

HODIC の巻頭言にあたって —書き換え型ホログラム有機材料の開発—

京都工芸繊維大学
副学長・教授 堤 直人

学生時代に研究していた光導電性とその後取り組んだ有機非線形光学材料の研究をベースに有機フォトリフラクティブ高分子材料の研究をスタートさせました。当初は気楽に取り組み始めましたが、実はなかなかの難物で成果が出るまで数年かかりました。1990年代後半から2000年代になると、テラバイト (10^{12} バイト) メモリの機運が高まり、有機フォトリフラクティブポリマーを用いたホログラフィック体積メモリデバイスの研究に係わるようになりました。これがホログラムとの最初の出会いです。

その後、立体テレビや3次元ホログラフィックディスプレイなどへの応用が期待され、2009～2015年の7年間にはJSTのS-Iノベの研究で、実用化を目指した書き換え型ホログラム材料の研究へと発展させました。
(1 ページにつづく)

目 次

1. 巻頭言：書き換え型ホログラム有機材料の開発	堤 直人 表紙
2. 計算機合成ホログラムにおける視点移動に伴う視覚効果	五十嵐俊亮, 他 2
3. フルカラーコンピュータホログラフィ用ソフトウェアツール群の開発	松崎昭太, 他 6
4. 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	五十嵐勇祐, 他 10
5. 縮小光学系のレンズ変更によるフリンジプリンタの高精細化	岩本拓己, 他 14
6. 波面再生型フルカラー体積ホログラムプリンタの作製	廣橋美葵, 他 18
7. ホログラフィ計算における三角関数簡易近似手法の高精度化	西辻 崇, 他 22
8. 計算機合成ホログラムにおける客観的評価方法の妥当性検証	植竹啓貴, 他 26
9. 可視光通信を用いた計算機合成ホログラムの伝送と再生 —バンドパスフィルタを用いた再生像の改善—	戸塚真隆, 他 30
10. 動画像を用いたホログラフィック 3D タッチ	中村友哉, 他 34
11. 次回研究会のお知らせ	巻末

材料の研究では、その特性や性能を数値で評価するのが一般的ですが、その数値でどのようなホログラムを見せられるかが鍵と考えます。「百聞は一見にしかず」です。まず、有機フォトリフラクティブポリマーでは、大学院生と共にビデオ速度（30フレーム毎秒）で2次元ホログラフィック動画の連続記録・再生・消去のデモンストレーションを成功させました。有機フォトリフラクティブポリマーでは、干渉光の照射と共に数kVの高電圧の印加が必須であり、絶縁破壊と隣り合わせです。それに対して、応答速度を若干犠牲にしても、光干渉のみで動作できかつ半永久的に使える書き換え型ホログラム材料のカルバゾールアゾモノリシック化合物に着目しました。この材料は、1秒以内に書き込みができ、書き込んだホログラム像は回折効率が80%以上でかつ長時間（数時間）のメモリ性を有していることを見出しました。この性能により、一旦書き込んだホログラムはある時間保持され、長時間見ることができます。さらに、材料の改質、具体的にはカルバゾールアゾモノリシック化合物の置換基の改変により、赤と緑の光源での読み出しを可能とする書き換え型マルチカラーホログラフィック材料へと発展させています（図1）。現在はさらに短波長化を狙って赤、緑、青の3色の光源での読み出しを可能とする書き換え型フルカラーホログラフィック材料への模索を始めています。

書き換え型ホログラム材料は、明視野下での記録・再生・消去を繰り返し行うことができる特長を有しています。そこで、材料の開発と並行して、持ち運びができ大衆の前でデモンストレーションできるホログラフィックディスプレイシステムの作製も行っています。「ラボから一般大衆の前で」です。2012年に、書き換え型ホログラムの書き込みと再生ができる第1号機を作製しました。2013年に、ホログラフィックステレオグラムによる書き換え型ホログラムの書き込みと再生ができる第2号機（図2）を作製し、JSTサイエンスアゴラ（2013年）、イノベーション・ジャパン（2012, 2014, 2017年）、シーテックジャパン（2015年）などで展示を行っています。

材料の可能性は無限です。特に有機材料は薄膜化や大面積化が容易であり、フレキシブル性を備えており様々な形状での使用も可能です。今後も有機材料の特徴を活かしながら書き換え型ホログラムに貢献できればと思います。

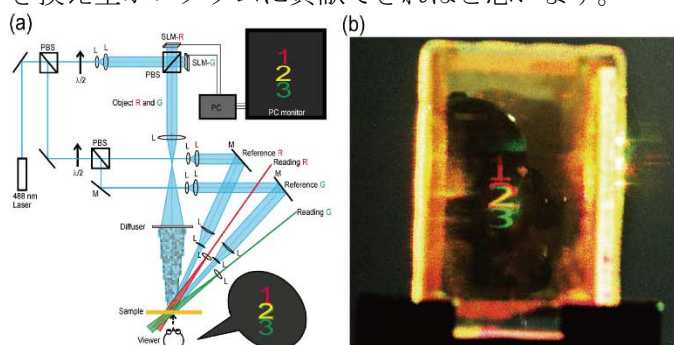


図1. 書き換え型マルチカラーホログラム
出展：NPG Asia Materials 8, e311 (2016)

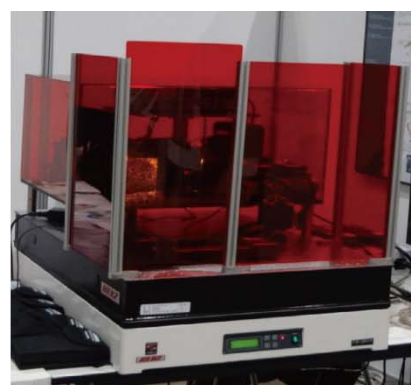


図2. 第2号機：書き換え型ホログラフィックディスプレイ

計算機合成ホログラムにおける視点移動に伴う視覚効果

五十嵐 俊亮¹ 中村 友哉^{1,2} 石井 勢津子 松島 恭治³ 山口 雅浩¹

1. 東京工業大学工学院 〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259

2. JST さきがけ 〒102-0076 東京都千代田区五番町 7

3. 関西大学システム理工学部 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: 1. {igarashi.s.ab, nakamura.t.bj, yamaguchi.m.aa}@m.titech.ac.jp, 3. matsu@kansai-u.ac.jp

あらまし 本研究では計算機合成ホログラムの生成において、仮想物体からの光を光線としてサンプリングし、光線空間上で視覚効果を加えた後に波面に変換することで、視点移動に伴う立体像の動きの付加など従来の計算法では難しかった視覚効果を含む立体像の再生を可能とする計算法を提案する。実験では計算した画素数 192K×128K のホログラムをレーザーリソグラフィ装置により印刷しレーザー光源によって照明することで、上記の表現を伴う立体像を光学再生した。

キーワード ホログラフィ、計算機合成ホログラム、3DCG

Visual Effects Accompanied by Viewpoint Movement in Computer Generated Holograms

Shunsuke IGARASHI¹ Tomoya NAKAMURA^{1,2} Setsuko ISHII

Kyoji MATSUSHIMA³ and Masahiro YAMAGUCHI¹

1. School of Engineering, Tokyo Institute of Technology 4259 Nagatada-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8503 Japan

2. JST PRESTO 7 Goban-cho Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0076 Japan

3. Faculty of Engineering Science, Kansai University 3-3-35 Yamate-cho, Suita, Osaka, 564-8680, Japan

E-mail: 1. {igarashi.s.ab, nakamura.t.bj, yamaguchi.m.aa}@m.titech.ac.jp, 3. matsu@kansai-u.ac.jp

Abstract We propose a calculation method of computer generated holograms that can reconstruct 3D images with visual effects accompanied by viewpoint movement. Visual effects are added to sampled rays of the object, and ray information is converted to the wavefront of the object. In the experiment, we computed 192K x 128K pixels CGH. The generated fringe pattern is fabricated as a binary amplitude mask by laser-lithography system. 3D image with visual effects were successfully reconstructed by illuminating the fabricated CGH.

Keyword Holography, Computer Generated Hologram, 3DCG

1. はじめに

ホログラフィを用いた 3D ディスプレイは物体からの波面を再生することで、人間の奥行き知覚要因を全て満たす立体像表示を可能にする技術であり、それを計算機によって生成・表示する技術を計算機合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) と呼ぶ。計算機によりホログラムを生成することで空間光変調器等を用いた動画表示が可能であり、また計算機処理により立体像の見え方を自由に設計することができる。一方で再生像の質には課題があり、計算手法・ハードウェア両面での研究が盛んに行われている。

立体像再生における CGH 計算法は、計算機上の物体を点光源やポリゴンに分解する手法 [1-6] と光線に

分解する手法 [7-14] に大別できる。

点光源・ポリゴン法は物体を仮想光源の集合体として表現し、これらの回折計算に基づきホログラム面の波面を求める手法である。この手法を用いて計算したホログラムは回折の物理現象をモデル化しているため、ホログラム面から深い位置にある物体に対しても高分解能の立体像再生を実現できる。これに加えて近年、点光源・ポリゴン法での質感表現においても、鏡面反射等を含む様々な手法が提案されている [5,6]。その一方で、複雑な透過・屈折や皮下散乱等の現代のフォトリアルな 3DCG では必ずと言ってよいほど用いられている表現手法の実現には、さらなる進歩が必要となる。

一方、ホログラフィック・ステレオグラムの原理に

基づく CGH 計算手法も提案されている[7]。これはホログラムによる多視点立体像表示であるが、視点数を増やし、さらに水平・垂直の全方向視差を記録する場合には、光線群を再生するホログラムということが出来る。この手法では 3DCG ソフトウェアなどを用いた光線情報処理を直接用いることが可能であり、複雑な質感の再現やオクルージョン処理を簡便に実装できる。しかしこの手法では立体像がホログラム面から離れるほど立体像の分解能が低下する[13]。

光線を用いて深い奥行きでも高分解能に再生するために提案されたのが、光線サンプリング(RS: Ray-Sampling)面[13]を用いた CGH 計算手法である。光線情報を用いることで複雑な質感を容易に表現可能であり、同時に波面変換と回折計算の適用により、奥行きの高いシーンに対しても分解能の高い立体像を再生することが可能である。さらにこの手法から不要な伝搬計算を省くことで高速な計算を達成したのが、正射影光線サンプリング(ORS: Orthographic Ray-Sampling)面を用いた計算手法である[14]。

本研究では ORS 面を用いた CGH 計算手法を応用し、光線サンプリングの段階で視点移動に伴う物体の移動などの視覚効果を加え、その光線から波面を取得することで、視覚効果を伴う立体像を再生する CGH 計算手法を提案する。これまでも角度ごとに異なる立体像を感光材料に多重露光することで物体の移動を達成する手法[15]やホログラフィック・ステレオグラムを用いた手法は提案されている[16,17]が、本手法では計算のみでその達成が可能であり、加えて通常の ORS を用いた CGH 計算と全く変わらないフロー・計算量で計算可能である。

実験では計算した画素数 192K×128K のホログラムをレーザーリソグラフィ装置により印刷しレーザー光源によって照明することで、上記の表現を伴う立体像を光学再生した。

2. ORS 面を用いた CGH 計算と視点移動に伴う視覚効果の付与

ORS 面を用いた光線波面変換型 CGH 計算の概念図を図 1 に示す。始めに仮想物体の近くに ORS 面と呼ばれる面を定義し、この面上で正射影画像（平行光線の空間的な分布の集合）を 3DCG ソフトウェア等によって様々な角度から取得する。正射影画像にランダム位相を加えフーリエ変換したものは、ORS 面での角スペクトルの一領域に相当する。CGH 面に入射する分の帯域に相当する正射影画像に対しこの処理を行う。

生成した角スペクトルに対し伝搬伝達関数を乗算することで、CGH 面での角スペクトルを得ることができる。これを逆フーリエ変換し CGH 面の波面を得る。

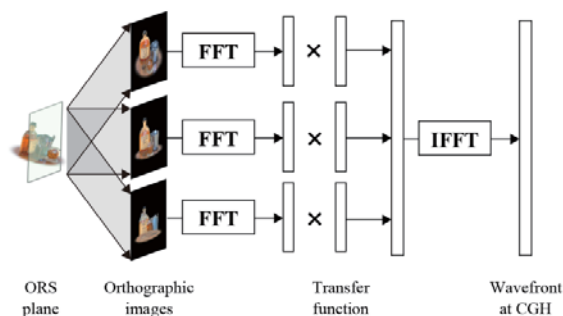


図 1 正射影光線サンプリング面の概念図。

参照光との干渉を計算することで、最終的な干渉縞を



図 2 用いた 3DCG モデルと視点移動に伴う効果。

計算することができる。

本手法の利点としてホログラム面に入射しない角スペクトルに相当する正射影画像の伝搬計算を省くことで、高速かつ大規模な計算が可能になるという特徴を持つ。

光線サンプリングの段階で、単に様々な角度から見た物体の情報のみを得るのではなく、物体に動きを加えた光線を取得することもできる。このように取得した光線情報から前述と全く同様に CGH を計算すると、再生した立体像でも視点移動に伴い動画が再生されるような効果を付与することができる。立体像の動きに限らず、観察する角度によって全く異なる立体像の再生や、取得した正射影画像に発光効果などの画像処理を加えることで、視覚効果を持った立体像の再生も可能になる。

水平方向の視点移動に伴う動きを加える場合、両眼視差に矛盾が生じるため、像の歪みや不整合が生じるが[16]、垂直方向の視点移動に伴う動きであれば、自然な動きを表現することができる。

点光源法などでは、このような視覚効果の付与には角度ごとに異なるホログラムを計算し、帯域制限を加えて多重するなどの処理が必要になる。本手法では取得する光線数は変化しないため、光線レンダリングに伴う計算時間は変化せず、また CGH 計算のフローも通常の ORS 面を用いた計算と全く同様であるため、簡単に視点移動に伴う特殊効果を付与することが可能である。

3. 実験

3DCG ソフトウェア Blender を用いて作成した図 2 のようなダイヤモンドのシーンを用いて CGH を計算する。視点移動に伴い、ダイヤモンドが回転・転倒する効果を加えた。ダイヤモンドによる複雑な透過・屈折・反射に加え、波長分散の効果も加えている。

計算する CGH のパラメータを表 1 に示す。

表 1 CGH 計算におけるパラメータ

CGH 面画素数	192K×128K
ORS 面画素数	192K×192K
波長	633nm
ピクセルピッチ	0.8 μ m
視野角	± 23.3 deg

ホログラムのサイズは 15cm×10cm であり、ORS 面は 15cm×15cm である。正射影 RS 面は立体像の中心に設



図 3 レーザリソグラフィ装置により印刷した CGH。

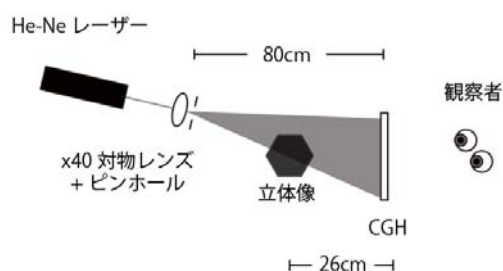


図 4 立体像再生光学系概念図。

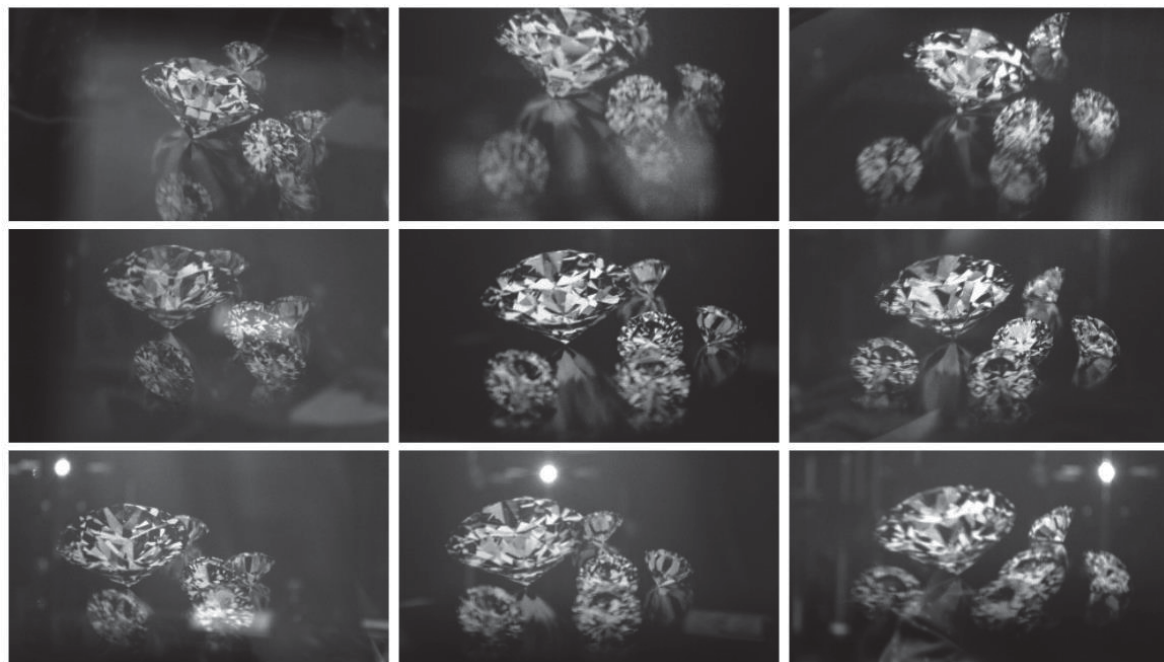


図 5 提案手法を用いて生成した CGH による立体像光学再生。様々な視点から撮影した図。

置し、ホログラム面との距離は 26cm とした。正射影画は 1024×1024 ピクセルの画を 64×64 の異なる角度からレンダリングした。計算した干渉縞データをバイナリ化し、関西大学デジタルホロスタジオ[18]のレーザーリソグラフィ装置 (Heidelberg Instruments DWL 66+) により振幅マスクとして印刷した (図 3)。この際に一度干渉縞データをバイナリビットマップデータから CAD データに変換し、それをガラス基板上に印刷する。

このようにして作成したホログラムを図 4 のような光学系を用いて He-Ne レーザーを光源とする球面波によって照明することで、虚像として裸眼で立体像を観察することができる。様々な視点から観察した再生像の写真を図 5 に示す。ダイヤモンドの複雑な透過・屈折に加え、上下左右の視点移動によりダイヤモンドが回転・転倒することで、光のきらめきをより強調して表現できている。

4. まとめ

本研究では正射影光線サンプリング面を用いて CGH を計算し、レーザーリソグラフィ装置を用いてガラス基板上に出力することで、視点移動に伴う特殊効果を付与した立体像を光学再生・観察した。

5. 謝辞

本研究の一部は、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)および関西大学デジタルホロスタジオの助成を受けた。

参考文献

- [1] M. Lucente, "Optimization of hologram computation for real-time display," Proc. SPIE **1667**, 32-43 (1992).
- [2] D. Leseberg and C. Frere, "Computer-generated holograms of 3-D objects composed of tiled planer segments," Appl. Opt. **27**, 3020-3024 (1998).
- [3] J. Weng, T. Shimobaba, N. Okada, H. Nakayama, M. Oikawa, N. Masuda, and T. Ito, "Generation of real-time large computer generated hologram using wavefront recording method," Opt. Express **20**, 4, pp. 4018-4023 (2012).
- [4] K. Matsushima, "Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture," Appl. Opt. **44**, 22, pp. 4607-4614 (2005).
- [5] H. Nishi, K. Matsushima, "Rendering of specular curved objects in polygon-based computer holography," Appl. Opt. **56**, F33-F44 (2017).
- [6] T. Ichikawa, T. Yoneyama, and Y. Sakamoto, "CGH calculation with the ray tracing method for the Fourier transform optical system," Opt. Express **21**, 32019-32031 (2013).
- [7] T. Yatagai: "Stereoscopic approach to 3-D display using computer-generated holograms," Appl. Opt. **15**, 11, pp. 2722-2729 (1976).
- [8] M. Yamaguchi, H. Hoshino, T. Honda, and N. Ohyama: "Phase-added stereogram: calculation of hologram using computer graphics technique," Proc. SPIE **1914**, pp. 25-31 (1993).
- [9] W. Plesniak, M. Halle, V. M. Bove, Jr., J. Barabas, and R. Pappu, "Reconfigurable image projection holograms," Opt. Eng. **45**, 115801 (2006).
- [10] H. Zhang, Y. Zhao, L. Cao, and G. Jin.: "Fully computed holographic stereogram based algorithm for computer-generated holograms with accurate depth cues," Opt. Express **23**, 4, pp. 3901-3913 (2014).
- [11] Y. Sando, M. Itoh, and T. Yatagai, "Holographic three-dimensional display synthesized from three-dimensional Fourier spectra of real existing objects," Opt. Lett. **28**, 2518-2520 (2003).
- [12] J. H. Park, M. S. Kim, G. Baasantseren, and N. Kim, "Fresnel and Fourier hologram generation using orthographic projection images," Opt. Express **17**, 6320-6334 (2009).
- [13] K. Wakunami and M. Yamaguchi: "Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane," Opt. Express **19**, 10, pp. 9086-9101 (2011).
- [14] S. Igarashi, T. Nakamura, and M. Yamaguchi, "Fast method of calculating a photorealistic hologram based on orthographic ray-wavefront conversion," Opt. Lett. **41**, pp. 1396-1399 (2016).
- [15] L. Cao, Z. Wang, H. Zhang, G. Jin, and C. Gu, "Volume holographic printing using unconventional angular multiplexing for three-dimensional display," Appl. Opt. **55**, pp. 6046-6051 (2016).
- [16] K. Okada, T. Honda, J. Tsujiuchi, "A method of distortion compensation of multiplex holograms," Opt. Commun. **48**, 167-170 (1983).
- [17] M. Yamaguchi, H. Sugiura, T. Honda, and N. Ohyama, "Automatic recording method for holographic three-dimensional animation," J. Opt. Soc. Am. A **9**, 1200-1205 (1992).
- [18] "Kan-Dai Digital Holo-Studio," (<http://holography.ordist.kansai-ac.jp/digitalholostudio/>)

フルカラーコンピュータホログラフィ用 ソフトウェアツール群の開発

松崎 昭太 小林 昂一郎 松島 恭治

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: matsuzaki@laser.ee.kansai-u.ac.jp

あらまし フルカラー再生が可能になるなど、計算機合成ホログラム(CGH)の表現力は年々向上しており、以前にも増して新しいデジタルアートとして期待されている。しかし、CGH の計算にはプログラミングの知識が不可欠であり、それがデザイナーやアーティストによる CGH 作品の作成を困難にしていた。そこで、プログラミングの知識を持たない人でもフルカラーCGH が計算できるソフトウェアツールの開発を進めている。本稿では、フルカラーCGH を作成する上で必要な三段階の工程である 3 波長での物体光波の計算、干渉縞のコーディング、再生シミュレーションの全てをプログラミングなしで行うアプリケーション群の開発状況を報告している。

キーワード CGH, コンピュータホログラフィ, ソフトウェアツール, コーディング, フルカラーシミュレーション

Development of software tools for full-color computer holography

Shota Matsuzaki Koichiro Kobayashi and Kyoji Matsushima

Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

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

E-mail: matsuzaki@laser.ee.kansai-u.ac.jp

Abstract New techniques for computer-generated hologram (CGH), for example full-color reconstruction, have been developed for the last few years. As a result, CGH are expected as a new digital art much more than before. However, programming skills were required to design and calculate CGHs. To ease this situation, software tools have been developed for non-expert people to calculate full-color CGHs. In this study, a series of application programs for large-scale CGHs, especially for full-color CGHs, are developed to calculate object fields, generate fringes pattern, and simulate its reconstruction without programming.

Keyword CGH, Computer holography, Software tool, Coding, Full-color simulation

1. はじめに

コンピュータホログラフィは、コンピュータ上でホログラムの干渉縞パターンを数値合成する技術であり、これによって作成されたホログラムは計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram 以下、CGH)と呼ばれる[1]。現在では 100 億ピクセルを超える大規模な干渉縞パターンを計算できるようになり、それによって高解像度 CGH が作成されるようになった。その結果、2012 年には 250 億ピクセルを超える“Brothers”が作成され[2]、ボストンの MIT ミュージアムにおいて数年に渡って展示されている。また、近年ではダイクロックミラー方式やカラーフィルタ方式などにより単一白色 LED 光源を用いたフルカラーCGH の再生もできるようになっている[3,4]。

仮想物体の CGH の計算は、まず物体モデルをコンピュータ上で用意し、その光波を数値合成し、次に干渉縞を生成するという手順で進む。すなわち、CGH の

作成には、「物体光波の数値合成」と、その光波から干渉縞パターンを求める「コーディング」処理、さらに、その干渉縞の描画前に計算が正しいことを検証する「再生シミュレーション」の大きく分けて三段階の工程がある。

以前は物体光波の数値合成にはプログラミングが必要であり、シーンデザインがハードコーディングされ、一般のデザイナーには CGH の計算が困難という問題点があった。その解決策として、従来より「物体光波の数値合成」、「コーディング」そして「再生シミュレーション」の三工程を行うアプリケーションが開発されている[5-7]。しかし、これらのアプリケーションはフルカラーCGH 技術が開発される前に作成されたものであり、カラーには対応していないという問題点がある。また、OS やライブラリの問題など、開発環境・実行環境も大きく変化しており、現在の環境で上手く動作しない機能があるといった問題点もある。

そこで、本研究では最新の Windows 環境で動作可能であり、フルカラーCGHを計算する上で必要な三段階の工程を行うための一連のアプリケーション群の開発を行った。本稿では、このアプリケーション群の概要と、これらを用いた計算結果を主に紹介する。

2. 開発したアプリケーション

本研究で開発したツール群を用いた CGH 作成工程を Fig.1 に示す。

2.1. 物体光波の数値合成

仮想物体から CGH を作成する際、まず初めに物体光波の数値合成を行う。これには Fig.2 に示す「HologramField Synthesizer」を用いる。このアプリケーションの原型(モノクロ版)は 2013 年に村田氏によって開発された[5-7]。これは 3D シーンを構成する素材を物体空間に配置・編集する会話型デザインツールであり、CGH 計算に必要な波長、ピクセルピッチなどのパラメータを設定することで、デザインした 3D シーンの物体光波を内蔵計算エンジンで計算することができる。また、シーンやパラメータ設定を XML ファイルで保存できる。

しかし、このツールそのものはリモートデスクトップによる共用を前提とした大容量コンピュータに対応していないため、本研究では独立した計算エンジンを開発し、会話型ツールでデザインしたシーンの XML パラメータファイルを読み込むことにより大容量コンピュータ上でのバッチ処理や、フルカラーCGHの計算も可能としている。

なお、このアプリケーションが現時点对応している 3D モデル(ポリゴンモデル)のフォーマットはメタセコイアの mqo 形式のみである。従って、他の形式の 3D モデルを読み込む際はメタセコイアで mqo ファイルに変換し、これを素材とする必要がある。

2.2. コーディング

合成した物体光波と参照光波を数値的に干渉することで干渉縞パターンを発生する。この過程をコーディングと呼ぶ。このためのツールが Fig.3 に示す「Fringe Coder」である。このツールは HologramField Synthesizer で計算した物体光波を読み込み、コーディングに必要な参照光波の位置などの設定をすることで干渉縞を計算する。また、カラーフィルタ方式 CGH では 3 波長それぞれの干渉縞を分割して一つの干渉縞に合成する機能や、RGB 再生光源の位置オフセットを設定する機能がある。現時点では、レーザーリソグラフィ装置での振幅バイナリ干渉縞の描画を想定しているため、干渉縞強度を二値化する振幅二値化コーディングにのみ対応している。

2.3. 再生シミュレーション

干渉縞はランダムなパターンであり、実際にホログ

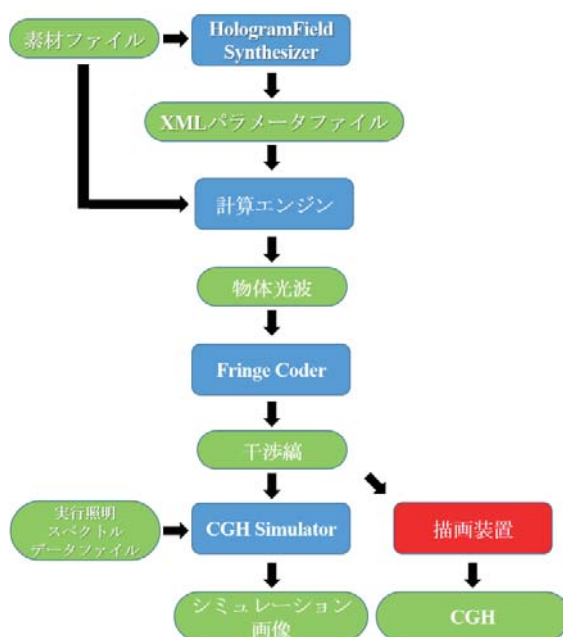


Fig.1 ツール群と CGH の作成工程

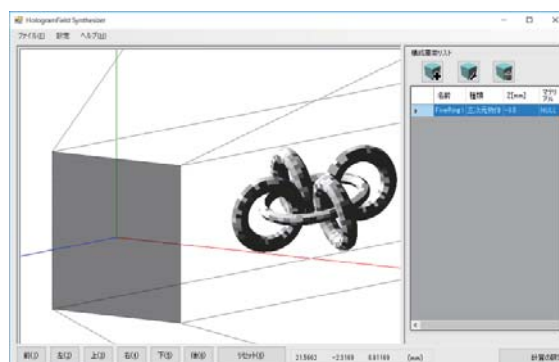


Fig.2 HologramField Synthesizer の画面イメージ



Fig.3 Fringe Coder の画面イメージ



Fig.4 CGH Simulator の画面イメージ

ラムを作成して再生照明光を照射するまで何が再生されるか判断できない。また、実際に光学再生を行うと、共役像や非回折光などが思わぬ障害となり再生像が劣化することがある。干渉縞の描画には長時間を要するため、描画前の再生シミュレーションが重要となってくる。この再生シミュレーションを行うツールが Fig.4 に示す「CGH Simulator」である。このアプリケーションは、干渉縞ファイルを読み込み、再生シミュレーションに必要な瞳の位置や注視点、再生照明光の位置などのパラメータを設定することで結像再生シミュレーションを行う。視点を移動させた時のアニメーションビデオを作成するための複数シミュレーション機能も搭載している。

フルカラーCGH の簡易再生シミュレーションでは、指定した3波長の再生像をXYZ等色関数によりカラー合成する。また、再生照明光の実効照明スペクトルデータファイルを読み込むことでより厳密な再生シミュレーションも可能である。なお、ダイクロックミラーとカラーフィルタの2種類のフルカラーCGH の方式に対応している。

3. アプリケーションの実行結果

これらのツールを用いてフルカラーCGH の物体光波の数値合成から再生シミュレーションまでを行った。

3.1. 物体光波の数値合成

HologramField Synthesizerを用いて物体光波の数値合成を行った。3Dシーンと用いたパラメータをそれぞれFig.5とTable 1に示す。

3.2. コーディング

HologramField Synthesizerを用いて数値合成した物体光波をFringe Coderを用いてコーディングし、干渉縞の計算を行った。用いたパラメータをTable 2に示す。ガードギャップ幅とフィルターストライプ幅はカラーフィルタ方式の干渉縞を合成する際に用いるパラメータである [4]。

Table 1 数値合成した物体光波のパラメータ

光波のサンプリング数	65536 × 65536
光波のサンプリング間隔	0.8 μm × 0.8 μm
設計波長 (R, G, B)	630, 520, 460 nm
モデルの総ポリゴン数	2707

Table 2 コーディングで用いたパラメータ

干渉縞画素数	65536 × 65536
干渉縞画素ピッチ	0.8 μm × 0.8 μm
サイズ	5.24 × 5.24 cm ²
設計波長 (R, G, B)	630, 520, 460 nm
参照光波位置	(0.0, -40.5, -300)mm
フィルターストライプ幅	80 μm
ガードギャップ幅	20 μm

Table 3 シミュレーションで用いたパラメータ

結像光波のサンプリング数	8192 × 8192
結像光波のサンプリング間隔	1.0 μm × 1.0 μm
視点位置	(0.0, 0.0, 180)mm
注視点位置	(0.0, 0.0, -100)mm

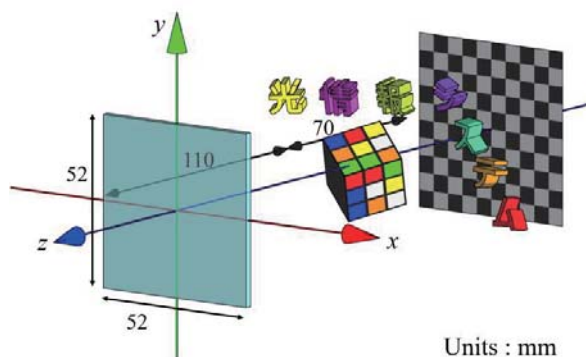


Fig.5 3D シーン

3.3. 再生シミュレーション

Fringe Coderを用いてコーディングした干渉縞をCGH Simulatorを用いて再生シミュレーションを行った。用いたパラメータをTable 3に示す。波長別のモノクロ結像再生シミュレーションで得られた強度像を等色関数を用いてカラー合成した結果をFig.6に示す。また、実効照明スペクトルデータをcsvファイルで読み込んで行ったカラーフィルタ方式の厳密な再生シミュレーション結果をFig.7に示す。

4. まとめ

本稿では、開発している CGH 計算用のアプリケーション群の概要を紹介し、それらを実際に用いた CGH の計算結果を報告した。

5. 謝辞

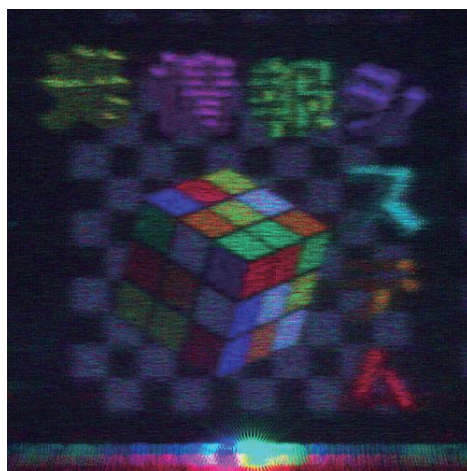
本研究は、日本学術振興会の科研費(15K00512), および文部科学省私立大学戦略基盤研究形成支援事業(平成 25 年～平成 29 年)の助成を受けたものである

文 献

- [1] 辻中順平:“ホログラフィックディスプレイ”, p44-49(産業図書, 東京, 1990)
- [2] K. Matsushima, S. Nakahara: “Stepping closer to the perfect 3D digital image”, SPIE Newsroom (6 Nov. 2012).
- [3] T. Miyaoka, K. Matsushima, S. Nakahara: “Optimization for design-wavelength for unobtrusive chromatic aberration in high-definition color computer holography”, SPIE Proc. **9386**, 93860N (2015).
- [4] Y. Tsuchiyama, K. Matsushima: “Full-color large-scaled computer-generated holograms using RGB color filters”, Opt. Express **25**, 2016-2030 (2017).
- [5] 村田峻平, 松島恭治, 中原住雄:“コンピュータホログラフィのための物体光波合成/編集ツールの開発”, Hodic Circular Vol. 32, No. 3, pp.27-30(2012).
- [6] 村田峻平, 松島恭治, 中原住雄:“コンピュータホログラフィのためのレンダリングソフトウェアツールの開発”, 3 次元画像コンファレンス 2013 講演論文集, P-8, 97-100(2013).
- [7] S. Murata, K. Matsushima, S. Nakahara: “Development of an integrated design system for computer holography”, International Workshop on Holography and Related Technologies 2013 (IWH2013), Kitami, 17a-3(2013).

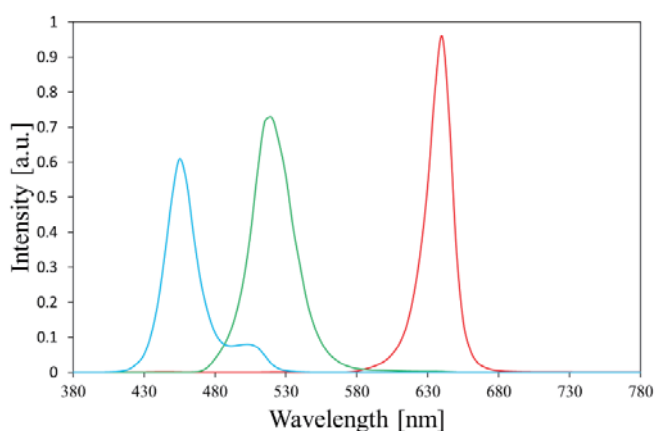


(a)ダイクロックミラー方式

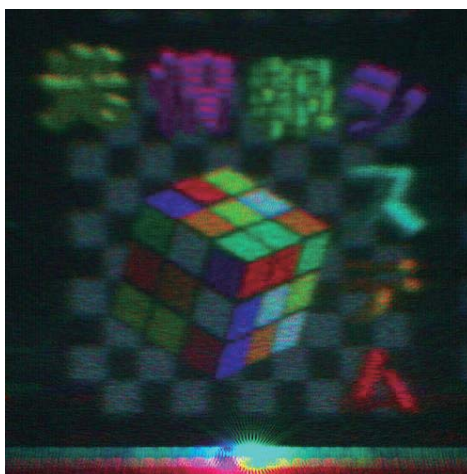


(b)カラーフィルタ方式

Fig.6 カラー再生シミュレーションの結果



(a) スペクトルデータ



(b)シミュレーション再生像

Fig.7 スペクトルデータファイルを読み込んだ厳密な再生シミュレーション

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

五十嵐 勇祐 松島 恭治

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

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

あらまし 現在提案されているカラーフィルタ方式 CGH では、カラーフィルタを高精度に位置合わせする必要があるため大量に作製することが難しく、またカラーフィルタが広帯域であるため再生像にボケが生じるといった問題がある。そこで本研究では、これらの問題を緩和するため、コンタクトコピー技術によりカラーフィルタ方式 CGH を体積ホログラムとしてフォトポリマーに転写し、白色光再生可能なフルカラーホログラムの作製を試みた。

キーワード 計算機合成ホログラム, フルカラーホログラム, フォトポリマー, カラーフィルタ

Full-color transferred volume CGH using RGB color filters

Yusuke IGARASHI Kyoji MATSUSHIMA

Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

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

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

Abstract Full-color CGHs using RGB color filters is not suitable for mass production, because it is necessary to align the color filters with the fringe pattern with high precision. Furthermore, the problem of blur occurs in the reconstructed image because of the wideband properties of the color filters. To reduce the problems and create full-color CGHs capable of reconstruction by white light, an original full-color CGH is transferred to photopolymer as the volume hologram using a contact copy technique.

Keyword Computer-generated hologram, full-color hologram, photopolymer, color filter

1. はじめに

近年、大規模コンピュータホログラフィ技術の進歩により、数 10～数 100 億ピクセルの高解像度計算機合成ホログラム(以下 CGH)が発展し、光学ホログラフィに匹敵するほどの再生像が得られるようになってきた。このような高解像度 CGH を作成する一つの手法は、計算機で数値的に合成した干渉縞パターンをレーザーリソグラフィによりクロム等の金属膜の 2 値振幅画像として描画することである[1]。

しかしながら、レーザーリソグラフィを含めて、干渉縞パターンを 2 次元画像として描画する作製方法では、作成されるホログラムがいわゆる「薄い」ホログラムになってしまう。そのため、このような CGH は、リップマンやデニシュク型の光学ホログラムが有するような波長選択性を持たず、白色光源で再生すると著しい色にじみが生じ、またフルカラー像を再生する

こともできない。この問題の解決策として、ダイクロイックミラーを用いる手法や[2], RGB カラーフィルタを用いる手法を報告している[3,4]。しかし、前者の手法では CGH と同等以上の大きさを持つダイクロイックミラーを用いて像を重ね合わせるため、光学系の規模が大きくなってしまい展示に向かない問題がある。また、後者の手法では、RGB カラーフィルタの広帯域特性のため、再生像にボケが生じるという問題や、RGB カラーフィルタと干渉縞の正確な位置合わせに非常に手間がかかる問題がある。

このような薄い CGH のフルカラー再生の問題を解決するため、レーザーリソグラフィで描画した金属膜干渉縞が反射再生可能なことを利用して、デニシュク型ホログラムの撮影方法と類似の手法を用いて 3 枚の原版 CGH をコンタクトコピーして 3 枚の RGB 体積ホログラムを作成し、それを重ね合わせる積層型フルカ

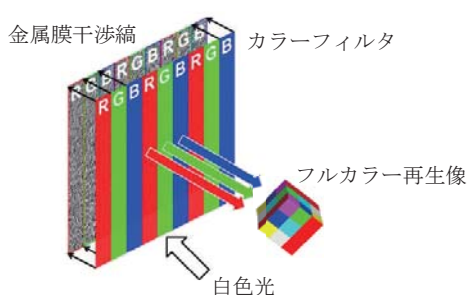


Fig. 1 カラーフィルタ方式 CGH の原理 [3]

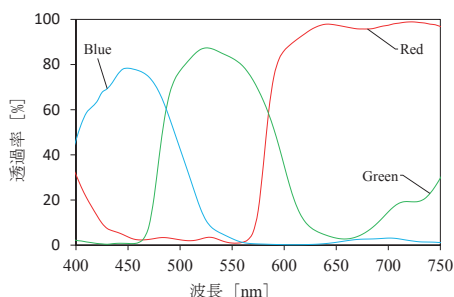


Fig. 2 カラーフィルタの透過特性

ラーCGH が提案されている[5,6]。しかし、この手法では、3枚の転写CGHを位置合わせする必要があることや、転写CGHがそれぞれガラス基板を有するため、ガラスの屈折による収差の補正が難しい問題、また当初位置合わせが正確であっても経年変化で記録材料が収縮すると色ずれが生じてしまう可能性があるといった問題がある。

そこで本研究では、個別に転写した3枚のRGB体積ホログラムを積層するのではなく、三波長でカラーフィルタ方式CGHのコンタクトコピーを行い、体積ホログラムの波長選択性によりフルカラー再生が可能な転写ホログラムの作製を試みた。これによりカラーフィルタ方式CGHでは困難なフルカラーCGHの大量生産も可能になると考えた。

2. カラーフィルタ方式フルカラーCGH

カラーフィルタ方式CGHの原理をFig.1に示す[3]。ここで用いるRGBカラーフィルタはカラー液晶パネルに用いられる物と同種の物であり、RGBの3原色の透過型フィルタとなっている。このRGBカラーフィルタを1枚の金属膜干渉縞に重ね、フィルタに重なる干渉縞をその色に対応する波長で計算しておくことによってフルカラー再生が実現される。これは、このCGHを白色光で照明するとRGBカラーフィルタを透過する波長帯のみの光により像が再生されてそれが混合して見えるためである。

しかしながら、Fig.2に示すように、RGBカラーフ

ィルタの透過スペクトルは広い透過帯域を持つ。このフィルタ特性により、この手法によるフルカラーCGHでは再生像にボケや色にじみが生じてしまう問題点がある。また、カラーフィルタ方式CGHでは、本来連続した干渉縞を空間的に分割し、3分の1ずつ抜き取って1枚の干渉縞に合成するため、一つの波長で見ると分断された干渉縞となってしまうっており、これにより再生像が劣化してしまうという問題点もある。

3. 転写の原理

本研究では、金属膜干渉縞が反射再生できる特徴を活かし、コンタクトコピーにより転写を行った。その原理をFig.3に示す。この手法では、RGBカラーフィルタを装着したカラーフィルタ方式CGHを反射再生することを前提に、再生照明光の入射側に記録材料を密着させる。このCGHでは予め球面波を参照光として干渉縞を計算してあるため、コヒーレント光源と空間フィルタによって球面波を発生し、その中心(空間フィルタのピンホール)を計算上の球面波参照光の位置と一致させて記録材料を貼り付けた側の面に入射する。これにより、カラーフィルタを装着した原版CGHで反射再生された光波が記録材料の背面から記録材料に入射する一方、再生照明光が前面側から入射するため、記録材料内で両者の干渉が生じ、原版CGHの再生光を記録材料に記録することができる。

この手法では原版CGHと記録材料を密着させるコンタクトコピーとなるため、光学ホログラフィの記録に比べて極めて振動に強い。さらに、記録材料に対して参照光(原版CGHの再生照明光)と物体光(原版CGHの再生光)が逆方向から入射するため、転写ホログラムは波長選択性を持つ体積ホログラムとなる。その結果、転写ホログラムはカラーフィルタによるフルカラー再生像よりもボケの少ない像を再生することが期待できる。その反面、参照光と再生光の強度比を任意に調整できないため、最適な露光条件を見出すことが難しくなる。

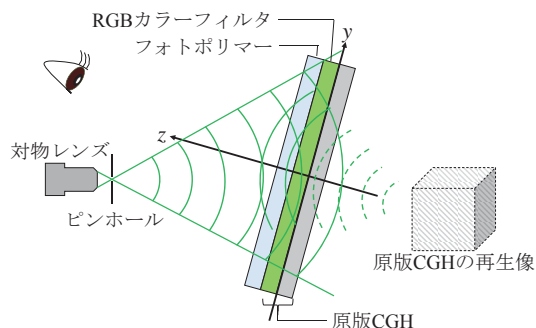
Fig. 3 カラーフィルタ方式の
原版CGHの転写方法

Table 1 原版 CGH のパラメータ

干渉縞画素数	65,536 × 65,536
干渉縞画素ピッチ	0.8 μm × 0.8 μm
サイズ	5.2 × 5.2 cm ²
設計波長 (R, G, B)	630, 520, 460 nm
フィルタストライプ幅	80 μm
ガードギャップ幅	20 μm

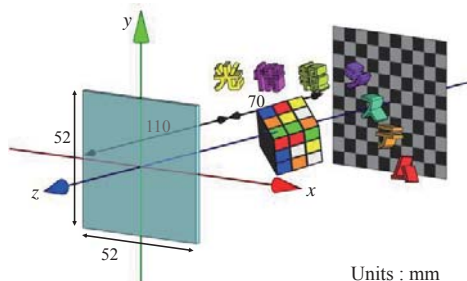


Fig. 4 原版 CGH の 3D シーン

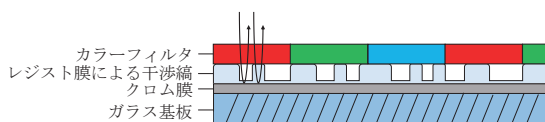


Fig. 5 位相変調型 CGH

4. フルカラー体積型転写 CGH の作製

4.1. 原版 CGH

本研究で転写元として用いた原版 CGH の 3D シーンを Fig.4 に示し、そのパラメータを Table 1 に示す。

この原版 CGH は、我々の従来の高解像度 CGH とは異なり、ガラス基板上的クロム膜で干渉縞パターンを形成したものではない。この CGH では、レーザー直接描画装置でレジスト層に干渉縞パターンを描画し、現像処理によって、Fig.5 に示す通り、レジスト層の厚さ変化として干渉縞パターンを形成している。すなわちこの CGH では、照明光が通過する位置のレジスト層の厚さによって光波の位相が変化する位相変調で像を再生している。2 値の位相変調であるため、ホログラムの性質としては振幅変調とほとんど変わらないが、レジスト層の下に均一なクロム膜があり、変調光はすべてクロム膜で反射される。そのためこの描画方法では像が明るくなる特徴がある。

原版 CGH はこの位相干渉縞に RGB カラーフィルタを装着したものである。

4.2. 記録材料

本研究では記録材料として銀塩感光材に比べて取り

扱いが容易なフォトリソマーを用いている。本研究で用いたフォトリソマーはエガリム社製の FIGURA_RGB である。赤橙色に対する感度が低いため暗室内でも赤橙色の照明をつけた状態で作業を行うことができ、理想的な場合の回折効率は RGB それぞれ加熱処理前で 35% とされている。

4.3. 三波長同軸転写光学系

本研究ではカラーフィルタ方式 CGH のフルカラー転写を行うため、光の三原色に相当する波長 457[nm] の青色レーザー、波長 532[nm] の緑色レーザー、波長 640[nm] の赤色レーザーを用いた。いずれのレーザーも狭帯域化した DPSS レーザーである。

本研究の実験で用いた光学系を Fig.6 に示す。この光学系では 1 つのミラーと 2 つのダイクロイックミラーを用いて三つのレーザー光を同軸に重ねている。そして、その同軸になったレーザー光を空間フィルタに入射させ球面波を発生している。青色レーザーの光路上にある 2 つのレンズは青色レーザーのビーム径を拡大するビームエキスパンダーである。

5. 転写結果

5.1. 単一波長での転写

本研究では、三波長で転写を行う前にまず予備実験として RGB それぞれのモノクロホログラムを転写できることを確認した。すなわち、RGB それぞれの単一波長での転写実験を行った。この結果を Fig.7 に示し、実験パラメータを Table 2 に示す。この結果より、RGB それぞれの波長で転写できていることが確認できる。

5.2. フルカラー転写

三波長同軸転写光学系を用いて転写したホログラムの再生像を Fig.8(a) に示し、原版 CGH 自体の再生像を Fig.8(b) に示す。いずれも再生光源はレーザーである。なお、転写は三波長同時ではなく、波長を順次切り換えて行っている。転写パラメータを Table 3 に示す。この結果より、色合いに若干の違いはあるがフルカラー転写ができていることを確認できる。

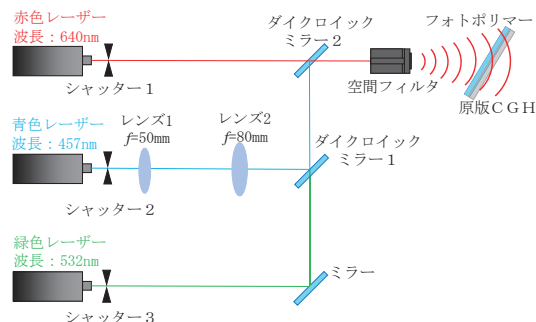


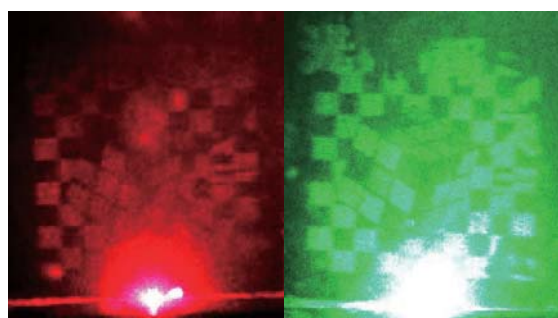
Fig. 6 三波長同軸転写光学系

Table 2 単一波長転写のパラメータ

波長 [nm]	露光強度 [mW/cm ²]	露光時間 [s]	露光量 [mJ/cm ²]
640	2.2	270	594
532	0.5	150	75
457	0.34	480	163

Table 3 三波長転写のパラメータ

波長 [nm]	露光強度 [mW/cm ²]	露光時間 [s]	露光量 [mJ/cm ²]
640	2.0	300	600
532	0.31	50	15.5
457	0.52	300	156



(a)640nm

(b)532nm

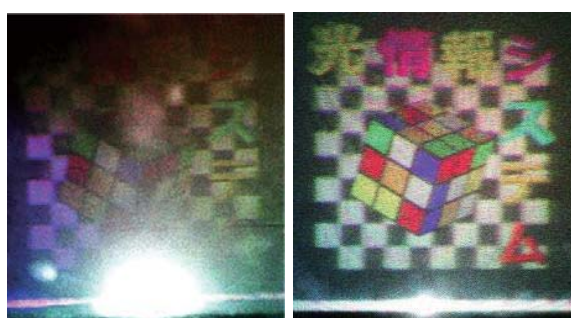
(c)457nm

Fig.7 単一波長での転写結果

しかし、転写ホログラムの再生像に色むらが生じてしまっている。これは、転写光学系において三つのレーザー光が完全に同軸になっていなかった事が原因であると考えられる。また、両者を比べると明らかなように、転写ホログラムの再生像の方が原版 CGH の再生像より暗いことがわかる。これは、おそらくカラーフィルタ方式原版 CGH の再生像が暗いことから、転写で参照光強度に対して物体光強度の値が低すぎる事が原因ではないかと考えられる。

6. まとめ

体積ホログラムの波長選択性による再生像品質の向上とフルカラーCGHの生産性向上のため、フォトポリマー記録材料と三波長同軸転写光学系を用いてフルカラー転写 CGH の作成を行った。残念ながら、現時点では原版 CGH との若干の色ずれやむら生じる結果となった。今後は、再生光源の波長スペクトル特性とフォトポリマーの感度特性からより適切な露光強度で均一な露光を行う必要がある。



(a)転写ホログラム

(b)原版 CGH

Fig.8 三波長での転写結果

7. 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 15K00512, および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)の助成を受けたものである。

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] T. Miyaoka, K. Matsushima, S. Nakahara: "Optimization of design-wavelength for unobtrusive chromatic aberration in high-definition color computer holography", SPIE Proc. **9386**, 9386N (2015).
- [3] Y. Tsuchiyama, K. Matsushima: "Full-color large-scaled computer-generated holograms using RGB color filters", Optics 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: "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, pp.19-22 (2016).
- [6] 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 講演論文集, P-10, (2017).

縮小光学系のレンズ変更によるフリンジプリンタの高精細化

岩本 拓己[†] 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: yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp

あらまし 我々は、計算機合成ホログラムを手軽にハードコピーとして出力できるフリンジプリンタの開発を行っている。これは液晶パネルに表示した干渉縞をレンズで縮小して感光材料に露光し、それらを多数並べることで高解像度なホログラムの出力を行う。従来のフリンジプリンタのレンズでは、収差が発生していたため、回折効率の低下や干渉縞の歪みといった問題が発生していた。本研究ではフリンジプリンタのレンズを収差補正付きレンズに変更することで、回折効率の向上や干渉縞の歪みの解消を行った。

キーワード ホログラフィ, 計算機合成ホログラム, フリンジプリンタ, 縮小光学系, 画素ピッチ, 収差

Improvement of the fringe printer on printing speed

Masaya INOUE[†] Makoto YASUMOTO[†] Takeshi YAMAGUCHI[‡] and Hiroshi YOSHIKAWA[‡][†] Department of Electronics and Computer Science, [‡] Department of Computer Engineering

College of Science and Technology, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba,

274-8501 Japan

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

Abstract We have been developing fringe printer that can output a holographic fringe image calculated as a computer-generated hologram. The printer demagnifies the fringe pattern displayed on liquid crystal display panel and projects it onto a holographic recording material. Previous fringe printer lens had problems of low diffraction efficiency and distortion of interference fringes due to aberration. In this paper, improvement of diffraction efficiency and interference fringe distortion are performed by changing to a lens with aberration correction.

Keyword Holography, Computer-generated hologram, Fringe printer, optical reduction system, pixel pitch, aberration

1. はじめに

計算機合成ホログラム (CGH: Computer-generated hologram) は CG のポリゴンデータなどの仮想物体の 3 次元情報をホログラムにすることができる利点がある。近年のパーソナルコンピュータの性能の向上により、100 Gpixel を超えるような高精細な CGH の計算も可能になった。この CGH の出力方法として電子線描画装置を用いる方法があり、高品質のホログラムを出力可能である。しかし、この方法は非常に高価で大量生産には適しているが、少量生産や一般ユーザー向けのものではない。そこで我々は安価で容易にホログラムを出力できる、フリンジプリンタについての研究を進めてきた¹⁾²⁾。

ホログラム用プリンタについては多くの報告がされており、大きく分けるとホログラフィックステレオグラムプリンタとホログラフィックフリンジプリンタの 2 つに分類される。ホログラフィックステレオグラムプリンタ³⁾は、多視点画像からホログラムとして立体像を合成するホログラフィックステレオグラムの出力ができる。これに対しホログラフィックフリンジ

プリンタは、干渉縞自体を露光する事ができるため、波面再生型のホログラムを出力することができる。フリンジプリンタとしては、ドット描画式ドラム型フリンジプリンタ⁴⁾や CD-R⁵⁾ドライブを用いた方法が報告されている。これらのプリンタはドットを描画するため、描画速度が遅いという欠点がある。また、最近の研究では、レーザリソグラフィ⁶⁾を利用したホログラム出力の研究が盛んに行われている。この方法は高解像度なホログラムを出力することができるが装置自体が非常に高価である。

これに対して、我々のフリンジプリンタは市販の光学部品で構築でき、画素ピッチ 0.44 μm と高精細である。しかし、縮小光学系に収差が生じており、回折効率の低下、干渉縞の歪みが発生していた。

本報告では、縮小光学系のレンズを収差補正付きのレンズに変更することで収差の改善を目指す。その結果、画素ピッチが 0.44 μm から 0.35 μm に向上し、回折効率も改善したシステムが実現できたので報告する。

2. フリンジプリンタ

現在のフリンジプリンタの光学系を Fig. 1 に示す。

空間光変調器(以下 SLM)として LCoS(Liquid Crystal on Silicon)を用いており、青レーザ、光の戻り光を防ぐためのアイソレータ、音響光学変調器(以下 AOM)シャッタ、高解像度なホログラムを出力するための X-Y ステージ、各種光学部品により構成されている。シャッタは 1 枚の CGH の出力に何万回と露光するので機械式ではなく AOM を用いている。

2.1. 縮小光学系

LCoS に 3 次元表示のための干渉縞を表示し、そのまま記録すると干渉縞の周期が長いため、ホログラムに必要な十分な回折角を得ることができない。そこで Fig. 1 に示す L3, L4 レンズを用いて、液晶パネルからの画像を縮小し記録する。縮小倍率は 2 つのレンズ L3 と L4 の焦点距離の比によって決まる。

2.2. 高解像度化

LCoS1 枚の解像度ではホログラムとして十分でない。高解像度なホログラムを撮影するために、分割した干渉縞を LCoS に表示し記録を行う。この時、分割した干渉縞を正確な位置に露光し、それに対応する干渉縞を表示する必要がある。フリンジプリンタでは、ステップモータによる X-Y ステージを用いている。ステージはコントローラを用いて Windows 上で制御するようになっている。また、ステージのコントロールと同時に対応する画像を表示させて、露光のためのシャッタの制御をおこなう。

3. 原理・方法

3.1. 縮小光学系の問題点

以前のフリンジプリンタは単レンズを使用していたため、L3, L4 レンズに収差が生じていた。収差とはレンズによって、像を結像する際に光束が一点に集光されないことである。その結果、ホログラムを出力したときに干渉縞の歪み、回折効率の低下が発生していた。そこで Table 1 の光学系に変更を行う。新光学系は L3, L4 レンズを組合せレンズに変更することで収差補正を行う。

3.2. 回折角の比較

回折角とは、0 次回折光と 1 次回折光とのなす角度のことである。ホログラムの再生像は 0 次回折光と 1 次回折光の間で再生されるため、回折角が大きいほどホログラムの再生像を大きくすることができる。波長 λ でホログラムを再生したときの回折角 θ は干渉縞の画素ピッチ p より式(1)から求めることができる

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\lambda}{2p} \quad (1)$$

式(1)を用いて Fig. 2 に画素ピッチと回折角の関係を示す。本研究では、回折格子の周期を変更し回折角、回折効率の測定をする。

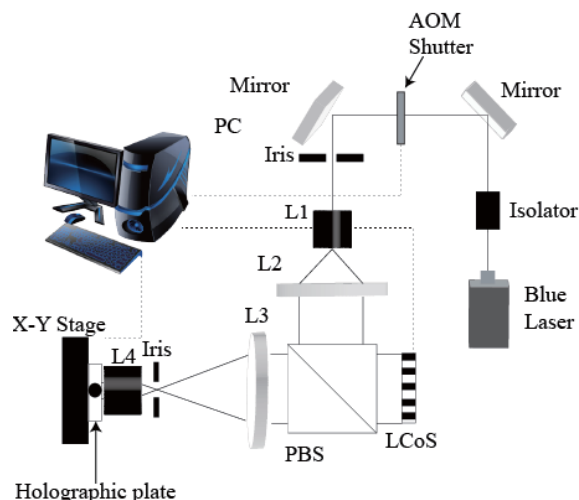


Fig. 1 Schematic of the fringe printing system.

Table 1 Characteristics of Fringe printer

		Previous system	Present system
Parameters	Focal Length (L3) [mm]	200	200
	Focal Length (L4) [mm]	12.5	10
	Demagnification Rate	1/16	1/20
	Settling time [ms]	1,500	600
	LCoS resolution [pixel]	1,920×1,080	1,920×1,080
	LCoS pitch [μm]	7.0	7.0
	Hologram pitch [μm]	0.44	0.35
Laser	Type number	MSL-FN-473	BLK73100
	wavelength [nm]	473	473
	Laser output [mw]	0.5	83

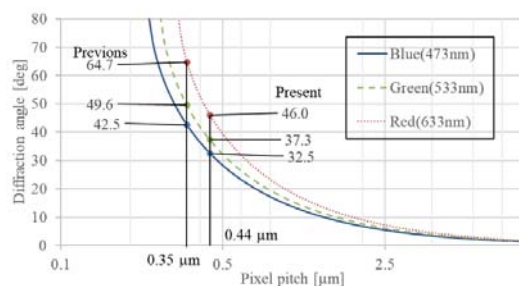


Fig. 2 Characteristics of Diffraction angle

3.3. 露光量特性

ホログラムはレーザによる露光量によって回折効率が変化するため、回折効率が最も高い露光量を測定する。露光量 E [$\mu\text{J}/\text{cm}^2$] の算出式を式(2)示す。 S [sec] は露光時間、 P [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$] は X-Y ステージでの露光パワーである。

$$E = P \times S \quad (2)$$

露光パワー P を測定した後、露光時間 S を調節し露光量 E を求める。その後、1 pixel 毎に濃淡が変化する回折格子を出力し、回折効率を測定する。

3.4. 高周波成分の測定

L4 レンズから X-Y ステージ間の距離が L4 レンズの焦点距離と等しくないと再生像全体が再生されない。L4 レンズの焦点距離は 10 mm である。よって、L4 レンズから X-Y ステージ間の距離を 9.8 mm から 10.3 mm まで変化させ、ホログラムの高周波成分が再生される位置を測定する。

3.5. セトリング時間による回折効率の検証

露光時に、振動が発生すると干渉縞が崩れるため回折効率が低下する。そのため、X-Y ステージを移動したときに一定の待ち時間(セトリング時間)を設ける必要がある。セトリング時間はレーザの露光パワーに反比例する。今日、出力の大きいレーザに変更したため、適切なセトリング時間を検証することで、ホログラム出力時間の短縮を図る。

4. 結果

4.1. 干渉縞の歪み

Fig. 3.1 のように縦108pixel、横96pixel 毎に濃淡が変化する回折格子を出力する。旧フリンジプリンタで出力した結果を Fig. 3.2、新フリンジプリンタで出力した結果を Fig. 3.3 に示す。Fig. 3.2 を見ると、旧フリンジプリンタは干渉縞が正しく出力されておらず、干渉縞が歪んでいることが分かる。Fig. 3.3 を見ると、新フリンジプリンタでは、干渉縞が正しく出力できていることが目測での比較で確認できる。以上より縮小光学系を変更することでレンズ収差の影響が小さくなっていることが確認できる。

4.2. 露光量特性

Fig. 4 に露光量特性を測定した結果を示す。使用した感光材料は VRP-M である。X-Y ステージ付近の光量は $15 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 、露光時間を 1 ms から 10 ms、セトリング時間を 1,500 ms として測定を行った。露光量 $100 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ から $130 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ の間で高い回折効率を得られた。また、新フリンジプリンタの最適露光量は $120 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ となり、回折効率は 6.1 % となった。旧フリンジプリンタと比較すると回折効率は 33 % 向上した。



Fig. 3.1 CG image of the recorded object



Fig. 3.2 Reconstructed image(Previous)



Fig. 3.3 Reconstructed image(Present)

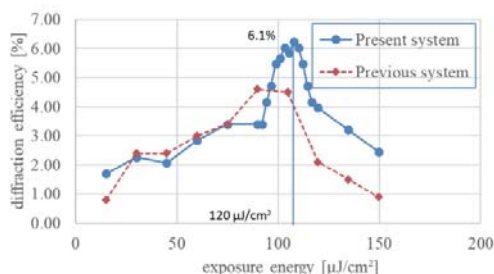


Fig. 4 Characteristics of expose energy



Fig. 5 CG image of the recorded object



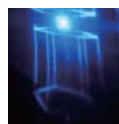
(a) 9.8 mm



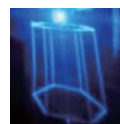
(b) 9.9 mm



(c) 10.0 mm



(d) 10.1 mm



(e) 10.2 mm



(f) 10.3 mm

Fig. 6 Characteristic of high frequency component with different distances between lens L4 and recording hologram

4.3. 高周波成分の測定

Fig. 5 のオブジェクトをホログラムとして出力し、L4 レンズから X-Y ステージ間の距離を 9.8 mm から 10.3 mm 間で変化させ、高周波成分が再生される位置を測定した結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 を見ると、10.0 mm から 10.3 mm 間で高周波成分が再生されていることが分かる。1 次回折光は 10.2 mm が最も明るく、L4 レンズの焦点距離である 10.0 mm とは 0.2 mm の誤差

があった。

4.4. 回折角の測定

Fig. 7 に結果を示す。干渉縞の周期が 2 pixel の時、以前の縮小光学系では波長 532 nm での回折角は 39.09 度であり、画素ピッチが 0.44 μm であった。これに対し、今回構築した縮小光学系は 50.06 度回折している。これは、画素ピッチ 0.35 μm に相当し、正しく干渉縞を出力できていることが確認できた。

4.5. セトリング時間による回折効率の検証

露光量を 120 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ として 100 ms から 900 ms までのセトリング時間を変化させた結果を Fig. 8 に示す。この結果から 600 ms まで回折効率は上昇し、それ以降はほぼ一定の回折効率であることが分かる。従来のセトリング時間は 1,500 ms であったため、セトリング時間は 60 % 短縮された。

5. 大型ホログラムの試作

新フリンジプリンタでアニメーテッド計算機合成円筒型ホログラム(以下 ACGCH)⁷⁾の試作を行った。ACGCH は水平方向に 360 度の視域を持ち、観察する方向によって再生像が変化するホログラムである。ホログラムのパラメータを Table 2 に示す。再生像を Fig. 9 に示す。このホログラムはバラが咲いてから枯れるまでをアニメーションとして表現したものである。このホログラムの 1 Mpixel 当たりの出力速度は 0.60 s であり、従来の 1.97 s(セトリング時間 1500 ms)よりも約 3 倍の出力速度であった。

6. むすび

本研究ではフリンジプリンタの縮小光学系を変更することで、収差の改善を行った。実際に回折格子を出力することで干渉縞の歪みが改善していることが確認できた。また、回折角においても、理論値とほぼ等しい結果が得られた。今後の課題としては、新フリンジプリンタでの様々な CGH の出力が挙げられる。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたりチームオプト株式会社にレンズについてのご助言をいただきました。心より感謝いたします。

文 献

- [1] Hiroshi Yoshikawa, Takeshi Yamaguchi and Satoshi Kajiro, "Direct fringe printer for computer-generated holograms: Improvement of printing speed," SPIE Proceedings of Practical Holography, XXVII, Vol. 8644, 8644-32, (2013)
- [2] 井上正也, 安元実, 山口健, 吉川浩: "フリンジプリンタ出力の高速化", 映像情報メディア学会技術報告, 38, 34, pp.9-12 (Sep.2014)
- [3] M. Takano, H. Shigeta, T. Nishihara, M. Yamaguchi, S. Takahashi, N. Ohyama, A. Kobayashi,

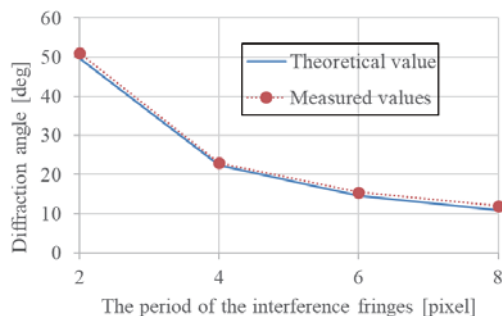


Fig. 7 The diffraction angle of each pixel pitch

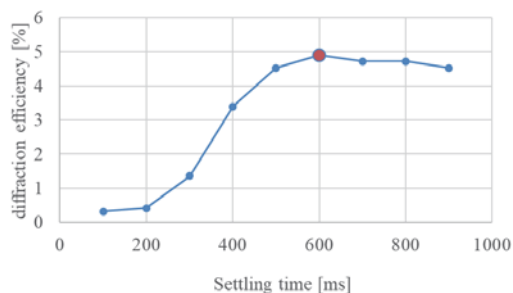


Fig. 8 Characteristics of settling time

Table 2 Parameter of Hologram

Parameter of Hologram	Value
Resolution [pixels]	1,616,000×216,000
Size [mm ²]	565.6×75.6
Pixel Pitch [μm]	0.35
Virtual window [piece]	505×100
Output time [min]	3,523
Time to print Mpixel [s]	0.60



Fig. 9 作成したホログラム

and F. Iwata, "Full-color holographic 3D printer," Proc SPIE 5005, pp.126-136 (2003).

[4] 小林俊輔, 松島恭治, 宮内宏之: "ドット描画式ドラム型フリンジプリンタ", Hodic Circular 25, 3, pp. 2-7(2005)

[5] Y. Sakamoto, M. Morishima and A. Usui, "Computer-generated holograms on a CD-R disk" in Practical Holography XVII, Proc. SPIE 5290, paper #5290-02 (2004).

[6] 中原住雄, 増田幸勇, 松島恭二: "レーザーソングラフィによるサブミクロンピクセル CGH の作成", HODIC Circular 34, 4, pp.26-30(2014)

[7] 下間仲隆, 山口健, 吉川浩: "アニメーテッド計算機合成ホログラムの隠面処理手法の改善"映像情報メディア学会技術報告, 40, 6, pp.315-318 (2016)

波面再生型フルカラー体積ホログラムプリンタの作製

廣橋 美葵[†] 青柳 翔真[†] 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: csmi16012@g.nihon-u.ac.jp

あらまし 我々は波面再生型体積ホログラムプリンタの研究を行っている。従来の研究では、露光した単色成分のホログラムを出力し、重ね合わせることでマルチカラーのホログラムを作製した。カラー体積ホログラムの研究は空間多重方式を用いたものが報告されているが、本研究では1枚の感光材料に多重露光方式を提案し、フルカラー体積ホログラムを出力するプリンタの作製を行った。

キーワード 波面再生型体積ホログラム, 計算機合成ホログラム, フルカラー

Development of full-color volume hologram printer

Miki Hirohashi[†] Shoma Aoyagi[†] Takeshi Yamaguchi[†] and Hiroshi Yoshikawa[†]

[†] Department of Computer Engineering

College of Science and Technology, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba,

274-8501 Japan

E-mail: csmi16012@g.nihon-u.ac.jp

Abstract In previous study, we had developed multi-color volume hologram printer which output 2 color components holograms. This system required manually switching of the laser when output a different color component. Furthermore, the reconstructed image was biased in color because proposed hologram piled up the color component holograms. In this study, we developed a full-color volume hologram printer with three lasers whose wavelength are primary colors and multiple exposure method. A fringe pattern is calculated with respect to each wavelength. Calculated fringe pattern is displayed on LCoS and exposed for each wavelength of laser.

Keyword Volume hologram, Computer-generated Hologram, Full-color

1.1. はじめに

究極の3次元像再生方式であるホログラフィは、両眼視差、輻輳、焦点距離などの人が立体視をするときの生理的要因をすべて満たすことができる^[1]。このため、ホログラフィ技術を用いて再生された3次元像は、あたかもそこに3次元物体が存在するような自然な再生像を得ることができる。このホログラフィの生成方法の一つに計算機合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) がある。CGHは実際の物体だけでなく、架空の物体をも3次元の情報を持った像として再生可能である。

CGHの出力装置として、我々は平面方向の干渉縞を記録するフリンジプリンタ^[2]と体積方向の干渉縞を記録するホログラムプリンタ^{[3][4]}の研究を行ってきた。フリンジプリンタに関しては、これまで多くの研究が行われ、高解像度、高精細、高出力など様々な特徴を実現しており、出力されるホログラムからは立体感の強い再生像を観察することができる。しかし、これらのCGHプリンタは、波長選択性を持たない平面型ホ

ログラムしか出力することができない、波長選択性がない場合、白色光による再生では色収差により再生像が劣化してしまうため、単色の光源が必要となる他、全方向視差のあるフルカラー化を実現するのが困難であるという欠点がある。これに対し、波長選択性がある体積型ホログラムは、白色光により簡単に再生ができる他、照明を反射させて再生像を観察するため、再生像が観察しやすいという利点がある。従来の研究では3次元物体からの波面を記録する体積ホログラムプリンタを開発した。他にも、空間分割多重方式を用いたフルカラー体積ホログラムプリンタ^[5]が報告されている。オブジェクトを分割し、それぞれの再生像を順次転写することで、大型のホログラムを出力できる。さらに、2台のレーザを手動制御し、各色成分のホログラムを出力するシステムを構築し、重ね合わせることで再生できるマルチカラーのホログラムを出力した。

本報告では、3台のシャッターを自動制御し、1枚の感光材料にRGB3色を多重露光するシステムを構築する。また、各色成分の干渉縞を計算し、フルカラー体

積ホログラム作製する。

2. 体積ホログラムプリンタ

2.1. 記録光学系

Fig. 1 に体積型ホログラムプリンタの光学系を示す。また、光学系のパラメータを Table1 に示す。体積型ホログラムを記録するため、LCoS (Liquid Crystal on Silicon) に表示した干渉縞から像を再生する。再生された像と参照光となる光を反対方向から干渉させ記録する。本研究では LCoS に表示させる一つひとつの CGH を要素ホログラムと呼ぶ。要素ホログラムは参照点光源と物体点光源によって作成され、LCoS に照射される平行光によって再生される。参照光の位置はレンズ3の焦点面にあるため、要素ホログラムとレンズ3が接していれば、平行光は記録した参照光と同じ位置に集光し、記録した物体点光源が正しく再生される。しかし、レンズ3の焦点距離が短いことやPBSがあることから、実際にはレンズ3と要素ホログラムは離れてしまっている。そのため、要素ホログラムの再生光は、記録した物体点光源とは異なる方向に生じてしまい、深い奥行を持つほど、再生像がゆがんでしまう。これを解決するため、4f系を用いてLCoSに表示させた要素ホログラムをレンズ3上に等倍結像している。また、各色のレーザはダイクロイックミラーを用いて光路を一致させ、感光材料の同位置に像が再生される。

プリンタの動作としては、LCoS に表示させる要素ホログラムの切り替え、シャッタの開閉、記録材料の移動、振動を落ち着かせるためのセトリング時間待機であり、PCによって制御される。

2.2. シャッタ

従来のプリンタには機械式シャッタを用いていたが、80 mm 角の単色ホログラムを出力する為に、1度に約2,300回の開閉が行われており、機械式シャッタの寿命サイクルは多くとも50万回程度であるため130枚程度の出力が限度であった。そこでレーザの増設に伴い、金属疲労のない音響光学素子(AOM: Acousto Optic Modulator)に変更し、各色1台ずつ割り当てることにより、シャッタ寿命を延ばす。また、物理的な開閉がなくなるため、 μs オーダでの制御が可能となる。シャッタは、PCとシングルボードプロセッサのRaspberry Pi 3によって制御され、開閉操作は、光学系調整時にはAOMドライバに接続したRaspberry Pi 3のボタンで制御を行う。ホログラム出力時にはPCとネットワーク接続を行い、自動制御する。自動制御のフローチャートをFig. 2に示す。PC側で出力するホログラムの色の変更ができ、単色のホログラムの出力も可能である。

3. 要素ホログラムの計算手法

LCoSの画素間隔が広いので、再生される像は非常

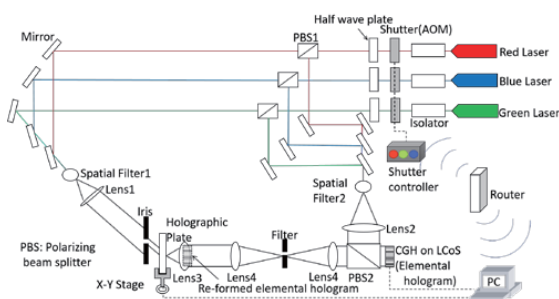


Figure 1 System of the volume hologram printer

Table 1 Characteristics of Volume hologram

Focal Length (L4) [mm]	300
Focal Length (L3) [mm]	30
LCoS resolution [pixel]	4096 x 2160
LCoS pitch [μm]	4
Wave Length(R, G, B)[nm]	640, 532, 473
Laser output[mW]	200, 300, 100

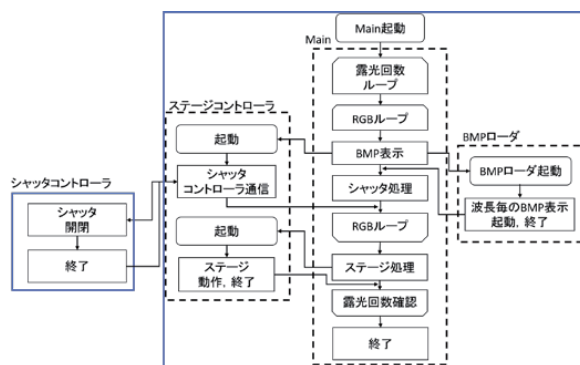


Figure 2 Control flow

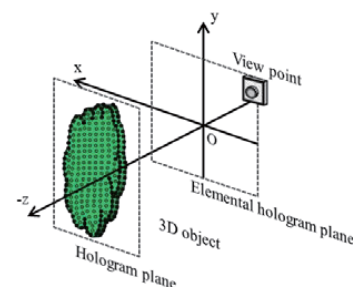


Figure 3 Model to create the object data

に小さく、出力できるホログラムも小さくなってしまふ。そこで、大きなオブジェクトを分割し、CGHを作製することで、再生像を順次転写しより大きなホログラムを出力できるようにする。

3.1. オブジェクトデータの取得

Fig. 3 にオブジェクトデータの取得モデル図を示す。ホログラム面と要素ホログラム面は実際のシステムにおける記録材料と LCoS の位置にそれぞれ対応している。オブジェクトは図中ではホログラム面上に配置しているが、視点から見える限り z 軸上の任意の位置に配置することができる。そして、オブジェクトは点光源の集合体と見なされ、各店の座標 (x, y, z) 、初期位相 (ランダム位相)、色情報 (R, G, B) がオブジェクトデータとして取得される。なお、本報告では、 z 軸上のある視点から隠面処理したオブジェクトデータを取得する。

3.2. 仮想窓による記録範囲付加

取得したオブジェクトデータは、仮想窓を用い、要素ホログラムごとのオブジェクトデータとして再作成される。ここで、仮想窓と要素ホログラムの関係について Fig. 4 に示す。仮想窓はホログラム面を等間隔に区切る窓であり、開いている窓に対して 1 つの要素ホログラムが対応している。そして、開いている仮想窓を通り、要素ホログラムに到達する物体波面のみを計算に用いる。これにより、要素ホログラムに部分的なオブジェクトを記録させることができる。要素ホログラムに届く物体波面が仮想窓を通るかどうかについては、オブジェクトデータの各点光源に記録範囲を付加することで判断する。記録範囲とは、物体点光源が要素ホログラムのどの範囲に記録されるのかを示すパラメータである。本報告では、最も回折角の小さい 473 nm の波長に合わせ後述する式(1)を満たすように仮想窓を設定する。

3.3. 要素ホログラムの計算

要素ホログラムは、Fig. 3 に示すような記録材料平面を等間隔に区切る仮想窓を用いて計算を行う。各仮想窓には、同軸上に 1 つの要素ホログラムが存在する。LCoS の画素ピッチは決まっているため、要素ホログラムに用いることのできる物体光と参照光は以下の式を満たす必要がある。

$$2d(\sin \theta_{obj} - \sin \theta_{ref}) \leq \lambda \quad (1)$$

ここで、 d はホログラムの画素ピッチ、 λ は波長である。また、 θ_{ref} は参照光の入射角、 θ_{obj} は物体光の入射角であり、Fig. 5 のような関係である。要素ホログラムにおいて、最小の d 及び λ は定数であり、参照光の

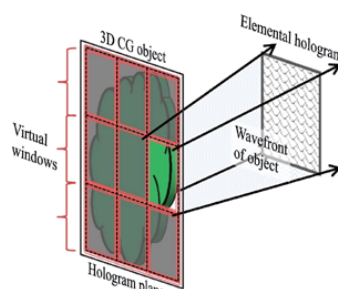


Figure 4 Model to calculate the elemental hologram

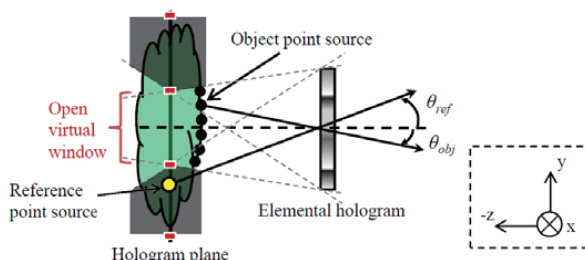


Figure 5 Schematic of the elemental hologram



Figure 6 CG image of the recorded object

点光源は仮想窓上部に配置するため、仮想窓の大きさに依存する。そこで、仮想窓の大きさは式(1)を満たすような物体光だけが通過するよう設定する必要がある。実際の干渉縞の計算には、以下に示す振幅のフレネルホログラムの計算式を用いる。

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{r_i} \cos \{kr_i + \phi_R(x, y) + \phi_i\} \quad (2)$$

ここで、 N はオブジェクトの点光源数、 ϕ_R は参照光

の位相, a_i , r_i , ϕ_i はそれぞれ i 番目の点光源の振幅, 要素ホログラム面までの距離, 初期位相である. k は波数であり, 波長 λ を用いて $k = 2\pi / \lambda$ と表される. 仮想窓を用いて計算された計算範囲が要素ホログラムよりも広い場合であっても, 計算するのは要素ホログラム内のみである.

4. 結果

Fig. 6 のオブジェクトを出力した結果を Fig. 7 に示す. また, 撮影時のパラメータを Table2 に示す. 仮想窓サイズは最短波長の 473nm で式(1)を満たすよう計算を行い, 決定した. 感光材料に Ultimate を使用した為, 最適露光量が増え, 総露光時間が長くなってしまった. また, ダイクロイックミラーを用いて光路を一致させている為, 光量が減衰してしまったことも原因として挙げられる. レーザの合計露光量を Ultimate の最適露光量としている為, オブジェクトの単色部分で回折効率が下がり, 暗くなってしまった.

5. むすび

波面再生型フルカラー体積ホログラムプリンタを構築し, 自動制御によりフルカラーホログラムを出力した. 再生像は露光量比が同程度であった為, カラーバランスが悪く色が偏ってしまった. 今後は露光量特性を測定し, より写実的な像を得られるように調整していく必要がある.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16H02819 の助成を受けたものです.

文 献

- [1] 大越孝敬: “3次元画像工学”, 朝倉書店(1991)
- [2] H. Yoshikawa and T. Yamaguchi: “Computer-generated holograms for 3D display”, Chinese Optics Letters, 7, 12, pp. 1079-1082,(2009)
- [3] O. Miyamoto, T. Yamaguchi and H. Yoshikawa: “The volume hologram printer to record the wavefront of a 3D object,” SPIE Proceedings of Practical Holography XXVI, 8281, pp. 82810N(1-10), (2012).
- [4] 山口健, 宮本磨, 吉川浩: “体積型ホログラムプリンタの開発-ホログラム面付近にある物体の記録の問題点とその改善”, 3次元画像コンファレンス 2012, P-02, pp. 98-101, (2012)
- [5] H. Kang, E. Stoykova, Y. Kim, S. Hong, J. Park, and J. Hong: “Color Holographic Wavefront Printing Technique for Realistic Representation,” IEEE Trans. Ind. Informatics, 12, 4, pp. 1590-11598, (2016).

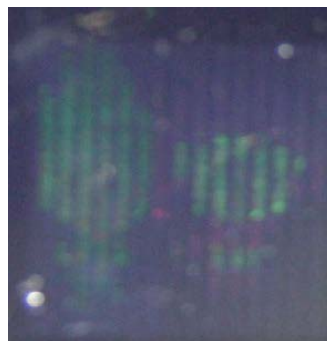


Figure 5 reconstructed image

Table 2 Recording parameter

Exposure time(R, G, B)[ms]	2700, 900, 6000
Settling time[ms]	5000
Hologram size [mm ²]	24 x 23.4
Virtual window size	3.2 x 1.8
Window division	15 x 26
Power ratio(R, G, B)	0.98:0.94:1.08
Printing time	2h 31min

ホログラフィ計算における三角関数近似手法の高精度化

西辻 崇[†] 下馬場 朋禄[‡] 角江 崇[‡] 奥村 誠司[†] 伊藤 智義[‡]

[†] 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1

[‡] 千葉大学大学院 工学研究科 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

E-mail: Nishitsuji.Takashi@dr.MitsubishiElectric.co.jp

あらまし ホログラフィの実用化課題の1つである計算負荷削減には、光学計算に頻繁に用いられる三角関数計算の負荷削減が有効と考えられる。そのため、筆者らは先に加減算、剰余、絶対値演算の組み合わせによる三角関数簡易近似手法を開発し、ホログラフィ計算への有効性を示した。しかし、近似精度の低さに伴うホログラムの性能劣化が課題であった。今回、先の手法に基づく近似精度改善手法を開発し、平均絶対誤差の約85%削減に成功した。また、計算機合成ホログラムの作製に開発手法を適用し、再生像の画質改善に成功した。

キーワード ホログラフィ、電子ホログラフィ、デジタルホログラフィ、高速計算、三角関数

Precision improvement method of simple cosine approximation technique for holographic calculation

Takashi NISHITSUJI[†] Tomoyoshi SHIMOBABA[‡] Takashi KAKUE[‡] Seiji OKUMURA[†]
and Tomoyoshi ITO[‡]

[†] Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation,

5-1-1 Ofuna, Kamakura-shi, Kanagawa, 247-8501 Japan

[‡] Graduate School of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522 Japan

E-mail: Nishitsuji.Takashi@dr.MitsubishiElectric.co.jp

Abstract An approximation of the cosine function is one of the solution for reducing the computational load in holographic calculation. Our previous work, which approximates the cosine function by a combination of addition, modulo and absolute operation, is proved to be effective for accelerating holographic calculation; however, its approximation error also degrades a performance of a hologram. In this study, we propose an error compensation method which is based on our previous work, and succeeded in reducing the mean absolute error by about 85% compared to our previous work. Moreover, our work also succeeded in improving an image quality of reconstruction image of computer-generated hologram.

Keyword Holography, Electro-holography, Digital holography, High-speed calculation, Trigonometric function

1. はじめに

デジタルホログラフィによる3次元計測技術をはじめとするホログラフィの応用技術において、再生処理やホログラム生成に係る計算負荷の大きさは実用化や普及に向けた高い障壁となっている。この解決のため、Field Programmable Gate Array (FPGA)[1][2] や Graphic Processing Unit (GPU)[3]を用いた計算システムに加え、計算量削減を目的とした計算アルゴリズム[4]-[6]が開発されてきたが、実用化や普及に向けた困難は未だに多い。

筆者らは、ホログラフィの計算処理(以下、ホログラフィ計算)で使用頻度の高い三角関数演算の簡易近似手法(以下、従来手法)を開発し、FPGA等のハードウェア実装に適

した手法として、特に計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram; CGH)計算における有効性を示してきた[6]。しかし、従来手法では、本来曲線で表現されるべき三角関数を直線的に近似するため、近似誤差の蓄積に伴うCGHの性能劣化が課題であった。そこで本研究では、従来手法を活用した誤差補正手法を開発し、近似誤差を補正することでCGHの性能劣化の改善に成功した。

本稿は、以下のように構成する。2章では従来手法と誤差補正手法の原理を述べる。3章では提案手法の性能評価結果と考察を述べる。4章で結論を述べ、5章でまとめる。

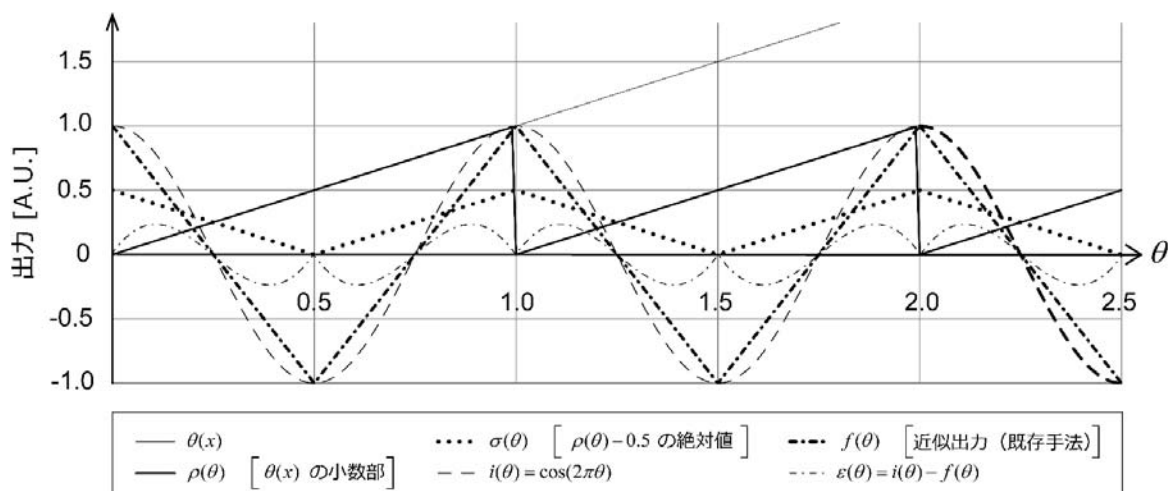


図 1 従来手法の生成過程の各段階における出力

2. 原理

2.1. 従来手法の原理

図 1 に従来手法[6]の近似出力生成過程の各段階における出力波形を示す．従来手法は， $ph(\theta) = 2\pi\theta$ で表現される位相入力に対し，3 段階の処理によって三角関数（余弦，正弦）の近似出力 $f(\theta)$ を生成する．なお，簡単のため図 1 では $\theta(x) = x$ とした．また，真値として理想関数 $i(\theta) = \cos(2\pi\theta)$ を定義した．

第 1 段階では， $\theta(x)$ に対し小数部を抽出することで，鋸波出力 $\rho(\theta)$ を生成する．位相入力 $ph(\theta)$ において 2π と θ は乗数の関係にあり，余弦，正弦関数は 2π の周期関数であることから，鋸波出力 $\rho(\theta)$ は理想関数 $i(\theta)$ に同調する．第 2 段階では，鋸波出力 $\rho(\theta)$ に対して 0.5 の減算と絶対値演算を施し，三角波出力 $\sigma(\theta)$ を得る．三角波出力 $\sigma(\theta)$ は θ を 0.5 毎に折り返す処理に相当するため，第 1 段階と同様の理由により，理想出力 $i(\theta)$ の半周期に同調する．第 3 段階では，理想出力 $i(\theta)$ に波形をフィッティングさせるため， $\sigma(\theta)$ から 0.25 のオフセットを減算した上で 4 倍する．以上の過程により，近似出力 $f(\theta)$ を得られる．

2.2. 誤差補正手法

理想関数 $i(\theta)$ に対する近似出力 $f(\theta)$ の誤差関数 $\varepsilon(\theta) = i(\theta) - f(\theta)$ を定義し図 1 に示す．図 1 に示すように $\varepsilon(\theta)$ は理想関数 $i(\theta)$ の半周期ごとに対称をなすように連続しているため，代表して $\{\theta | 0 \leq \theta < 0.5\}$ を考える．同区間において $f(\theta)$ は，

$$f(\theta) = -4\theta + 1, \quad (1)$$

となるため，誤差関数 $\varepsilon(\theta)$ は，

$$\varepsilon(\theta) = \cos(2\pi\theta) + 4\theta - 1, \quad (2)$$

となる． $\varepsilon(\theta)$ は同区間において， $\theta = 0, 0.25, 0.5$ で 0 とな

り， $\theta \approx 0.11, 0.39$ で極値 $\varepsilon(\theta)|_{\theta=0.11, 0.39} \approx \pm 0.21$ を取る正弦波に類似した波形をとる．すなわち， $\varepsilon(\theta)$ は理想出力 $i(\theta)$ と比較して，① 2 倍の周波数，② 4 分の 1 周期の位相ずれ，③ 約 4 分の 1 の振幅，を持つ三角関数出力に類似しており，④ 理想出力 $i(\theta)$ の半周期毎に対称な波形となる．以上に示した $\varepsilon(\theta)$ の 4 つの性質は，他区間においても同様であることから，本研究では， $\varepsilon(\theta)$ をキャンセルする誤差補正信号を従来手法を用いて生成し，従来手法の途中過程で印加することで近似精度の向上を図る．生成する誤差補正信号は，誤差関数の性質 ① ③ ④ を満たし，性質 ② を満たし，さらに逆位相となる信号出力である．

図 2 に誤差補正信号の生成過程の各段階における出力波形を，図 3 に誤差補正を施した三角関数近似出力の生成過程の各段階における出力波形を示す．先に示したとおり，従来手法は θ を 0.5 毎に折り返すことで理想出力 $i(\theta)$ と同じ周波数を再現しているため，従来手法に入力する θ に対する増幅値の乗算，オフセット値の加算によって，出力の周波数調整と位相ずれを実現し，上に挙げた性質を満たす出力を得られる．すなわち，従来手法に対して $\theta' = 2\theta + 0.25$ を入力し，鋸波出力 $\rho(\theta')$ ，三角波出力 $\sigma(\theta')$ の生成を経て，オフセット 0.25 の減算と 0.25 の乗算を施すことで，誤差関数 $\varepsilon(\theta)$ の性質 ① ③ を満たし，性質 ② に対して逆位相となる誤差補正信号 $c(\theta')$ を生成できる．他方，性質 ④ は従来手法に対する誤差補正信号印加後の近似出力生成過程の中で実現できる．従来手法では理想出力 $i(\theta)$ の周期に同調する鋸波出力 $\rho(\theta)$ を， $\rho(\theta) = 0.5$ を境に折り返すことで三角波出力 $\sigma(\theta)$ を得るため，従来手法における鋸波出力 $\rho(\theta)$ に誤差補正信号 $c(\theta')$ を印加した鋸波出力 $\rho'(\theta)$ を入力として三角波出力 $\sigma'(\theta)$ を得ることで，性質 ④ を

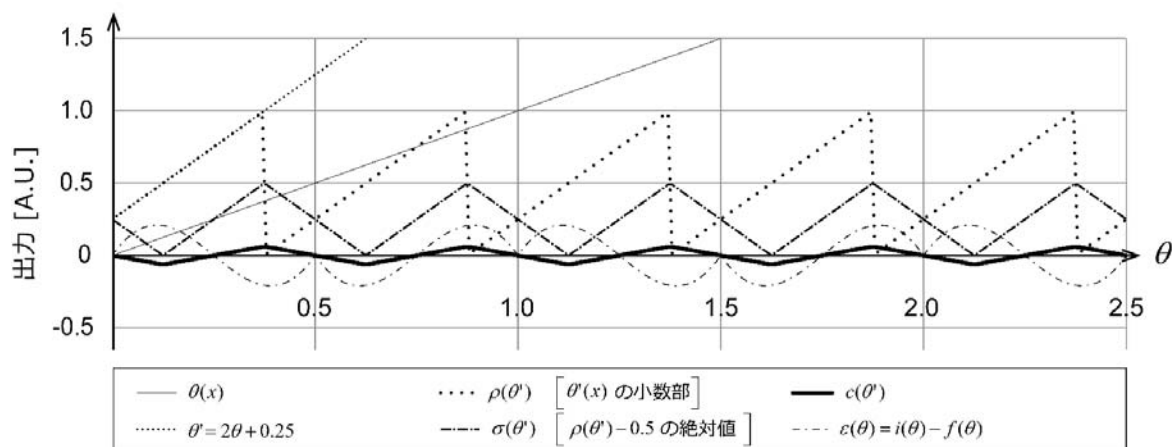


図 2 誤差補正信号の生成過程の各段階における出力波形

実質的に実現できる．以上の過程により誤差補正を施した近似出力 $f'(\theta)$ を得られる．

3. 性能評価・考察

3.1. 三角関数の近似精度評価

誤差補正手法の有効性検証のため，理想出力を真値に置き，誤差補正手法適用前後で 1 周期中の平均絶対誤差を比較した．なお，サンプル数は 1000 とした．その結果，適用前が 0.137，適用後が 0.0209 であった．誤差補正手法の適用により，平均絶対誤差を約 85% 削減できており，誤差補正手法の有効性が確認できた．

3.2. ホログラフィ計算における性能改善評価

誤差補正手法を自発光する点光源によって構成される 3 次元モデル (点光源モデル) を用いた CGH 計算に適用し，適用前後における再生画質，および計算速度への影響を比較した．

点光源モデルによる CGH 計算は，

$$\phi(x_\alpha, y_\alpha) = \tan^{-1} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} A_n \exp \left(j \frac{2\pi p}{\lambda} r_{an} \right) \right\}, \quad (3)$$

で表される[6]．ここで， (x_α, y_α) は CGH の座標系， ϕ は CGH の画素値， A_n は各点光源の強度， j は虚数単位， N は点光源数， p は座標系の量子化単位， λ は使用光源の波長， $r_{an} = \{(x_\alpha - x_n)^2 + (y_\alpha - y_n)^2 + z_n^2\}^{1/2}$ ， (x_n, y_n, z_n) は点光源の座標系である．なお，CGH のサイズは 1,920 × 1,080[pixels] とし， $p = 8[\mu\text{m}]$ ， $\lambda = 520[\text{nm}]$ とした．また，簡単のため $A_n = 1$ とした．

今回，約 12,000 点の点光源で構成される点光源モデルを使用し，式(3)に含まれる三角関数 (余弦，正弦) に近似手法を適用した CGH を作成し計算時間を計測した．次に，作成した CGH と近似手法を適用せずに作成した CGH に対して角スペクトル法を用いた再生シミュレーション[7]を行い，所望再生距離の前後 100 ス

ライス (約 80[μm] 間隔) での強度分布を取得した．その後，各スライスについて近似手法非適用時を真値とした場合の Peak-Signal to Noise Ratio (PSNR) を算出し，その平均値を求めた．計算環境として，CPU: Intel Core i7 3770 3.40GHz (1-core only), Memory: 16GB, OS: Windows 7 Professional 64bit, Compiler: Visual C++ 2015 を用いた．また，浮動小数点精度は倍精度を用いた．

評価結果を表 1，表 2 に示す．PSNR について，再生距離 0.3[m] の場合は 1.6[dB] の改善が見られるが，再生距離 1.0[m] の場合は 0.2[dB] の改善に留まり大きな効果は得られなかった．これは，再生距離が遠くなるに従い，式(3)における高周波領域の影響が大きくなることに起因すると考えられる．今回の誤差補正手法は，従来の直線的な近似を曲線的に補正するため，真値上で直線的な変化と見なされる高周波領域には補正効果が薄くなる．したがって，再生距離が比較的長い 1.0[m] で性能改善効果が小さくなったと考えられる．また，いずれの場合も誤差補正手法の適用に伴う計算負荷の増加率はおよそ 40% であった．

表 1 評価結果 (再生距離 : 0.3[m])

	平均 PSNR[dB]	計算時間[s]
近似なし	-	1790
従来手法	37.1	496
従来手法 + 誤差補正手法	38.7	696

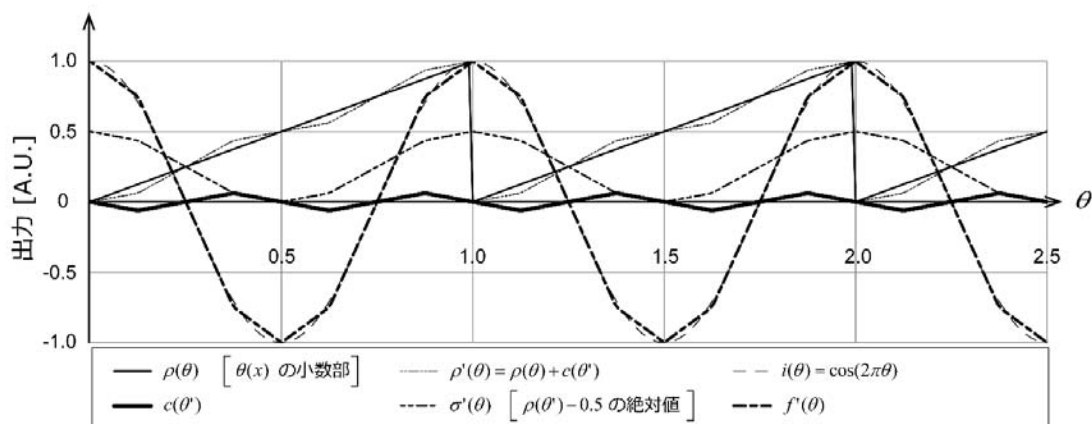


図 3 誤差補正を施した近似出力の生成過程における出力波形

表 2 評価結果 (再生距離: 1.0[m])

	平均 PSNR[dB]	計算時間[s]
近似なし	-	1790
従来手法	33.6	508
従来手法 + 誤差補正手法	33.8	709

4. 結論

三角関数を簡易近似する既報の従来手法に対する誤差補正手法の適用により近似精度が改善した。また、ホログラフィ計算の代表例として CGH 計算に本手法適用し、低周波の影響が比較的強い条件下に限り、三角関数の精度改善による画質改善効果を確認した。

5. おわりに

本稿ではホログラフィ計算への適用を前提に、三角関数の簡易近似手法における高精度化手法を提案した。ホログラフィ計算における有効性は限定的であったため、今後、特に高周波成分の近似精度向上に向けたアルゴリズム改善を図る必要がある。

他方、三角関数は様々な物理計算で用いられる汎用関数であり、提案手法は小規模な計算リソースで実装可能であることから、ホログラフィに限らず、ロボットなどの組込系を中心とした適用が期待できる。

文 献

- [1] Y. Ichihashi, H. Nakayama, T. Ito, N. Masuda, T. Shimobaba, A. Shiraki, and T. Sugie: "HORN-6 special-purpose clustered computing system for electro-holography", Opt. Express, 17, 16, pp. 13895-13903 (2009).
- [2] N. Masuda, T. Ito, K. Kayama, H. Kono, S. Shin-ichi, T. Kunugi, and K. Sato, "Special purpose computer for digital holographic particle tracking velocimetry," Opt. Express 14, 2, pp. 587-592 (2006).
- [3] H. Niwase, N. Takada, H. Araki, H. Nakayama, A. Sugiyama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito: "Real-time spatiotemporal division multiplexing electroholography with a single graphics processing unit utilizing movie features", Opt. Express, 22, 23, pp. 28052-28057 (2014).
- [4] S. Kim and E. Kim: "Fast one-step calculation of holographic videos of three-dimensional scenes by combined use of baseline and depth-compensating principal fringe patterns", Opt. Express, 22, 19, pp. 22513-22527 (2014).
- [5] X-B. Dong, S-C. Kim, and E-S. Kim: "MPEG-based novel look-up table for rapid generation of video holograms of fast-moving three-dimensional objects," Opt. Express, 22, 7, pp. 8047-8067 (2014).
- [6] T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, D. Arai, and T. Ito: "Simple and fast cosine approximation method for computer-generated hologram calculation", Opt. Express, 23, 25, pp. 32465-32470 (2015).
- [7] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics Roberts & Company (2004).
- [8] T. Shimobaba, J. Weng, T. Sakurai, N. Okada, T. Nishitsuji, N. Takada, A. Shiraki, and T. Ito: "Computational wave optics library for C++: CWO++ library," Comput. Phys. Commun., 183, 5, pp. 1124-1138 (2012).

計算機合成ホログラムにおける客観的評価方法の妥当性検証

植竹 啓貴 吉川 浩 山口 健

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

あらまし 計算機合成ホログラム(CGH)は、多くの手法が提案されており、高解像度で複雑なシーンの計算を行っている。我々は CGH の再現性を示す構造的類似度(SSIM)と明るさを示す回折効率で客観的に評価し、計算手法による画質の違いについて研究を行ったが、客観的評価と主観評価の比較を行っていなかった。本研究では、フーリエ変換ホログラムの客観的画質評価と主観的画質評価、そして光学再生を行った CGH の主観的画質評価を比較し、客観的画質評価方法の妥当性検証を行う。

キーワード ホログラフィ、計算機合成ホログラム、画質評価、構造的類似度

Validation of objective evaluation in a computer-generated hologram

Hiroki UETAKE, Hiroshi YOSHIKAWA and Takeshi YAMAGUCHI

Department of Computer Engineering

College of Science and Technology, Nihon University

7-24-1 Narashinodai, Funabashi Chiba, 274-8501 Japan

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

Abstract Various computer-generated holograms (CGH) have been studied to reconstruct complex and resolution images. We have evaluated objectively with structural similarity (SSIM) showing the reproducibility of CGH and diffraction efficiency showing brightness, and studied the difference in image quality by calculation method. However, we have not yet compared objective evaluation and subjective evaluation. Therefore, in this study, we compare the objective image quality evaluation of Fourier transform hologram, subjective image quality evaluation, and subjective evaluation of optically reconstructed CGH and validate the objective image quality evaluation method.

1. はじめに

計算機合成ホログラム (CGH: Computer-generated hologram) は CG のポリゴンデータなどの仮想物体の 3 次元情報をホログラムにすることができる利点がある。最近では計算機の性能が上がり、多くの CGH の手法が提案されている[1]。さらには、CGH に使用される仮想物体の高画質化に対する研究が行われている[2]。しかし、高画質化の研究でも再生像に対しての評価は主観評価が主で、客観的な画質評価法はあまりされておらず主観評価手法も確立されていない。

以前、我々の研究においてピーク信号対雑音比 (PSNR) と構造的類似度 (SSIM)[3] と回折効率を用いた客観的画質評価の提案を行った[4][5]。評価項目である PSNR は人間の認識と必ずしも一致しない場合が多いことが知られており、SSIM は構造的類似度を用いることで、人間の主観に近い評価を行うことができる 2 次元画像の画質評価手法である。しかし、これらの客観的評価を主観的评价と比較していないため、ホログラムの画質評価として適しているということができてい

ない。そのため、客観的評価と主観的評価を比較し、客観的評価手法の妥当性の検証が必要である。

本研究では、干渉縞に非線形変換を行った画像を SSIM 及び主観的評価で評価し、SSIM の評価がホログラムの評価として適しているのか検証することが目的である。非線形変換は、回折効率を向上させることを目的とし、干渉縞のコントラストを強調し、ダイナミックレンジを広げることにより行う。しかし、再生像にノイズが表れ、画質が低下する。したがって、低下した画質を正しい尺度で評価し、再現率を低下させずに回折効率を向上させることが望まれる。

本報告では、文献[5]の客観的画質評価に対し、主観的画質評価を行い、客観的評価手法の妥当性検証を行う。画質評価は、干渉縞の画素値分布に対して折れ線補正を行い、その再生像に対し客観的・主観的画質評価を行う。同時に、振幅型ホログラムにおける光学再生像の主観的画質評価結果を合わせて報告する。

2. ホログラムの計算

本研究では、記録する像と再生像が 2 次元で PSNR の評価が容易なフーリエ変換ホログラムを検討した。原理としては、元画像をフーリエ変換して物体光として計算する。ただし、ホログラムを再生した際に、直接透過光 (0 次回折光) や共役像が再生像と重ならないように、Fig. 1 (a) の様にフーリエ変換する面の中心を避けて画像を配置する。さらに、画像の振幅値は正の実数しかとらないので、そのままフーリエ変換すると直流成分に強度が集中する。そのため、ランダム位相成分をかけてからフーリエ変換を行い、参照光を加えてホログラムとする。

また、画質評価を行う上で画質に変化を持たせるため、文献[4]の折れ線補正を用いて画質制御を行っている。折れ線補正の式は以下のとおりである。

$$\begin{cases} O(x,y) = \frac{I(x,y) - O_{min}}{O_{max} - O_{min}} \\ O_{max} = \alpha f_{max} + f_{av}(1 - \alpha) \\ O_{min} = \alpha f_{min} + f_{av}(1 - \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 f_{max} , f_{min} , f_{av} はそれぞれ、入力画素値の最大、最小とその平均値で、 $O(x,y)$, O_{max} , O_{min} がある点 x,y の出力画素値とその最大、最小値を示し、 $I(x,y)$ はある点 x,y の入力画素値を示している。 α は補間係数を示している。 $\alpha=1$ のとき補正がかかっていない状態で、 α が減少するにつれ補正度が上がる。算出した画素値を出力範囲で正規化し、 O_{min} 以下は 0 で、 O_{max} 以上は 255 として出力を行った。元の分布に対し、分布が横に広がる補正である。

3. 再生方法

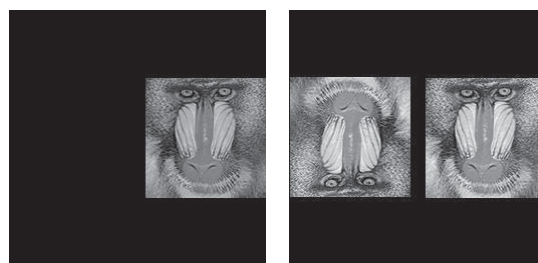
CGH の再生は、シミュレーションで行い、客観的画質評価及び主観的画質評価を行う。また、振幅型ホログラムの光学再生を同一の CGH から行い、主観的画質評価を同時に行う。

3.1. 再生シミュレーション

再生シミュレーションでは、ホログラムをフーリエ逆変換することで再生像を求めている。このとき、振幅ホログラムに対して干渉光強度が振幅透過率となるように仮定し、位相ホログラムに対しては位相変化が干渉縞強度に比例すると仮定している。再生像の数値シミュレーションの例を Fig. 1(b) に示す。実際には強い直接透過光が中心部分に現れるが、数値的に取り除いて 1 次回折像と共役像を見やすくしている。ただし、回折効率の計算では直接透過光成分も含めて計算を行っている。

3.2. 光学再生

今回再生に用いる光学系を Fig. 2 に示す。0 次光を



(a) Original image (b) Reconstructed image

Fig. 1. Original image and reconstructed images for Fourier hologram.

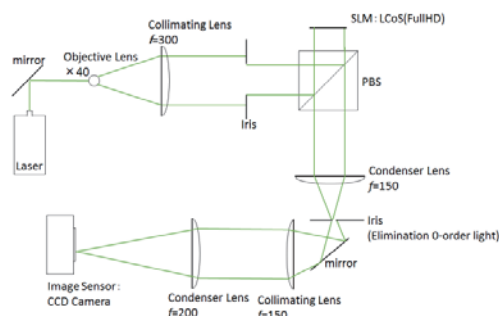


Fig. 2 Optical reconstruction system

除去するため、 $4f$ 系を用い 1 次回折光のみを抽出している。また、空間変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) として LCoS (Liquid Crystal on Silicon) を用いるため振幅型の光学再生を行っている。本研究で使用する CCD カメラは Baumer 製 PXU-120M.Q である。撮影時、露光エネルギーが一定になるよう回折効率に応じてシャッター時間を変化させている。

4. 評価方法

CGH の客観的画質評価方法として、SSIM と回折効率を用いた。SSIM は 2 枚の 2 次元画像の構造類似度を評価する手法で、PSNR のような誤差の統計値を評価する方法よりも主観評価に近い結果が得られるといわれている。そのため、ホログラムの再現性を評価する指標として用いる。また、ホログラムの評価においては、SSIM が高くても回折効率が低くても再生像がはっきり見えないため、あまり意味がない。よって、SSIM と回折効率の双方から評価を行うことが求められる。また、主観的画質評価方法として、映像の品質評価手法として用いられる DCR 法 (Degradation Category Rating)[6]を用いて評価する。

4.1. 回折効率

回折効率は 1 次回折光強度を入射光強度で割ったものをパーセントで表す。単純なグレーティングでは 1 次回折光と他の回折光を分離するのは容易だが、フーリエ変換ホログラムでは再生像が現れるエリアの強度

の総計を 1 次回折光強度と仮定しているの、ノイズや他の回折光がこのエリアに入った場合は誤差が生じる。また、光学再生を行なった際の計測方法として、表示画像を全て黒にした際の露光エネルギーと、再生像の露光エネルギーの比で求める。

4.2. 構造類似度

SSIM とは、各画素値の誤差を算出し、離散的に評価をするのではなく輝度・コントラスト・構造の 3 項目に分けそれぞれ個別に評価を行い、その評価を合成することで人間の主観に近い評価を行える評価手法である。以下に SSIM の式を示す。

$$SSIM = \frac{(\mu_x \mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (3)$$

ここで、 x が元画像、 y が再生像を示し、 μ_x, μ_y は画素値の平均値、 σ_x, σ_y は標準偏差、 σ_{xy} が共分散を示している。 c_1, c_2 は任意の定数となり、今回は $c_1 = 0.01, c_2 = 0.03$ で、構造比較の際に使用する窓はガウシアンを使用し計算を行った。また、再生像は回折効率により絶対的輝度が変化するため、輝度の平均値が元画像の輝度の平均値と一致する様に正規化している。SSIM には画像の位置がシフトもしくは回転したときに正しく評価できないという欠点がある。しかし、シミュレーション再生の再生像は元画像と同じ場所に再現されるため問題がないが、光学再生像は画素数及び位置が異なってしまうため、SSIM の評価を行うことが難しい。

4.3. DCR 法

DCR 法は、映像品質の主観評価手法の 1 つで、基準となるリファレンス映像と評価映像を各 10 秒評価者に提示し、その後 10 秒以内に 5 段階評価を行うものである。この 5 段階評価は平均オピニオン評価のことであり、DMOS(Degradation Mean Opinion Score)と呼ばれる[6]。SSIM 同様主観的画質評価における再現性の評価として用いる。

5. 結果と考察

フーリエ変換ホログラムの計算では、入力画像面及びホログラムの画素数を $1,024 \times 1,024$ 、記録する 2 次元画像の画素数を 500×500 とし、Fig. 1(a) に示すように入力画像面の右端に置いてランダム位相を適用してから離散フーリエ変換を行い、物体光の複素振幅とした。評価の際には、再生像の表示される箇所だけを抜き出し評価を行った。主観評価は 14 人の男女を対象として行い、平均値及び標準誤差を求めた。

5.1. 振幅ホログラム

振幅ホログラムの折れ線補正における画質評価を Fig. 3 に、その再生像を Fig. 4 に示す。画質評価のグ

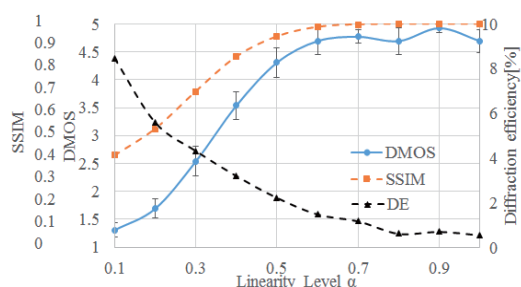


Fig. 3. Diffraction efficiency, SSIM and DMOS against linearity for amplitude transmission holograms. (Simulation reconstruction)

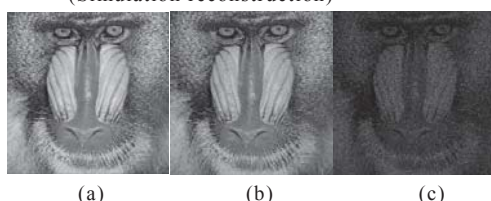


Fig. 4. Simulation reconstruction polyline correction images for amplitude transmission hologram.

- (a) $\alpha = 1.0$, SSIM = 0.999,
DE = 0.55%, DMOS = 4.69
(b) $\alpha = 0.5$, SSIM = 0.943,
DE = 2.23%, DMOS = 4.31
(c) $\alpha = 0.2$, SSIM = 0.530,
DE = 5.60%, DMOS = 1.69

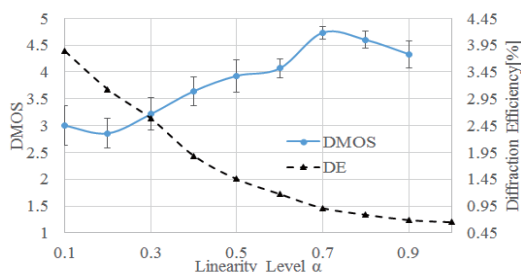


Fig. 5. Diffraction efficiency and DMOS against linearity for amplitude transmission holograms. (Optical reconstruction)

ラフは、DMOS, SSIM と回折効率を示しており、DMOS は標準誤差を求め、重ねて示している。グラフより補正を強めると再現性が落ちるが、回折効率が向上している。SSIM と DMOS の結果を比較すると、主観評価と客観評価に相関があることがわかる。また、再生像の正規化を最大値と最小値で行っている。そのため、明るい像でも暗く表示されている。

また、光学再生ホログラムの画質評価を Fig. 5 に、

再生像を Fig. 6 に示す．光学再生を行うとスペックルノイズがより激しく確認でき、画質が低い．そのため、補正なしの再生像との主観評価を行うことによって、補正による画質の劣化が認められるかを評価した．Fig. 5 より補正を強めるに従い、再現性が低下していることがわかる．同時に回折効率が向上しているため、シミュレーションの結果よりも劣化するが、同じ傾向が得られることがわかった．また、十分に高い SSIM を維持できる場合、回折効率が高いほうが主観評価では高い評価を得ることができたため、回折効率も主観評価を行う上で重要な評価項目だと言える．

5.2. 位相ホログラム

位相ホログラムの折れ線補正における画質評価を Fig. 7 に、その再生像を Fig. 8 に示す．結果より振幅型と同様、主観評価と客観評価に相関があることがわかる．しかし、主観評価においては、スペックル状のノイズが大きく、主観評価結果に強い影響があることがわかる、ノイズを取り除くことができれば改善することができると考えられる．

6. むすび

CGH の画質評価として SSIM と回折効率を用いることの妥当性検証を行った．文献[5]の研究結果と比較し、SSIM と回折効率による評価方法は適切であるといえることがわかった．しかし、位相ホログラムの光学再生を行っておらず、光学再生における主観的画質評価を行っていない．そのため、同様の実験を行い、画質評価を行う必要がある．

また、光学再生を行うとノイズが多くシミュレーションの評価をそのまま扱うことができないという問題がある．本研究で用いた光学系では、スペックルノイズを考慮せずに再生を行ったためである．今後は、このスペックルノイズがどれだけ客観的画質評価に影響を与えるか光学系を変更し比較していく予定である．

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP16K00282 の助成を受けたものです．

文 献

- [1] H. Yoshikawa : “Computer-Generated Holograms for White Light Reconstruction” , In T.-C. Poon(Ed.), Digital Holography and Three Dimensional Display, Springer, pp.235-255 (2006)
- [2] 中村将基, 山口健, 吉川浩 : “計算機合成ホログラムへのプログレッシブフォトンマッピングの導入”, 映像情報メディア学会技術報告 pp211-214(Mar 2013)
- [3] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh and E. P. Simoncelli : “Image Quality Assessment : From Error Visibility to Structural Similarity”, IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, VOL.13 No.4 pp.600-612 (Apr 2004)



(a) (b) (c)

Fig. 6. Optical reconstruction polyline correction images for amplitude transmission hologram.

(a) $\alpha = 0.9$, DE = 0.69%, DMOS = 4.33

(b) $\alpha = 0.5$, DE = 1.45%, DMOS = 3.93

(c) $\alpha = 0.2$, DE = 3.12%, DMOS = 2.86

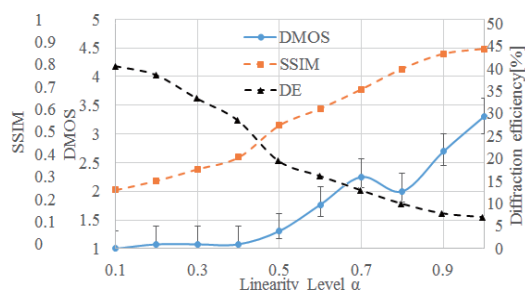


Fig. 7. Diffraction efficiency, SSIM and DMOS against linearity for phase transmission holograms.

(Simulation reconstruction)



(a) (b) (c)

Fig. 8. Simulation reconstruction polyline correction images for phase transmission hologram.

(a) $\alpha = 1.0$, SSIM = 0.870,

DE = 6.89%, DMOS = 3.31

(b) $\alpha = 0.5$, SSIM = 0.537,

DE = 19.37%, DMOS = 1.31

(c) $\alpha = 0.2$, SSIM = 0.296,

DE = 38.52%, DMOS = 1.08

- [4] 植竹啓貴, 山口健, 吉川浩 : “計算機合成ホログラムの非線形変換による画質制御”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol39, A1215-109 pp13-16(Sept 2015)
- [5] 植竹啓貴, 山口健, 吉川浩 : “構造類似度を用いた計算機合成ホログラムの客観的評価方法の検討”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol40, No29,AIT2016-148 pp.5-8 (Sept 2016)
- [6] NTT : “通信トラヒック品質プロジェクト”, http://www.ntt.co.jp/qos/technology/visual/01_5_3_h.html

可視光通信を用いた計算機合成ホログラムの伝送と再生 —バンドパスフィルタを用いた再生像の改善—

戸塚真隆[†] 高野邦彦[‡] 松本充司^{†3} 佐藤甲癸[†]

[†] (元) 湘南工科大学

[‡] 東京都立産業技術高等専門学校

^{†3} 早稲田大学

あらまし 三次元を表示するホログラムの場合、可視化するため再生照明光が必要となる。すなわち、ホログラムの伝送と再生が可能である可視光の利用が有効である。しかし、従来の通信の電波や IrDA (Infrared Data Association) の赤外線での利用は再生困難であった。そこで、半値幅の狭いバンドパスフィルタを用いて分散の影響を低減して再生像の改善をした上で、IrSimple 技術に可視光デバイスを適用して可視光通信の可能性を検討し、可視光技術に IrSimple プロトコルを適用して計算機合成ホログラムの伝送および再生したので報告する。

キーワード IrSimple, デジタル空間可視光通信, 干渉縞型計算機合成ホログラム

Transmission and Reconstructed of the Computer Generated Hologram using the Digital Wireless LED Visible Light Communication

— Improvement of the reconstruction image using the band pass filter —

Masataka TOZUKA[†] Kunihiro TAKANO[‡] Mitsuji MATSUMOTO^{†3} and Koki SATO[†]

[†] Former of Shonan Institute of Technology

[‡] Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology

^{†3} Waseda University

Abstract In the case of a hologram displaying three dimensions, reconstruction illumination light is necessary to visualize it. In other words, the use of the visible light that transmission and the reconstruction of the hologram are possible is effective. However, the use in infrared rays of an electric wave and the IrDA (Infrared Data Association) of the conventional communication was hard to reconstructed. Therefore we reduced influence of the dispersion using a narrow band pass filter of the half bandwidth and improved the reconstruction image. After having carried out activity, we applied a visible light device to an IrSimple technology and examined possibility of the visible light communication. Thus, we apply IrSimple protocol to a visible light technology and report it in the transmission of the computer composition hologram and the one which reconstructed.

Keyword IrSimple, Digital wireless LED visible light communication, Interference fringe type computer generated hologram

1. まえがき

従来、ホログラムの作成には光の干渉現象を利用して製作され、二光束以上の光の干渉を用いるため大規模な光学系が必要であった。しかし、近年、計算機合成ホログラム (CGH) では、光の干渉を計算機上で合成するため大規模な設備の必要がなく、高精細液晶パネルを用いたホログラムの立体 (3D) 再生が行われている。将来は、携帯端末を用いてホログラムの 3D 再生が期待されている。本論文は、携帯端末に CGH のホログラムを伝送するため、白色発光ダイオード (白色 LED) を用いた可視光で IrSimple プロトコルの通信する場合の適用性について検討する。512×512 画素の干渉縞型 CGH パターンは、パソコンを使って、リアルタイムで実写像の二次元 (2D) 動画入力して、ホログラムの基本式を成立させる計算機プログラムの流れ

により、振幅と位相から光学干渉系を使わず干渉縞型 CGH パターンを作成するのである。この反射ホログラムパターンは 256 階調の単色イメージである。また、パターンを表示した LCOS 素子と観測者の間に特殊な光学系を必要としない単純な光学系であり、レンズ項とプリズム項を埋め込んだパターンは、0 次光と高次回折光などの不要光の間に再生像が現れるのである。両項は限りなくホログラム面の近くに光学レンズが入ることと同様の効果を得られる。この三次元を表示するホログラムの場合、可視化するため再生照明光が必要となる。すなわち、ホログラムの伝送と再生が可能である可視光の利用が有効である。しかし、従来の通信の電波や IrDA (Infrared Data Association) の赤外線での利用は再生困難であった [1]-[3]。半値幅の狭いバンドパスフィルタを用いて分散の影響を低減して再生

像の解像度の改善をしたうえで、IrSimple 技術に可視光デバイスを適用して、可視光通信を可能にした例は見当たらない[4]-[11]。可視光技術[12][13]に IrSimple プロトコル[14][15]を適用して、ホログラムの再生光を兼ねた可視光通信方式により、計算機合成ホログラムの伝送および再生したので報告する。

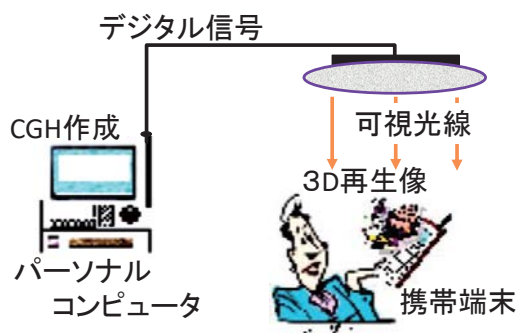


図1 可視光を利用したシステムの概念図

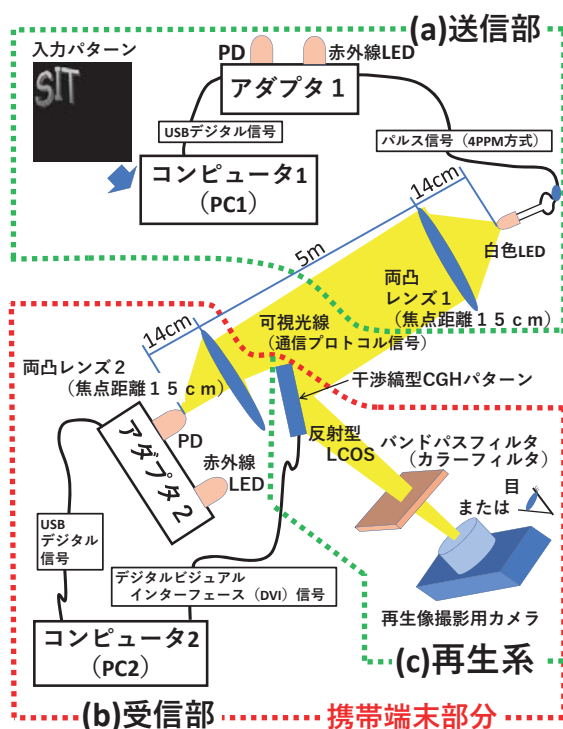


図2 可視光通信システムのブロック図

2. 白色 LED と IrSimple の可視光通信へ適用

図1は可視光により CGH を再生している様子を示したものである。ここで、可視光線は CGH の再生像を可視光により再生するとともに、可視光線に IrSimple プロトコルを利用して制御情報を受信側に送るものである。

IrSimple 規格では、相手からの応答を必要とし再送処理を行う双方向通信及び再送処理を省き相手からの応答を必要としない片方向通信という2つの通信方式を定義している。本実験では光学系を簡素にするために、通信プロトコルの片方向通信を使用した。しかし、双方向通信の可視光化も、本論文の方式を可視光線2本にする応用で可能である。図2に本実験系の可視光通信システムのブロック図を(a)送信部と(b)受信部に分けて示す。

図2 (a)の送信部のコンピュータ 1(PC1)に接続した IrSimple のアダプタ 1【LB 技研合同会社製 LBIR5100, 変調方式: 4PPM(Pulse Position Modulation)】の変調信号を取り出し、赤外線発光ダイオード(LED: Light Emitting Diode)と指向性の強い高輝度白色 LED (日亜化学工業株式会社製 NSPW500DS) [16]へ接続する。なお、図3は白色 LED のスペクトラムが、780nm 以降の赤外線を含んでいないことを示したものである。

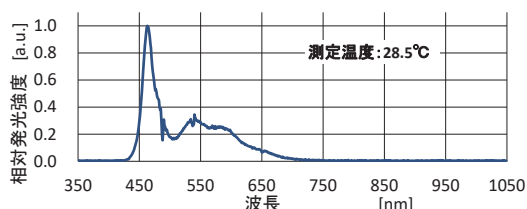


図3 白色 LED のスペクトラム

図2 (b)の受信部のコンピュータ 2(PC2)に接続した IrSimple のアダプタ 2【LB 技研合同会社製 LBIR5100, 変調方式: 4PPM】のフォトダイオード(PD: Photo Diode)で信号を受信する。受信した干渉縞を、反射型 LCOS (Liquid-crystal on silicon) 素子に表示する。

3. 実験方法

3-1 本伝送システムの確認方法

図2に実験で用いた系のブロック図を示す。また、焦点距離が 15cm の両凸レンズ 1, 2 を 14cm の位置に加え、白色 LED から PD 側までの 5m を、わずかに収束な光線に合わせた伝送システムを使用した。この光線をレンズ 2 でまとめれば、5m 以上の間隔距離に対応できると考えられる。伝送前後のパターンをピーク信号対雑音比 (PSNR: Peak Signal to Noise Ratio) と信号波形で通信品質を確認する。

3-2 白色 LED の通信プロトコル信号による再生像の確認方法

図2に示す通信プロトコル信号と同等の可視光によって、干渉縞型 CGH パターンの再生をする。赤色のバンドパスフィルタ (カラーフィルタ) を用いて分散の影響を確認する。また緑色と青色のバンドパスフィルタを用いて再生をする。

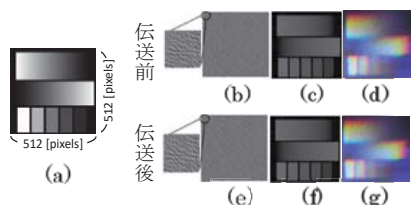


図4 伝送前後のパターン

4. 結果と検討

4-1 通信結果についての検討

4-1-1 伝送前後の再生像の検討

図4 (a)の 512×512 画素の入力パターンから図2 (a)に示す PC1 を使って CGH を作成した。伝送前は、256 階調の単色イメージで図4 (b)の 512×512 画素の CGH パターンと一部分の 64×64 画素の拡大画像を示した。図4 (c)は伝送前のパターンのシミュレーション結果画像、図4 (d)は伝送前のパターンの光学的な再生像を示した。伝送後は、図4 (e)の 512×512 画素の CGH パターンと一部分の 64×64 画素の拡大画像、図4 (f)のパターンのシミュレーション結果画像と図4 (g)のパターンの光学的な再生像を示した。また図4 (c)と(f)のシミュレーション結果画像を比較して通信品質を確認した。PSNR で評価した結果、平均二乗誤差 (MSE: Mean Squared Error) は 0.0 であり、二つの画像が同一であることが示された。パターンの 24bit フルカラー画像は、512×512 画素で 768 kB の容量であった。また、平均通信時間は 3.5 sec であった。

4-1-2 光学系の検討

図2に示すようにレンズを設置し、光線の強度を改善し情報伝達の距離を増やした。レンズがない場合は、3 cm の距離の通信であった。しかしレンズを用いて 5 m 以上もの通信が可能となった。通常の携帯端末の仕様を考えると、室内の天井までの高さが 3 から 4m 程で受信できればよく、再生も同じである。また、情報伝達の距離は、光出力と受光感度の影響が大きい変数である。それぞれの変数は距離に比例関係である。本実験では使用する白色 LED と PD が、購入品であるため光出力と感度を上げることはできなかった。受光感

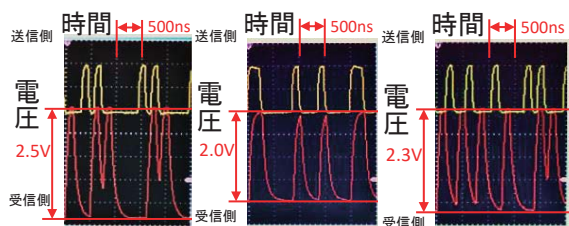


図5 送受信パルス波形の観察

度について、IrSimple に使用される PD の波長感度特性は、赤外線領域にピークがある。これを可視光線に適用するには、PD の低感度領域だが、レンズによる集光で通信が可能となった。また、集光され光が狭まるため、秘匿性が高いことが確認できた。

4-1-3 PD の電気的な検討

図5に送受信パルス波形の観察結果を示す。上の黄色は、送信波形で LED 制御信号の駆動電圧を示す。下の赤色は受信波形で、アダプタ2の PD 出力波形とアダプタ2に外付けした波形モニタ出力を示した。図5 (a)の受信可能な PD 出力波形は、ピークからボトムとの波形でおよそ 2.5 V である。図5 (b)の受信不可能の PD と波形モニタ電圧出力の 2 V は、2.3 V を超えていない。この CMOS タイプ回路 $V_{cc} = 3.3$ V の静的特性の最小値は 2.3 V である。この電圧を越えて受信可能にするには、受光に対する電圧を増やすことが必要である。その受光感度が高くなれば、通信距離を延長できる。

4-1-4 アイパターンによる検討

図6にアイパターンによる通信品質の評価を示す。まず、IrSimple の 4 PPM 変調方式の場合の測定条件は、周期 500 ns = 周波数 2 MHz の M 系列発生器 (7 段) の出力信号を使って、4-1-3 章の良好な通信が可能な距離である。図6 (a)のジッタ、オーバーシュートとアンダーシュートが小さく、品質の良いアイパターンといえる。しかし、図6 (b)のように信号速度が速くなると、比例してジッタ、オーバーシュートとアンダーシュートが大きくなり品質が悪いアイパターンになる。信号の電圧が低くなり通信不可能となる。

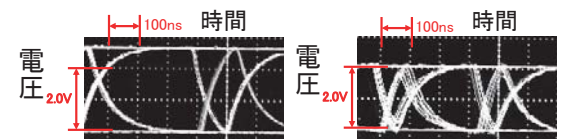


図6 アイパターンの観察

4-1-5 BER(Bit Error Rate)の特性による検討

図7に受光パワーと BER の関係を示す。ここでは、変調方式として 4 PPM 方式を利用し、BER を 10^{-4} 以下に抑えるには、0 dBm (1 mW) 以上の光入力が必要である。

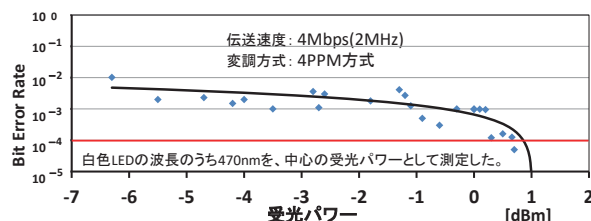


図7 受光パワー対 BER 特性

4-2 白色 LED の通信プロトコル信号による再生像

白色 LED の通信プロトコル信号の光による再生系を図 2 (c) 再生系に示す。この系を用いて 5 m 以上の距離で白色再生像がえられ、波長特性は図 8 の点線のとおり広い。その白色再生像を 470nm・540nm・650nm バンドパスフィルタ (eo TECHSPEC Bandpass Filter : 65144,65218,65170,86657) で分光した波長特性を図 8 の実線に示す。本実験でフィルタの半値幅 25nm を選択した。しかし、この波長帯も広いため再生像にカメラ (Nikon 製:D500 本体/AF-S MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8G レンズ) の焦点が波長によって一致しないためにぼけることがわかった。波長帯が狭いほど高解像度になることは知られている。フィルタの半値幅を 25nm から 10nm に狭めることにより、解像度の上がった像を観察できた。

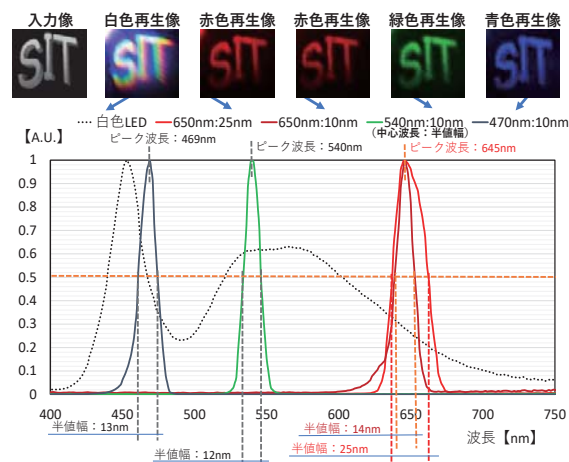


図 8 フィルタを使った再生像と波長特性

5. 結論

白色 LED を用いた IrSimple の片方向通信は、3D データの干渉縞の高速デジタル可視光通信を行なうことができ、通信に用いたのと同じ光で再生するため、有望な技術であるとわかった。また、IrSimple の適用により、容易に開発が行えた。今後の展望である干渉縞の 3D データは、2D データとして扱えるため、情報量が余り増加しないと筆者らは考えている。しかし、IrSimple の片方向通信を用いた可視光通信は、動画で 4K・8K の高解像度になった場合に影響が出ている。この対応のために、IrSimple を 4 Mbps より高速にするか、新しい変調方式や干渉縞の最適な圧縮技術などを導入する必要があるといえる。今後、これらの問題が解決されると、動画のリアルタイム情報通信を行なうことも可能であると考えられる。

文 献

[1] 高野邦彦, 若林良二, 岡村悦章, 野村大輔, 青山

浩久, 秋山裕紀, 武藤憲司, 鈴木弘, 島田一雄: “SSTV を用いたホログラフィ立体画像の無線伝送法”, 映像情報メディア学会誌, Vol.57, No.12, pp.1770-1773 (2003).

- [2] 高野邦彦, 武藤憲司, 佐藤甲癸, 藍天, 趙洪明: “赤外線通信を用いたホログラフィ立体画像伝送”, 電子情報通信学会総合大会, D-11-77, pp.77 (2007).
- [3] 高野邦彦, 野口幹容, 甲谷佑太, 宝地戸俊介, 藍天, 佐藤甲癸, 武藤憲司: “動画ホログラムの無線伝送に関する基礎検討”, 画像電子学会誌, Vol.37, No.5, pp.645-650 (2008).
- [4] 近藤那樹, 北岡涼太郎, 水野翔太, 中條渉: “120fps イメージセンサと 16 素子 LED アレイを用いた可視光通信のシンボルレート限界とビットレート”, 信学技報, WBS2016-1, pp.1-5 (2016-05).
- [5] 松田勇介, 小澤佑介, 榎田洋太郎: “RGB-LED アレイを用いたデジタル制御型 CSK 信号の照明色温度とその周波数”, 信学技報, WBS2016-5, pp.23-28 (2016-05).
- [6] 望月輝, 藤本暢宏: “三原色型白色 LED による高速照明光通信の一検討”, 電子情報通信学会総合大会, B-10-102 (2012).
- [7] 吉留祐樹, 佐々木良輔, 村口正弘: “雑音耐性に優れた可視光通信の検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, CMN-14-48, pp.73-77 (2014).
- [8] 原田亮, 戸川真, 村口正弘: “OFDM による可視光通信システムの研究”, 電子情報通信学会技術研究報告, MW2012-45, OPE2012-38, EST2012-27, MWP2012-26, pp.119-124 (2012).
- [9] 田口靖洋, 網野翔太, 宮保憲治, 島田尊正: “可視光通信を活用した放射線警告用照明システムの検討”, 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会, AS-2-3 (2012).
- [10] 田中仁, 萬代雅希, 渡辺尚: “二次元コードを用いた可視光通信の基礎考察と実験について”, 第 8 回情報学ワークショップ, pp.165-170 (2010).
- [11] 北村匡彦, 苗村健: “DMD を用いた空間分割型可視光通信の基礎検討”, 第 5 回情報科学技術フォーラム, LK-010, pp.293-295 (2006).
- [12] 戸塚真隆, 佐藤甲癸, 大木眞琴, 高野邦彦, 瀧本幸男, 松本充司: “白色 LED を用いたホログラムの光空間伝送および立体像再生の特性改善”, Wireless Technology Park 2012, pp.29-30 (2012).
- [13] 戸塚真隆, 高野邦彦, 大木眞琴, 松本充司, 佐藤甲癸: “可視光通信システムによる計算機合成ホログラムの伝送と再生”, 画像電子学会誌, Vol.45, No.1, pp.27-31 (2016).
- [14] 直江仁志, 深江文博, 山口久美子, 松本充司: “IrDA 次世代高速赤外線通信標準方式「IrSimple」”, 画像電子学会誌, Vol.35, No.5, pp.598-602 (2006).
- [15] 直江仁志, 深江文博, 酒井宏仁, 大澤昇平, 神之門司, 中島孝士, 豆田憲治: “高速赤外線通信プロトコル IrSimple の標準化”, ジャープ技報, Vol.95, pp.63-68 (2007).
- [16] 日亜化学工業株式会社: 白色 LED 標準仕様書 NSPW500DS, NICHIA STS-DA1-1476A <Cat.No.110318>.

動画像を用いたホログラフィック3Dタッチ

中村 友哉^{†,‡} 桜井 爽馬[‡] 山口 雅浩[‡]

[†]東京工業大学工学院 〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259-G2-28

[‡]JSTさがけ 〒102-0076 東京都千代田区五番町7

E-mail: [†]nakamura.t.bj@m.titech.ac.jp

あらまし 我々はホログラム光学素子とプロジェクタにより構成されるライトフィールドディスプレイを提案している。これにより形成される三次元実像は接触可能であり、接触は散乱光検出により検知可能である。この原理（ホログラフィック3Dタッチ）を利用したインタラクティブなディスプレイ及びユーザインタフェースを我々は研究している。今回は、動画像を用いたホログラフィック3Dタッチについて、原理と実験結果を紹介する。

キーワード ホログラフィ、ライトフィールド、インタラクション

Holographic 3D Touch with Moving Images

Tomoya NAKAMURA^{†,‡} Soma SAKURAI[‡] and Masahiro YAMAGUCHI[‡]

[†]School of Engineering, Tokyo Institute of Technology 4259-G2-28 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8502 Japan

[‡]JST PRESTO, 7 Gobancho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0076 Japan

E-mail: [†]nakamura.t.bj@m.titech.ac.jp

Abstract We proposed light-field display composed of holographic optical element and projector. Three-dimensional real image formed by the display can be touched, and the touch can be detected by capturing scattered light. We are studying interactive display and user interface using this principle (holographic 3D touch). In this report, we introduce the principle and experimental results on holographic 3D touch using moving-image projection.

Keyword Holography, Light field, Interaction

1.背景

近年 Kinect[1]やLeap motion[2]などに代表される、ジェスチャ認識を用いた3Dユーザインタフェース（UI）が注目されている。現在普及している多くの3DUIは、3Dの操作空間と2Dの映像表示を基にしているため、操作空間と映像空間が原理的に一致しない。一方、3Dの映像表示に基づく3DUIを構築できれば、操作空間と映像空間を一致させることができるため、より直感的で誰にでも使いやすいUIを実現できると考えられる。このようなシステムが実用化されれば、次世代型のデジタルサイネージや情報入力装置などへの応用が期待される。

我々はホログラム光学素子とプロジェクタを用いた光線再生方式全視差型フルカラー3Dディスプレイ[3,4]と立体像接触検知システムを統合したホログラフィック3DUIを研究している[3]。システムの構成を図1に示す。立体像への接触検知はカメラによる散乱光の撮影と色識別処理に基づき実装される。このアルゴリズムにより、接触対象の認識を接触物体の位置を未知としたまま実現できる。

これまで、空中に静止立体像として表示された7色のボタ

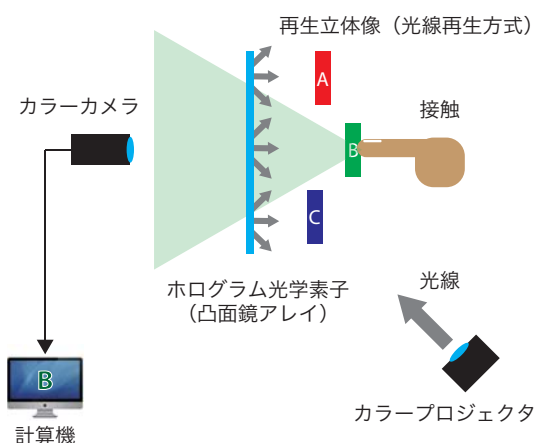


図1. ホログラフィック3DUIのシステム構成。カラープロジェクタとホログラム光学素子による光線再生によりカラー立体像の表示を行う。カラーカメラと計算機によりタッチの判定と接触物体の識別を行う。

ンを操作するUIのデモンストレーションを報告した[5]. 色識別処理の前処理として背景差分処理によるホログラム光学素子由来の散乱光除去が必要となるが, 立体像を動画化する場合, 背景画像を投影画像に同期させて動的に更新する必要が生じる. 本報告では, このような処理フローの開発に基づく動画立体像に対応した3DUIについて報告する.

2. 動画像に対する3Dタッチ検出

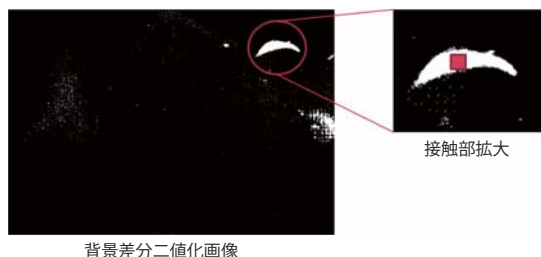


図2. 立体像接触時の背景差分画像の例.

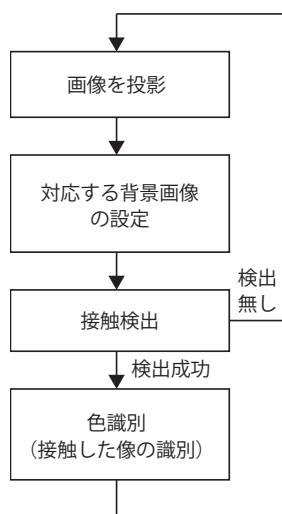


図3. 動画像を用いたホログラフィック3DUIの処理フロー.

ホログラフィック3DUIは, 光線画像投影, カメラによる撮像, 取得フレームに対する信号処理, 投影光線画像の更新により構成される. 取得フレーム処理では, まず不要成分除去のために背景差分を計算し, 次に二値化, 領域抽出, 及び面積閾値処理に基づき立体像へのタッチの有無を判定する. 立体像をタッチした際の背景差分二値化画像の例を図2に示

す. 立体像へのタッチが検出された場合, 散乱光の色識別処理により接触した像 (位置) を識別する.

静止立体像表示の場合, 事前に一枚の背景画像を用意し, この単一背景画像をフレームごとの背景差分計算時に使用すれば十分であった. 一方, 背景画像はホログラム光学素子による投影画像の散乱光の情報も含むため, 投影画像を動画化する場合にフレームごとに個別の背景画像を用意する必要が生じる. 今回, 投影画像の動画化のため, 事前に全投影画像に対する背景画像を計測・登録しておき, 投影画像の更新ごとに背景画像を併せて更新する処理フローを実装した. 処理フローを図3に示す.

3. 実験



図4. 実験光学系.

動画像を用いたホログラフィック3Dタッチの実証実験を行った. 実験光学系を図4に示す. また, 実験光学系のパラメータを表1に示す. DCI4K解像度の液晶プロジェクタによる投影光線を凸レンズでコリメートし, ホログラフィックスクリーン (ホログラム光学素子によるスクリーン) に入射させた. ホログラフィックスクリーンとして, フルカラー凸面鏡アレイの機能を有するホログラム光学素子を用いた. ホログラム光学素子はフォトリソ材料を用いて露光した. ホログラムの露光はホログラムプリンタを用いて実施した[3,6]. 凸レンズの後側に傾けた鏡を挿入し, 投影光線の光路を上方に変調することで, 回折光がホログラム光学素子の正面側に生じるよう設定した. タッチ検出及び接触像識別のため, ホログラフィックスクリーンの背面にカラーCCDカメラを配置した. 実像の再生距離は全て20mmと設定した.

表1. 実験光学系パラメータ.

プロジェクタ	VPL-VW500ES
プロジェクタ画素数	4096×2160
要素ホログラムサイズ	1mm × 1mm
要素ホログラム数	120 × 67
ホログラム記録材料	フォトポリマー
ホログラムへの光線入射角	30°
立体像の視域	31°
ホログラム記録波長	473, 532, 633nm
カメラ	Flea2
カメラ画素数	1288 × 964
表示実像距離	20mm

表示した動画立体像、及び像の接触検知・識別のデモンストレーション結果を図5に示す。再生像として、位置関係が異なる三つの果物の画像を4フレーム分用意した。これらを時間とともに入れ替えることで、動画立体像とした。動画立体像に対して接触が判定された場合、接触された像のみを残して立体像表示を行うシステムを実装した。例えば図5のフレーム1の像を表示している時間内に黄色の像に接触した場合、黄色の像のみが残って表示されることを確認し、システムの良好な動作を確認した。実験により、ホログラフィック3DUIにおいて動画立体像を表示した場合でも、立体像への接触検知、及びそれによる立体像と人のインタラクションが良好に動作することを実証した。

4. 今後の課題

今回、全ての表示フレームに対して背景画像を事前計測した。しかし、システムの実利用の際は周辺環境も時々刻々と変化するため、背景画像計測がシステムの動作と並行して動作し、背景画像が動的に更新されることが望ましい。現在のアルゴリズムでは、システムの動作と背景画像計測を同時に行った場合、例えば接触物体やユーザなど背景ではない物体が意図せず背景画像として映り込む状況が発生する。これを回避するためには、不要物体の映り込みが無い状況の認識処理をシステムに組み込むことが有効であると考えられる。

また、システム全体として、色識別精度の向上が重要な課題である。現在のマハラノビス距離を用いた色分類アルゴリズムでは、7色のボタンの立体像表示を行った場合の識別精



再生像フレーム 1



再生像フレーム 2



再生像フレーム 3



再生像フレーム 4



再生像フレーム 1 への接触



接触した物体の表示 (識別結果)

図5. 実験結果。4フレームの画像を時間とともに変えながら表示することで、動画立体像表示とした。接触物体のみを残して表示するシステムを実装し、動作を確認した。

度は49%である[5]. 識別精度向上のためには, ホログラム光学素子による投影光の直接反射の除去や素子の回折効率の改善, 及び像表示距離の拡大が必要であることが分かっている. 光学系及びホログラム素子のパラメータの再設計により, 今後識別精度の改善に取り組む.

5. おわりに

ホログラフィック3DUIにおいて, 事前に登録した背景画像の選択を投影光線画像に同期させることで, 投影画像に動画像を用いた場合でも接触検知が良好に動作することを実験により確認した. 今回, 全投影画像に対応する背景画像を事前に計測して取得したが, 今後は立体像表示を行いながら背景画像を自動取得する手法を検討する. 併せて, これまで事前生成を前提としていた投影画像に関しても, システムを動作させながらその場でリアルタイムに計算・生成する手法を検討し, より幅広い表現が可能で実環境にインタラクティブな3DUIの実現を目指す.

謝辞

本研究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. また, ホログラムの記録材料はCovestro Deutschland AGから提供されたものを使用した.

文 献

1. “Kinect,” <http://www.xbox.com/ja-JP/xbox-one/accessories/kinect>.
2. “Leap Motion,” <https://www.leapmotion.com/>
3. M. Yamaguchi and R. Higashida: “3D touchable holographic light-field display”, Appl. Opt., 55, 3, pp. A178-A183 (Jan. 2016)
4. K. Hong, J. Yeom, C. Jang, J. Hong, and B. Lee, “Full-color lens-array holographic optical element for three-dimensional optical see-through augmented reality”, Optics Letters 39, 1, pp. 127–130 (2014).
5. S. Sakurai, T. Nakamura, and M. Yamaguchi: “The use of color in scattered light for 3D touchable holographic light-field display”, JSAP-OSA Joint Symposium, 13a-C301-4 (Sept. 2016)
6. M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, “Holographic three-dimensional printer: new method”, Appl. Opt. 31, 2, pp. 217–222 (Jan. 1992).

平成 29 年第 3 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

- 開催日： 2017 年 9 月 15 日（金）13:00～17:15
 - 場 所： 東京工業大学 大岡山キャンパス 南 2 号館 2 F S222 講義室
東急目黒線・大井町線 大岡山駅下車、徒歩 6 分
 - テーマ： 立体映像およびホログラフィー
 - 共 催： 映像情報メディア学会
映像表現&コンピュータグラフィックス研究会
立体映像技術研究会
 - プログラム：
 - (1) 計算機合成ホログラムにおける視点移動に伴う視覚効果
○五十嵐俊亮・中村友哉（東工大）・石井勢津子（作家）・
松島恭治（関西大）・山口雅浩（東工大）
 - (2) フルカラーコンピュータホログラフィ用ソフトウェアツール群の開発
○松崎昭太・小林昂一郎・松島恭治（関西大）
 - (3) 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
○五十嵐勇祐・土山泰裕・松島恭治（関西大）
 - (4) 縮小光学系のレンズ変更によるフリンジプリンタの高精細化
○岩本拓己・山口 健・吉川 浩（日大）
 - (5) 波面再生型フルカラー体積ホログラムプリンタの作製
○廣橋美葵・山口 健・吉川 浩（日大）
 - (6) ホログラフィ計算における三角関数簡易近似手法の高精度化
○西辻 崇（三菱電機）・下馬場朋禄・角江 崇（千葉大）・
奥村誠司（三菱電機）・伊藤智義（千葉大）
 - (7) 計算機合成ホログラムにおける客観的評価方法の妥当性検証
○植竹啓貴・吉川 浩・山口 健（日大）
 - (8) 可視光通信を用いた計算機合成ホログラムの伝送と再生
～ レンズ項の改良とバンドパスフィルタを用いた再生像の改善 ～
○戸塚真隆，高野邦彦（都立産技高専）・松本充司（早大）・佐藤甲斐
 - (9) 動画像を用いたホログラフィック 3D タッチ
○中村友哉・桜井爽馬・山口雅浩（東工大）
- 情報コーナー

■ 問合せ先

・担当幹事

東京工業大学 山口雅浩 （E-mail: yamaguchi.m.aa@m.titech.ac.jp ）

・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 29 年第 4 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：2017 年 11 月 17 日（金）13:00～17:00

■場 所：金沢大学サテライトプラザ 3F 集会室

920-0913 金沢市西町三番丁 16 番地

http://www.adm.kanazawa-u.ac.jp/ad_koho/satellite/

■テーマ：ホログラフィにおける計算の高速化

■プログラム

コンプレッシブホログラフィの GPU 高速化

遠藤優（金沢大），下馬場朋禄，角江崇，伊藤智義（千葉大）

汎用的なネットワークを用いた GPU クラスタシステムによるリアルタイム

電子ホログラフィの検討

高田直樹，老川稔，三宮廣海，前田祐貴（高知大），

中山弘敬（国立天文台），角江崇，下馬場朋禄，伊藤智義（千葉大）

空間周波数分割多重記録を行なうデジタルホログラフィにおける

高速像再生アルゴリズム

田原樹(関西大)，赤松 孝則(千葉大)，新井泰彦(関西大)，

下馬場朋禄，伊藤智義，角江崇(千葉大)

スイッチバック法隠面消去の高速化(仮題)

松島恭治（関西大）

GPU を用いたイメージ型ホログラムの再生シミュレーション

山口 健（日大）

■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

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 洵（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（久保田おぐら工房）	酒井 朋子（千葉大学）	坂本 雄児（北海道大学）
佐藤 甲癸（早稲田大学）	佐藤 俊一（シャープ）	下馬場朋禄（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）	渡邊恵理子（電気通信大学）

相 談 役（５０音順）

上田 裕昭（エコミナルグ・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）	三田村峻右
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. 37, No. 3 (Sep. 2017)

2017 年 9 月 15 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 にてお願いいたします。

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