

## ホログラムの思い出や現在の取り組みについて

情報通信研究機構 涌波光喜

私が初めてホログラムに触れたのは、Lightrix 社の Red beam シリーズのホログラムでした[図 1]。部屋の蛍光灯や太陽光で見え方の変わるホログラムを見て、照明の難しさや奥深さを感じたことをよく覚えています。大学院生時代は、年に一回「すずかけ祭」というオープンキャンパスのような催しがあり、研究室でホログラム紹介ブースが設けられ、普段はなかなか見ることができないホログラムが展示されましたが、その時に飾られていた久保田先生の「日本人形」の存在感に感銘を受けました。大学院の卒業旅行ではガボール先生の母国ハンガリーに行き、博物館で王冠のマルチプレックスホログラムを見て、その品位に改めてホログラムの魅力を再認識しました。

現在、私はホログラムプリンタに係る研究をしています。電子ホログラフィで再生した光波を物体光としてホログラム記録材料に記録する波面印刷に基づき、20cm 四方に 3,000 億画素程度の CGH データを反射型ホログラムとして記録しています[図 2]。

(1 ページにつづく)

### 目 次

1. 巻頭言：ホログラムの思い出や現在の取り組みについて	涌波光喜 表紙
2. フルカラー積層体積型 CGH における基板収差の補正	國枝織絵, 他 2
3. 大型の 3D 室内空間を再生する計算機合成ホログラムの計算法	五十嵐俊亮, 他 6
4. ホログラフィ計算における三角関数近似手法の回路設計と評価	西辻 崇, 他 10
5. 電子ホログラフィ専用計算機 HORN-8 を用いた 3 次元映像システム	山本洋太, 他 14
6. 平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡デモシステム	井元克駿, 他 18
7. インデックスマッチング法と MEMS 技術を融合したデジタルホログラフィック	
PTV 法によるマイクロピラー周りの流体計測	松田康寛, 他 22
8. 次回研究会のお知らせ	巻末

元々は3次元データの出力方法として研究をスタートしましたが、近年はホログラフィック光学素子(HOE)の作製技術としての研究にも取り組んでいます。図3は、波面印刷で作製した凹面鏡アレイのHOEを使った投影型ライトフィールド3Dディスプレイの再生例です。被写界深度は限られますが通常のプロジェクタを使って広い視域に立体映像を提示可能です。また、図4は、波面印刷で作製した軸外し凹面鏡のHOEを使った投影型ホログラフィック3Dディスプレイの再生例です。視域は限定的ですが任意の奥行きにホログラム映像を提示することができます[図はHOEスクリーンの後方1,000mmの位置にホログラム映像を結像した例]。現在は千葉大学の伊藤・下馬場・角江研究室と共同で視域の制御に関する研究や当ディスプレイに特化したホログラム計算に関する研究にも取り組んでいます。波面印刷で作製したHOEの実用化に向けては課題も多いですが、回折角の誤差の計測・補正による回折光学素子としての精度の向上や、温度特性・角度選択性の測定、アプリケーションに応じた記録条件の最適化による位相整合性の考慮などに取り組んでいます。波面印刷のフルカラー化にも取り組んでおり、フルカラー対応のHOEスクリーンの作製も行っています[図5]。3波長で多重記録した際のクロストークの影響など、高い回折効率を得るにはまだまだ条件だしや最適化が必要で、HODIC Circularの記事や皆様の学術論文・教科書を読みながら日々勉強させて頂いています。波面印刷で作製したHOEの利用分野の開拓も必要だと感じております。小型衛星の数が飛躍的に増える将来に向けて、東海大学の高山研究室と空間光通信用のHOEに関する研究を行っています。体積型ホログラムの多重記録性、角度選択性といったおなじみの特徴が、機械駆動に頼る現状の受光部分の機能の置き換えとなる可能性があります。

ここ数年、自動車や家電分野でホログラフィを巧みに応用した技術の報道発表を目にすることが多くなってきました。これからの10年で、ホログラフィが今まで以上に生活に溶け込むのだと思います。ホログラフィの長い歴史の中で培われてきたアナログホログラムの技術が土台となり、そこに表示デバイスの高画素化、高機能化や計算機の処理能力の向上を受けたデジタルの魅力が組み合わさることで、今までにない新しいホログラフィ技術が生み出されることへの期待に胸が高鳴ります。



図1. Lightrix社Red beamシリーズ



図2. 波面プリンタの出力例

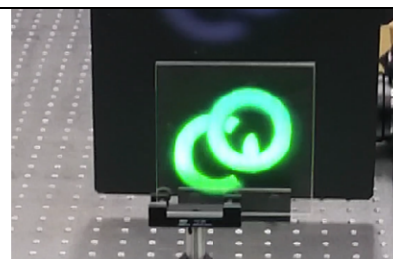
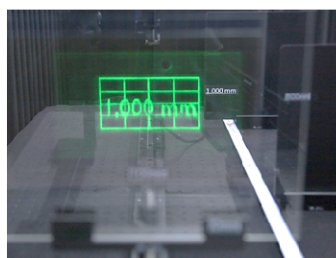
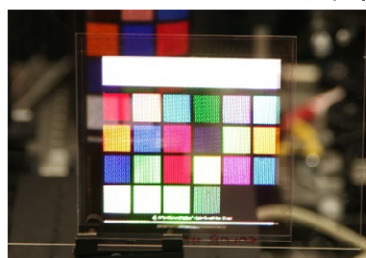
図3. 投影型ライトフィールド  
3Dディスプレイ図4. 投影型小ホログラフィック  
3Dディスプレイ

図5. フルカラーのHOEスクリーン

# フルカラー積層体積型 CGH における基板収差の補正

國枝 織絵<sup>†</sup> 松島 恭治<sup>‡</sup>

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: <sup>†</sup> kunieda@laser.ee.kansai-u.ac.jp, <sup>‡</sup> matsu@kansai-u.ac.jp

**あらまし** 計算機合成ホログラム(CGH)をフルカラー再生する手法として、積層体積型 CGH がある。この手法では、再生時に記録材料や原版 CGH のガラス基板の厚みによる収差が生じ、再生像に色ずれが発生してしまうことが大きな問題となっている。そこで本研究では、原版 CGH の計算においてガラス基板の厚みと屈折率を補正する手法の開発を行った。また、この手法を用いて、実際にフルカラー積層体積型 CGH の作製を行った。

**キーワード** 計算機合成ホログラム(CGH), フルカラー-CGH, 体積ホログラム

## Compensation for substrate aberration in creating stacked-volume CGHs

Orie KUNIEDA<sup>†</sup> Kyoji MATSUSHIMA<sup>‡</sup>

Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

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

E-mail: <sup>†</sup> kunieda@laser.ee.kansai-u.ac.jp, <sup>‡</sup> matsu@kansai-u.ac.jp

**Abstract** The technique of stacked-volume CGHs allow us to create full-color computer-generated holograms (CGH). But this technique has a severe problem of color smear. The CGHs created by this method simultaneously reconstruct three images in RGB colors. However, these images have a little position shift due to aberration caused by the thick glass substrates. To get over the problem, we present techniques to compensate thickness and refractive index of the glass substrate. Several full-color CGHs fabricated by the proposed technique are demonstrated to verify validity of the technique.

**Keyword** Computer-generated hologram(CGH), Full-color CGH, Volume hologram

### 1. はじめに

近年、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)が作製されるようになった[1]。このような高解像度CGHを作製する手法の一つは、計算機上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二値振幅画像として描画することである。

しかし、このように干渉縞パターンを二次元画像として描画する方法では、作製されるホログラムは薄いホログラムとなってしまう、波長選択性を持たない。そのため白色光源で再生すると色にじみを生じるだけでなく、フルカラー像を再生することも困難である。

CGHをフルカラー再生するために、ダイクロイックミラーを用いる手法や[2], RGBカラーフィルタ方式が提案されてきた[3]。ダイクロイックミラーを用いる手法では非常に鮮明なフルカラー再生像が得られるが、大型で複雑な再生光学系を必要とするため展示には不向きである。RGBカラーフィルタ方式では再生光学系が単純で持ち運びが容易であるが、作製時に干渉縞パ

ターンを短冊状に分割するため、鮮明な再生像が得られない。また、RGBカラーフィルタが広帯域であるため、特に奥行の深い像ではボケが生じる問題がある。

このようなCGHのフルカラー再生の問題を解決するため、積層体積型CGHを作製する手法が提案されている[4]。この手法では、三枚の原版CGHをコンタクトコピーして三枚のRGB体積ホログラムを作製し、それらを正確に重ね合わせることで一枚のホログラムとする。これによって作製されたホログラムは、持ち運びが容易でかつ鮮明な像を再生することができる。また波長選択性を有するため、白色光源による再生が可能である。しかしこの手法では、原版CGHや転写CGHのガラス基板の厚みにより収差が生じ、再生像に色ずれが発生してしまうことが問題となっている。

そこで本研究では、原版CGHの干渉縞パターンを計算する際にガラス基板の厚みと屈折率を補正する手法の開発を行った[5]。また、補正を行った原版CGHを用いて実際にフルカラー積層体積型CGHを作製し、補正を行わずに作製したフルカラー積層体積型転写CGHと再生像の比較を行った。

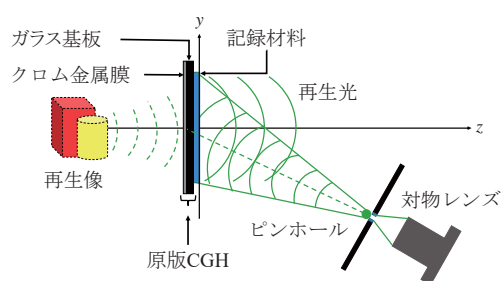


Fig.1 原版 CGH の転写方法

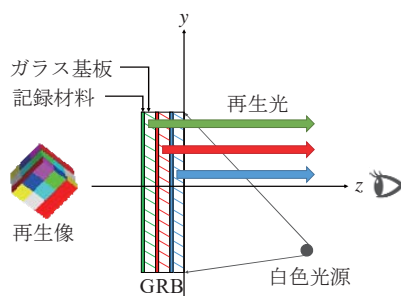


Fig.2 積層体積型 CGH の原理

## 2. 積層体積型 CGH の作製法

### 2.1. CGH の転写

レーザーリソグラフィで描画した金属膜干渉縞は高い反射率を有する。そのため作製された CGH は反射再生が可能であり、これを利用して、記録材料を透過して CGH を再生するデニッシュ型のコンタクトコピーが行える。Fig.1 にその原理を示す。記録材料を原版 CGH に密着させ、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、記録材料面側に照射する。この光は記録材料を通過して背面の原版 CGH に照明し、原版 CGH を反射再生する。この再生光が物体光として記録材料の背面から入射し、前面から入射する参照光と記録材料内で干渉する。このように物体光と参照光が記録材料を挟み込むように入射することにより、原版 CGH の再生光を体積ホログラムとして記録材料に記録することができる。

コンタクトコピーによって転写した CGH は波長選択性を有する体積ホログラムとなる。そのため、白色光源による再生が可能となる。

### 2.2. 転写 CGH の重ね合わせ

積層体積型 CGH では、RGB 三色に相当する原版 CGH をそれぞれ転写し、これらの転写 CGH を重ね合わせるによりフルカラー再生を行う。以下ではその原理について述べる。Fig.2 に示すように、三枚の転写 CGH を B, R, G の順に重ね合わせる。これに白色

光を入射すると、それぞれの転写 CGH が RGB 各色の単色像が再生し、それらが重なり合うことでフルカラー像が得られる。転写 CGH の重ね合わせの際、位置調整が不十分だと単色像が完全に重ならず最終的な再生像に色ずれが生じてしまうため、位置合わせは精密に行う必要がある。

## 3. 基板収差の補正

転写 CGH の干渉縞はガラス基板の背面側の記録材料面に記録されており、原版 CGH の干渉縞パターンもガラス基板背面のクロム金属膜に記録されている。転写時にも再生時にもガラス基板内で収差が生じるため、単純に RGB 三色の原版 CGH を転写し、重ね合わせるだけでは再生像が完全に重ならない。そこで本研究では、ガラス基板の厚みや屈折率を補正する手法を開発した。以下にその手順を示す。

まず、Fig.3 に示すように仮想物体から積層体積型 CGH 前面までの物体光波  $O(x, y, \lambda_p)$  を計算する。この物体光波は色ずれのない理想的な光波である。ここで、 $\lambda_p(p=R, G, B)$  は RGB 各色に相当する波長を表す。

次に、Fig.4 に示すように転写 CGH が BRG の順に重なっている状態を仮定し、 $O(x, y, \lambda_p)$  を記録材料面まで後方伝搬させる。この伝搬距離は BRG の順に長くなり、例えば G の場合は Fig.4 に示すように  $3d$  となる。またこの時、再生時にはガラス基板内を通過することから、後方伝搬計算における波長をガラスの屈折率に応じた値に変化させる。このように後方伝搬させた光波を  $O'(x, y, \lambda_p)$  とする。

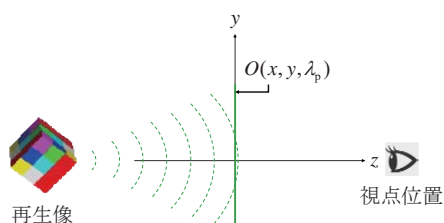


Fig.3 理想光波の計算

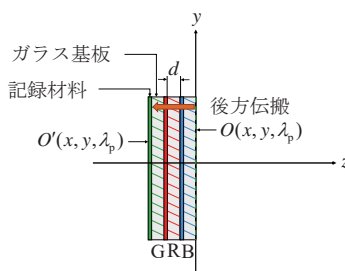


Fig.4 再生時における収差の補正

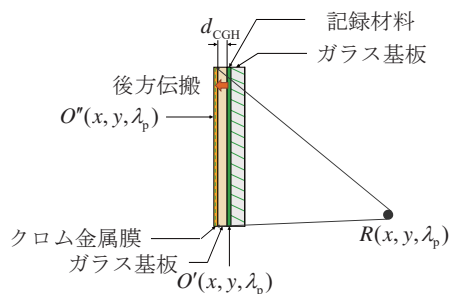


Fig.5 転写時における収差の補正

原版 CGH を転写するとき、干渉縞を形成しているクロム金属膜で反射された光もガラス基板を通過して記録材料に到達し記録される。ここでも収差が生じていると考えられるため、この基板収差も補正する必要がある。Fig.5 に示すように、転写時は原版 CGH の前面に記録材料が密着し背面にクロム膜干渉縞がある。そこで、 $O'(x, y, \lambda_p)$  を原版 CGH のガラス基板の厚み分だけさらに後方伝搬させる。ここでも同様に、後方伝搬計算の波長を原版 CGH のガラスの屈折率に応じた値に変化させる。光波の伝搬距離は RGB どの場合でも  $d_{\text{coh}}$  で一定である。ここでさらに後方伝搬させた光波を  $O''(x, y, \lambda_p)$  とする。

干渉縞パターン  $I(x, y, \lambda_p)$  は、物体光  $O''(x, y, \lambda_p)$  と参照光  $R(x, y, \lambda_p)$  から数値的に求められる。レーザーリソグラフィで描画するパターンはバイナリデータでなければならないため、求めた  $I(x, y, \lambda_p)$  を二値化して最終的な干渉縞パターンとする。

#### 4. フルカラー積層体積型 CGH の作製

##### 4.1. 基板収差を補正した原版 CGH の作製

本研究で転写元として用いた原版 CGH の 3D シーンを Fig.6 に、そのパラメータを Table 1 に示す。物体光波はポリゴン法を用いて計算し[6]、スイッチバック法を用いたポリゴン単位の隠面消去処理を行った[7]。

本研究で用いた記録材料と原版 CGH のパラメータを Table 2 に示す。記録材料には COVESTRO 社製のフォトリソ Bayfol HX200 を用いた。

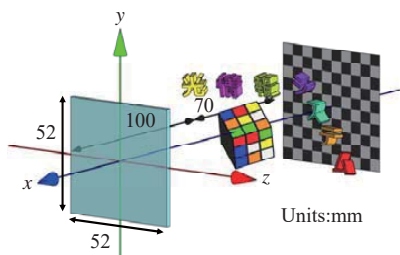


Fig.6 原版 CGH の 3D シーン

Table 1 原版 CGH のパラメータ

ピクセル数	65,536×65,536
ピクセル間隔[μm]	0.8×0.8
サイズ[cm <sup>2</sup> ]	5.2×5.2
両側視域角(@532 nm) [°]	38.8×38.8
設計波長 (R, G, B)[nm]	(640, 532, 488)

Table 2 記録材料と原版 CGH のパラメータ

	記録材料	原版 CGH
厚さ[mm]	1.0	1.5
屈折率	1.51	1.51

#### 4.2. 原版 CGH の転写

本研究では、三枚の原版 CGH の転写において Fig.7 に示すような三波長同軸転写光学系を用いた。この光学系ではミラーや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、そのレーザー光を空間フィルタに入射して球面波を発生している。空間フィルタのピンホール位置は、原版 CGH の干渉縞を作製する時に設定した点光源位置に厳密に合わせる必要がある。また実際の光学系では、青色レーザーのみ他のレーザーと比べてビーム径が細いため、ビームエキパンダーを用いてビーム径を拡大している。さらに、記録材料は波長によって感度が変わるため、露光時間やレーザーの光強度は波長ごとに調節する必要がある。

#### 5. 転写結果

##### 5.1. 転写 CGH の単色再生像

三枚の原版 CGH をそれぞれ転写した結果を Fig.8 に、また実験パラメータを Table 3 に示す。Fig.8 に示す再生像は全て白色 LED を用いて再生したものであり、記録時に用いたレーザーの波長と等しい単色の再生像が得られていることから、転写 CGH が波長選択性を有していることが確認できる。

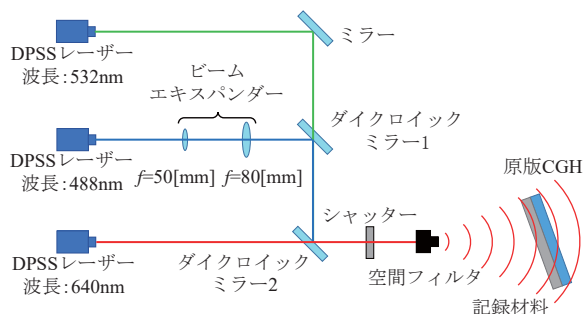
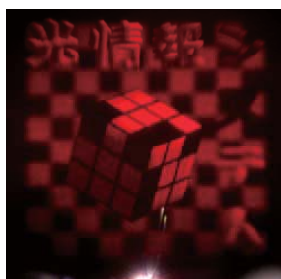


Fig.7 三波長同軸転写光学系

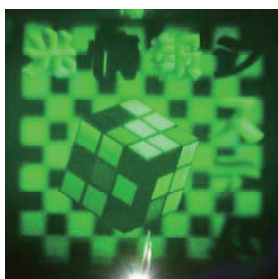


Table 3 記録材料と原版 CGHのパラメータ

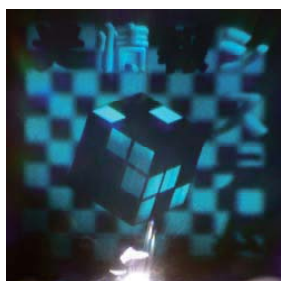
波長 [nm]	露光強度 [mW/cm <sup>2</sup> ]	露光時間 [s]	露光量 [mJ/cm <sup>2</sup> ]
640	2.0	30	60
532	1.0	30	30
488	1.5	30	45



(a)640 nm



(b)532 nm



(c)488 nm

Fig.8 転写 CGH の再生像

## 5.2. フルカラー積層体積型 CGH の再生像

三枚の転写 CGH を重ね合わせて一枚のフルカラー積層体積型 CGH とした。Fig.9 にその再生像を示す。

また、基板収差補正を行わなかった場合のフルカラー積層体積型 CGH の再生像を比較のために Fig.10 に示す。Fig.9 と Fig.10 を比べると、補正をかけなかった場合に見られる色ずれが、補正をかけることにより大きく減少していることが確認できる。

## 6. まとめ

積層体積型 CGH の作製による高解像度 CGH のフルカラー再生手法と、再生像に生じる色にじみを軽減するために基板収差の補正方法を提案した。また、実際に補正を行った原版 CGH を用いてフルカラー積層体積型 CGH の作製を行った。その結果、基板収差の補正を行うことで再生像の色ずれが大きく減少していることが確認できた。



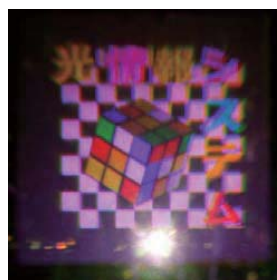
(a)中央視点



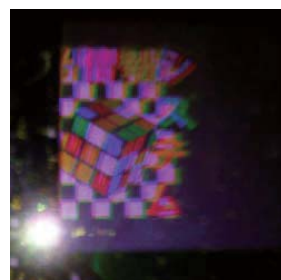
(b)左視点

Fig.9 積層体積型 CGH の再生像

(基板収差補正あり)



(a)中央視点



(b)左視点

Fig.10 積層体積型 CGH の再生像

(基板収差補正なし)

## 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," Opt. Express **25**, 2016-2030 (2017).
- [4] 中尾弘希, 松島恭治: "反射型高解像度 CGH のコンタクトコピーによるフルカラー体積型転写 CGH の作成", HODIC Circular **36**, No. 3, 19-22 (2016).
- [5] O. Kunieda, H. Nakao, K. Matsushima: "Full-color CGHs created by stacking monochromatically-transferred volume CGHs," International Symposium on Display Holography 2018 (ISDH2018), Aveiro (Portugal), (2018).
- [6] K.Matsushima: "Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture," Appl. Opt. **44**, 4607-4614(2005).
- [7] K.Matsushima, M.Nakamura, S.Nakahara: "Silhouette method for hidden surface removal in computer holography and its acceleration using the switch-back technique," Opt. Express **22**, 24450-24465 (2014).

# 大型の 3D 室内空間を再生する計算機合成ホログラムの計算法

五十嵐 俊亮<sup>1</sup> 中村 友哉<sup>1,2</sup> 松島 恭治<sup>3</sup> 山口 雅浩<sup>1</sup>

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-G2-28

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** 計算機合成ホログラムにおいて、写実的かつ大型の立体像を再生することは大きな目標の一つであるが、膨大な計算量の問題から極めて困難である。本研究では筆者らがこれまでに提案した正射影光線サンプリング面を用いた計算法を応用することでその達成を試みる。実験では 105 mm×105 mm のホログラムの奥 1m 立方の空間内に部屋の立体像を再生する CGH を提案手法により計算し、レーザーリソグラフィ装置により干渉縞を印刷した。出力したホログラムをレーザー光で照明することで立体像の光学再生を実現した。

**キーワード** ホログラフィ, 計算機合成ホログラム, 3DCG

## Calculation of holograms that reconstruct a large 3D room

Shunsuke IGARASHI<sup>1</sup> Tomoya NAKAMURA<sup>1,2</sup> Kyoji MATSUSHIMA<sup>3</sup>  
and Masahiro YAMAGUCHI<sup>1</sup>

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

2. JST PRESTO, 5-7 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** It is one of major goals to reproduce a photorealistic and large 3D image by a computer generated hologram, however it has not been attained so far because of a huge amount of computational cost. In this research, we apply a calculation method using orthographic-ray-sampling plane for this purpose. In the experiment, a CGH reproducing a 3D image of a room in 1 m<sup>3</sup> space beyond a CGH of 105 mm × 105 mm was calculated by the proposed method. The interference fringe was printed by a laser-lithography system. Optical reproduction of a 3D image was confirmed by illuminating the hologram with laser light.

**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。これを計算機によって生成する計算機合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) の技術を用いることで空間光変調器等を用いた動画表示が可能となる一方で、再生像の質とサイズ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[7-16]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。計算したホログラムは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、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 用いられる表現手法の実現には、さらなる進歩が必要となる。また光線場を再生する CGH 計算手法も以前から提案されている。これらの手法では 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一方、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]。

光線から波面への変換と回折計算の適用により、光線を用いて深い奥行きでも高分解に再生を可能とした手法が、光線サンプリング(RS: Ray-Sampling)面[13]を用いた CGH 計算法である。さらにここ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)面を用いた計算法も筆者らにより提案された[14,15]。近年さらに深い距離範囲に連続的に分布するような物体を表現するため複数の RS 面の設置および相互オクルージョン処理を行う計算手法も研究されている[16]。

ディスプレイの奥深くに大きな空間が広がる表現は波面を再生するホログラフィに特異な表現であるが、4 章で述べる通り実際のところ点光源・ポリゴン法・光線に基づく手法どの手法でもその計算は膨大な計算量の問題から困難を伴う。

本研究では正射影光線サンプリング面により大型の立体像を可能な計算手法を提案する。実験では 105 mm×105 mm のホログラムの奥 1m 立方の空間内に部屋の立体像を再生する CGH を提案手法により計算し、レーザーリソグラフィ装置により干渉縞を印刷した。出力したホログラムをレーザー光で照明することで立体像の光学再生を実現した。

## 2. 正射影光線サンプリング面を用いた CGH 計算

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

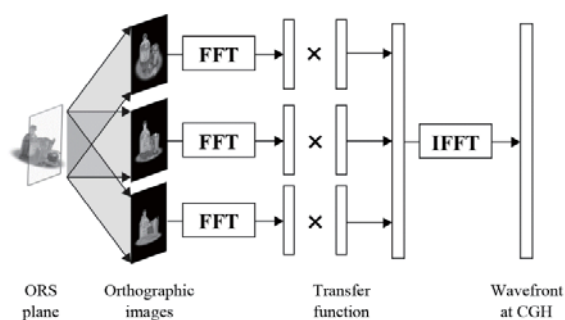


図 1 正射影光線サンプリング面の概念図。

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。参照光との干渉を計算することで、最終的な干渉縞を計算する。

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。

## 3. 正射影光線サンプリング面における相互オクルージョン処理

深い奥行き幅を持つ物体の立体像を高分解能に再生するためには、複数の RS 面を設置する必要がある。その際、非透明物体を扱う場合、手前にある物体で奥の物体が隠れて見えるように隠面消去と呼ばれる処理

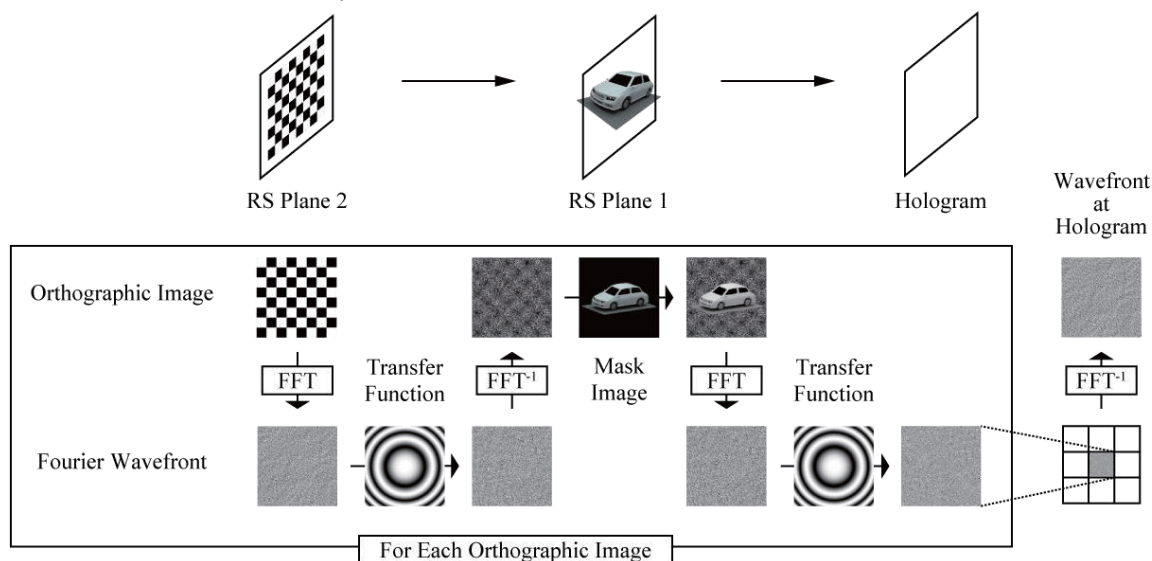


図 2 正射影光線サンプリング面を用いた相互オクルージョン処理のフロー。



を施す必要がある。従来の RS 面を用いた計算では、この処理は波面から光線への変換を用いて実装されていた。本研究ではこの手法と等価な処理を、正射影画像を用いた計算法に実装する。本研究ではオクルージョンを光線空間上で処理するため、シンプルかつ直感的に処理を実装できる。

提案手法のフローを図 2 に示す。RS 面を 2 枚用いる場合、始めに奥側の RS 面 2 から、手前の RS 面 1 に対して波面の伝搬計算をする。そして RS 面 2 の上で波面を光線に変換し、正射影画像によるマスキングを行う。この状態で再度光線波面変換を行い、RS 面 1 からホログラム面まで波面の伝搬計算を行う。正射影を用いた高速計算法では、この一連の処理は各正射影画像に対して独立に実行できる。その結果を並べたものはホログラム面における周波数空間上の波面に相当するため、全体を逆フーリエ変換することでホログラム面上の波面を得ることができる。

#### 4. 大型物体における光線-波面変換

ホログラフィに特異な表現として、CGH 自体は 100 mm 角程度であっても、光の波面再生によりメートル単位の立体物を奥に再生可能である。しかし可視光波長程度のスケールで波面をサンプリングした場合膨大な点数が必要となるために、そのような大きな物体波面の伝搬には多大な困難を伴う。

点光源法・ポリゴン法において FFT を利用するため物体近くに中間波面を用いるとする。例えば 1.0 m × 1.0 m の波面を 1.0 μm でサンプリングする場合、1000K × 1000K の物体波面から 100K × 100K の CGH 面への伝搬計算が必要になる。

一方で、物体波面のサイズに対して CGH 面が小さい場合には、物体波面の中に CGH に入射しない成分が多く含まれることは明らかである。ORS 面を用いた計算法を用いることで、光線空間でそのような余剰な成分を排除することが可能になる [15]。CGH に回折で入射する光線のみ利用して計算を行うことで、結果的に 100K × 100K の物体波面から 100K × 100K の CGH 面までの伝搬と同等の計算量で CGH を生成することが可能になる。また CGH 面を分割して並列計算した場合この効果はより顕著になる。従来の計算法では分割数に従ってトータルの計算量が増加するが、提案手法を用いることで分割数によらず一定の計算量で計算可能であるため、効率的な並列化が可能になる。

#### 5. 実験結果

実験では図 3 のような室内の縮尺約 50% の 3DCG モデルを制作し、それを用いて CGH を計算した。105 mm × 105 mm の CGH の奥 200 mm に 1 枚目の RS 面を、1.0



図 3 CGH 計算に用いる 3DCG シーンと配置。

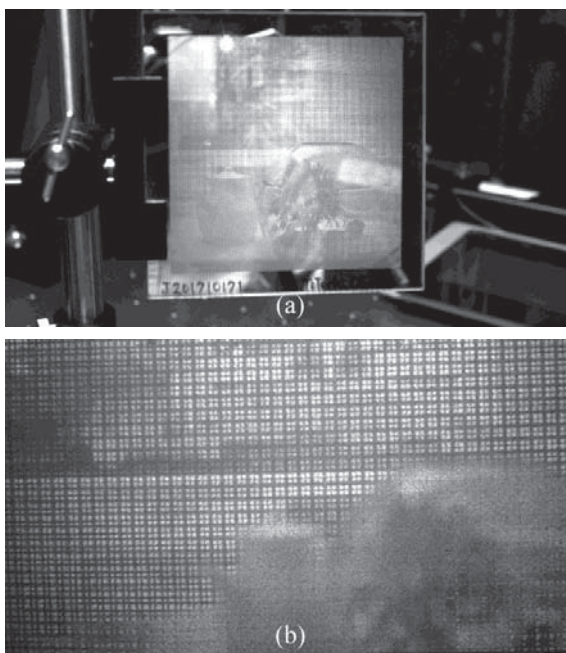


図 4 (a)手前と(b)奥にピンツを合わせた光学再生像。

m 奥に 2 枚目の RS 面を配置する。生成した 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	128K × 128K
CGH 分割数	64 × 64
波長	633 nm
ピクセルピッチ	0.8 μm
視野角	±23.3 deg
伝搬距離 (手前)	200 mm
正射影画像画素数 (手前)	2048 × 2048
正射影画像視点数 (手前)	64 × 32
伝搬距離 (奥)	1000 mm
正射影画像画素数 (奥)	1024 × 1024
正射影画像視点数 (奥)	128 × 64

レンダラーとして Blender Cycles を利用した. CGH 計算の際, レンダリングした正射影画像群を一旦ディスク上に保存し, 伝搬計算時には再度それらをメモリ上に読み込んでいる. 計算環境として CPU に Intel Core i7 4790K を, RAM 32GB, GPU に GeForce GTX 980 を用いた. レンダリング時間に 38 時間, 波面伝搬計算時間に 6 時間を要した. 計算した干渉縞は関大デジタルスタジオ[17]のレーザーソングラフィ装置によりバイナリ振幅マスクとして出力し, レーザー光源により照明することで図 4 のような光学再生像を得た.

前方の RS 面によって生成された立体像(a)においてはガラスによる透過屈折などの効果も含め明瞭に再生できていることが分かる. その一方で後方の RS 面で生成した立体像には格子状のノイズが乗ってしまっていることが分かる. これは光線サンプル数の不足に起因する問題であると考えられる. 空間的なサンプリング間隔としては 1.0 mm 程度であるため人間の目の分解能を考えれば問題ないが, 角度のサンプリングが不足しており, フーリエ面で格子状の空隙が生まれているためそれが視覚的に現れたものと思われる.

立体像のサイズについては奥 1.0 m の位置に 1.0 m × 1.0 m 大の像を再生できている, 奥行き幅の深く大型の立体像再生を確認することができた.

## 6. まとめ

本研究では複数の正射影光線サンプリング面を用いることにより, 奥行きが深く写実的な立体像を再生する CGH 計算法を提案した. 実験では 105 mm × 105 mm のホログラムの奥 1.0 m 立方の空間に部屋の立体像を再生する CGH を提案手法により計算し, レーザーソングラフィ装置により干渉縞を印刷した. 出力したホログラムをレーザー光で照明することで立体像の光学再生を実現した. 今後は後方物体における格子状ノイズの除去とさらなる大規模立体像の再生に取り組む必要がある.

## 7. 謝辞

本研究の一部は JSPS 特別研究員奨励費 JP201814590, 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 planar 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**, 4018-4023 (2012).
- [4] K. Matsushima: "Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture," Appl. Opt. **44**, 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**, 2722-2729 (1976).
- [8] M. Yamaguchi, H. Hoshino, T. Honda, and N. Ohya: "Phase-added stereogram: calculation of hologram using computer graphics technique," Proc. SPIE **1914**, 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**, 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**, 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**, 1396-1399 (2016).
- [15] S. Igarashi, T. Nakamura, K. Matsushima, and M. Yamaguchi, "Efficient tiled calculation of over-10-gigapixel holograms using ray-wavefront conversion," Opt. Express **26**, 10773-10786 (2018).
- [16] 五十嵐俊亮, 中村友哉, 山口雅浩, "正射影光線サンプリング面を用いたホログラム計算における相互オクルージョン処理," 平成 27 年第 3 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会, HODIC Circular, Vol. 25, 7-10, (2015).
- [17] "Kan-Dai Digital Holo-Studio," (<http://holography.ordist.kansai-ac.jp/digitalholostudio/>).

# ホログラフィ計算における三角関数近似手法の回路設計と評価

西辻 崇<sup>†</sup> 山本 洋太<sup>‡</sup> 杉江 崇繁<sup>‡</sup> 角江 崇<sup>‡</sup> 下馬場 朋禄<sup>‡</sup> 伊藤 智義<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 首都大学東京 システムデザイン学部 〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6

<sup>‡</sup> 千葉大学大学院 工学研究院 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

E-mail: nishitsuji@tmu.ac.jp

**あらまし** ホログラフィ専用計算機 HORN の次期モデルに向けた三角関数の実装手法として、メモリを用いず、ビットシフトと加減算器のみで構成する近似回路を提案する。これまでに提案した三角関数簡易近似手法、及び近似誤差補正手法を固定小数点精度の回路として設計し、回路規模、及び CGH 計算適用時の 3 次元像再生画質の観点から評価した。その結果、他の近似手法と比較して使用する回路リソースを 30%以下に抑えた上、十分な再生画質を実現した。

**キーワード** 電子ホログラフィ、高速計算、三角関数、FPGA、専用計算機、HORN、回路設計

## Design and evaluation of the cosine approximation circuit for holographic calculation

Takashi NISHITSUJI<sup>†</sup> Yota YAMAMOTO<sup>‡</sup> Takashige SUGIE<sup>‡</sup> Takashi KAKUE<sup>‡</sup>  
Tomoyoshi SHIMOBABA<sup>‡</sup> and Tomoyoshi Ito<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Systems Design, Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan

<sup>‡</sup> Graduate School of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 Japan

E-mail: nishitsuji@tmu.ac.jp

**Abstract** An implementation of an approximation method of the trigonometric functions for holography-dedicated computer, which is composed of bit shifter and adder-subtractor, is proposed. We implemented the approximation method into Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) and C++ program with fixed-point precision and evaluated a resource usage of FPGAs and quality of a reconstructed image when it is applied for CGH calculation. As a result, we succeeded in reducing the resource usage to less than 30% compared to conventional approximation circuit and reconstructing a 3D image with sufficient quality.

**Keyword** Electro-holography, fast calculation, trigonometric function, FPGA, special purpose computer, HORN

### 1. はじめに

電子ホログラフィ方式の 3 次元映像システムにおいて、計算機合成ホログラム (Computer-Generated Holograms: CGHs) の作成に伴う計算量の削減は実用化に向けた重要課題の 1 つである。HORN (Holographic Reconstruction) は、かかる課題の解決を志向して 20 年以上にわたり開発されている CGH 専用計算機であり、最新型の HORN-8 では振幅型 CGH のビデオレートでの作成に成功している [1]。しかし、電子ホログラフィの実用化には、より大規模な CGH 計算が要求されることから、HORN の高性能化は今後も重要な取り組みとして位置づけられる。なお、HORN は点光源によって 3 次元像を構成する 3 次元像モデル (点光源モデル) を対象としている。

HORN-8 では、計算並列度の向上を目的に開発した三角関数の簡易近似手法 [2] を実装し、約 8,000 点の点

光源で構成される 3 次元像を再生可能な CGH (解像度:  $10^4 \times 10^4$  [pixels]) のリアルタイム再生に成功している。しかし、今後見込まれる点光源数や CGH 解像度の大規模化に伴い、近似誤差の累積による画質悪化等の影響が懸念されていた。そこで筆者らは、わずかな補正により近似誤差を改善する手法を考案し CGH 計算における有効性を示した [3]。

本稿では、三角関数簡易近似手法、および誤差補正手法について、固定小数点での実装を前提とした合理的な実装方法、および誤差補正による 3 次元像の画質改善効果を報告する。

### 2. 三角関数近似手法

図 1、図 2 に  $\cos$ ,  $\sin$  関数の理想出力 ( $i_c(\theta)$ ,  $i_s(\theta)$ )、誤差補正前の近似出力 ( $p_c(\theta)$ ,  $p_s(\theta)$ )、誤差補正後の近似出力 ( $p'_c(\theta)$ ,  $p'_s(\theta)$ )、及び近似前後の誤差関数 ( $\varepsilon_c(\theta)$ ,  $\varepsilon_s(\theta)$ )

の比較を示す．ここで， $\theta$ は整数部を持たない固定小数精度（2の補数表現）の位相値であり， $-0.5 \leq \theta < 0.5$ である．

理想出力 $i_c(\theta), i_s(\theta)$ を，

$$i_c(\theta) = \cos(2\pi\theta)/4 \quad (1)$$

$$i_s(\theta) = \sin(2\pi\theta)/4 \quad (2)$$

と定義する．式(1)(2)では， $p_c(\theta), p_s(\theta), p'_c(\theta), p'_s(\theta)$ の値域が $i_c(\theta), i_s(\theta)$ の1/4になることから，予め1/4を乗じている．図1，図2より， $p_c(\theta), p_s(\theta)$ は，

$$p_c(\theta) = \begin{cases} 0.25 - \theta & (\theta \geq 0) \\ 0.25 + \theta & (\theta < 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$p_s(\theta) = \begin{cases} -0.5 - \theta & (-0.5 \leq \theta < -0.25) \\ \theta & (-0.25 \leq \theta < 0.25) \\ 0.5 - \theta & (0.25 \leq \theta < 0.5) \end{cases} \quad (4)$$

$$p'_c(\theta) = \begin{cases} -0.5 - \theta & (-0.5 \leq \theta < -0.25) \\ \theta & (-0.25 \leq \theta < 0.25) \\ 0.5 - \theta & (0.25 \leq \theta < 0.5) \end{cases} \quad (5)$$

$$p'_s(\theta) = \begin{cases} -0.5 - \theta & (-0.5 \leq \theta < -0.25) \\ \theta & (-0.25 \leq \theta < 0.25) \\ 0.5 - \theta & (0.25 \leq \theta < 0.5) \end{cases} \quad (6)$$

として求められる．式(3)(4)では $\theta = -0.5, 0, 0.5$ ，式(5)~(7)では $\theta = -0.25, 0.25$ で折り返す出力を得られる．

式(1)(2)の $\cos, \sin$ 関数への入力 $2\pi\theta$ であることから，式(3)~(7)において $\theta$ が折り返される値をとるとき， $\cos, \sin$ 関数は極値をとるため， $p_c(\theta), p_s(\theta)$ の出力は $i_c(\theta), i_s(\theta)$ に同調する．

次に， $p_c(\theta), p_s(\theta)$ の理想出力に対する誤差関数 $\varepsilon_c(\theta), \varepsilon_s(\theta)$ を，

$$\varepsilon_c(\theta) = p_c(\theta) - i_c(\theta) \quad (8)$$

$$\varepsilon_s(\theta) = p_s(\theta) - i_s(\theta) \quad (9)$$

と定義すると，図1，図2に示すように， $\varepsilon_c(\theta), \varepsilon_s(\theta)$ のいずれも正弦波に類似した波形となる． $\varepsilon_c(\theta), \varepsilon_s(\theta)$ を正弦波とみなすと，式(8)(9)より両関数の振幅はおよそ0.053となる．これは $i_s(\theta)$ の振幅の1/4程度とみなせ，周波数は2倍である．そのため， $\varepsilon_c(\theta), \varepsilon_s(\theta)$ は $\pm i_s(2\theta)/4 = \pm \sin(4\pi\theta)/16$ と見なせる．また， $\varepsilon_c(\theta)$ は $p_c(\theta)$ の傾きが正の区間では $i_s(2\theta)/4$ と見なせ，負の区間では $-i_s(2\theta)/4$ と見なせる．一方， $\varepsilon_s(\theta)$ は $p_s(\theta)$ の傾きが正の区間では $-i_s(2\theta)/4$ と見なせ，負の区間では $i_s(2\theta)/4$ と見なせる．したがって，誤差補正信号 $EC(\theta)$ を，

$$EC(\theta) = \frac{i_s(2\theta)}{4} \approx \frac{p_s(2\theta)}{4} \quad (10)$$

とすれば，

$$p'_c(\theta) = p_c(\theta - EC(\theta)) \quad (11)$$

$$p'_s(\theta) = p_s(\theta + EC(\theta)) \quad (12)$$

なる演算により，近似誤差を補正した $\cos, \sin$ 関数の近似出力を得られる．式(10)~(12)より， $\cos, \sin$ 関数で誤差補正信号 $EC(\theta)$ は共用でき，また，式(5)~(7)に対して式(10)に付加される乗算，除算はいずれもビットシフトで実装できることから，誤差補正にかかる回路面

積の増加は少ない．

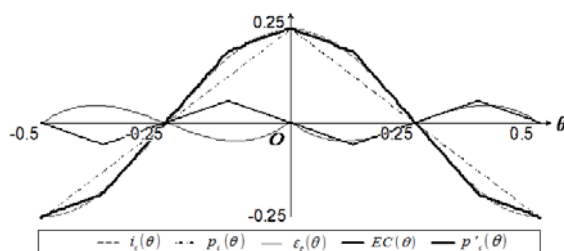


図1 出力の比較（cos関数）

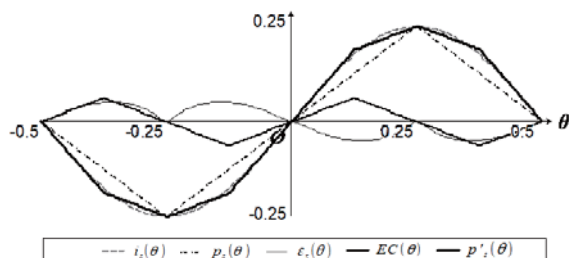


図2 出力の比較（sin関数）

### 3. 回路実装

図3に式(10)~(12)を実装した近似回路のブロック図を示す． $N$ はビット幅である．近似回路は，EC(Error Compensation)ブロックとBA(Basic Approximation)ブロックに分けられる．ECブロックは式(10)の実装であり，BAブロック上部は式(3)(4)，下部は式(5)~(7)の実装である．BAブロック上部では， $\theta$ の正負によって式(3)(4)が切り替わるため，符号ビットによって加減算を切り替える．BAブロック下部では， $\theta$ の上位2ビットによって式(5)~(7)を切り替える．ここで， $\theta$ が定義域 $-0.5 \leq \theta < 0.5$ の固定小数であり， $\theta = 0.5$ と $\theta = -0.5$ のビット列は一致することから，式(5)(7)は統合できる．そのため， $\theta$ の上位2ビットが01のとき式(5)を，10のとき式(6)を使用するように加減算器を設定する．

### 4. 評価

Microsoft Visual C++ Compiler 2017における倍精度の $\cos, \sin$ 関数を用いた三角関数出力を真値とし，誤差補正前後の簡易近似手法，及び三角関数の主流な近似手法の1つであるCORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer)[4]を用いた出力について，近似精度とCGH計算への適用効果を評価した．また，CORDICと簡易近似手法を誤差補正の有無に分けて実装した場合の回路規模，回路性能を評価した．なお，CORDICの繰返し回数は4に設定した．



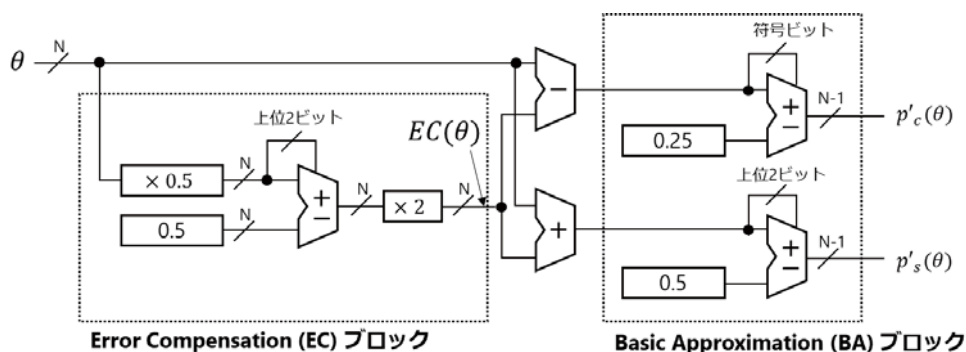


図 3 三角関数簡易近似回路 ブロック図

#### 4.1. 三角関数近似精度

表 1, 表 2 に近似精度の評価結果として, 出力値に対するビット幅  $N$  ごとの MSE (Mean Square Error) を示す. 簡易近似手法, および CORDIC の評価結果は Xilinx Vivado 2018.1 を用いて FPGA (Field Programmable Gate Array) 向けに設計した演算回路のシミュレーション出力 1 周期分を比較して算出した. なお, サンプル数はいずれも  $2^N$  である. 表より, 誤差補正前後で比較して約 30 倍の改善効果が認められ, CORDIC と同等精度にまで誤差を削減できた.

表 1 MSE (cos 関数)

$N$	誤差補正有	誤差補正無	CORDIC
8	0.000755	0.0228	0.000644
12	0.000723	0.0228	0.000604
16	0.000723	0.0228	0.000602

表 2 MSE (sin 関数)

$N$	誤差補正有	誤差補正無	CORDIC
8	0.000755	0.0228	0.000645
12	0.000723	0.0228	0.000604
16	0.000723	0.0228	0.000602

#### 4.2. 回路規模・性能

簡易近似手法, および CORDIC を FPGA へ実装した場合の回路規模を FPGA の回路リソース (Slice LUT (SL), Slice Register (SR)) の使用量で比較した. また, 回路性能を最大動作周波数, 最大出力遅延時間で比較した. なお, 評価対象は簡易近似手法単体であり, CGH 計算回路は含まれない. また, 使用する FPGA は, Xilinx Spartan-7 XC7S100FPGA676-1Q とした.

評価結果を表 3~表 5 に示す. 表より, 誤差補正の有無

にかかわらず, 簡易近似手法は, いずれの評価においても CORDIC より優れていることがわかる. また, 誤差補正に伴う回路規模, 出力遅延の増加は, CORDIC との差に比べれば小さく, 近似精度の改善効果をあわせて考えれば, 誤差補正を含む簡易近似手法の三角関数近似手法としての有効性は高いといえる.

表 3 回路規模の比較

$N$	誤差補正無		誤差補正有		CORDIC	
	SL	SR	SL	SR	SL	SR
8	11	32	33	46	185	199
12	39	48	73	70	257	283
16	53	64	111	94	334	366

表 4 最大動作周波数 [MHz]

$N$	誤差補正無	誤差補正有	CORDIC
8	357	334	208
12	260	256	204
16	228	271	119

表 5 最大出力遅延 [ns]

$N$	誤差補正無	誤差補正有	CORDIC
8	18.1	28.0	98.1
12	18.6	28.0	98.3
16	18.7	28.1	98.3



### 4.3. CGH 計算への適用効果

$N = 8, 16$  のケースについて、誤差補正を含む簡易近似手法を C++ で実装し、CGH 計算への効果として 3 次元像の再生画質を計測した。CGH 計算には、フレネル近似に基づく計算式 (式 (13)) を使用し、三角関数部分を簡易近似手法に置き換えた。

$$U(x_\alpha, y_\alpha) = \sum_{j=0}^Q \exp\left\{ \frac{2\pi}{\lambda} \left( z_j + \frac{x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2}{2z_j} \right) \right\} \quad (13)$$

なお、 $(x_\alpha, y_\alpha)$ 、 $(x_j, y_j, z_j)$  はそれぞれ CGH、 $j$  番目の点光源の座標、 $U$  は  $(x_\alpha, y_\alpha)$  における複素振幅分布、 $\lambda$  は参照光の波長、 $i$  は虚数単位、 $Q$  は 3 次元像を構成する点光源の数であり、 $\lambda = 520[\text{nm}]$ 、 $p = 8[\mu\text{m}]$ 、 $Q = 11,646$  とした。また、点光源の奥行き方向の距離はおおよそ  $0.30 \sim 0.31[\text{m}]$  とした。

画質評価では、作成した CGH に対して角スペクトル法による回折計算を行い、点群が分布する区間を奥行き方向に 100 分割した CGH の各平行平面における強度分布を真値、及び簡易近似手法適用時について計算し、PSNR (Peak-Signal to Noise Ratio) を算出した。

比較結果を表 6 に示す。8[bit]、16[bit] いずれの場合も誤差補正により PSNR が改善しており、CGH 計算への効果が確認できた。

表 6 3 次元像再生画質の比較 [dB]

$N$	誤差補正無	誤差補正有
8	41.6	50.7
16	41.7	51.0

## 5. 結論

FPGA に実装した場合の回路規模、性能や CGH 計算適用時の画質評価結果から、三角関数簡易近似手法の誤差補正手法の有効性を示せた。また、代表的な三角関数近似手法である CORDIC に対しても使用回路リソースの観点から有効性を示せた。

## 6. おわりに

ホログラフィ専用計算機 HORN の次期モデルには、計算回路の高密度化や大規模化が求められるため、より合理的なアルゴリズムや実装方法の開発が重要である。提案手法はその 1 つとして有効である可能性があり、次期 HORN への搭載に向けた検討を進める。

## 文 献

- [1] T. Sugie et al.: “High-performance parallel computing for next-generation holographic imaging,” *Nature Electronics*, 1, pp. 254-259 (Apr. 2018)
- [2] T. Nishitsuji et al.: “Simple and fast cosine approximation method for computer-generated hologram calculation,” *Opt. Express*, 23, 25, pp. 32465-32470 (Dec. 2015).
- [3] 西辻ほか: “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,” ホログラフィック・ディスプレイ研究会 HODIC Circular, 37, 3, pp.22-25 (Sep. 2017)
- [4] J. E. Volder: “The CORDIC Trigonometric Computing Technique,” *IRE Transactions on Electronic Computers*, EC-8, 3, pp. 330-334 (Sep. 1959)

## 電子ホログラフィ専用計算機 HORN-8 を用いた 3 次元映像システム

山本 洋太<sup>†</sup> 杉江 崇繁<sup>†</sup> 西辻 崇<sup>‡</sup> 下馬場 朋禄<sup>†</sup> 角江 崇<sup>†</sup> 伊藤 智義<sup>†</sup><sup>†</sup> 千葉大学 工学研究院 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33<sup>‡</sup> 首都大学東京 システムデザイン学部 〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6

E-mail: y-yamamoto@chiba-u.jp

あらまし 理想的な 3 次元映像提示手法として電子ホログラフィへの期待が高まっている。しかし、必要な計算量の膨大さを一因として実用化には至っていない。筆者らの研究グループでは、ホログラフィ専用計算機 HORN の開発により、その解決を目指してきた。本発表では、最新型である HORN-8 について紹介する。HORN-8 は、位相型・振幅型のホログラムに対応し、最大で 4 万点の点群で構成される 3 次元映像のリアルタイム再生が可能である。

キーワード 電子ホログラフィ、専用計算機、FPGA

## Special-purpose computer HORN-8 for real-time electroholography

Yota YAMAMOTO<sup>†</sup> Takashige SUGIE<sup>†</sup> Takashi NISHITSUJI<sup>‡</sup>Tomoyoshi SHIMOBABA<sup>†</sup> Takashi KAKUE<sup>†</sup> Tomoyoshi ITO<sup>†</sup><sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522, Japan<sup>‡</sup> Faculty of Systems Design, Tokyo Metropolitan University, 6-6, Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065,

Japan

E-mail: y-yamamoto@chiba-u.jp

**Abstract** Electroholography attracts attention as an ideal 3D image display method. However, it has not realized yet due to the vast amount of calculation. Our research team have been developed special-purpose computers for electroholography to solve the problem. In this paper, we demonstrate HORN-8 which is the latest version of HORN series. HORN-8 has the function which can calculate phase type and amplitude type Computer-Generated Hologram. It has performance playing 3D movie constructed from 40 thousand-pint cloud data.

**Keyword** Electroholography, special-purpose computer, FPGA

## 1. はじめに

近年、様々な 3 次元映像提示技術が実用化され、放送、医療、芸術、娯楽など様々な分野で活用されている。しかし、現在主流の 3 次元映像提示技術は目の錯覚を利用したものが多く、人間が 3 次元像を知覚するために必要な奥行き手がかりをすべて再現できていない。奥行き手がかりの欠如、矛盾は、観察者に疲労感や不快感を生じさせる原因となる[1]。すべての奥行き手がかりを再現可能な技術として、電子ホログラフィがある。観察者へ負担を掛けない理想的な 3 次元映像提示技術として電子ホログラフィへの期待が高まっている。

しかし、表示用のディスプレイである空間光変調器 (SLM : Spatial Light Modulator) の解像度が現状では十

分ではない、電子ホログラフィを処理する計算機の性能が現状では十分ではない、という 2 つの問題点から実用には至ってない。

本研究室では、計算機の処理能力不足に注目し、計算機合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) の計算処理に特化した専用計算機を開発してきた[2-4]。これまでに、CPU に比べ 100 倍以上の性能を実現するなど、専用計算機の有効性を確認してきた。しかし、依然として実用観点から十分な性能は得られていない。そこで、本研究室では新たに FPGA (Field Programmable Gate Array) を複数搭載した電子ホログラフィ専用計算機 HORN-8 と複数の HORN-8 を用いたクラスタシステムを開発し、最大で 4 万点の点群で構成される 3 次元映像のリアルタイム再生に成功

した。

## 2. ホログラフィ専用計算機

### 2.1. HORN-8

HORN-8 は, 本研究室で独自に開発した大規模 FPGA ボードをベースにしている. HORN-8 の外観を図 1 に, アーキテクチャを図 2 に示す. HORN-8 は 8 つの FPGA を搭載し, 各 FPGA をリングバスで接続している. ホスト PC との通信用インターフェースとして PCI Express x8 Gen1 (PCIe) エッジコネクタを搭載している. PCIe スロットの真上にある FPGA を CCU (Communication Control Unit) と呼び, 通信制御を担当している. 残り 7 つの FPGA は TPU (Tuned Processing Unit) と呼び, CGH の計算を行っている. 表 1 に CCU および TPU に使用している FPGA の仕様を示す. HORN-8 は, 書き換え可能な FPGA の特性を利用し, TPU の搭載回路を書き換えることで, 様々な機能を持たせられる. 今回, TPU に実装できる振幅型, 位相型の CGH 計算回路を設計し, 両型に対応する電子ホログラフィ専用計算機を開発した.



図 1 HORN-8 の外観.

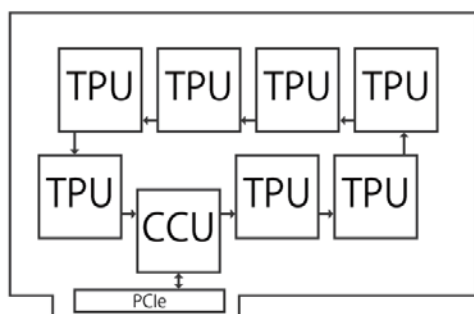


図 2 HORN-8 ボードのアーキテクチャ.

表 1 HORN-8 ボードの搭載 FPGA.

	制御用 FPGA (CCU)	計算用 FPGA (TPU)
ファミリ名	Virtex5	Virtex5
デバイス	XC5VLX30T-2-FF665	XC5VLX110-2-FF676
スライス数	4,800	17,280
DSP48E	32	64
LUT (Look Up Table)	19,200	69,120
FF (Flip Flop)	19,200	69,120
Block RAM	1,296 Kbit	4,608 Kbit

### 2.2. CGH 計算回路

TPU 内の CGH 計算部分は, 初期位相計算部 (BPU : Basic Phase Unit) と加算位相計算部 (APU : Additional Phase Unit) で構成している (図 3). HORN では, 2.4 節で詳述する漸化式に基づく近似計算法[5]を採用しており, BPU は初項計算を, APU は漸化式の加算処理を担う. 各ユニットは CGH1 画素分を計算しており, それらを並列実行させることで高速化を図っている. 本研究で作成した振幅型回路は, 同時に 640 画素分の強度分布を計算でき, 位相型回路は, 同時に 320 画素分の位相分布を計算できる.

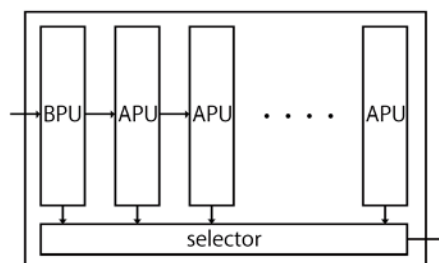


図 3 CGH 計算部のアーキテクチャ.

### 2.3. 初期位相計算部(BPU)

BPU は近似計算法の初項計算を担い, その計算方法は CGH 計算の一般式と一致する. CGH の座標を  $(x_a, y_a)$ ,  $N_{obj}$  点の点群からなる 3 次元像について,  $j$  番目の点群座標を  $(x_j, y_j, z_j)$  とすると,  $z_j \gg x_j, y_j$  の条件下において複素振幅分布  $U$  は,

$$U(x_a, y_a) = \sum_{j=0}^{N_{obj}-1} a_j \exp[2\pi i \theta_{aj}] \quad (1)$$

と表される[5]．ここで，

$$\theta_{aj} = \rho_j(x_{aj}^2 + y_{aj}^2) \quad (2)$$

$$\rho_j = \frac{1}{2\lambda|z_j|} \quad (3)$$

である．また， $x_{aj} = x_a - x_j$ ， $y_{aj} = y_a - y_j$ ， $i$ は虚数単位， $\lambda$ は参照光源の波長， $a_j$ は各点光源の光強度である．

式 (3) において， $\rho_j$  の計算には除算が含まれているため，FPGA 実装時に計算リソースの消費増や動作周波数低下の要因となる．そこで，HORN-8 では  $\rho_j$  をあらかじめホスト PC で計算しておくことで，FPGA 上の演算を加減算，乗算のみにしている．

図 4 に式 (2) を実装した BPU のアーキテクチャを示す．ここで，IU (Intensity Unit) は振幅型 CGH における強度計算のためのユニットであり，CAU (Complex Amplitude Unit) は位相型 CGH における複素振幅を計算するためのユニットである．

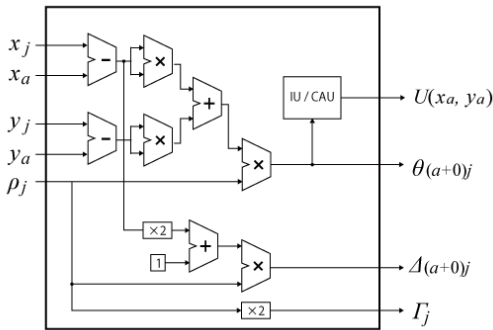


図 4 初期位相計算部 (BPU) のアーキテクチャ．

## 2.4. 加算位相計算部 (APU)

CGH 計算の定義に従えば，CGH の各画素に対して式 (2) を計算する必要がある．しかし，HORN-8 では，一般に SLM の画素間隔が等間隔で非常に狭いことを利用し，隣接する画素に関する近似式[5]を利用し計算を簡略化している．新たな変数として，

$$\Delta_{aj} = \rho_j(2x_{aj} + 1) \quad (4)$$

$$\Gamma_j = \frac{1}{\lambda z_j} = 2\rho_j \quad (5)$$

を導入すると， $\theta_{(a+n-1)j}$  を既知としたとき，隣り合う  $\theta_{(a+n)j}$  は，

$$\begin{aligned} \theta_{(a+n)j} &= \theta_{(a+n-1)j} + \Delta_{(a+n-1)j} \\ &\quad + (n-1)\Gamma_j \end{aligned} \quad (6)$$

と表される．式 (6) は加算とビットシフトによる乗算のみで計算可能であるため，FPGA 実装したときに，リソースの消費を抑え，並列数を増加できる利点があ

る．式 (6) を実装した APU のアーキテクチャを図 5 に示す．

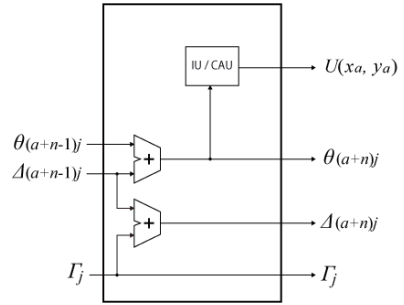


図 5 加算位相計算部 (APU) のアーキテクチャ

## 2.5. 強度計算部 (IU)

強度計算部 (IU) は振幅型 CGH の計算回路で使用するユニットである．BPU 及び APU で求めた位相値  $\theta_{aj}$  から三角関数計算によって強度を求め，3 次元像を構成する全点群に対する総和をとり，その正負から 2 階調の結果を出力する．IU のアーキテクチャを図 6 に示す．

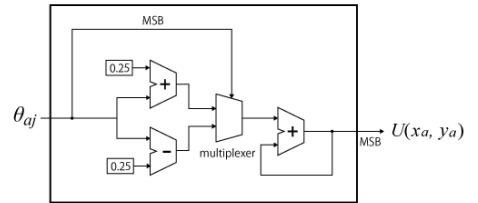


図 6 強度計算部 (IU) のアーキテクチャ．

## 2.6. 複素振幅計算部 (CAU)

複素振幅計算部 (CAU) は位相型 CGH の計算回路で使用するユニットである．CAU では，IU と同様に BPU 及び APU で求めた物体点ごとの位相値  $\theta_{aj}$  から三角関数計算を行って複素振幅を求め，3 次元像を構成する全点群の総和を求める．その後，偏角テーブル (Normalization Circuit) を利用し，総和結果を 256 階調に正規化した結果を出力する．CAU のアーキテクチャを図 7 に示す．

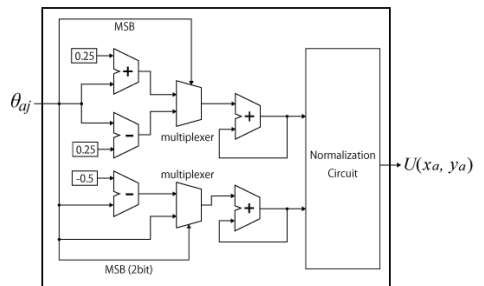


図 7 複素振幅計算部 (CAU) の  
アーキテクチャ

### 3. 性能評価

#### 3.1. 動作環境

HORN-8 を Linux Fedora 25 が動作するホスト PC に搭載し CGH 計算時間を測定した。ホスト PC の CPU は、Intel Core i5-4670 3.40GHz、メインメモリは 16GB であった。計算時間比較のため、CPU で動作する CGH 計算プログラムを作成し、計算時間を計測した。比較用プログラムの動作 PC 環境は、OS : Windows 10 Enterprise, CPU : Intel Core i7-6700 3.40GHz、メインメモリ : 16GB、コンパイラ : Intel C++ Compiler 17.0 とした。また、GPU (Graphic Processing Unit) で動作する同様のプログラムを作成し、計算時間を測定した。使用した GPU は、GeForce GTX 1080 Ti であり、コンパイラは、NVIDIA C compiler driver 8.0 である。なお、GPU は比較用プログラムの動作 PC に搭載した。

#### 3.2. 計算時間

振幅型と位相型 CGH について、HORN-8, HORN-8 クラスタ (8 ボード)、GPU, CPU の計算時間を図 8, 9 に示す。CGH の解像度は  $1,920 \times 1,080$  [pixel] で生成した場合の計算時間である。なお、図中の Video Rate は、NTSC 方式テレビ放送のフレームレートである 29.97 [fps] を指す。

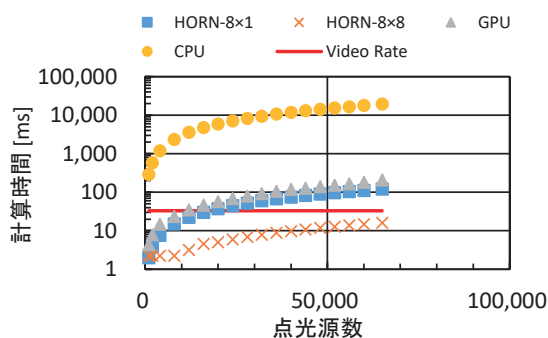


図 8 振幅型 CGH における点光源数と計算時間の関係。

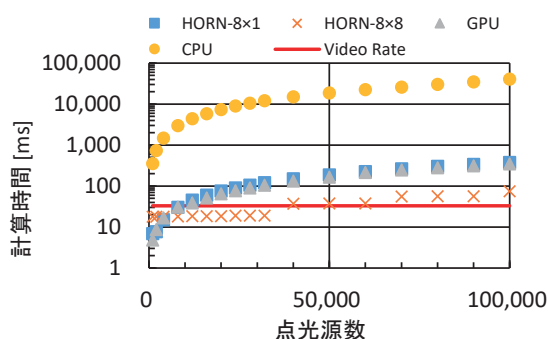


図 9 位相型 CGH における点光源数と計算時間の関係。

#### 3.3. リソース使用率

TPU に実装した回路のリソース使用量を表 2 に示す。

表 2 TPU のリソース使用率

	振幅型	位相型
Slice Register	59,179 / 69,120 (86%)	61,157 / 69,120 (88%)
Slice LUT	51,102 / 69,120 (74%)	49,001 / 69,120 (71%)
Slice	16,730 / 17,280 (97%)	16,976 / 17,280 (98%)
Block RAM	4,356KB / 4,608KB (95%)	4,554KB / 4,608KB (99%)

### 4. むすび

本研究では、独自に開発した汎用 FPGA ボードを用いて、振幅型・位相型ホログラフィ専用計算機 HORN-8 を開発した。また、HORN-8 を 8 枚用いたクラスタシステムを構築した。その結果、振幅型では CPU と比較して約 1,200 倍の処理速度を実現した。位相型では、CPU と比較して約 630 倍の処理速度を実現した。クラスタシステムでは、最大で 4 万点の点光源で構成した 3 次元像を 30 [fps] でリアルタイムに再生可能であり、実用的な性能を達成した。

今後は、FPGA チップの世代を更新するとともに、小型を目指し開発を進めていきたい。

### 文 献

- [1] G. Kramida: "Resolving the vergence-accommodation conflict in head-mounted displays", IEEE Trans. Vis. Comput. Grap., 22, 7, pp.1912-1931 (2016)
- [2] T. Ito, N. Masuda, K. Yoshimura, A. Shiraki, T. Shimobaba, and T. Sugie: "Special-purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography", Opt. Express, 13, 6, 1923-1932 (2005)
- [3] Y. Ichihashi, H. Nakayama, T. Ito, N. Masuda, T. Shimobaba, A. Shiraki, and T. Sugie: "HORN-6 special-purpose clustered computing system for electroholography", Comput. Phys. Commun., 93, 13-20 (2009)
- [4] T. Sugie, T. Akamatsu, T. Nishitsuji, R. Hirayama, N. Masuda, H. Nakayama, Y. Ichihashi, A. Shiraki, M. Oikawa, N. Takada, Y. Endo, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito: "High-performance parallel computing for next-generation holographic imaging", Nature Electronics, 1, 4, 254-259 (2018)
- [5] T. Shimobaba and T. Ito: "An efficient computational method suitable for hardware of computer-generated hologram with phase computation by addition", Comput. Phys. Commun., 138, 1, 44-52 (2001)
- [6] 伊藤智義, 下馬場朋禄: "ホログラフィ入門", 講談社 (2017)



## 平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡デモシステム

井元克駿<sup>1</sup> 佐竹宏基<sup>1</sup> 児玉周太朗<sup>1</sup> 池田佳奈美<sup>2</sup> 岡本勝就<sup>3</sup> 渡邊恵理子<sup>1</sup>電気通信大学<sup>1</sup> 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1大阪府立大学<sup>2</sup> 岡本研究所<sup>3</sup>

E-mail: phase@fourier.ghrdp.uec.ac.jp

**あらまし** 我々は、レンズレスで超小型化が可能な平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡 (PLC-DHM: Digital Holographic Microscope based on Planar Lightwave Circuit)を提案し、その有効性を確認してきている。本研究では専門的知識を有さないユーザーを対象とした PLC-DHM のユーザインターフェイスを作成し、サンプルを設置するだけで再構成像の取得が可能となるデモシステムを開発したので報告する。

**キーワード** デジタルホログラフィック顕微鏡, 平面導波路

## Demonstration system of Digital Holographic Microscope based on Planar Lightwave Circuit

Katsutoshi INOMOTO<sup>1</sup> Hiroki SATAKE<sup>1</sup> Syutaro KODAMA<sup>1</sup>Kanami IKEDA<sup>2</sup> Katsunari OKAMOTO<sup>3</sup> and Eriko WATANABE<sup>1</sup>The University of Electro-Communications<sup>1</sup> 1-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, JapanOsaka Prefecture University<sup>2</sup>, Okamoto laboratory<sup>3</sup>

E-mail: phase@fourier.ghrdp.uec.ac.jp

**Abstract** We have developed a digital holographic microscope based on planar lightwave circuit (PLC-DHM), which can be an ultra-compact and completely lensless system. In this study, we design and develop a demonstration system for the PLC-DHM, which is equipped with a graphical user interface for near real-time data reconstruction. This system will be beneficial for common users who do not have technical knowledge of DHM.

**Keyword** Digital holographic microscopy, Planar lightwave circuit,

## 1. はじめに

デジタルホログラフィック顕微鏡(DHM)[1]は非侵襲・非染色で3次元物体の定量位相情報を取得することができる。しかし精密なアライメント、ピエゾ素子やミラーを用いるため空間光学系が必要となる課題がある。我々はこの問題を解決するために原理的に超小型化が可能な平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡(PLC-DHM: Digital Holographic Microscope based on Planar Lightwave Circuit)を開発している[2,3]。

本稿では、ユーザーがサンプルを準備・設置するだけで再構成像の取得が可能な PLC-DHM のユーザインターフェイス(UI), および持ち運び可能なデモシステムの構築に関して述べる。さらにこの PLC-DHM デモシステムのユーザインターフェイスを用いて生体試料イメージングを行ったので報告する。

## 2. 平面導波路型

## デジタルホログラフィック顕微鏡

## 2.1 実験原理

図 1-(a)に PLC-DHM の概要を示す。光源には波長が 632.8 nm の He-Ne レーザーを使用し、偏波面保持ファイバを通して平面導波路に入射され、導波路内で物体光と参照光に分波される。平面導波路から出射した物体光はサンプルに照射され、ビームスプリッタを介して参照光と干渉させ、その干渉縞を撮像素子で記録する。

図 1-(b)(c)に PLC-DHM の記録と再生の座標系を示す。撮像素子面から  $z_0$  だけ離れたサンプル(複素振幅を  $U_0(x', y')$ )に物体光を照射する。この物体光と撮像素子

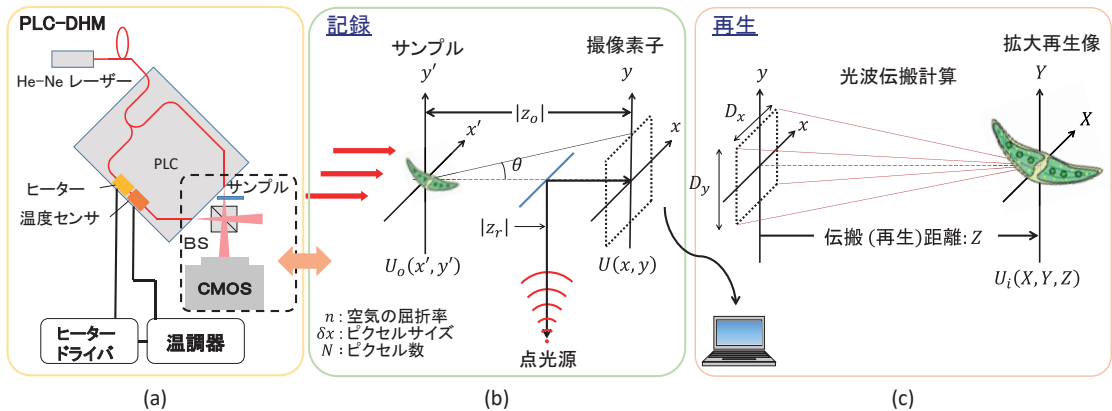


図 1 PLC-DHM の概要と実験座標系

から  $z_r$  だけ離れた参照光と同軸で干渉させ、干渉縞を撮像素子で記録する。撮像素子面での物体光の複素振幅を  $U(x, y)$  とする。記録した干渉縞画像に対し画像処理、光波伝搬計算を行うことで再生像  $U_i(x, y)$  を取得する。

インラインの光学系の場合、再生光である 1 次光と 0 次光と -1 次光が重なるために再生像の画質が劣化してしまう欠点がある。PLC-DHM では参照光の位相を変化させた複数枚の干渉縞を計算機上で処理を行い、再生光を取り出す位相シフト法を用いている[4]。位相制御には熱光学効果を用いることで位相シフトを制御し相対位相差を与え参照光の位相をシフトさせる[5]。

本研究では相対位相差  $\delta = \frac{\pi}{2}$  の干渉縞 4 枚を用いて再生光の複素振幅分布を取得する。再生光の複素振幅分布は式(1)で表される。

$$I = \frac{1}{4} \left[ \{I(0) - I(\pi)\} - i \left\{ I \left( \frac{3\pi}{2} \right) - I \left( \frac{\pi}{2} \right) \right\} \right], (1)$$

得られた再生光の複素振幅分布に対しフレネル伝搬計算を行うことで再構成像を取得する。計算機上での再生伝搬距離  $Z$  は式(2)で得られる[6]。

$$Z = - \left( \frac{1}{z_0} - \frac{1}{z_r} \right)^{-1}, (2)$$

$z_r$  は参照光源から撮像素子面までの距離、 $z_0$  はサンプルから撮像素子面までの距離である。サンプルの強度分布と位相分布を同時に正確に取得するには式(3)のサンプリング条件を満たす必要がある。

$$Z = \frac{N(\delta x)^2}{\lambda}, (3)$$

ここで  $N$  と  $\delta x$  は撮像素子のサンプル数とピクセルサイズ、 $\lambda$  は使用している光源の波長である。

PLC-DHM の理論空間分解能  $\delta x_0$  は式(4)で定義される。

$$\delta x_0 = \frac{\lambda}{\delta x \cdot N} |z_0|, (4)$$

PLC-DHM は撮像素子の受光面積  $\delta x \cdot N$  を最大限用いて干渉縞をとらえることができるように設計しているため、高い開口数と空間分解能を保持している。

## 2.2 デモシステム

本研究では専門的知識を有さないユーザーを対象とした PLC-DHM のユーザインターフェイスを作成し、サンプルを設置するだけで再構成像の取得が可能となるデモシステムの開発を行った。PLC-DHM デモシステムの概要を図 2 に示す。デモシステムは PLC-DHM、カメラ、温調器、温度センサー、ヒーター、ヒータードライバで構成される。

再構成像を得るまでのシステムの流れについて説明する。ユーザーはサンプルをステージに設置し、システムの開始命令を行う。UI は開始命令を受け取ると温調器とカメラを起動し、位相シフトした干渉縞動画を記録、保存を行う。この干渉縞動画を 2.1 節で述べた原理で再構成像を取得する。

PLC-DHM システムにおいて重要な要素デバイスについて説明する。我々は熱光学効果を利用した位相シフト法により相対位相差  $\delta = \frac{\pi}{2}$  の干渉縞 4 枚を用いて再生光の複素振幅分布を取得している。そのため UI の作製には干渉縞動画から相対位相差  $\delta = \frac{\pi}{2}$  の干渉縞 4 枚を自動でとりだす必要があった。

本研究ではこの課題に対し、MATLAB を用いて UI を作成し、定量的にヒーターの温度をコントロールすることができる温調器を導入した。温調器はユーザーが決定した目標温度と温度上昇率に応じてヒーターに電流を送り、温度をコントロールすることができる。

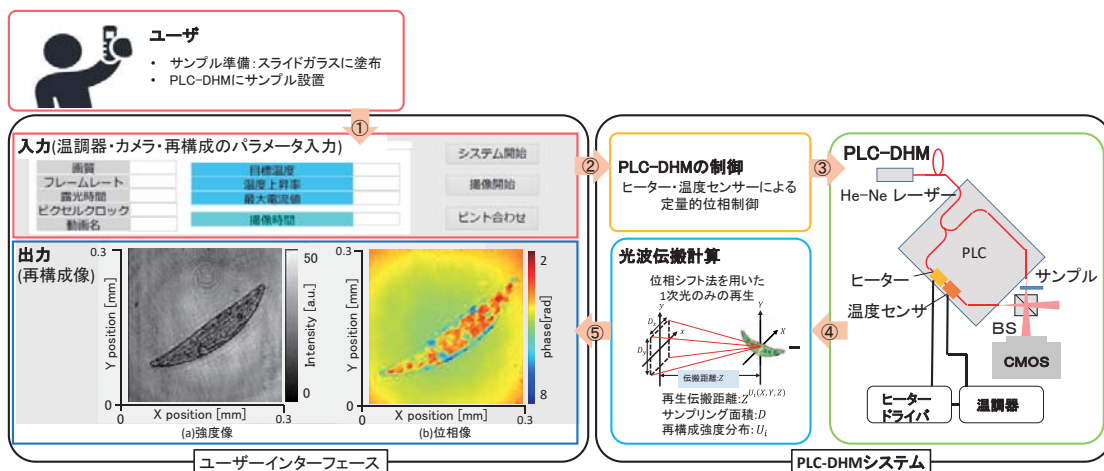


図 2 PLC-DHM デモシステム概要

る. 図 3 に温調器の制御フローチャートを示す. 開始命令を受け取ると温調器と PC を接続し, ユーザーが設定したヒーターの目標温度と温度上昇率, ヒーターへ流す最大電流値を格納する. これらの値を温調器のメモリに格納する 値に変換, 格納ののちに温調を開始する.

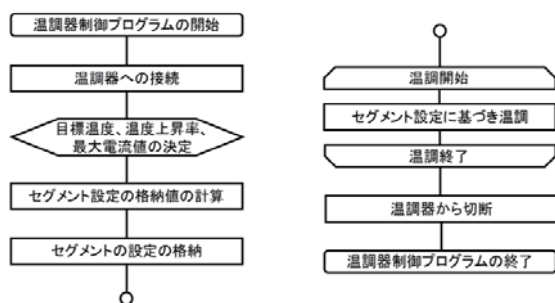


図 3 温調器制御フローチャート

温調器の動作開始直後に, カメラを起動し干渉縞の記録を開始する. カメラの制御フローチャートを図 4 に示す. 今回使用しているカメラを, MATLAB で動作させるには, 配布されている.NET アセンブリと.dll ファイルを読み込む必要がある. その後, 干渉縞を記録する際のフレームレート, 画質, ディスプレイモードを決定し, 干渉縞の記録を開始する.

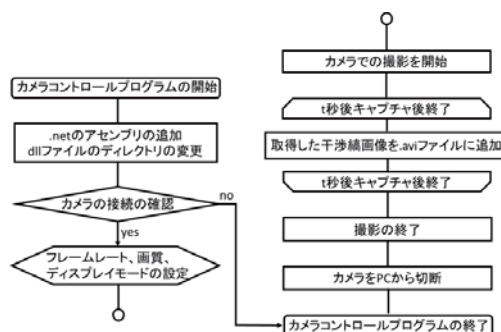


図 4 カメラ制御フローチャート

干渉縞の記録終了後温調器とカメラの接続を切断し, 再構成を開始する.

再構成の手順について説明する. UI は干渉縞の取得が終了すると, 干渉縞動画を画像フレームごとに分割し, 保存する. 分割した画像の任意ピクセルの光強度を取得する. 光強度-画像番号のグラフをフーリエ変換による近似を行い, 近似曲線から相対位相差  $\delta = \pi/2$  の干渉縞 4 枚を選択する. 選択した干渉縞画像を 2.1 節で述べたように再構成を行う. デモシステム全体の制御フローチャートを図 5 に示す.

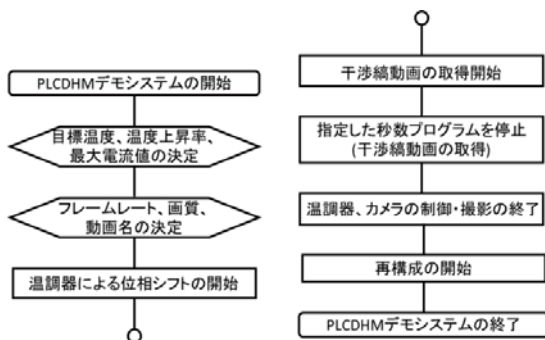


図 5 PLC-DHM デモシステム  
制御フローチャート

### 3. 実験結果

PLC-DHM デモシステムの空間分解能を評価するために、TOPPAN-TEST-CHART を用いた。再構成像の強度分布から空間分解能  $1.2\ \mu\text{m}$  を得た。

PLC-DHM デモシステムの性能を評価するために生体試料(ミカヅキモ)の観察を行い、生体試料の観察も可能であることを確認した。実験結果を図 2-(a)(b)に示した。

### 4. まとめ

本研究では専門的知識を有さないユーザーを対象とした PLC-DHM のユーザインターフェイスを作成し、サンプルを設置するだけで再構成像の取得が可能となるデモシステムを開発した。

### 文 献

- [1] J. W. Goodman, et al. Appl. Phys. Lett. **11** 77 (1967)
- [2] E. Watanabe, et al. Opt. Rev. **22**, 342C (2015).
- [3] K. Ikeda, et al. Digital Holography & 3-D Imaging DTh11.2 (2016).
- [4] I. Yamaguchi, et al. Appl. Opt.**40**, 6177-6186(2001)
- [5] K. Okamoto, et al. Opt. Lett. **35**, 2103(2010).
- [6] T. Goh, et al. J. Lightwave Tech. **15**, 2107 (1997)

# インデックスマッチング法と MEMS 技術を融合したデジタルホログラフィック PTV 法によるマイクロピラー周りの流体計測

松田 康寛<sup>†</sup> 木上 裕<sup>†</sup> 海野 徳幸<sup>‡</sup> 谷口 淳<sup>†</sup> 佐竹 信一<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京理科大学基礎工学研究科電子応用工学専攻 〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1

<sup>‡</sup> 山口東京理科大学 〒756-0884 山口県山陽小野田市大学通 1-1-1

E-mail: <sup>†</sup> {8117632, 8111033}@ed.tus.ac.jp, {junt, satake}@te.noda.tus.ac.jp, <sup>‡</sup> unno@rs.tusy.ac.jp

**あらまし** インデックスマッチング法を用いたデジタルホログラフィック粒子追跡流速測定 (DHPTV) 法は、サブミクロンの分解能で粒子の 3D 位置を検出することができるため、x-y-z (3D) 流れ測定にとって強力な技術である。MY-133-V2000 は、1.333 の屈折率を有する UV 硬化性エラストマーである。屈折率 1.333 は水と一致する。このため、このポリマーは、粒子の画像を歪ませないマイクロ構造の構築を可能にする。これにより、流れ構造の高品質で高分解能なイメージングが可能になる。本研究では、MY-133-V2000 で作製されたマイクロ構造の周りの流れ構造を可視化するために、DHPTV の可視化を、作動流体として水を用いたインデックスマッチング法によって行った。

**キーワード** ホログラフィ, PTV, マイクロピラー

## Flow measurement around micro-pillars by digital holographic PTV combining refractive index matching method and MEMS technology

Yasuhiro Matsuda<sup>†</sup> Hiroshi Kigami<sup>†</sup> Noriyuki Unno<sup>‡</sup> Jun Taniguchi<sup>†</sup> Shin-ichi Satake<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Applied Electronics, Tokyo University of Science, 6-3-1 Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585 Japan

<sup>‡</sup> Tokyo University of Science, Yamaguchi, 1-1-1 Daigakudo-ri, Sanyo-onoda, Yamaguchi, 756-0884 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {8117632,8111033}@ed.tus.ac.jp, {junt,satake}@te.noda.tus.ac.jp, <sup>‡</sup> unno@rs.tusy.ac.jp

**Abstract** Digital holographic particle tracking velocimetry (DHPTV) with a refractive-index-matching method is powerful technique for xyz (3D) flow measurement, because it can detect the 3D position of the particles with submicron resolution. MY-133-V2000 is a UV-curable elastomer with index of 1.333. The refractive index, 1.333, matches water. Due to this, this polymer enables construction of microstructures, that does not distort the imaging of particles. This enables a breakthrough in high quality, high resolution imaging of flow structures. In the present study, to visualize the flow structures around the microstructures made of MY-133-V2000, digital holographic PTV visualization is carried out by a refractive index-matching method using the water employed as a working fluid.

**Keyword** Holography, PTV, micro-pillar

### 1. 緒言

流体解析や生体細胞の動きの計測などに用いられる実験手法にインデックスマッチング法がある。インデックスマッチング法は、流体中の構造物の周囲を観察する際に、屈折率が同程度の流体と構造物の組み合わせを用いることで構造物を見かけ上透明化し、流体中の構造物から屈折や散乱が生じることを防ぐ手法で

ある[1]。

先行研究では、水と同じ屈折率の材料 MEXFLON で構造物を作製して水とのインデックスマッチング法を行い、MnPIV によるマイクロ構造物周りの粒子追跡[2]を行った研究や、MEXFLON で作製した球体を充填した円管内の複雑流れをデジタルホログラフィック PTV (DHPTV) 法[3]で計測[4]した研究がある。



このほか MY-134 (MY Polymers, 屈折率  $n=1.34$ ) で作製したマイクロピラーと細胞培養液 ( $n=1.338$ ) を用いてインデックスマッチング法を行い, 細胞を観察した研究[5]がある.

本研究では, 水と同じ屈折率 1.333 の UV 硬化樹脂 MY-133-V2000 を構造物の材料として使用することで, 作動流体として水を用いたインデックスマッチング法による流体の三次元計測を行った.

構造物の作製方法は, UV ナノインプリントソグラフィ技術を用いて MY-133-V2000 (MY Polymers) で MnPIV のためのキャリブレーションプレートを作製することに成功した先行研究があり[6]これと同様の方法を用いてマイクロピラー構造物を作製し, その周囲の流れを計測した.

## 2. 実験方法

UV ナノインプリントソグラフィ (UV-NIL) による製造プロセスを用いて水と同じ屈折率 1.333 の光学材料 MY-133-V2000 でマイクロピラーパターンを作製した[6]. マイクロピラーパターンの欠損を防ぐために, UV-NIL の際に真空引きを行った. このマイクロピラーパターンの上に, 純水(昭和化学株式会社)に直径  $1\mu\text{m}$  のトレーサー粒子 (Thermo Fisher Scientific, 4010A) を混ぜたトレーサー粒子懸濁液に, トレーサー粒子をピラーの上に固定するために濃度  $10[\text{mmol/L}]$  となるように NaCl(昭和化学株式会社, 試薬特級) を追加した懸濁液を滴下し, その上にスライドガラスを被せてホログラムを撮影し, 再生の校正を行った. また, トレーサー粒子懸濁液を滴下して撮影を行い, DHPTV 法でトレーサー粒子を再生, 可視化してピラーの上で動くトレーサー粒子の動きを観察した. 図 1 に実験に用いた光学系の概略図を示す. 実験装置は既報[7]と同じである.

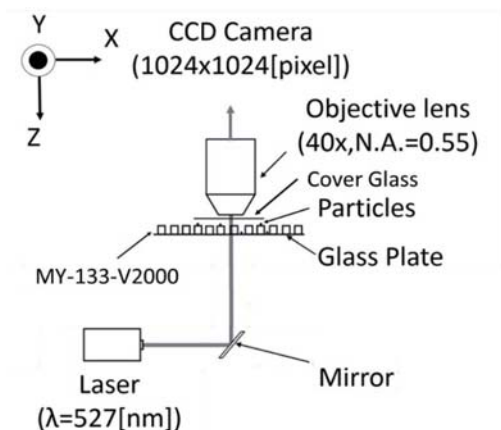


図 1 実験装置概略図

光学系は CCD カメラ (Redlake, MotionProX-3, 解像度  $1024[\text{pixel}] \times 1024[\text{pixel}]$ , 素子サイズ  $12[\mu\text{m}] \times 12[\mu\text{m}]$ ), 対物レンズ ( $40\times$ ,  $\text{NA}=0.55$ ), マイクロスケールピラーパターンがのったスライドガラス (松浪硝子工業株式会社, S9112), ホログラム撮影時にマイクロスケールピラーパターン上に滴下したトレーサー粒子の上からかぶせるカバーガラス, ミラー, 高繰り返しダブルパルスレーザ (Photonics Industries DS20-527,  $\lambda=527\text{ nm}$ ) で構成される. ダブルパルスレーザは波長  $527[\text{nm}]$ , 繰り返し間隔  $1[\text{kHz}]$  のグリーンレーザで, CCD カメラの解像度は  $1024 \times 1024[\text{pixel}]$  で毎秒 1000 枚の撮影を行った. また, CCD の素子サイズは  $12[\mu\text{m}/\text{pixel}]$  である. 対物レンズは倍率 40 倍, 開口数 0.55 である. レーザーはホログラムを撮影するために, 試料と CCD カメラに対して垂直に照射されるように設置した.

## 3. 実験結果

図 2 に真空引きしない UV-NIL で作製したマイクロピラーパターンの SEM 像を示す.

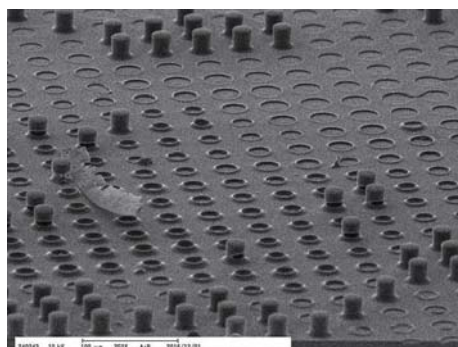


図 2 真空引きしない UV-NIL で作製したマイクロピラーパターンの SEM 像

マイクロピラーパターンが欠損し, ピラーが立っていない部分があることが確認できる. 図 3 にこのマイクロピラーパターンのホログラムを示し, 図 4 にトレーサー粒子懸濁液を滴下した後のマイクロピラーパターンのホログラムを示す.

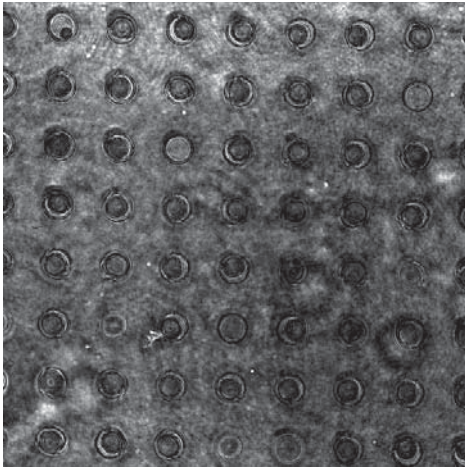


図3 真空引きしない UV-NIL で作製したマイクロピラーパターン(粒子懸濁液なし)

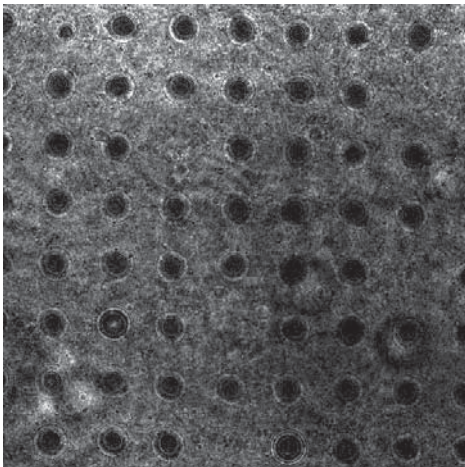


図4 真空引きしない UV-NIL で作製したマイクロピラーパターン(粒子懸濁液あり)

トレーサー粒子懸濁液を滴下した後もマイクロピラーが透明化していないことが分かる。これに対して UV-NIL の過程で真空引きして作製したマイクロピラーパターンの SEM 像を図 5 に示す。

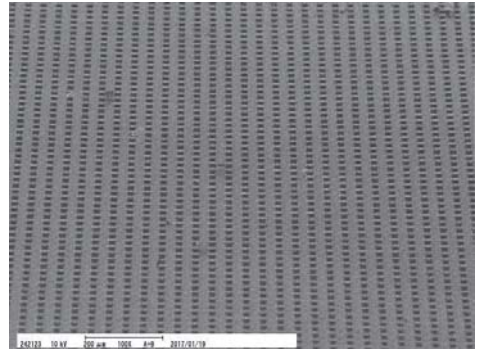


図5 真空引きした UV-NIL で作製したマイクロピラーパターン

図 6 にトレーサー粒子懸濁液を滴下する前のマイクロピラーパターンのホログラムを示し、図 7 に NaCl 入りトレーサー粒子懸濁液を滴下した後のマイクロピラーパターンのホログラムを示す。

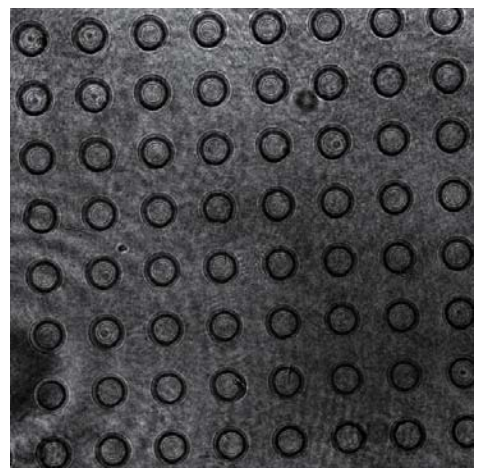


図6 真空引きした UV-NIL で作製したマイクロピラーパターン(粒子懸濁液なし)

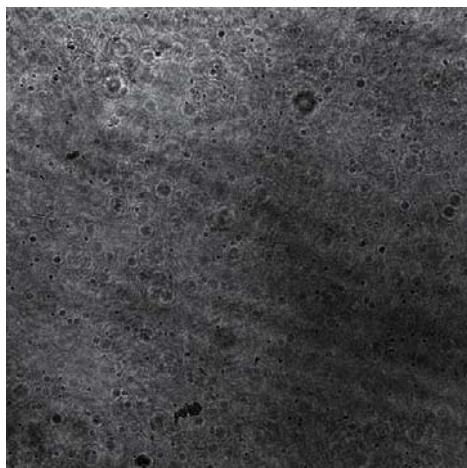


図7 真空引きした UV-NIL で作製したマイクロピラーパターン(粒子懸濁液あり)

NaCl 入りトレーサー粒子懸濁液を滴下した後はマイクロピラーパターンが透明化した。図8に真空引きした UV-NIL で作製したマイクロピラーの SEM 像の拡大図を示す。

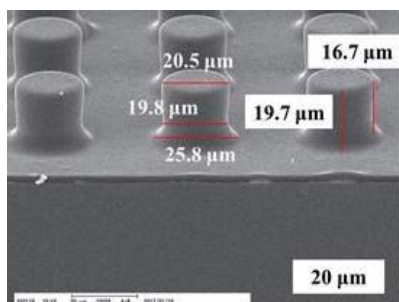


図8 真空引きした UV-NIL で作製したマイクロピラーの SEM 像の拡大図

図9にホログラムを再生して得られた粒子の軌道の三面図を示す。ピラーに関しては上部 5μm のみを可視化した。

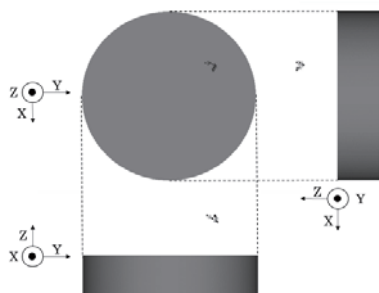


図9 ピラーの上を動く粒子の軌道の3面図

粒子の再生とトラッキングに成功した。よって、水と MY-133-V2000 によるインデックスマッチングに成功した。

#### 4. 結言

本研究では MY-133-V2000 で構造物を作製し、作動流体として水を用いたインデックスマッチング法による計測が行えることが分かった。今後は、より複雑なマイクロ構造物周りの流れの三次元可視化への応用が期待できる。

#### 文 献

- [1] R.Budwig, Refractive index matching methods for liquid flow investigations. Experiments in Fluids, pp. 350-355, 1994.
- [2] Noriyuki Unno, Shuichiro Nakata, Shin-ichi Satake, Jun Taniguchi, "Three-dimensional particle tracking around microstructures in water via total internal reflection fluorescence microscopy and refractive-index-matching method," Experiments in Fluids (2016) 57: 120. doi:10.1007/s00348-016-2205-x
- [3] Satake, S., Kunugi, T., Sato, K., Ito T., " Digital Holographic Particle Tracking Velocimetry for 3-D Transient Flow around an Obstacle in a Narrow Channel," Optical Review, Vol. 11, No. 3, 2004, pp L162 - L164.
- [4] Masataka Kuniyasu, Yusuke Aoyagi, Noriyuki Unno, Shin-ichi Satake, Kazuhisa Yuki, Yohji Seki, "Digital holographic PTV for complicated flow in a water by two cameras and refractive index-matching method," Optical Review, Volume 23, Issue 3, 2016, pp.529-534, DOI 10.1007/s10043-016-0203-0
- [5] Andrea Ravasio, Sree Vaishnavi, Benoit Ladoux, Virgile Viasnoff. High-resolution imaging of cellular processes across textured surfaces using an indexed-matched elastomer. Acta Biomaterialia, Volume 14, 1 March 2015, Pages 5360.
- [6] Noriyuki Unno, Hiroshi Kigami, Taku Fujinami, Shuichiro Nakata, Shin-ichi Satake, Jun Taniguchi, "Fabrication of calibration plate for total internal reflection fluorescence microscopy using roll-type liquid transfer imprint lithography", Microelectronic Engineering 180 (2017) 86–92 <http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2017.06.005>
- [7] Shin-ichi Satake, Tomoaki Kunugi, Kazuho Sato, Tomoyoshi Ito, Hiroyuki Kanamori and Jun Taniguchi. Measurements of 3D flow in a micro-pipe via micro digital holographic particle tracking velocimetry. Measurement Science and Technology, Volume 17, Number 7, pp. 1647-1651, 2006.

## 平成 30 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： 2018 年 9 月 7 日（金） 13:00～17:00

■ 場 所： 電気通信大学

京王線 調布駅下車

■ 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) フルカラー積層体積型 CGH における基板収差の補正

國枝織絵・松島恭治（関大）

(2) 大型の 3D 室内空間を再生する計算機合成ホログラムの計算法

五十嵐俊亮・中村友哉（東工大）・松島恭治（関西大）・山口雅浩（東工大）

(3) ホログラフィ計算における三角関数近似手法の回路設計と評価

西辻 崇（首都大）・山本洋太・杉江崇繁・角江 崇・下馬場朋禄・伊藤智義（千葉大）

休憩

(4) 電子ホログラフィ専用計算機 HORN-8 を用いた 3 次元映像システム

山本洋太・杉江崇繁（千葉大）・西辻 崇（首都大東京）・

下馬場朋禄・角江 崇・伊藤智義（千葉大）

(5) 平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡デモシステム

井元克駿・佐竹宏基・児玉周太朗（電通大）・池田佳奈美（府立大）・

岡本勝就（岡本研）・渡邊恵理子（電通大）

(6) インデックスマッチング法と MEMS 技術を融合したデジタルホログラフィック

PTV 法によるマイクロピラー周りの流体計測

松田康寛・木上 裕（東京理科大）・海野徳幸（山口東京理科大）・

谷口 淳・佐竹信一（東京理科大）

情報コーナー

■ 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

TEL/FAX 047-469-5391 E-mail: [office@hodic.org](mailto:office@hodic.org)



## 平成 30 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： 2018 年 11 月 30 日(金) 午後 (予定)
- 場所： 京都工芸繊維大学(松ヶ崎キャンパス)  
東 3 号館(旧ノートルダム館)3 階 K303 講義室 (予定)  
[https://www.kit.ac.jp/uni\\_index/campus-map/](https://www.kit.ac.jp/uni_index/campus-map/)
  
- テーマ： デジタルホログラフィー(仮)
  
- 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](mailto: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, 分からない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](mailto: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](mailto: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（首都大学東京）	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）	角江 崇（千葉大学）
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（ユニカミルタフ・ラネトリウム）	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）	三田村峻王
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. 3 (Sep. 2018)

2018 年 9 月 7 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**