

ホログラムカレンダー

2023年10月14日（土）～16日（月） SPIE/COS Photonics Asia 2023, Beijing, China

<https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-asia?SSO=1>

2023年12月5日（火）～7日（木） International Workshop on Holography and related technologies (IWH2022&2023), Fuzhou, China

Submission deadline 10月1日締切 <http://www.iprc.ac.cn/iwh2022/>

2023年12月6日（水）～8日（金） International Display Workshop (IDW), 14th International Conference on Three Dimensional Systems and Applications (3DSA 2023), 朱鷺メッセ, 新潟 Late-News Paper 9月20日締切 <https://www.idw.or.jp/>

2024年1月27日（土）～2月1日（木） SPIE Photonics West, San Francisco, California, United States <https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-west/>

目 次

1. ホログラムカレンダー:	表紙
2. デニシュク型波面プリンタによる全方向視差高解像度 CGVH の描画	
3. 大型化した積層 CGVH による高品質フルカラー3D 映像	竹村祐貴, 他 1
4. 光線サンプリング面を用いた光波計算の波動光学的特性	藤木駿介, 他 5
5. Non-Periodic Line Photon Sieve を用いたホログラム表示の検討	桂 謙介, 他 9
6. 小型プロジェクタを用いたフルカラーホログラフィックビデオディスプレイ	佐々木隼暉, 他 13
7. リニアブレンディングを用いた多視点 DFD(Depth-fused 3D)レンダリング	霍 翔, 他 17
8. 計算機合成ホログラムにおける任意曲面における鏡像の計算アルゴリズム	森下雄登, 他 21
9. 計算機ホログラムにおけるクラウドサーバ群を用いた計算負荷の分散および処理時間に対する効果の検証	新井大也, 他 25
10. 位相アンラッピングにおける空間関係を考慮したモジュールの導入 —Spatial Relation Aware Module (SRAM)の開発—	山内啓瑚, 他 29
11. 次回研究会のお知らせ	吾妻千織, 他 33
	卷末

デニシュク型波面プリンタによる全方向視差高解像度 CGVH の描画

竹村 裕貴^{†*} 西 寛仁[†] 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: *k493099@kansai-u.ac.jp (竹村)

あらまし 白色光照明で再生可能な体積型計算機合成ホログラム (CGVH) を 1 ステップで描画可能で、かつ低出力光源で機能するデニシュク型波面プリンタを製作し、総サンプル点数約 125 億の物体光波を描画した。この全方向視差 CGVH のサイズは約 12cm × 9cm であり、緑色波長で両側視域角は約 33 度である。製作した波面プリンタの詳細および白色光源による CGVH の再生像を報告する。

キーワード 計算機合成ホログラム(CGH), 体積ホログラム, 波面プリンタ, デニシュク型光学系

Print of full-parallax high-definition CGVH using Denisyuk-type wavefront printer

Yuki Takemura^{†*} Hirohito Nishi[†] Kyoji Matsushima[†]

[†]Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

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

E-mail: *k493099@kansai-u.ac.jp (Y. Takemura)

Abstract A Denisyuk-type wavefront printer is developed for printing computer-generated volume holograms (CGVH) in a single step, which have the advantage of reconstruction using white light illumination. Using the printer that features operation with a low power light source, we successfully printed a large-scale full-parallax object field composed of approximately 12.5 billion sample points. The size of the CGVH is approximately 12cm × 9cm, and the viewing angle is 33 degrees on both sides at a green wavelength. The details of the wavefront printer and the optical reconstruction of the printed CGVH are reported in this paper.

Keyword Computer-generated hologram(CGH), Volume hologram, Wavefront printer, Denisyuk-type optical system

1.はじめに

計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram: 以下 CGH) は、コンピュータで作成した仮想物体光波から干渉縞パターンを数値計算によって生成し、それを描画装置で描画して作製するホログラムである。通常、視域角数 10 度でサイズ数センチ角以上の高解像度 CGH の作成には最低でも数十億ピクセル以上の大規模な干渉縞パターンが必要であり、計算に膨大な時間を要する問題がある。また、1 μm 以下のピクセルピッチで干渉縞を描画する必要があるため、高精細な描画技術が必要であり、この目的のためのプリンジプリンタが開発され利用されて来た[1, 2]。また電子ビーム描画装置も利用されおり[3]、電子ビームより物理解像度は劣るが描画速度と面積の観点からレーザーリソグラフィー技術を用いた高解像度 CGH の作製が行われている[4]。

しかし、このような描画装置では干渉縞を二次元的

に描画するため、薄いホログラムとなる。薄いホログラムは波長選択性を持っておらず、様々な波長でわずかに異なる再生像が生じるため、白色光で再生すると色収差による虹状の像が生じてしまう。一方で、このような問題が発生しないホログラムとして体積ホログラムがある。体積ホログラムの干渉縞は薄いホログラムとは異なり、3 次元構造を有するため波長選択性があり、白色光で照明しても記録時の波長のみで再生される。このような体積ホログラムとして作製された CGH は計算機合成体積ホログラム (Computer-Generated Volume Hologram: 以下 CGVH) と呼ばれる。通常、CGVH は CGH の再生像を厚い感光性記録材料へ転写して作製される。特に、レーザーリソグラフィーによって高反射率の干渉縞パターンを描画した場合は、コンタクトコピーによって容易に転写できる[5]。

しかしながら、これらの手法では CGH 描画と転写の 2 つの工程が必要である。CGVH を 1 ステップで描

画できる手法として、波面プリンタの開発が行われている[6-9]。波面プリンタでは、空間光変調器(Spatial Light Modulator: 以下 SLM)を用いて物体光の波面を発生し、参照光と干渉させることで CGVH を作製する。以下、SLM で発生した光を描画光あるいは描画波面と呼ぶ。一般に波面プリンタでは、レーザー光源の出力光をビームスプリッタによって分岐して描画光と参照光に分けていたため、描画光の光強度が低下し、露光時間が長くなることで振動に弱くなるという問題があった。

そこで、我々はデニシュク型ホログラムの手法を波面プリンタに応用したデニシュク型波面プリンタを提案している[10]。この手法では、光を分岐する必要がないため描画光強度が高くなり、また必要な光学素子数が減少するため振動に強い利点がある。この方式により、フルハイビジョン解像度の位相型 SLM(以下、2K-SLM)を用いて、両側視域角約 15 度で奥行き約 16cm の位置にある物体像を再生する 6.1cm×3.5cm の CGVH を報告している[11]。しかし、この従来型では、用いた SLM の物理解像度が低く、十分な視域とサイズを持つ CGVH の作製が困難であった。そこで本研究では、同様の光学系に 4K 解像度の位相型 SLM(以下、4K-SLM)を導入して CGVH の視域角を 2 倍の約 30 度に拡大し、面積比が約 5.7 倍の 12.3cm×9.9cm の全方向視差高解像度 CGVH を描画した。この改良したデニシュク型波面プリンタとその光学再生像について報告する。

2. デニシュク型波面プリンタ

2.1. 原理

図 1(a)に一般的なデニシュク型ホログラムの記録方法を示す。この手法では、記録材料を透過した光で被写体を照明し、そこで反射・散乱された物体光が、記録材料に入射した光を参照光として干渉縞を形成する。この時、参照光と物体光が厚い記録材料に逆方向に入

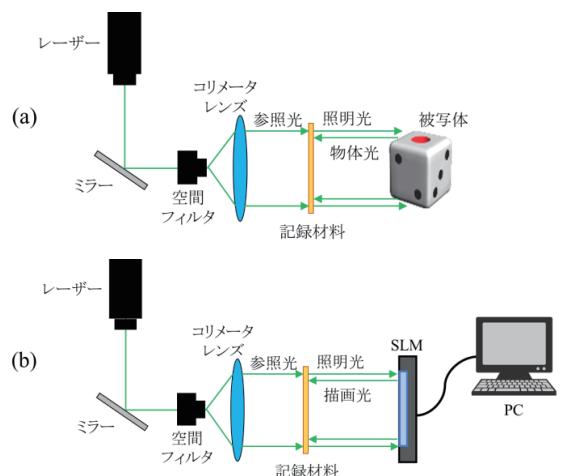


図 1 (a)デニシュク型ホログラムの記録と(b)デニシュク型波面プリンタの原理

射するため、体積ホログラムが記録される。一方、デニシュク型波面プリンタでは、(b)のように、記録材料を透過した光で SLM を照明することで描画光を発生する。この時、デニシュク型ホログラムと同様に描画光と参照光が記録材料を挟み込むように入射するため、体積ホログラムとして描画光を記録することができる。

2.2. 波面プリンタの光学系

従来使用していた 2K-SLM と本研究で新たに導入した 4K-SLM の仕様を表 1 に示し、図 2 に本研究で作製したデニシュク型波面プリンタの光学系を示す。光源には狭帯域化した 532nm の緑色レーザーを使用した。この光学系ではまず、空間フィルタとコリメータレンズを用いてビーム径を拡大し、可変矩形開口を通して矩形に整形したビームを参照光として記録材料に斜入射している。この時、参照光入射角を約 30 度とし、

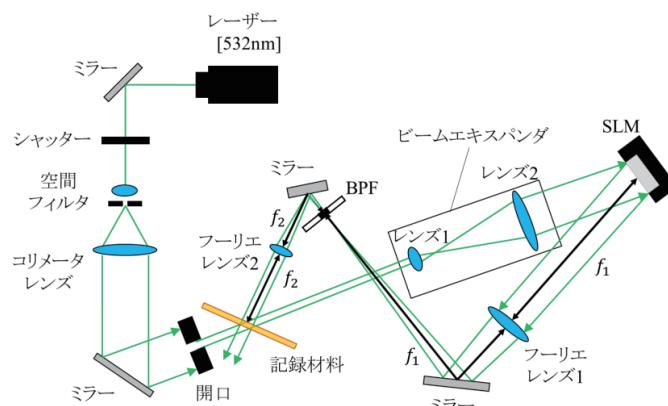


図 2 デニシュク型波面プリンタの光学系

表 1 描画光発生に用いた位相型 SLM の仕様

	2K-SLM(従来)	4K-SLM(本研究)
製品(メーカー)	PLUTO (HOLOEYE)	JD7714 (Jasper Display)
ピクセル数	1,920 × 1,080	4,094 × 2,400
ピクセルピッチ [μm]	8.0 × 8.0	3.74 × 3.74
有効面積 [mm ²]	15.36 × 8.64	15.31 × 8.97
位相変調レベル	256 (8bit)	256 (8bit)

再生時に 0 次光や照明光源自体が鑑賞の妨げにならないようにしている。記録材料を透過した光はビームエキスパンダによって 5 倍に拡大され、SLM の変調面全体を照明する。SLM で発生した描画光は 4f 光学系に設置したバンドパスフィルタによってフィルタリングと縮小を行い、記録材料にはほぼ垂直に入射している。なお、縮小後の描画波面のサンプリング間隔 δ' は

$$\delta' = \frac{f_2}{f_1} \delta \quad (1)$$

となる。ここで、 f_1 と f_2 はそれぞれフーリエレンズ 1, 2 の焦点距離、 δ は SLM のピクセルピッチである。本研究で用いたフーリエレンズの焦点距離は $f_1 = 400\text{mm}$, $f_2 = 100\text{mm}$ となっており、(1)式より描画波面のサンプリング間隔は SLM のピクセルピッチの 4 分の 1 に縮小されている。本研究では、この光学系と定格出力 150 mW のレーザー光源を用いて、参照光で約 35 mW/cm²、描画光で約 1.8 mW/cm² の光強度を得ている。

2.3. タイリング

本研究で用いた 4K-SLM であってもその空間バンド積は高々 10^7 程度であり、空間バンド積が 10^{10} に及ぶ大規模な高解像度 CGVH を一度に描画できない。実際、図 2 の光学系で発生できる描画光のサイズは約 3.8 mm × 2.2 mm となっている。そこで、一般に波面プリンタではタイリング転写を行って CGVH のサイズを拡大する。本波面プリンタにおいても、図 3 に示すように、計算した描画波面を SLM で発生可能なサイズの複数の部分波面に分割し、順次それらを SLM で発生して部分的に CGVH を描画する。一つの部分 CGVH 描画後に自動ステージによって記録材料を移動して次の部分波面を描画する。これを繰り返すことで最終的に元の描画波面全体を CGVH として記録している。なお、自動ステージによる移動には振動を伴うため、移動するたびに安定状態になるまで 3 秒間のセトリングタイムを設けている。

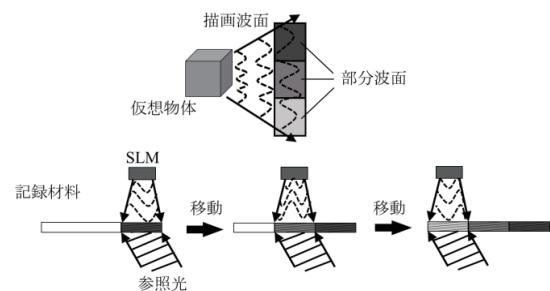


図 3 タイリング描画

3. 高解像度 CGVH の描画

描画した CGVH の 3D シーンを図 4 に示す。ビーナス像のサーフェスモデルの背後にチェックマーク模様の 2 次元画像を配置した構成となっている。全方向視差の描画光波は、ポリゴン法とシルエット法によるオクルージョン処理を用いて計算した[12]。描画した CGVH のパラメータを表 2 に示す。描画波面の総サンプル点数(空間バンド積)は 125 億以上となっており、波長 532 nm でサンプリング間隔 0.935 μm であるため、両側視域角約 33 度、また CGVH サイズは約 123 mm × 90 mm である。なお、計 1280 枚のタイリングで総描画時間は約 2.5 時間であった。

表 2 CGVH の描画パラメータ

設計波長 [nm]	532
タイル数	32 × 40
総サンプル点数	131,008 × 96,000
サンプリング間隔 [μm]	0.935 × 0.935
サイズ [mm ²]	122.5 × 89.7
両側視域角 [deg]	33.1 × 33.1
セトリングタイム [s]	3
露光時間 [s]	0.25
フォトポリマー	Bayfol®HX200

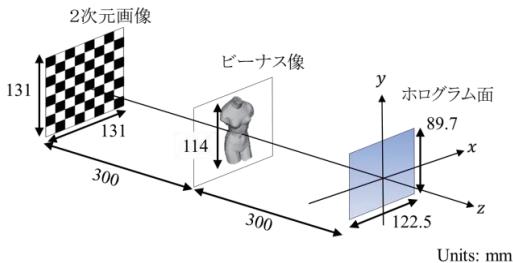


図 4 描画 CGVH の 3D シーン

4. 光学再生像

描画した全方向視差高解像度 CGVH をファイバ出力白色 LED で照明した再生像の写真を図 5 に示す。写真是異なる 3 つの視点から撮影しており、視点の変化に応じてビーナス像とチェック画像のオクルージョンの変化が確認できる。表 1 に示すように、本研究で用いた 4K-SLM は従来の 2K-SLM に対してピクセル数が縦横約 2 倍、ピクセルピッチが約 2 分の 1 に向かっている。そのため、同規模のピクセル数を持つ CGVH をより少ないタイル数で描画でき、両側視域角が従来の約 2 倍である 33 度以上に向上した。

5.まとめ

デニッシュ型波面プリンタに従来よりも物理解像度が高い 4K-LCoS 液晶 SLM を導入した。これにより、描画される CGVH の両側視域角が従来の約 2 倍に相当する約 33 度に向上した。また、総サンプル点数が 125 億を超える波面の描画を行い、約 12cm × 9cm の大型全方向視差 CGVH を作製した。

今後はデニッシュ型波面プリンタのさらなる改良により再生像の品質を向上するとともに、複数波長のレーザーを導入し、フルカラー再生が可能な大型 CGVH の作製を行う予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費 22H03712 の助成を受けたものである。

文献

- [1] K.Matsushima, S. Kobayashi and H. Miyachi: "A high-resolution fringe printer for studying synthetic holograms", Proc. SPIE, 6136, pp.347-354(Jan. 2006).
- [2] H.Yoshikawa and T.Yamaguchi: "Review of holographic printers for computer-generated holograms", IEEE Trans. Ind. Inform. 12, 4, pp.1584-1589(Aug. 2016).
- [3] W. Freese, T. Kämpfe, W. Rockstroh, E.-B. Kley, and A. Tünnermann: "Optimized electron beam writing strategy for fabricating computer-generated holograms based on an effective medium approach", Opt. Express 19, 9, pp.8684-8692(Apr. 2011).
- [4] 松島恭治, 斎藤智崇, 五十嵐勇祐, 國枝織絵, 橋村直柔, 小西涼太: “関大デジタルホロスタジオにおける大規模 CGH 描画・作成技術”, Hodic Circular, 38, 1, pp.2-9(Mar. 2018).
- [5] O. Kunieda and K. Matsushima: "High-quality full-parallax full-color three-dimensional image reconstructed by stacking large-scale computer-generated volume holograms", Appl. Opt. 58, 34, pp.G104-G111(Dec. 2019).
- [6] W. Nishii and K. Matsushima: "A wavefront printer using phase-only spatial light modulator for producing computer-generated volume holograms", Proc. SPIE, 9006, 90061F(Feb. 2014).
- [7] T. Yamaguchi, O. Miyamoto, and H. Yoshikawa: "Volume hologram printer to record the wavefront of three-dimensional objects", Opt. Eng. 51, 7, 075802 (Jul. 2012).
- [8] R. Oi, P. Y. Chou, B. J. Jackin, K. Wakunami, Y. Ichihashi, M. Okui, Y. P. Huang, and K. Yamamoto: "Three-dimensional reflection screens fabricated by holographic wavefront printer", Opt. Eng. 57, 6, 061605(Jan. 2018).
- [9] Y. Kim, E. Stoykova, H. Kang, S. Hong, J. Park, J. Park, and J. Hong: "Seamless full color holographic printing method based on spatial partitioning of SLM", Opt. Express 23, 1, pp.172-182(Jan. 2017).
- [10] 斎藤智崇, 松島恭治: “デニッシュ型光学系を用いた波面プリンタの基礎研究”, 3 次元画像コンファレンス 2017, P-3, (Jul. 2017).
- [11] K. Matsushima, "Introduction to Computer Holography", Sect. 15.4.4, Springer, (2020).
- [12] K. Matsushima and S. Nakahara: "Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method", Appl. Opt. 48, 34, pp.H54-H63(Dec. 2009).

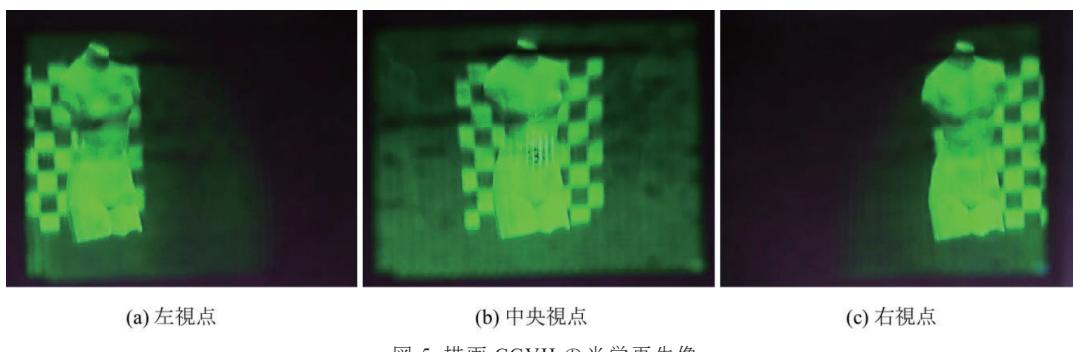


図 5 描画 CGVH の光学再生像

大型化した積層 CGVH による高品質フルカラー3D 映像

藤木 駿介 西 寛仁 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: k524366@kansai-u.ac.jp (藤木)

あらまし 積層 CGVH(Computer-generated volume hologram)は計算機合成ホログラムをフルカラー再生する一つの手法である。積層 CGVH では、鮮明な再生像を得るためにレーザー照明が必要な RGB カラーフィルタ方式フルカラーCGH とは異なり、干渉縞を空間分割せず、また CGVH の優れた波長選択性により、広帯域の白色 LED 照明でも高品質で明るい再生像を得ることができる。しかし、作製可能な大きさが転写レーザーの出力で決まる問題がある。そこで、タイリング転写法でこの問題を回避し、大型で高品質な積層 CGVH を作製した。そのフルカラー再生像を報告する。

キーワード 体積 CGH, コンタクトコピー, CGH, フルカラー, 積層 CGVH

High-quality full-color 3D image by stacking upsized CGVH

Shunsuke FUJIKI Hirohito NISHI Kyoji MATSUSHIMA

Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, Kansai University

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

E-mail: k524366@kansai-u.ac.jp (S.Fujiki)

Abstract Technique of the stacked CGVH (Computer-generated volume hologram) is one of methods to reconstruct full-color images from computer-generated hologram. Unlike the RGB color filter method that requires an RGB laser light source to reconstruct sharp images, because a stacked CGVH does not split the fringe pattern spatially and has an excellent spectral property by volume hologram, the stacked CGVH can reconstruct bright and sharp 3D images using broadband white LED illumination. However, the size of a stacked CGVH is limited dependently on the output power of the laser used for fabricating CGVHs. In this paper, we report high quality 3D images of a large-scale stacked CGVH, fabricated using a technique of tiling contact-copy to avoid limitation of the CGVH size due to the laser power.

Keyword computer-generated volume hologram, contact-copy, CGH, full-color, stacked CGVH

1.はじめに

コンピューターの性能向上と計算技術の進歩によって、数 100 億画素から数 1000 億画素もの全方向視差高解像度計算機合成ホログラム(Full-parallax high-definition CGH: FPHD-CGH)の干渉縞パターンを計算できるようになった。計算した干渉縞パターンから実際の FPHD-CGH を作製するためにはフリンジプリンタや、波面プリンタ、電子ビーム描画装置、レーザービーム描画装置等が用いられる。しかし、このような装置で描画された干渉縞は、そのままでは単色の像を再生するため、描画した干渉縞からフルカラー再生像を得る手法が複数提案されている。

RGB カラーフィルタ方式は、RGB の 3 原色の波長で計算した干渉縞を空間分割して組み合わせ、一つの CGH として描画し、カラー液晶と同様の RGB カラーフィルタを位置合わせして貼り付ける手法である[1]。

しかし、この手法は干渉縞を空間分割しているためノイズが多く、またカラーフィルタの帯域が広いため、高品質な再生像を得るには RGB レーザー光源を用いる必要がある[2]。計算機合成体積ホログラム(Computer-generated volume hologram: CGVH)を描画する波面プリンタでフルカラー像を得る方法として、RGB の干渉縞を空間分割してモザイクパターン状に描画する手法も報告されているが、やはり干渉縞を空間分割しているためか、高品質なカラー再生像は得られていない[3]。干渉縞を空間分割することなしに CGVH を 3 波長で多重露光する手法も考えられるが、記録材料の容量の制限のため、各色の回折効率が低くなると考えられる[4]。

干渉縞の空間分割や多重露光をせずに、高品質で高効率のフルカラー再生像が得られる方式として、RGB

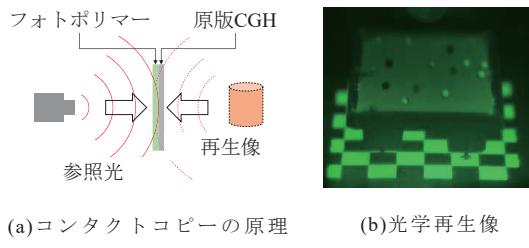


図 1 コンタクトコピーの原理と CGVH の再生像

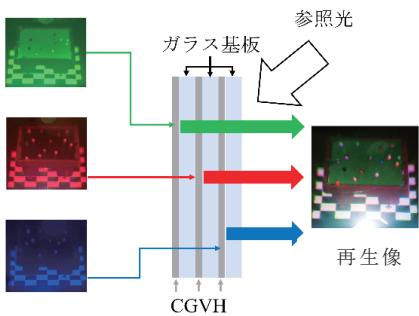


図 2 積層 CGVH 方式カラーホログラムの原理

ごとに作製した個別の CGVH を重ねる積層 CGVH 方式がある[5]. この方式では、RGB の像を異なった CGVH が再生することから、干渉縞の空間分割によるノイズが無く、記録材料の回折効率の低下も発生しない. そのため、白色 LED による広帯域照明でも高品質で明るい再生像を得られる.

しかし、位置合わせの容易さと正確さの点から、この方式では反射型 CGH のコンタクトコピーにより CGVH を作製しており、作製可能なサイズが転写レーザーの出力に依存する問題がある. この制限を回避するため、ビームスキャン法による大型化が提案されているが、高品質な再生像は得られていない[6]. これはビームスキャン時の振動やビームの重なりが原因だと考えられる. そこで、このような問題が発生しないタイリング転写法[7,8]により大型化したフルカラー積層 CGVH を報告する.

2. タイリング転写法による CGVH の作製

2.1. コンタクトコピー

FPHD-CGH の干渉縞の有力な描画方法としてレーザリソグラフィがある[2]. この方法で描画される干渉縞はクロム膜でできているため、反射率が高く反射再生が可能である. そこで、この方法で作製された FPHD-CGH を原版とし、図 1(a)に示すように、原版 CGH とフォトポリマーを密着させた状態で転写光を入射し、フォトポリマーを通して原版 CGH を照明する. この時、転写光を CGH 計算時の参照光と同じ光にすると、

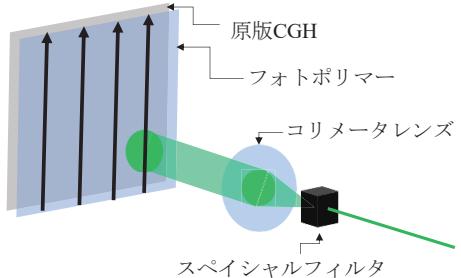


図 3 ビームスキャン法の原理

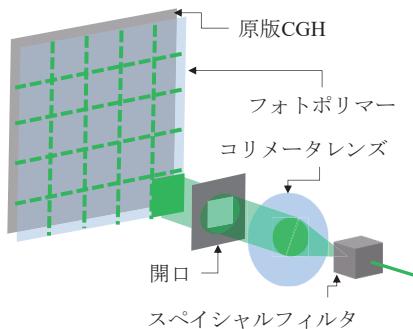


図 4 タイリング転写法の原理

原版 CGH の再生光が物体光、転写光が参照光となり、これらが互いに対向してフォトポリマーに入射するため、原版 CGH の再生像を体積ホログラムとして転写することができる. そのため、図 1(b)のように白色光照明でも単色の再生像を得ることができる. この手法はデニッシュホログラムと同様に振動に強く、鮮明な像を記録できる.

2.2. 積層 CGVH 方式の原理

図 2 に積層 CGVH 方式によるフルカラー再生の原理を示す. この方式では、ガラス基板に張り付けた RGB 各色の CGVH を位置合わせして積層し、それを白色光で照明することにより、RGB の CGVH の再生像が重なりフルカラー再生される. なお、この方式の原版 CGH の計算では、ガラス基板の厚みと屈折の補正を行っている[5].

2.3. タイリング転写法の原理

原版 CGH が大型であると、転写光強度が不足して通常のコンタクトコピーでは転写できない問題がある. そこで、図 3 に示すビームスキャン法が提案されている[6]. これは、原版 CGH の一部を照明する程度のガウスビームを用いて全体を連続的にスキャンする手法である. この手法では、スキャンの際の振動やビームの一部が重なる多重露光によって再生像が劣化する.

そこで本研究では、そのような問題が発生しないタイリング転写法を用いる. 図 4 にその原理を示す. こ

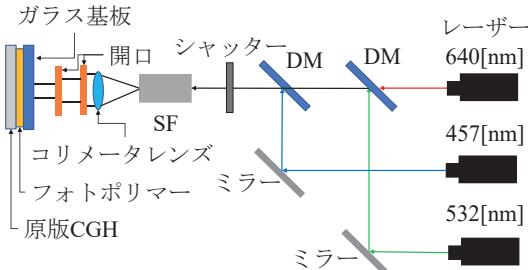


図 5 タイリング転写の光学系(DM: Dichroic mirror, SF: Spatial filter)

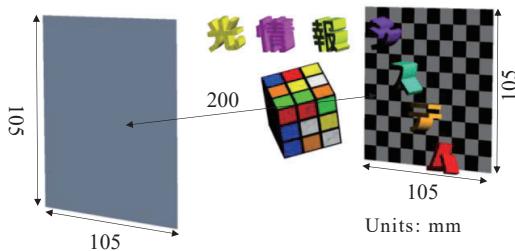


図 6 作製した積層 CGVH の 3D シーン

の手法では矩形開口を透した平行光を転写光とし、矩形タイル毎に静止した状態で転写を行ない、一つのタイルを転写した後に移動して全体を転写する。そのため、移動ステージの振動による影響がない。また原版 CGH が大型化しても転写時間が長くなるだけで、作製できる CGVH のサイズは転写レーザーの出力で制限されない。一方、タイルの境界が多重露光になったり隙間が発生したりする可能性がある。また、球面波参照光で計算した原版 CGH を平行光で転写する際に理論上発生するノイズは、ビームスキャン法と同様に発生することになる[7]。

3. 積層 CGVH の作製と再生像

3.1. タイリング転写法による個別 CGVH の作製

タイリング転写の光学系を図 5 に、転写パラメータを表 1 に示す。この光学系では、3 波長のビームをダイクロイックミラー 2 枚により同軸に重ねているが、RGB 各色の CGVH を個別に作製するため、作製している波長以外のレーザー出力は遮断している。

作製した積層 CGVH の 3D シーンを図 6 に、また原版 CGH のパラメータを表 2 に示す。作製した個別の CGVH を白色ピクセル LED で再生した結果を図 7 に示す。表 1 に示した数十 mW 級の低出力レーザーでも 10cm 角の CGVH が作製でき、鮮明な再生像が得られる事を確認できる。図 8 に示すように、カメラのピントをホログラム面に合わせると、タイリングの境界が確認される。しかし、目立ったノイズではなく、ピントを再生像に合わせた図 7 では、境界で像がわずかに暗くなる程度で境界自体は目立たない結果となった。

表 1 タイリング転写のパラメータ

	赤	緑	青
波長 [nm]	640	532	457
定格レーザー出力 [mW]	75	100	50
光強度 [mJ/cm ²]	2.1	1.6	0.6
露光時間 [s]	9	30	30
タイルの大きさ [mm]	26.2 × 26.2		
セトリングタイム [s]	15		
フォトポリマー	Bayfol® HX200		

表 2 原版 CGH のパラメータ

ピクセル数	131,072 × 262,144
ピクセルピッチ [μm]	0.8 × 0.4
設計波長 [nm] (R, G, B)	(640, 532, 457)
ポリゴン数	5,292

くなる程度で境界自体は目立たない結果となった。

3.2. 積層 CGVH のフルカラー再生像

作製した個別の CGVH は、観察者からみて青、赤、緑の順番で正確に位置合わせして積層した。白色 LED 照明による光学再生像の写真を図 9 に示す。ほとんどぼけのない高品質なフルカラー再生像を確認することができる。タイル境界は見えるが、再生像を注視した時は境界で再生像がわずかに暗くなる程度であることがわかる。

4.まとめ

タイリング転写法によって 10cm 角規模の高品質な大型積層 CGVH を作製した。タイルの境界は発生するが、再生像の観察には大きく影響を与えないことが分かった。今後はタイル境界をより目立たなくし、更なる高品質化を目指す予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費 22H03712 および国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究(06801)の助成を受けたものである。

文献

- [1] Y. Tsuchiyama and K. Matsushima: "Full-color large-scaled computer-generated holograms using RGB color filters", Opt. Express 25, 3, pp.2016-2030 (2017).
- [2] K. Matsushima: "Introduction to Computer Holography", Sect. 15.6, Springer, (2020).
- [3] H. Kang, E. Stoykova, Y. Kim, S. Hong, J. Park, and J. Hong: "Color holographic wavefront printing technique for realistic representation", IEEE Trans. Ind. Inf. 12, 4, pp.1590-1598 (2016).
- [4] Y. Wu, C.-W. Shin, K.-C. Kwon, K.-Y. Lee, and N. Kim: "Time-scheduled exposure method for full-color high diffraction efficiency and uniformity of a photopolymer", Opt. Laser Technol. 156, 108555 (2022).
- [5] O. Kunieda and K. Matsushima: "High-quality full-

- parallax full-color three-dimensional image reconstructed by stacking large-scale computer-generated volume holograms”, Appl. Opt. 58, 34, pp.G104-G111 (2019).
- [6] O. Kunieda and K. Matsushima: “Large-scale full-color computer-generated display holograms created by stacking transferred volume holograms”, SPIE Proc. 11062, 1106203(2019).
- [7] 藤木駿介, 松島恭治：“タイリング転写による積層 CGVH 方式フルカラーCGH の大型化”, 3 次元画像コンファレンス 2022, P-4 (2022).
- [8] 藤木駿介, 西寛仁, 松島恭治：“タイリング転写による積層 CGVH 方式フルカラーCGH の作製”, HODIC 学生シンポジウム 2023, 1-3 (2023).

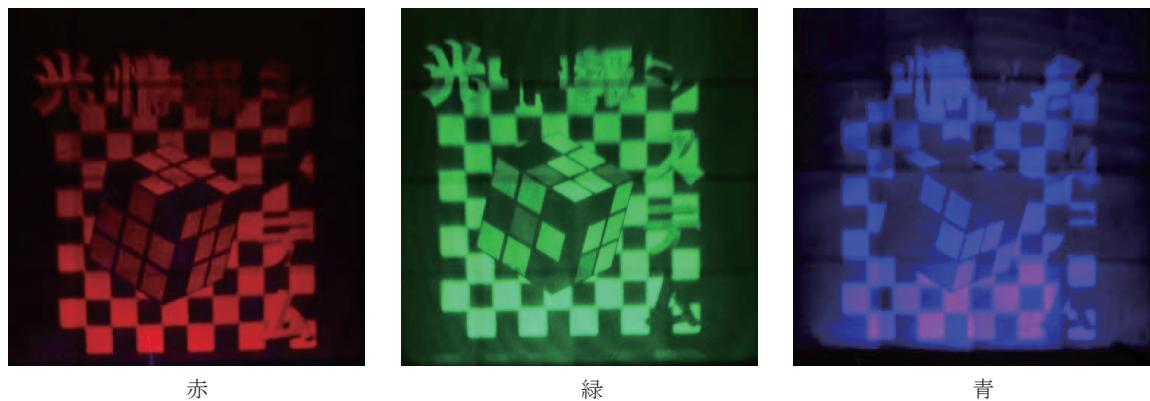


図 7 各色の個別 CGVH の光学再生像の写真(再生像に合焦)

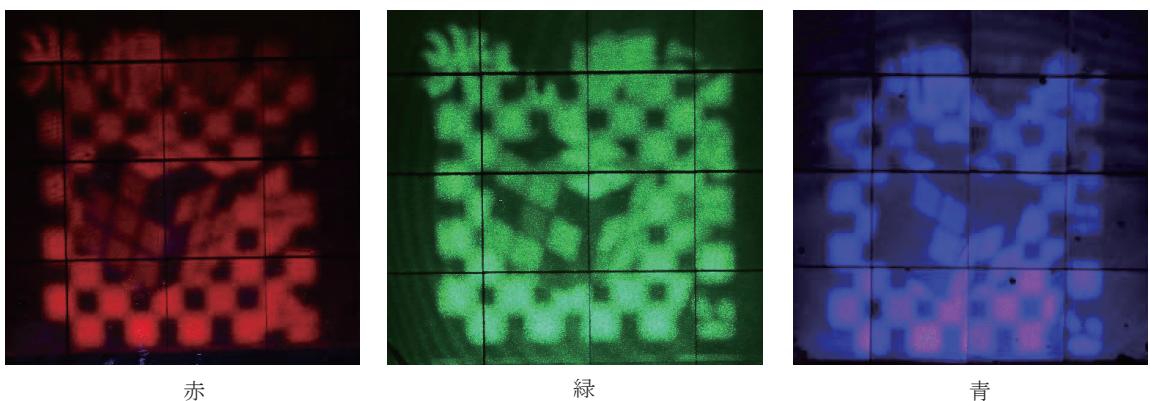


図 8 各色の個別 CGVH の光学再生像の写真(ホログラム面に合焦)

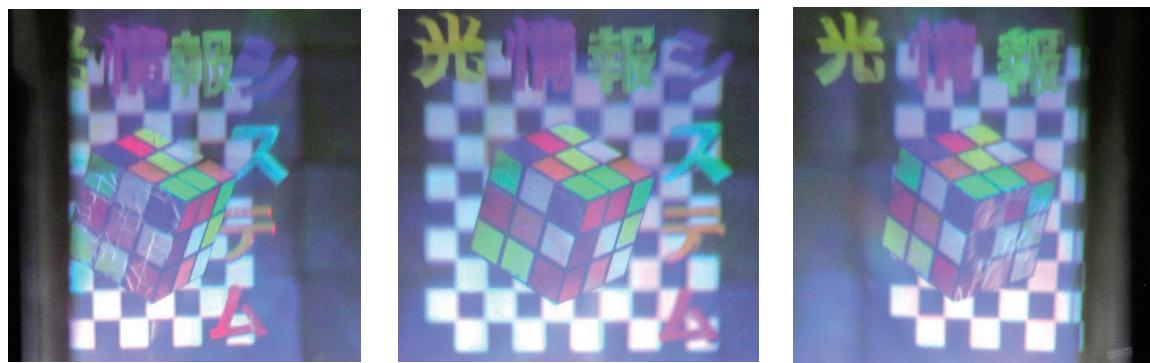


図 9 作製した積層 CGVH のフルカラー光学再生像

光線サンプリング面を用いた光波計算の波動光学的特性

桂 誠介 西 寛仁 松島 恒治

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: k167063@kansai-u.ac.jp(桂)

あらまし 光線サンプリング面(RSP)を用いた計算法は多視点画像から全方向視差高解像度 CGH の物体光波を計算する有力な手法である。しかし、光線情報と波面情報(光波)の変換における基本的な波動光学的性質は報告されていない。そこで本研究では、光線/波面変換で求めた物体光波の視野、視域、再生像位置などの諸特性を数値的/理論的に解析し、RSP を用いた色収差のないフルカラー高解像度 CGH を計算する手法等を報告する。

キーワード CGH, 光線サンプリング面, フルカラー

Wave-optical characteristics of wavefield calculated using ray-sampling plane

Ryosuke KATSURA Hirohito NISHI Kyoji MATSUSHIMA

Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, Kansai University

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

E-mail: k167063@kansai-u.ac.jp (R. Katsura)

Abstract The ray-sampling plane (RSP) method is a powerful method for calculating object waves from multi-viewpoint images in full-parallax high-definition CGHs. However, the basic properties in wave optics have not been reported in the ray-wavefront conversion. In this study, we numerically and theoretically analyze the basic properties of the wavefield obtained by the ray-wavefront conversion, such as the field of view, viewing angle, image position. A method based on the analysis is proposed for calculating full-color high-definition CGHs without chromatic aberration using RSP.

Keyword CGH, ray-sampling plane, full-color

1.はじめに

近年、コンピューターの性能向上やコンピューター ホログラフィにおける計算アルゴリズムの発展により、数百億から一千億以上のピクセルを有する大規模な全方向視差高解像度計算機合成ホログラム(Full-parallax high-definition CGH, FPHD-CGH)が計算可能となった[1]。FPHD-GGH では、奥行き知覚に関して全く矛盾が生じないため、驚くほど奥行きの深い像を再生できる。このような FPHD-CGH の計算では、実用的な計算手法としてポリゴン法[2]やシルエット法[3]など物理シミュレーションベースの手法が用いられている。これらの手法では、物体光波を物理的にシミュレートするため、深い奥行き感のある立体像を再生可能であるが、現在のところ CG ほど高度なレンダリング技術は確立されていないという問題がある。

一方、多視点画像を用いる手法も FPHD-CGH の実用的な計算手法であり、特に光線サンプリング面(Ray-sampling plane, RSP)を用いた光線/波面変換による手法が有望である[4]。この手法では深い奥行きを有する単一の物体ではポリゴン法に比べ再生像が不鮮明にな

ってしまう問題があるが、CG の高度なレンダリング技術を用いることが可能であるという利点がある。そのため、FPHD-CGH において高度な質感表現を行う場合には最も有力な計算手法となる。

そこで、我々は両手法の利点を活かしたハイブリッド CGH の計算法や、RSP を用いたフルカラーCGH の計算法を提案している[5,6]。しかし、光線情報と波面情報(光波)の変換における基本的な波動光学的性質は報告されていない。そこで本研究では、光線/波面変換にまつわる諸特性、すなわち得られた物体光波の視野、視域、再生像位置などの基礎的な性質を数値的/理論的に解析し、RSP を用いて色収差のないフルカラーCGH を計算する手法等を報告する。

2. RSP を用いた光線/波面変換の諸特性

2.1. 光線/波面変換と回折理論の関係

RSP を用いた物体光波計算では、まず物体近傍に RSP を配置し、RSP を多数の矩形状のセル(要素ホログラム)に分割する。そして、セルの中心を視点としてレンダリングした CG 画像にランダム位相を付与し FFT を施したものと各要素ホログラムにおける光波とする

ことで物体光波を計算する。これはレンダリング画像が持つ光線情報から波面情報を取得していると考えられるので、光線/波面変換と呼ばれている。

一方、この光線/波面変換はフラウンホーファー回折の観点から解釈することもできる。図 1 に示すように座標系を取り、 $z = z_0$ の伝搬元平面の光波を $g(x, y; z_0)$ とし、伝搬先の光波を $g_{far}(x, y; z)$ とすると、フラウンホーファー回折は以下のようにフーリエ変換を用いて記述される。

$$g_{far}(x, y; z) = A_{far}(x, y; d) \mathcal{F}\{g(x, y; z_0)\} \quad (1)$$

ここで、

$$A_{far}(x, y; d) = \frac{\exp(ikd)}{i\lambda d} \exp\left[i\frac{k}{2d}(x^2 + y^2)\right] \quad (2)$$

である。したがって、光線/波面変換はレンダリング画像を伝搬元の光波と考え、 $A_{far}(x, y; d)$ を無視したフラウンホーファー回折を計算していると解釈できる。通常、RSP を用いて物体光波計算を行う際は要素ホログラムのサイズを十分小さくするため、位相因子 $A_{far}(x, y; d)$ を無視することが可能と考えられる。

2.2. 視域角

光線/波面変換をフラウンホーファー回折と考えると、RSP を用いて計算した CGH の視域角はポリゴン法や点光源法等の物理シミュレーションによって計算した CGH が持つ視域角と変わらないと考えられる。したがって、設計波長を λ 、 x 方向のサンプリング間隔を Δx とすると、視域角は

$$\theta_{view} = 2 \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2\Delta x}\right) \quad (3)$$

となると考えて良い。 y 方向も同様である。

2.3. 再生像の位置

図 2 に多視点画像を CG でレンダリングする際に設定するカメラの視野角(画角) θ_{fov} と光線のサンプリング間隔を示す。なお、以下では x 方向についてのみ考えるが、 y 方向についても同様の議論が成立する。カメラから距離 d_R 離れた平面上での物理的なサンプリング窓のサイズは

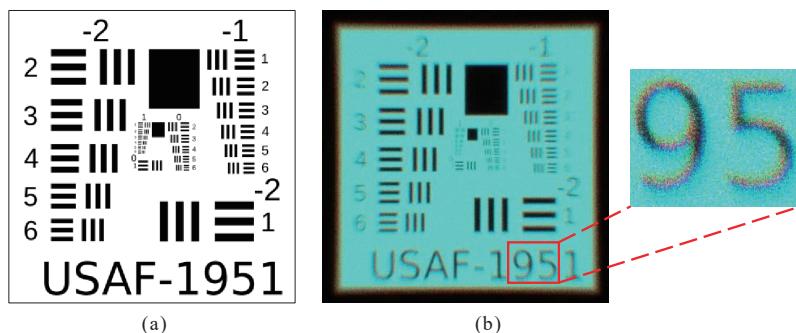


図 3 (a)原画像、(b)RSP を用いて求めた 3 波長物体光波のカラー結像再生シミュレーション結果

で与えられる[7]. レンダリング画像の FFT をフーリエ変換計算と解釈すると $s_H = s_R$ とみなせることがから、(5)式と(6)式より、レンダリング時のカメラから被写体までの距離 d_R と CGH 計算時の RSP から被写体までの距離 d_H との関係を次のように求めることができる.

$$d_H = \frac{2\Delta x \tan\left(\frac{\theta_{fov}}{2}\right)}{\lambda} d_R \quad (7)$$

したがって、CG レンダリング時にカメラの視野角(画角)を $\theta_{fov} = 2 \tan^{-1}(\lambda/2\Delta x)$ と設定することにより、 $d_H = d_R$ となり、CGH の再生像位置をレンダリング時に設定したカメラ位置と一致させることができると考えられる.

そこで、(7)式を検証するためにシミュレーションを行った. シミュレーションに用いた 3D シーン及びパラメータを図 1 と表 1 に示している. ここで、CG レンダリングの画角を青色の波長を用いて $\theta_{fov} = 2 \tan^{-1}(\lambda_b/2\Delta x)$ とした. したがって、波長 λ の光波では

$$d_H = \frac{\lambda_b}{\lambda} d_R \quad (8)$$

の関係がある. 実際のシミュレーションでは、表 1 からカメラの画角を $\theta_{fov} = 32.9 [\text{deg}]$ とし、また図 1 からカメラ位置を $d_R = 30[\text{mm}]$ とし、図 1 の平面物体をレンダリングして得たカラー多視点画像から RSP を用いて 3 波長で物体光波を計算した. この光波を 1mm ずつ逆方向に伝搬し、図 3(a)に示す原画像と物体光波の強度分布との PSNR を計算した結果を図 4 に示す. ノイズを含むため PSNR 値は低いが、そのピークは逆伝搬光波がもっとも鮮明で合焦した位置を示す.

表 1 の各設計波長における d_H の値を(8)式から求めると、RGB の順に 22mm, 27mm, 30mm となり、図 4 の PSNR のピーク位置と概ね一致していることがわかる. したがって、(7)式が光線/波面変換における物体モデルの奥行き位置の関係を良く表していることがわかる.

RGB の 3 波長で光線/波面変換した物体光波をカラー結像再生シミュレーション[8]した結果を図 3(b)に示す. 波長により奥行き位置が変化するため、再生像に色収差が生じていることを確認できる.

3. RSP を用いたフルカラー CGH の計算

3.1. 色収差の補正

RGB の 3 波長で RSP による光線/波面変換を行ってフルカラー CGH を計算する場合、いずれの波長でも d_H が同一にならないと色収差が発生する. したがって、(7)式によれば、色収差がないフルカラー CGH を計算するには RGB 各チャネルの波長に応じて θ_{fov} または d_R を変更した多視点画像を用意する必要があることがわかる. しかし、そうすると波長毎に多視点画像を再レン

表 1 シミュレーションのパラメータ

RSP	
総サンプル点数	$65,536 \times 65,536$
RS 点数	256×256
画像 1 枚当たりのピクセル数	256×256
RS 点間隔	$0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$
物体光波	
サンプル点数	$65,536 \times 65,536$
サンプリング間隔	$0.8 \mu\text{m} \times 0.8 \mu\text{m}$
RGB 設計波長 ($\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$)	$633 \text{ nm}, 532 \text{ nm}, 473 \text{ nm}$

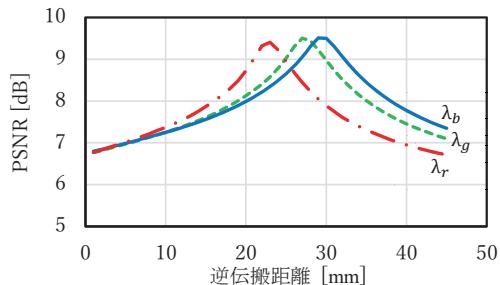


図4 波長による合焦位置の変化

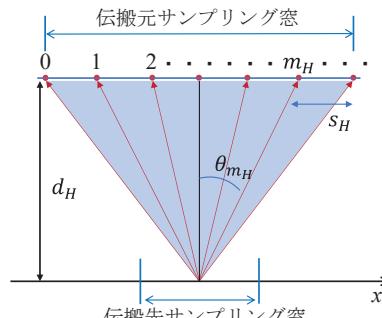


図5 離散フーリエ変換におけるサンプル点と光線角度の関係

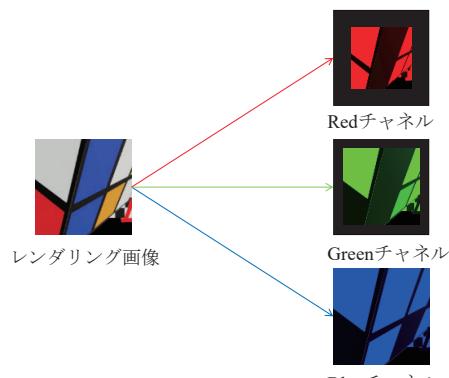


図6 色チャンネル毎のレンダリング画像の補間処理

ダーリングすることになるため、レンダリング時間がおよそ3倍となってしまう。そこで、1セットのカラー多視点画像からカラーCGHを計算する手法を以下に示す。

図5に離散的フラウンホーファー回折計算におけるサンプリング位置と光線角度の関係を示す。(6)式のサンプリング間隔を用いると、波長 λ の光波に対して、図5に示した m_H 番目のサンプル点の光線角度 θ_{m_H} は

$$\theta_{m_H} = \tan^{-1} \left\{ \frac{\lambda}{M\Delta x} \left(m_H - \frac{M}{2} \right) \right\} \quad (9)$$

となる。一方、レンダリング画像において同様に番号付けした m_R 番目のピクセルの光線角度 θ_{m_R} は(5)式から

$$\theta_{m_R} = \tan^{-1} \left\{ \frac{2 \tan \left(\frac{\theta_{fov}}{2} \right)}{M} \left(m_R - \frac{M}{2} \right) \right\} \quad (10)$$

となる。ここで、2.3節と同様に青色波長を基準としてレンダリングの画角を $\theta_{fov} = 2 \tan^{-1}(\lambda_b/2\Delta x)$ とすると、

$$\theta_{m_R} = \tan^{-1} \left\{ \frac{\lambda_b}{M\Delta x} \left(m_R - \frac{M}{2} \right) \right\} \quad (11)$$

となる。 $\theta_{m_H} = \theta_{m_R}$ として(9)式と(11)式を解くと、 $\lambda_b(m_R - M/2) = \lambda(m_H - M/2)$ の関係が得られる。したがって、フラウンホーファー回折のサンプル点 m_H に対応するレンダリング画像中の位置は、

$$x_{m_H} = \frac{\lambda}{\lambda_b} \left(m_H - \frac{M}{2} \right) + \frac{M}{2} \quad (12)$$

となり、 $\lambda = \lambda_b$ の場合以外はピクセルの位置と一致しない。したがって図6に示すように、バイキュービック補間等を用いて各チャネルの多視点画像を再サンプリングすることで、1セットのカラー多視点画像からフルカラーCGHを計算することが可能となる。

3.2. シミュレーション結果

この手法による色収差補正を定量的に評価するため、提案法を用いてRGBの3波長物体光波を計算し、2.2節で述べた3Dシーンとパラメータを用いて同様のシミュレーションを行った。逆伝搬距離に対するPSNRの変化を図7に示し、この3波長物体光波をカラー結像再生シミュレーションした結果を図8に示す。図4と比べ、図7ではPSNRのピーク位置が3波長全て同じ位置に揃っており、色収差の発生を抑えられていることがわかる。また、図3(b)と比較すると図8の再生像では色収差がほとんど発生していないことが確認できる。

4.まとめ

RSPを用いた光線/波面変換の波動光学的特性を数値的/理論的に解析した。特に、RSPで求めた物体光波における再生像の位置を理論的に解析し、PSNRを用いて定量的に評価することで再生像位置が設計波長と画角に依存することを示した。また、1セットのカラ

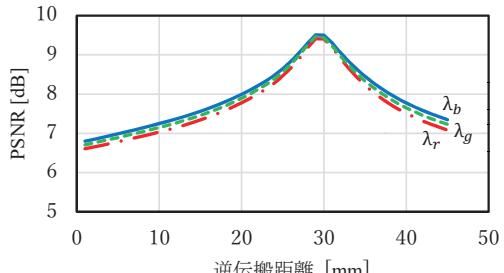


図7 色収差を補正した物体光波の合焦位置

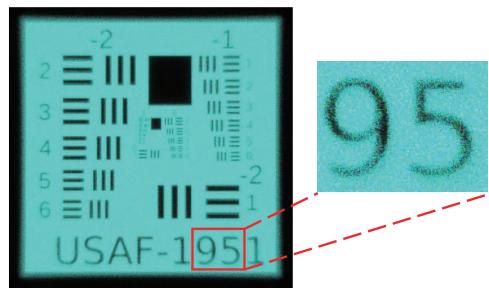


図8 色収差を補正した物体光波の結像再生シミュレーション結果

一多視点画像から色収差のないフルカラーCGHを計算する方法を提案し、PSNRによる定量的評価から、本手法の有効性を確認した。

5.謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費 22H03712 の助成を受けたものである。

文献

- [1] K. Matsushima: "Introduction to Computer Holography", Sect. 1.3, Springer, (2020)
- [2] K. Matsushima: "Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture", Appl. Opt. 44, 22, pp.4607-4614(Aug. 2005)
- [3] K. Matsushima, M. Nakamura, and S. Nakahara: "Silhouette method for hidden surface removal in computer holography and its acceleration using the switch-back technique", Opt. Express 22, 20, pp.24450-24465(Sep. 2014)
- [4] K. Wakunami, and M. Yamaguchi: "Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane", Opt. Express 19, 10, pp.9086-9101 (Apr. 2011)
- [5] 桂, 松島: "ポリゴン法と光線サンプリング面を用いたハイブリッド計算法による全方位視差高解像度CGH", 3次元画像コンファレンス 2022, 10-2(Jul. 2022)
- [6] R. Katsura, K. Matsushima, "Hybrid technique of polygon-based and ray-sampling plane-based methods in full-parallax high-definition computer holography", Digital Holography and 3-D Imaging 2022, Tu1A.5 (Aug. 2022)
- [7] K. Matsushima: "Introduction to Computer Holography", Sect. 6.1, Springer, (2020)
- [8] K. Matsushima: "Introduction to Computer Holography", Sect.13.3 and 13.5, Springer, (2020)

Non-Periodic Line Photon Sieve を用いたホログラム表示の検討

佐々木 隼暉[†] 高木 康博[†]

† 東京農工大学工学部 〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

E-mail: †s209409u@st.go.tuat.ac.jp

あらまし Non-periodic photon sieve を用いたホログラム表示は、ホログラム表示の視域角を数倍に拡大する技術として提案されている。その方法は、位相変調型の空間光変調器の各画素に対して直径 1-2 μm の開口をランダムな位置に取り付けるというものである。しかし、この方法による再生像の光強度には実用化に向けて課題がある。そこで、本研究では、non-periodic photon sieve の開口を線状にすることで光の透過率を向上する方法を提案し、再生像の光強度の向上を実現した。

キーワード ホログラフィー, photon sieve, 視域角

Investigation of Holographic Display Using a Non-Periodic Line Photon Sieve

Shunki SASAKI[†] and Yasuhiro TAKAKI[†]

† Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

E-mail: †s209409u@st.go.tuat.ac.jp

Abstract This study aims to enhance the light intensity of the reconstructed images generated through holographic techniques using a non-periodic photon sieve, which offers a wide viewing zone angle. In the technique, apertures with diameters of 1-2 μm are randomly positioned and attached to each pixel of the phase-only spatial light modulator. However, the intensity of the reconstructed images is insufficient for practical implementation due to the reduction in the light transmission efficiency caused by the non-periodic photon sieve. We modified the aperture configuration of the non-periodic photon sieve to be linear in order to improve the light transmission efficiency.

Keyword Holography, photon sieve, viewing zone angle

1.はじめに

ホログラフィーは視覚疲労を感じない理想的な立体表示技術であり、この技術を電子的に実現するディスプレイに空間光変調器（SLM）がある。しかし、SLM には像の見える範囲（視域角）が狭いという課題がある。SLM で実用的な 30 度以上の視域角を実現するには、画素ピッチを 1 μm 以下にし、解像度を数百 K にする必要があり、現実的ではない[1,2]。

しかし、最近になり、SLM の課題を解決する方法として、non-periodic photon sieve と呼ばれるランダムな開口アレイを SLM に取り付ける方法が提案された[3]。この方法により、画素ピッチと視域角の関係を断ち切り、大きな画素ピッチのまま視域を拡大することが可能になる。また、これに伴い、画像サイズの拡大に要する解像度も大幅に減少する。実際に、画素ピッチが 36 μm の SLM を用いて約 30°の視域角を実現できることが実験的に示されている。ところが、non-periodic photon sieve には光の透過率が小さいという課題がある。開口幅は数 μm であり、開口を通らない光は遮断され、これに伴って再生像の光強度は低下する。

そこで、本研究では、non-periodic photon sieve の光透過率を向上させる方法として non-periodic photon sieve の開口を線状にすることを提案し、その photon sieve を non-periodic line photon sieve と呼ぶ。

2. 原理

2.1. Non-periodic photon sieve(従来法)

2.1.1. ホログラム表示の方法

Non-periodic photon sieve を用いたホログラム表示[3]について説明する。

SLM を用いたホログラム表示の概略図を図 1(a)に示す。SLM に入射した光は変調を受け、伝搬することで立体像を表示する。ここで、SLM が周期的な画素構造を有することに伴い、変調された光は周期的な回折光を発生する。そのため、同一の立体像が繰り返し発生する。しかし、立体表示にはその 1 周期分を用いるため、立体像を見ることができる視域が制限される。このとき、視域角は光の波長 λ と SLM の画素ピッチ p を用いて λ/p で表される。

SLM に non-periodic photon sieve を取り付けた従来法のホログラム表示（以下「従来法」という）の概略図を図 1(b)に示す。Non-periodic photon sieve は、SLM の各画素に対してランダムな位置に 1 つの小さな開口を設置するように取り付ける。開口の位置の非周期性は、SLM の周期的な画素構造が立体像表示に及ぼす周期性をなくす。これは高次回折光の発生を抑制するため、立体像の表示範囲と視域に対する制限がなくなる。視域角は、各開口で回折されて広がる光の広がり角で決まる。そのため、開口幅を画素ピッチの数分の一にすることで視域を数倍に拡大できる。このとき、視域角は光の波長 λ と non-periodic photon sieve の開口幅 a を用いて λ/a で表される。立体像の表示には各開口で回折される光を用いるため、開口を通らない光は遮断されて表示には用いられない。そのため、non-periodic photon sieve を取り付けた場合には取り付けない場合と比較して再生像の光強度は低下する。

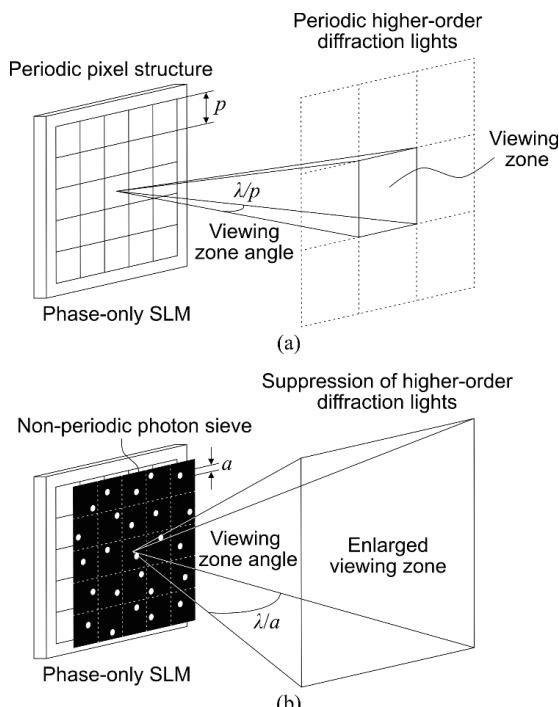


図 1 (a) SLM を用いたホログラム表示、(b) Non-periodic photon sieve を取り付けたホログラム表示 (λ : レーザー光の波長)

2.1.2. 計算機シミュレーション

従来法の有効性を計算機シミュレーションによつて確認する。SLM の画素ピッチと解像度はそれぞれ 8 μm 、 128×128 とした。Non-periodic photon sieve の開口幅は 2 μm レーザー光の波長は 633 nm、SLM から再生像までの距離は 15.0 mm とした。この場合の拡大された視域角は 18.1°である。これらの条件によるシミュレーション結果を図 2 に示す。図 2(a)は 32 点の集光点を円形に生成した再生像である。円の直径は 1.41 mm である。図 2(b)は 90 点の集光点を TUAT の文字を描くように整列した再生像である。像を表示する範囲は 2.11 mm × 2.11 mm の大きさである。Non-periodic photon sieve を取り付けた SLM によってホログラム表示が可能であることがわかる。このとき、non-periodic photon sieve を取り付けない場合のホログラム表示と比較して、再生像の最大強度は図 2(a), (b) でそれぞれ 0.0184%, 0.0145% に低下する。

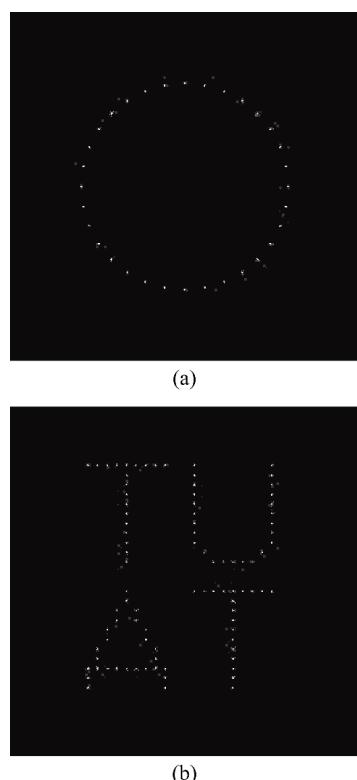


図 2 Non-periodic photon sieve を用いたホログラム表示の計算機シミュレーション結果：(a) 集光点数 32 点、(b) 集光点数 90 点

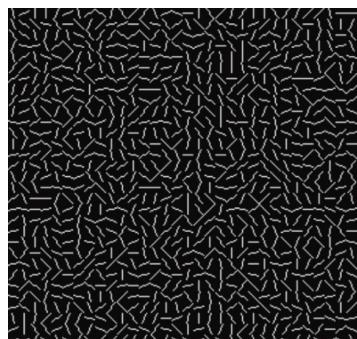
2.2. Non-periodic line photon sieve(提案法)

本研究で提案する 2 つの異なる non-periodic line photon sieve について説明する。それぞれの拡大図を図 3 に示す。拡大図は、SLM の画素 128×128 に対応する範囲から 32×32 に対応する一部範囲を拡大した。

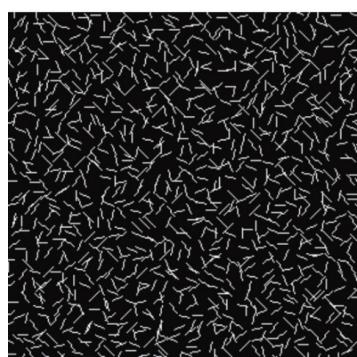
1 つ目に、線状の開口の中心を周期的に配置する non-periodic line photon sieve(以下「提案法 a」という)を図 3(a)に示す。開口の中心を SLM の画素中心に合わせて配置し、 360° を 28 分割するようにランダムに回転させる。開口幅は $2 \mu\text{m}$ とし、開口の長さは SLM の画素に対応する範囲をまたがない長さとする。

2 つ目に、線状の開口の中心をランダムに配置する non-periodic line photon sieve(以下「提案法 b」という)を図 3(b)に示す。各開口の中心は、SLM の 1 画素に対応する範囲内に配置する。開口の回転、幅、長さの条件は提案法 a と同様とする。

いずれの提案法も、開口を拡大することで non-periodic photon sieve の光の透過率の向上を図る。



(a)



(b)

図 3 Non-periodic line photon sieve の拡大図：
(a) 提案法 a, (b) 提案法 b

3. 結果

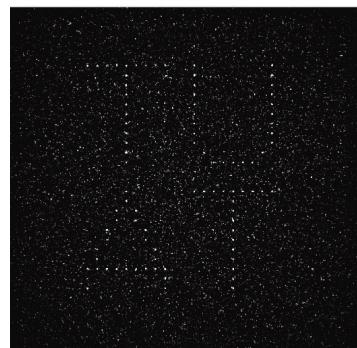
一点の集光点を生成するホログラム表示の計算機シミュレーションを行い、再生像最大強度を比較した。SLM と non-periodic photon sieve の条件は 2.1.2.での条件と同様である。参考のために、従来法では、SLM のみと比較して 0.0152%に低下する。提案法 a および b では、従来法と比較してそれぞれ 2.76 倍、2.93 倍に向上了した。

提案法によるホログラム表示の計算機シミュレーションを行い、再生像の最大強度を比較した。SLM, non-periodic photon sieve, 再生像の条件は 2.1.2.での条件と同様である。

提案法 a による再生像を図 4 に示す。図 4(a)および(b)では、従来法と比較してそれぞれ 4.18 倍、6.87 倍に向上了した。提案法 a を用いることで再生像の光強度が向上していることがわかる。また、いずれの再生像に対しても同一の立体像が繰り返し発生した。



(a)

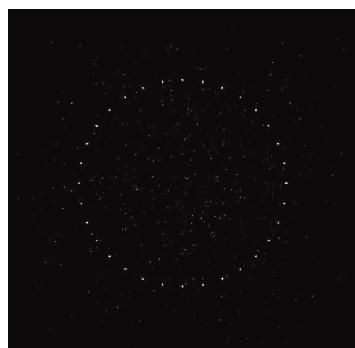


(b)

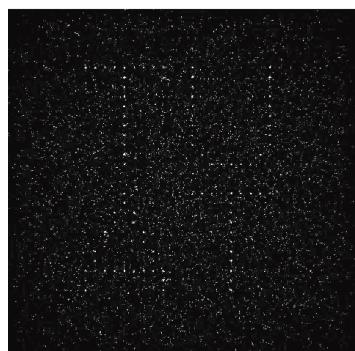
図 4 提案法 a を用いたホログラム表示の
計算機シミュレーション結果：(a) 集光点数 32 点,
(b) 集光点数 90 点

提案法 b による再生像を図 5 に示す。図 5(a)および(b)では、従来法と比較してそれぞれ 4.33 倍、4.34 倍に向上した。提案法 b を用いることで再生像の光強度が向上していることがわかる。さらに、提案法 a と比較して、同一の立体像の周期的な発生が抑制されていることがわかる。

提案法では、a, b いずれにおいても従来法と比較して再生像の光強度が向上した。しかし、再生像のコントラストは低下した。提案法では、再生像の制御性が低下することがわかる。



(a)



(b)

図 5 提案法 b を用いたホログラム表示の
計算機シミュレーション結果：(a) 集光点数 32 点,
(b) 集光点数 90 点

4. 考察

提案法 b では、提案法 a と比較して同一の立体像の周期的な発生を抑制した。これは、non-periodic line photon sieve の開口の中心を非周期的に配置することにより、SLM による周期性を提案法 a よりも抑制することが寄与したと考えられる。

また、提案法では従来法と比較して再生像の制御性が低下した。これは、提案法における non-periodic line

photon sieve の開口が長さをもつものに対して SLM の各画素が画素内において同一の位相しか表示できないため、開口位置に合わせた適切な位相設計ができていなかることによるものであると考えられる。

5.まとめ

Non-periodic photon sieve の開口を線状にすることで再生像の光強度が向上した。提案法の non-periodic line photon sieve を用いたホログラム表示の有効性を計算機シミュレーションにより確認した。今後は、実験を通じて提案法の有効性を確認する。

文 献

- [1] F. Yaras, H. Kang, and L. Onural, "State of the art in Holographic displays: A survey," *Journal of Display Technology*, Vol. 6, No. 10, 443–454 (2010).
- [2] A. W. Lohmann, R. G. Dorsch, D. Mendlovic, C. Ferreira, and Z. Zalevsky, "Space-bandwidth product of optical signals and systems," *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 13, No. 3, 470–473 (1996).
- [3] J. Park, K. Lee, and Y. Park, "Ultrathin wide-angle large-area digital 3D holographic display using a non-periodic photon sieve," *Nature Communications*, Vol. 10, No. 1, 1304 (2019).

小型プロジェクタを用いた フルカラー ホログラフィックビデオディスプレイ

霍 翔 † 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 小型ビデオプロジェクタに内蔵された透過型液晶パネルを用いて、リアルタイムで 2K(1,920 × 1,080 ピクセル)のフルカラー ホログラム表示を試みた。液晶パネルは対角 70 mm の大きさで、RGB カラーフィルターと偏光板も貼り合わされており、振幅ホログラムを再生できる。フルカラー ホログラムは白色光 LED とレンズにより簡単に再生可能である。液晶パネルの画素ピッチは 31 μm で直視での両眼観察には対応できないが、ヘッドマウントディスプレイなどの接眼型や視点追跡などに使われる視域制限型ディスプレイに適している。ノート PC 上でリアルタイムにホログラムを生成し、フルカラーのホログラフィックビデオ表示を実現した。

キーワード ホログラフィックビデオディスプレイ、液晶パネル、計算機合成ホログラム、イメージホログラム

Full color holographic video display using compact video projector

Xiang Huo † Hiroshi YOSHIKAWA † and Takeshi YAMAGUCHI †

† Dept. Computer Engineering, Nihon University

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

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

Abstract It is realized that real time 2K (1,920 × 1,080 pixel) full color image hologram display with a transmission liquid crystal panel which is taken from compact video projector. The liquid crystal panel is 70 mm diagonal size with RGB color filter and polarizers. Therefore, full color hologram can be reconstructed with white light LED and a few lenses. Although the pixel pitch of the panel is 31 μm which does not provide binocular observation, it is suitable for near-eye or eye-tracking type display. With real time hologram generation program running on a note PC, holographic video display can be realized easily.

Keyword holographic video, liquid crystal panel, computer-generated hologram, image hologram

1. はじめに

ホログラフィックビデオディスプレイは、両眼視差、輻輳、焦点調節など 3 次元表示における生理的要因を矛盾なく提示できる自然なディスプレイとして期待されている。パソコンのモニタの様に使用するタイプでは、十分な視域を得るために μm オーダーの微細な画素を持つ SLM(Spatial Light Modulator)が必要で、実用的な画面サイズにするには Gpixel を超える画素数が必要である [1]。また、フルカラー表示を行うには、一般に 3 枚の SLM を用いて像を合成するか、1 枚の高速な SLM に光源を時分割で切り替える必要があり構成が複雑になる。このフルカラーのホログラフィックビデオディスプレイを簡単な構成で低価格で実現するために、安価なビデオプロジェクタのパネルを使用する方法を提案する。プロジェクタに内蔵の液晶パネルは単板だがカラーフィルタもついているので、フルカラーの光学系も簡単となる。ただし、液晶パネルの画素ピッチが粗く視域

が制限され、接眼タイプのディスプレイ [2, 3] などに適している。

2. 再生光学系

2.1 液晶パネル

本研究で使用したビデオプロジェクタは中国 YOWHICK 社製の DP02 プロジェクタで希望小売価格は税込 12,999 円である。透過型液晶パネルにはカラーフィルターと出射側の偏光子が貼り付けられている。熱の対策のためか、光源側にある入射側の偏光子はガラス基板のもので、透過型液晶とは離れて配置してある。液晶パネルの外観写真を図 1 に、おもなスペックを表 1 に示す。透過率(全白)とは、液晶に真っ白な画像を表示したときの、液晶に照射した光と出射した光のパワーの比である。液晶パネルの拡大写真を図 2 に示す。図より、RGB の画素が横に並んでいることがわかる。

液晶パネルを角形素子ホルダに実装した様子を図 3 に示

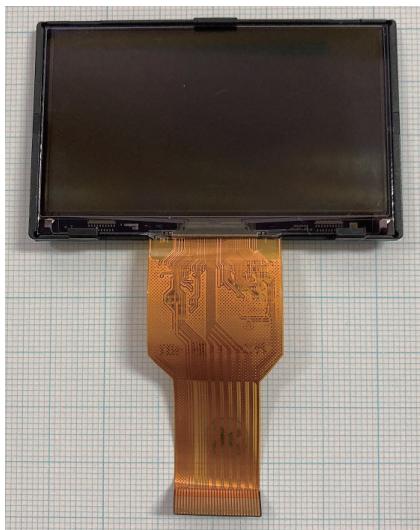


図 1 液晶パネルの外観。

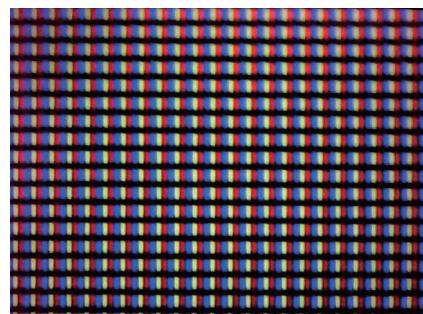


図 2 液晶パネルの拡大写真。カラーフィルタの配置がわかる。

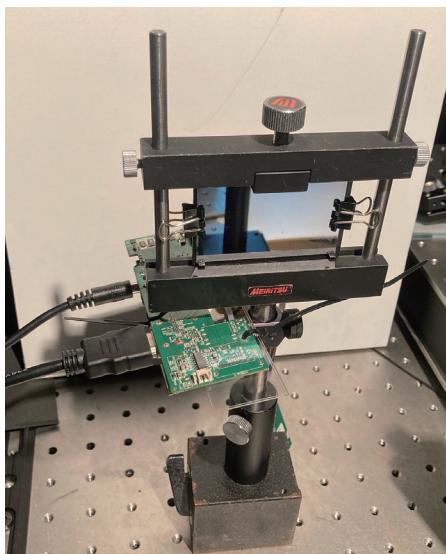


図 3 液晶パネルの実装状況。

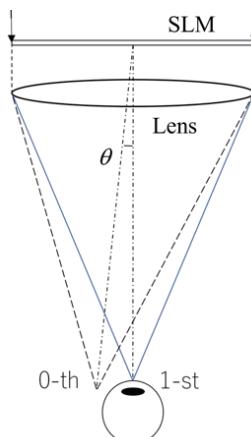


図 4 再生光学系。白色 LED は SLM から 3 m 離して配置。Lens の焦点距離は 0.5 m で、SLM と Lens の距離は 60 mm。

す。液晶とドライブ基盤をつなぐフラットケーブルが短いので、ドライブ基盤は角形素子ホルダのポールに固定している。ドライブ基盤には AC アダプタと HDMI ケーブルが接続されている。

2.2 再生光学系

再生光学系を図 4 に示す。SLM に表示された干渉縞の 1 回折像 (1-st) が Lens により集光され、集光点で像を観察する。回折しない直接透過光 (0-th: 0 回折光) は再生の邪魔となるので観察者の目に入らないように空間的に分離する。今回の実験では後述の様に 0 回折光と 1 回折光の間の距離は約 7 mm である。

2.3 白色光源

本研究で使用した液晶は画素ピッチが $31 \mu\text{m}$ とホログラム用としてはあまり十分な精細さではない。表示可能な干渉縞の最小周期は画素ピッチの 2 倍の $62 \mu\text{m}$ であり、青の波長を $0.46 \mu\text{m}$ とすると回折角は 0.425 度となる。そのため、レンズにより一点に集光できる空間的コヒーレンスの良い光源を用いないと 1 回折光と直接透過光 (0 回折光) が重なってしまい、像を正しく観察できない。RGB レーザが理想ではあるが、プロジェクタが安価なのに光源が高価ではバランスが悪いので白色 LED を使用した。プロジェクタ

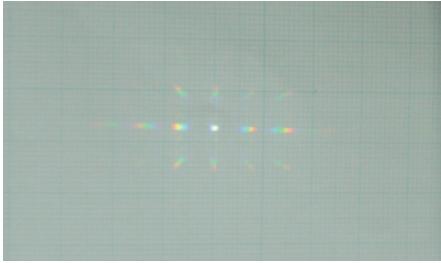


図 5 レンズ集光面での回折光の集光の様子。

に組み込まれている白色 LED は輝度は十分であるが発光面が $10\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ と大きいので空間的コヒーレンスに問題があるので、発光面が 5 mm 角の CREE 社の白色 LED (XHP50 J4 1CO) を使用した。空間的コヒーレンスを高めるため、コリメートレンズは使用せず、液晶パネルから約 3 m 離れて配置した。図 5 にレンズから出射した光が集光する面に方眼紙を置いて撮影した回折光の集光の様子を示す。使用したレンズの焦点距離は 0.5 m であるが、集光面はレンズから 0.58 m であった。レンズへの入射光が平行光なら集光面は焦点距離に現れるが、今回は白色 LED をレンズから 3 m の位置に配置している。実像結像でのレンズの結像方程式は、下記のようにあらわせる。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad (1)$$

ここで、レンズの焦点距離 f を 0.5 m、物体の位置 r_1 を 3 m とすると、結像位置 r_2 は 0.6 m となり、図 5 の集光面の距離 0.58 m とほぼ一致している。また、 r_1 と r_2 の比から、像の大きさは元の物体である白色 LED(5 mm 角)の $1/5$ の 1 mm 角となる。図 5 の中央の白い四角が 0 次回折光の像であるが、方眼紙の 1 mm の枠とほぼ一致していることがわかる。0 次回折光の周りには上下左右に回折光が観察でき、上下と左右の間隔が同程度であることから画素ピッチが上下と左右で同じであることがわかる。また、1 次回折光は波長により回折位置が $6\sim8\text{ mm}$ 程度 0 次回折光から離れているが、集光面の液晶パネルからの距離 0.64 m から回折角度を求める $0.54\sim0.72$ 度となる。この回折は液晶の画素ピッチ $31\text{ }\mu\text{m}$ を周期とする回折格子による回折と考えて良いが、波長 $0.46\text{ }\mu\text{m}$ から計算した回折角 0.85 度とは異なっている。

3. 実験結果

3.1 イメージホログラムの計算及び表示時間

ホログラムの計算と表示に使用したノート PC の CPU は Intel Core i7-4720HQ 2.6GHz, OS は Windows 10 Pro, コンパラは Visual C++ 2019 である。図 6 に物体の点光源数に対するデータ読み込み (read), 干渉縞計算 (calc), 干渉縞正規化 (norm), 干渉縞の表示バッファへの転送 (other) およ

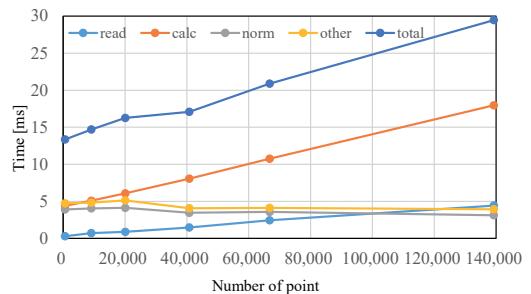


図 6 点光源数に対するイメージホログラムの計算等の時間。read: データ読み込み, calc: 干渉縞計算, norm: 干渉縞正規化, other: 干渉縞を表示バッファに転送, total: 合計

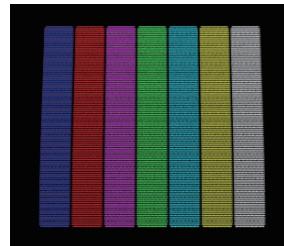


図 7 カラーテストチャートの点群データの透視図表示

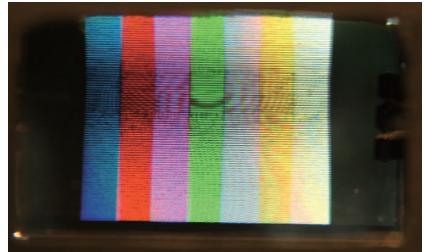


図 8 イメージホログラムのカラーテストチャートの再生像

び合計 (total) を示す。干渉縞正規化とは、実数で計算した R,G,B の干渉縞を、ディスプレイに表示するために 8 ビットに変換する処理である。計算方法は 4K イメージホログラム [4, 5] と同一であるが、画素数が少ないため普通のノート PC でも十分な速度が得られた。計算したホログラムの画素数は、液晶パネルと同じ $1,920 \times 1,080$ である。データ読み込み時間は点光源数に比例している。干渉縞計算は直線となっているが、初期化を含むので点光源数が少くても一定の時間が必要である。干渉縞正規化と干渉縞の転送は点光源数にかかわらずほぼ一定である。物体の点光源数が 6 万点以下なら毎秒 50 フレーム以上の表示が可能である。

3.2 イメージホログラムの再生

図 7 にカラーテストチャートの点群データの透視図を示す。チャートには左から、青、赤、マゼンダ、緑、シアン、黄、白の七色が配置されており、これを用いて色再現の正確



図9 使用した点光源データの透視図. ©qnep



図10 イメージホログラムの干渉縞. ©qnep



図11 イメージホログラムの再生像. ©qnep

性や一貫性を評価することができる。各色は 2,933 点で構成されている。図 8 にイメージホログラムのカラーテストチャートの再生像を示す。元の画像と比較すると全般的に明るく彩度が低下しているが、シアン以外は良好に再現されていると主観的・定性的に評価できる。

3 次元物体の再生像の例として、使用した 3 次元物体の点光源データの透視図を図 9 に示す。点光源数は 40,810 である。図 10 に計算した干渉縞を、図 11 に本システムでの再生像の写真を示す。イメージホログラムのため、干渉縞は輪郭や色が点光源データの透視図と似ているが、3 次元物体のため点光源からの干渉縞はある大きさに広がっている。そのため、例えば透視図で確認できる目や口の黒い部分が干渉縞では見えなくなっている。透視図と再生像を比較すると、目や口の黒い部分が明るくなっているが、鮮明に再生できていることが確認できた。

4. むすび

本研究では小型ビデオプロジェクタに内蔵された透過型液晶パネルを用いて、リアルタイムで 2K のフルカラーホロ

グラム表示が簡単に行えることを示した。ノート PC 上でリアルタイムにホログラムを生成し、再生像の色の再現性や正確性を確認した。液晶パネルの画素ピッチは $31 \mu\text{m}$ で回折角が小さく視域が制限されるが、ヘッドマウントディスプレイなどの接眼型や視点追跡などに使われる視域制限型ディスプレイに適している。

今後の課題は、表示像の奥行き再現性の評価などである。

文献

- [1] Hiroshi Yoshikawa: "Development of holographic video displays", Laser Display and Lighting Conference 2023 (LDC2023), LDC10-01, PACIFICO Yokohama, Japan(Apr. 2023)
- [2] 竹森, 伊藤, 大坪: "PAL-SLM による視域拡大型計算機ホログラムの表示", HODIC Circular, **16**, 1, pp. 8-12 (Mar. 1996)
- [3] 北山亮太, 山口健, 吉川浩: "接眼型イメージホログラムによるフルカラー HoloTV - 実時間再生と広視野化の実現 - ", 3 次元画像コンファレンス 2009, 4-4(July 2009)
- [4] Hiroshi Yoshikawa, Naoki Yuasa and Takeshi Yamaguchi: "Interactive generation of full color 4K image hologram (invited)," Optica Frontier in Optics, Online, FTh2C.1 (Nov. 2021)
- [5] 湯浅尚樹, 吉川浩, 山口健: "実時間対話型ホログラムの生成と表示 ~ 写実的な描画による表現力の向上 ~", 映像情報メディア学会技術報告, **45**, 25, AIT2021-134(Sep. 2021)

リニアブレンディングを用いた

多視点 DFD(Depth-fused 3D)レンダリング

森下 雄登[†] 伊達 宗和[‡] 水科 晴樹[†] 陶山 史朗[†] 山本 健詞[†]

[†]徳島大学理工学部光システムコース〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1

[‡]徳島文理大学理工学部〒769-2193 香川県さぬき市志度 1314-1

E-mail: [†]{c612336026, mizushina.haruki, suyama.shiro, kenji.yamamoto}@tokushima-u.ac.jp,

[‡]date-munekazu@fst.bunri-u.ac.jp

あらまし 多視点 DFD レンダリングとリニアブレンディングの組み合わせにより、積層型多眼ディスプレイの視点数を疑似的に増やすことができ、評価実験によりその有効性を確認した。多眼ディスプレイには、3D 画像のぼやけによって表現できる奥行き範囲が制限されるという課題があった。従来、多眼ディスプレイを積層し、表示できる奥行き範囲を拡大する方法が提案されているが、視点数は考慮されていない。しかし、実際の多眼ディスプレイでは視点数に限りがある。そこで、リニアブレンディングを用いて視点数を疑似的に増やす手法を提案する。実験では、複数のカメラ間距離で 3D 画像の奥行きを評価した。

キーワード 多眼ディスプレイ, DFD 表示, リニアブレンディング

Multi-view DFD (Depth-fused 3D) Rendering with Linear Blending

Yuto Morishita[†], Munekazu Date[‡], Haruki Mizushina[†], Shiro Suyama[†] and Kenji Yamamoto[†]

[†] Dept. Of Optical Science and Technology, Tokushima University 2-1 Minamijousanjima, Tokushima
770-8506 Japan

[‡] Faculty of Science and Engineering, Tokushima Bunri University, 1314-1 Shido, Sanuki-shi, Kagawa
769-2193, Japan

E-mail: [†]c612336026@tokushima-u.ac.jp, [‡]date-munekazu@fst.bunri-u.ac.jp

Abstract In this study, the number of viewpoints of a stacked multi-view display can be pseudo-increased by combining multi-view DFD rendering and linear blending. In a multi-view display, the depth range is limited due to blurring of 3D images. Currently, stacking multi-view displays were proposed to expand the depth range that can be displayed, but the number of viewpoints is not taken into account. However, the number of viewpoints is limited in a real multi-view display. Therefore, we propose a method to pseudo-increase the number of viewpoints using linear blending. The depth of 3D images was evaluated at several camera-to-camera distances.

Keywords Multiview display, DFD, Linear Blending

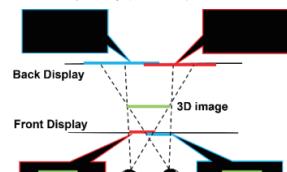
1. はじめに

多眼ディスプレイでは、3D 画像がディスプレイ面から離れると、像がぼやけるため、表現できる奥行き範囲が制限される。そこで、奥行き範囲を拡大するため

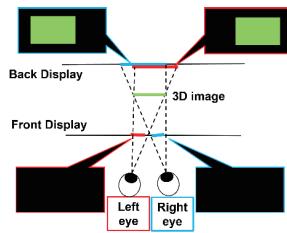
に複数の多眼ディスプレイを用いた積層型多眼ディスプレイが提案されている[1]。

図 1 に示すように、従来の積層型多眼ディスプレイのレンダリング方法として、Nearest Layer レンダリングがある。この方法では、多視点映像は 3D 画像に近い

多眼ディスプレイのみに表示される。



(a) 3D image(Front)



(b) 3D image(Back)

図1 Nearest Layerレンダリング

しかし、このレンダリング方法では、多視点映像が観察者の眼間距離に基づいてレンダリングされていない場合、奥行き知覚が設計された位置から逸脱する。そのため、前後のディスプレイの表示エリアを跨ぐ3D像を表示した場合、像が空間的に不連続になるなどの問題が発生する。

この問題を解決するために、積層型多眼ディスプレイとDFD表示の組み合わせが提案された[2]。この研究では、特にDFD表示をステレオ表示と組み合わせることを想定している。

DFD表示とは、前後のディスプレイに表示される映像の輝度比によって奥行きを知覚させる表示方法である。例えば図2では、上の四角形が最も奥に見え、下の四角形が最も手前にあるように見える[3-5]。

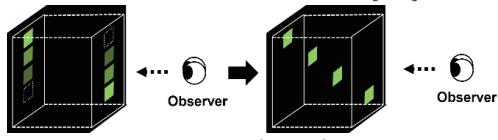
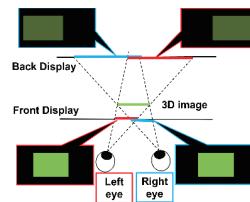
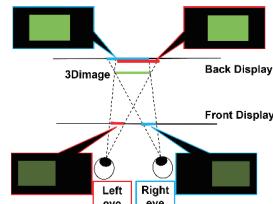


図2 DFD表示の概要

従来のDFD表示は、左右の眼の中間の位置で前後の像が重なるようにレンダリングしていた。しかし、多視点DFD表示は、図3に示すように、左右それぞれの眼から見たときに前後の像が重なり、前後面のそれぞれに両眼視差を持たせて描画するように設計されている。



(a) 3D image(Front)



(b) 3D image(Back)

図3 多視点DFD

しかし、この多視点DFDレンダリングでは視点間の像の変化は不連続であり、滑らかな運動視差を表現するには非常に多くの視点が必要となる。しかし、単純に視点数を増やすと、それに比例して情報量が増えるという別の問題が生じる。この問題を解決するために、多視点DFDレンダリングと視点間画像のリニアブレンディングを組み合わせることで、擬似的に視点数、すなわちカメラ台数を増やすことができる。本研究では、リニアブレンディングを用いた積層型多眼ディスプレイにおける奥行き知覚を評価する。奥行き知覚の評価には、多視点DFDレンダリングとNearest Layerレンダリングを用いた。評価には2台の二眼式立体表示ディスプレイを積層型多視点ディスプレイとして使用した。

2. リニアブレンディングを用いた多視点 DFD レンダリング

リニアブレンディングの概略図を図4に示す。位置aおよび位置bは、各視差画像AおよびBが撮影されたカメラ位置を示す。視点をaの位置からbの位置に移動させると、視差画像Aの輝度は線形に減少し、視差画像Bの輝度は線形に増加する。その結果、観察位置の変化に応じて知覚される画像を滑らかに変化させることができ、知覚される画像のエッジが連続的に移動することで滑らかな運動視差を表現できる[7]。しかし、視点数が少なすぎたり、カメラ間の距離が広すぎたりすると、観察者は輝度が変化した視差画像AとBの二重像を見ることになる。

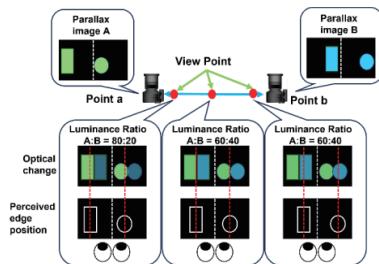


図 4 リニアブレンディングの概要

3. Nearest Layer レンダリングと多視点 DFD レン

ダリングの奥行き知覚の評価実験

リニアブレンディングを用いた多視点 DFD レンダリングによるカメラ間の許容範囲を明らかにするため、以下の実験を行った。

3.1 実験装置と刺激

実験に使用した装置を図 5 に示す。二眼式立体表示ディスプレイ（三菱電機製、RDT233WX-3D(BK)）を 2 台異なる視距離になるように配置し、ハーフミラーを用いて後面ディスプレイの虚像と前面ディスプレイを合成した。前面と後面のディスプレイ間の距離は 50 mm で、前面ディスプレイまでの視距離は 500 mm とした。

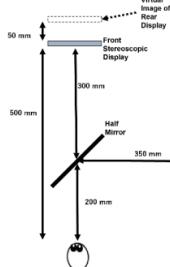


図 5 実験装置

本研究では、Nearest Layer レンダリング（従来法）と多視点 DFD レンダリング（提案手法）の 2 種類のレンダリング法を用いて、リニアブレンディングを用いた画像を作成した。

事前にレフラクトメータ（Grand Seiko, WAM-5500）を用いて被験者の眼間距離を測定し、測定した眼間距離に基づいて左右の眼に提示する視差画像を作成した。

被験者は図 6 のように 3 つの正方形が水平に並んだ画像を観察した。左右の四角形は奥行きの基準として前面ディスプレイに表示され、中央の四角形は前面ディスプレイから 20 mm の奥行きとなるように設定した。カメラ間の距離は 10 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm の 7 パターンとした。リニアブレンディングのブレンド比は図 7 に示すように、内側

のカメラから眼までが 7、外側のカメラから眼までが 3 とした。

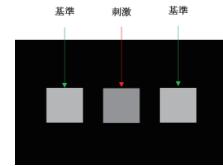


図 6 表示画像

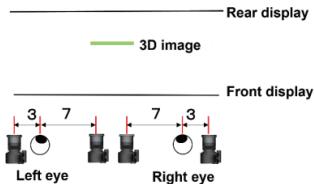


図 7 ブレンド比

3.2 測定方法

まず評価を行う前に被験者に奥行き知覚の測定に慣れてもらうため、いくつかの位置に立体映像を表示し、図 8 のように被験者に正面からの奥行きを指の間隔で表現してもらい、正しい奥行きをフィードバックすることでキャリブレーションを行うことで、知覚した奥行きを正確に指で表現できるようになるまで練習を行った。

被験者は 500 mm の視距離で刺激を観察し、人差し指と親指を使って左右の四角形に対する中央の四角形の知覚された奥行きを表した。指の間隔は、図 8 に示すように電子ノギスで測定した。被験者は像の最も手前の面と最も奥の面のそれぞれの知覚される奥行きを表した。画像はランダムに表示され、各条件を 3 回ずつ測定した。

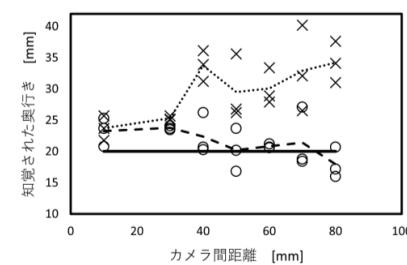


図 8 測定方法

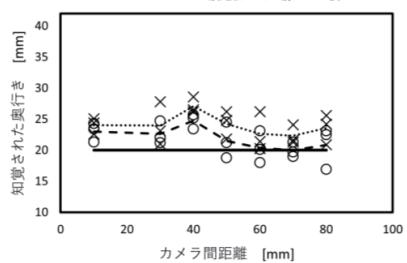
3.3 奥行き知覚の評価結果

図 9~10 にカメラ間の距離を変化させたときの 2 人の被験者の奥行き知覚の測定結果を示す。横軸はカメラ間の距離、縦軸は知覚される奥行きを示し、横の太い線は設定した奥行きを示す。また、点線は知覚された前後の面のそれぞれ平均値を表している。

Nearest Layer レンダリングでは、カメラ間の距離が 30 mm より短い場合、前後面がほぼ同じ奥行きに知覚

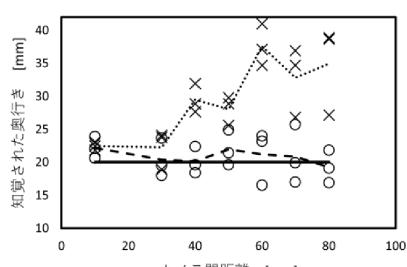


(a) Nearest Layer レンダリング

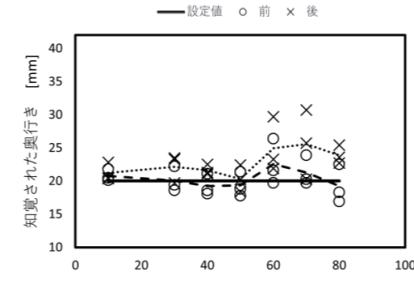


(b) 多視点 DFD レンダリング

図 9 被験者 A の実験結果



(a) Nearest Layer レンダリング



(b) 多視点 DFD レンダリング

図 10 被験者 B の実験結果

されたことから、3D像は融合した1つの3D像として知覚されたことがわかる。一方で、カメラ間の距離が40mmより長い場合、3D像は前後の別々の映像として知覚された。一方、多視点DFDレンダリングでは、カメラ間距離が40mm程度までは融合した1つの3D像

として知覚され、カメラ間距離が50mmを超えても前後の像の分離量は小さかった。

この結果から、リニアブレンディングを使用してレンダリングされた画像の奥行き知覚は、多視点DFDレンダリングでは、より広いカメラ間距離でも1つの3D像として知覚できることが示された。すなわち、多視点DFDレンダリングは少ない視点数で所望の奥行きを表現できる。

4.まとめ

リニアブレンディングを用いた積層型多眼ディスプレイにおいて、提案する多視点DFDレンダリングの有用性を確認するため、従来の方法(Nearest Layerレンダリング)と提案する方法による奥行き知覚の評価を行った。実験結果より、リニアブレンディングを用いることで、より広いカメラ間距離でも融合した1つの3D像として知覚することができた。すなわち、多視点DFDレンダリングにリニアブレンディングを組み合わせることで疑似的に視点数を増やせることがわかった。

多視点DFDレンダリングとリニアブレンディングは、少ない視点数でも所望の奥行きを積層型多眼ディスプレイで表示するために効果的な手法である。

5.謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(JP19H04155, JP20H05702, JP20K21817, JP20K11919, JP22H00535, JP23H03485)および放送文化基金による助成を受けた。

文 献

- [1] 和田高緒、高木康博：“Wide Depth Range 超多眼ディスプレイにおける視点間隔と奥行き表示範囲の拡大の関係”，Proc. 3DSA2013, S9-3(2013)
- [2] 森下雄登、伊達宗和、水科晴樹、須山史朗、山本健詞：“ステレオDFD(Depth-fused-3D)表示における奥行き知覚の基礎評価”，HODIC(2023)
- [3] H. Takada, S. Suyama, K. Nakazawa;”A New 3-D Display Method Using 3-D Visual Illusion Produced by Overlapping Two Luminance Division Display”, IEICE Trans. On Electronics, Vol.E88-C, No.3, pp.445-449(2005)
- [4] O. Iwamoto, H. Mizushima and S. Suyama;”Real-Object DFD Method Can Change Perceived Depths of Dark Real Object and Occluded Rear Real Object to in front and behind”, IDW/3DSA2019, pp.171-174(2019)
- [5] T Yamakawa, H. Takada, M. Date, T. Kojima, I. Morita, Y. Honda, and M. Miyao;”Measurement of Lens Accommodation During Viewing of DFD Images”, UAHCI2015, pp.285-296(2015)
- [6] M. Date, S. Shimizu, H. Kimata, D. Mikami, Y. Kusachi;”Depth Range Control in Visually Equivalent Light Field 3D”, IEICE Trans. On Electronics, Vol.E104-C, No.2, pp.52-58(2021)

計算機合成ホログラムにおける任意曲面における鏡像の計算アルゴリズム

新井 大也 坂本 雄児

北海道大学大学院情報科学院 〒060-0814 北海道札幌市北区北 14 条西 9 丁目

E-mail: arai.hiroya.j3@elms.hokudai.ac.jp

あらまし ホログラフィでリアリスティックなレンダリングを行うためには鏡像の計算が不可欠である。鏡像の計算には物体光が視点に届くまでに通る鏡面上の反射点を求める必要がある。現在、平面に鏡像を計算する手法は存在するが、曲面で計算するには高次式を解く必要があり、困難である。本研究ではベジェ曲面を対象にベジェクリッピングを用いることにより、曲面上の反射点を決定し、鏡像の計算に必要な鏡映点を求める手法を提案する。

キーワード 計算機合成ホログラム, 鏡面反射, ベジェ曲面, ベジェクリッピング

Algorithm for mirror images on arbitrary surfaces in computer-generated hologram

Hiroya ARAI and Yuji SAKAMOTO

Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University
N-14, W-9, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-0814 Japan

E-mail: arai.hiroya.j3@elms.hokudai.ac.jp

Abstract The calculation of the mirror image is essential for realistic rendering in holography. The calculation of the mirror image requires the determination of the reflection points on the mirror surface through which the object light passes before reaching the viewpoint. Currently, there are methods for calculating the mirror image on a plane, but calculating it on a curved surface is difficult because it requires solving higher-order equations. This study proposes a method for Bezier surfaces that uses Bezier clipping to determine the reflection points on the surface and to find the mirror points needed to compute the mirror image.

Keyword Holography, Specular reflection, Bezier surface, Bezier clipping

1.はじめに

近年、立体表示技術に関する研究が盛んに行われている。なかでも人間が立体感を知覚するためには必要とする生理的要因を十分に満たしているという点から、理想的な表示技術として計算機合成ホログラム(CGH: Computer-Generated Hologram)[1]の研究が注目されている。しかし、現在、CGH が抱える課題の一つとして Computer Graphics (CG) の

レンダリング技術を CGH にそのまま適用できないという問題がある。その理由として、ひとつの視点からしか計算を行わない CG に対し、CGH は視点によって見える像が異なり、運動視差に対応させる必要があるためである。

そこで複数視点からの映像を扱うリアリスティックなレンダリング手法としてレイトレーシングによって、連続的な運動視差を持つ CGH の計算を

可能にする方法[2]がある。この手法では物体に点光源を配置し、各光源からの光波を計算する点光源法を想定しており、鏡像を表示する鏡映点を計算する際に、視点と点光源を結ぶ鏡面上の反射点を求める必要がある。現在、平面や球面[3]での反射点の計算法が提案されているが、任意曲面での反射点を計算するには高次式を解く必要があり、解析的な計算方法は存在していない。

そこで、ベジエ曲線[4]を対象に反射点をベジエクリッピング[5]を用いて計算する手法[6]を提案したが、今回はこの手法を3次元に拡張し、ベジエ曲面を対象に反射点を計算する手法を提案する。

2. 提案手法

2.1. 提案手法の概要

提案手法の概略図、フローチャートをそれぞれ

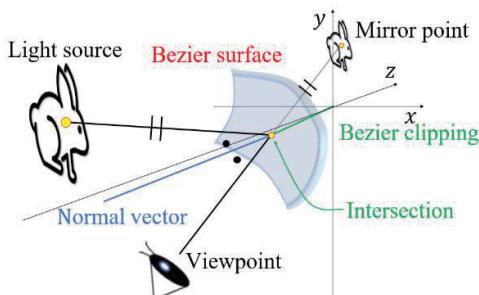


図 1. 提案手法の概略図

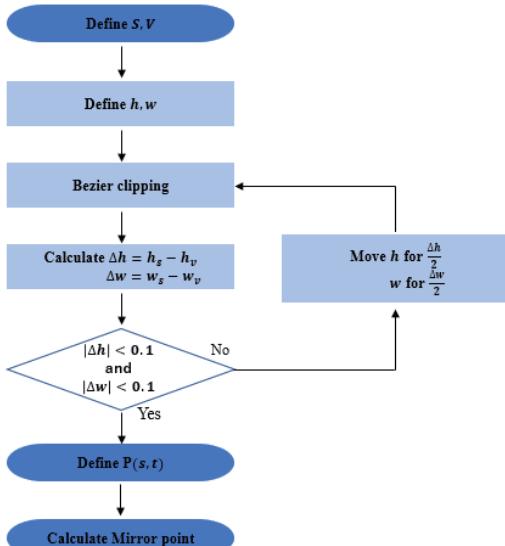


図 2. 提案手法のフローチャート

図 1, 2 に示す。ベジエ曲面とは 2 つの媒介変数 $s(0 \leq s \leq 1)$ と $t(0 \leq t \leq 1)$ からなる $n \times m$ 個の制御点を持つ曲面であり、制御点 $F_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ 、各制御点の重さを表す ω_{ij} 、バーンスタイン基底関数 $B_i^n(x) = \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i}$ を用いて

$$\hat{P}(s, t) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_i^n(s) B_j^m(t) \omega_{ij} F_{ij}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_i^n(s) B_j^m(t) \omega_{ij}} \quad (1)$$

と、表すことができる。本研究では 3×3 個の制御点からなるベジエ曲面を対象に視点と点光源を結ぶ反射点を求め、鏡映点計算を行った。

2.2. 反射点計算

反射点を求めるまでの流れを説明する。まず 3 次元空間上に視点 V 、物体を構成する点光源のひとつ S を配置する。そして、それぞれの高さを表す角度 h と広さを表す角度 w を求め、その間の角を偏角にもつ直線とベジエ曲面との交点をベジエクリッピングにより求める。なお、極座標 (r, h, w) で表される点を直交座標に変換すると、それぞれ

$$x = r \cos h \sin w \quad (2)$$

$$y = r \sin h \quad (3)$$

$$z = r \cos h \cos w \quad (4)$$

と表すことができる。曲面のベジエクリッピングは 2 つの平面を定義し、その交線を直線とし、曲面との交点を計算する。今回は x 平面上に垂直な広さ角度 w の平面、 y 平面上に垂直な高さ角度 h 、広さ角度 w の平面をそれぞれ

$$x \cos w - z \sin w = 0 \quad (5)$$

$$-x \sin h \sin w + y \cos h - z \sin h \cos w = 0 \quad (6)$$

と、表す。それぞれの平面とベジエ曲面との交線はベジエ曲線となり、それぞれの制御点 d_{ij}^k は

$$d_{ij}^1 = \omega_{ij} (x_{ij} \cos w - z_{ij} \sin w) \quad (7)$$

$$d_{ij}^2 = \omega_{ij} (-x_{ij} \sin h \sin w + y_{ij} \cos h - z_{ij} \sin h \cos w) \quad (8)$$

と、表すことができる。そして交点とベジエ曲面の制御点との s , t に関する距離関数の制御点はそれぞれ

$$s_x = d_{00}^1 + d_{02}^1 - d_{20}^1 - d_{22}^1$$

$$s_y = d_{00}^2 + d_{02}^2 - d_{20}^2 - d_{22}^2$$

$$D_{ij}^s = \frac{-s_x d_{ij}^2 + s_y d_{ij}^1}{\sqrt{s_x^2 + s_y^2}} \quad (9)$$

$$t_x = d_{02}^1 + d_{22}^1 - d_{00}^1 - d_{20}^1$$

$$t_x = d_{02}^3 + d_{22}^3 - d_{00}^3 - d_{20}^2$$

$$D_{ij}^t = \frac{-t_x d_{j(-i+2)}^2 + t_y d_{j(-i+2)}^1}{\sqrt{t_x^2 + t_y^2}} \quad (10)$$

と表すことができ、制御点の凸包を用いてそれぞれの関数が 0 になる値を求め、 s , t を決定し、交点 $P(s, t)$ を導出する。ここまでが曲面に対するベジェクリッピングの説明である。

次に、交点における角度の差を求める。交点の法線ベクトル \vec{H} は交点を s で微分した接線ベクトル $\vec{P}'(s)$ と、 t で微分した接線ベクトル $\vec{P}'(t)$ の外積

$$\vec{H} = \vec{P}'(s) \times \vec{P}'(t) \quad (11)$$

を計算することにより求められる。そして、法線ベクトルを軸に光源から交点へ入射するベクトル \vec{SP} の反射ベクトル \vec{f} を

$$\vec{f} = \vec{SP} + (-\vec{SP} \cdot \vec{H})\vec{H} \quad (12)$$

と求めることができる。ベクトルの各成分を (x, y, z) とすると、高さ角度 h と広さ角度 w はそれぞれ

$$h = \sin^{-1} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (13)$$

$$w = \operatorname{sgn}(x) \cos^{-1} \frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}} \quad (14)$$

と表すことができる。なお、 w で用いた $\operatorname{sgn}(x)$ は符号関数であり、 x が正なら 1, 負なら -1 という値を持つ。交点から視点へ向かうベクトル \vec{PV} の高さ角度の差 Δh 、広さ角度の差 Δw を求め、それぞれ差の半分、ベジェクリッピングの偏角を移動させる。そして、再度ベジェ曲面との交点を求める。それぞれの角度の差が共に 0.1° 未満になるまで繰り返し計算を行うことにより、反射点を決定する。なお、 $\Delta h, \Delta w$ の計算を図 3 に示す。

2.3. 鏡映点計算

反射点がわかると、鏡映点を計算することができる。まずは光源から反射点までの距離 $|\vec{SP}|$ を求め、その距離の分だけ、視点から反射点へ向かうベクトルを延長させることにより、鏡映点が求められ、鏡像の点光源配置が可能となる。以上の流れが、今回の提案手法である。

3. 提案手法の評価

提案手法を評価するため、2 つの方法を用いた。まずは提案手法で求めた反射点と実際の反射点の誤差を調べた。誤差の確認方法は、光源の位置を固定し、様々な反射点 $P(s, t)$ における光源の反射ベクトルを求め、正反射した位置を求める。その位置を視点位置とし、提案手法を用いて反射点を計算し、実際の反射点と比べることにより誤差を計算する。なお今回の計算は光源位置を $S(100, 50, 600)[mm]$ とし、図 4 のベジェ曲面で計算を行った。実際の反射点 $P(s, t)$ における誤差の値を図 5 に示す。図よりほとんどの値で誤差を 0.1mm 未満に抑えることができた。ただし、 s または t の値が 0, 0.1, 0.9, 1 のときに反射点を検出できない事象がしばしば発生したため、有効範囲を 0.2 以上 0.8 以下にするとすべての点で誤差を 0.1mm 以下に抑えることができた。

次に計算負荷に関して調べる。先ほどと同じ

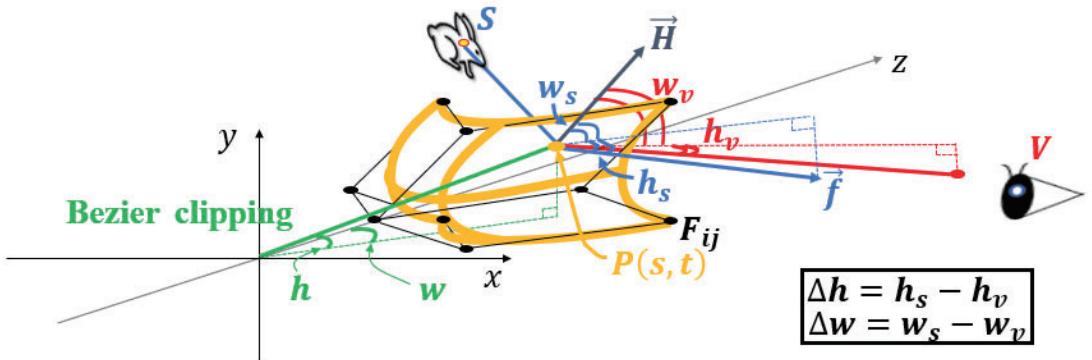


図 3. $\Delta h, \Delta w$ の計算方法

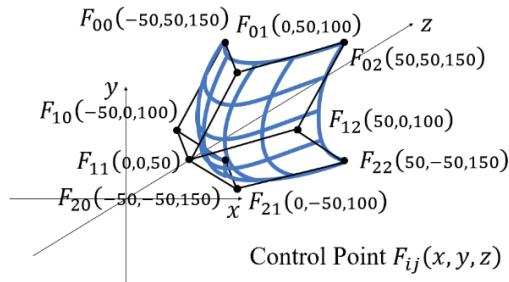


図 4. 使用したベジエ曲面

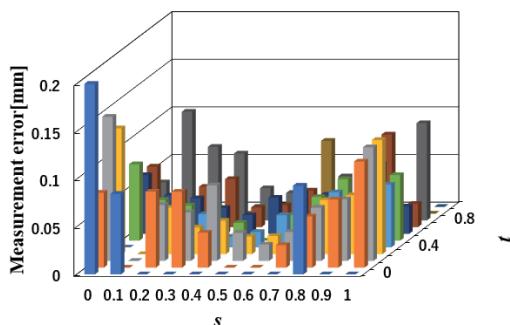
図 5. s, t における誤差の大きさ

表 1. 提案手法の計算負荷

光源数[個]	100
試行回数[回]	1645
計算時間[ms]	32.5

図 4 の曲面を使用して、視点位置を $V(100,50,1000)[mm]$ とし、光源位置を $S(1 \leq x \leq 10, 1 \leq y \leq 10, 600)[mm]$ の範囲で x と y を 1 ずつ動かし、計 100 点の光源に対する計算負荷を調べ、結果を表 1 に示す。提案手法では最初に設定する偏角を 2 点目以降は直前の光源との反射点を偏角にすることにより、総試行回数を少なくしている。また、光源の間隔を狭くすることで 1 個当たりの試行回数は減らすことができる。

4.まとめ

本研究ではベジエ曲面を対象に 3 次元空間上で反射点をベジエクリッピングにより計算し、鏡映点を計算する手法を提案した。また、提案手法が高い精度で計算できていることを示した。今回の

研究では、3 × 3 個の制御点からなるベジエ曲面を対象に計算を行ったが、より多くの制御点を持つベジエ曲面の反射点も提案手法によって最適化可能である。また、本研究により、CGH のリアルティックなレンダリング手法で任意鏡面での鏡像が計算可能になることが期待できる。

5. 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 22H03621 の助成を受けたものです。

文 献

- [1] J. P. Waters, "Holographic image synthesis utilizing theoretical methods," *Applied Physics Letters*, vol. 9, pp. 405–407, 1966.
- [2] Keita Watanabe, Yuji Sakamoto, "Hidden surface removal method using object point based ray tracing in CGH," *Proc. SPIE 11766, International Workshop on Advanced Imaging Technology (IWAIT) 2021*.
- [3] 新井大也, 坂本雄児, "鏡面円筒における反射点の近似手法," 令和 4 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 122, 2022.
- [4] 坂根由昌, "ベジエ曲線とベジエ曲面-コンピュータによる形状設計入門-," 現代数学序説(III)第 5 章, 川中宣明・宮西正宜編, 大阪大学出版会, 2002.
- [5] T. Nishita, T. W. Sederberg and M. Kakimoto, "Ray Tracing Trimmed Rational Surface Patches," *Computer Graphics (SIGGRAPH'90 Proc.)*, vol. 24, pp. 337-345, 1990.
- [6] 新井大也, 坂本雄児, "計算機合成ホログラムにおけるベジエ曲線での鏡面反射の計算法," HODIC 学生シンポジウム 2023, 2-3, 2023 年 2 月

計算機合成ホログラムにおけるクラウドサーバ群を用いた 計算負荷の分散および処理時間に対する効果の測定

山内 啓瑚[†] 柏木 晴史[†] 坂本 雄児[‡]

† 北海道大学大学院 情報科学院 〒060-0814 北海道札幌市北区北 14 条西 9 丁目

‡ 北海道大学大学院 情報科学研究所 〒060-0814 北海道札幌市北区北 14 条西 9 丁目

E-mail: † {k_yama@eis.hokudai.ac.jp, kashiwagi.akifumi.z8@elms.hokudai.ac.jp} ‡ yuji@ist.hokudai.ac.jp

あらまし 3D ホログラフィックディスプレイは、ヒトの立体視における生理的要因を満たした理想的な三次元映像表示技術として注目されている。一方で計算機合成ホログラムの動画化やリアルタイム化に向けた高速な生成に際し、光波伝搬計算シミュレーションによる膨大な計算量が課題となっている。本研究では複数の計算機を用いて並列化し、さらに並列度を柔軟に調整できるクラウドサーバを利用することにより、計算量を分散する手法を提案する。

キーワード ホログラフィ、計算機合成ホログラム、クラウドコンピューティング、並列処理、GPU

Distributed Calculation of Light Propagation for Computer-generated Hologram using Cloud Cluster

Keigo YAMAUCHI[†] Akifumi KASHIWAGI[†] and Yuji SAKAMOTO[‡]

† Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University,

Kita 14, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-0814, Japan

‡ Faculty of Information Science and Technology, Hokkaido University,

Kita 14, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-0814, Japan

E-mail: † {k_yama@eis.hokudai.ac.jp, kashiwagi.akifumi.z8@elms.hokudai.ac.jp} ‡ yuji@ist.hokudai.ac.jp

Abstract 3D Holographic Display, which satisfies physiological factors when human recognize 3D, has been expected as an ideal 3D displaying technology. However, for fast generation towards videos or real-time process of CGH(Computer-generated Hologram), we need to tackle enormous computational cost required by light propagation simulation. This study proposes the method that enables fast computation distributing propagation process using a cluster of cloud-based GPU servers.

Keyword Holography, Computer-generated Hologram, Cloud Computing, Parallel Processing, GPU

1. はじめに

昨今の映像表現技術の発展に伴い、ヒトが立体を近くする生理的要因[1]を満たしたホログラフィ[2]が次世代の三次元映像技術として注目されている。ホログラフィは記録過程と再生過程に大別できるが、記録過程に計算機を用いてホログラム画像を生成する CGH(Computer-generated Hologram)、計算機合成ホログラム)[3]は、仮想物体の記録や動画作成を実現可能な技術として期待されている。

一方で、実用化に向けた課題のひとつとして高い計算コストが挙げられる。CGH の生成過程において、物体表面からホログラム面への光波伝搬シミュレーションの計算量が最も大きく、計算時間の観点からも支配的である。従来より CGH の分散計算は提案されてき

たが、本研究では、クラウドサーバを利用することにより導入コストが大きな環境も想定できる柔軟な拡張性をもった CGH 計算手法を提案するとともに、通信オーバーヘッドをはじめとする実用性を検証する。

2. 先行研究

CGH 計算における各ホログラム面座標の計算結果は他の画素の結果に対して非依存であるため、並列性が高い。したがって CG(Computer Graphics)と同様に GPU(Graphic Processing Unit)を活用したハードウェア高速化が数多く行われてきた。しかし、実用化の要件を満たすような滑らかな動画像やサイズの大きな CGH を作成するためには更なる処理能力が要求され、複数の GPU を搭載した計算機を複数台接続して構成するマルチ GPU クラスターを用いた手法が提案され

ている。例えば、1フレームごとの計算を各GPUに逐次的に割り当てる手法[4]では、パイプライン化した計算処理をInfiniBandネットワーク上で行うことによりCGH動画生成のリアルタイム化を実現した。また、記録する物体を分割する手法[5]ではデータサイズやメモリアロケーション、メモリアクセスなどの観点から単一および複数サーバ上で最適化を行うことにより計算量を削減し、実行時間への影響を検証した。

一方で、CGHにはレンダリング表現技法が確立していないという課題もある。写実的な再生像を得るために、今日のCG画像のように隠面消去やシェーディングなどの処理が必要となる。本研究では物体表面を点光源で覆い、各点からCGH面上の画素への伝搬を記録する点充填法を用いるが、この計算手法は背面の点光源が透過してしまうことが課題となっていた。これに対してレイトレーシングを用いた手法[6]がある。この手法は物体表面の点光源からホログラム面の画素までレイトレーシングを行い、遮蔽される光源は記録しないことにより連続した運動視差のある隠面消去を実現した。本研究ではこのレンダリング手法を採用しており、課題となる膨大な計算量を分散する。

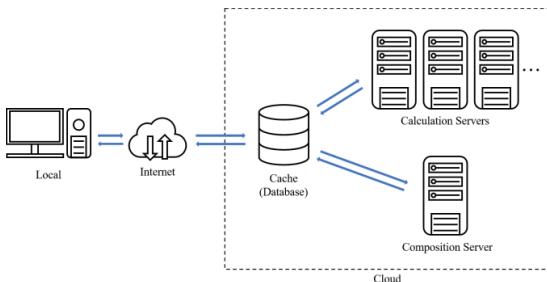


図1: ネットワーク構成

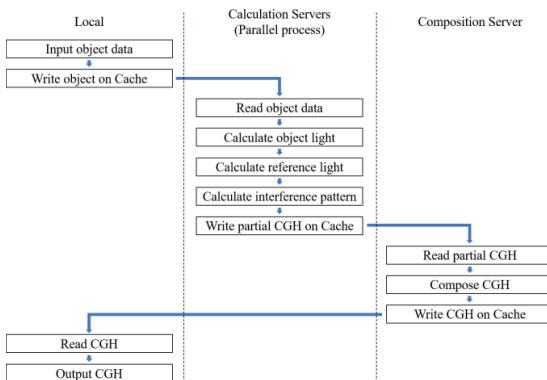


図2: 提案手法の計算過程

3. 提案手法

3.1. 提案手法の概要

CGHの計算領域を分割し、複数のサーバに割り当てるこことによって生成処理を分散する提案手法のシステムを説明する。

当該システムのネットワーク構成を図1に示す。キャッシュおよび各サーバは全て同一クラウドのネットワーク上にあるとし、ローカル-キャッシュ間をインターネット回線で接続する。なお、分割数によらず計算サーバの他に合成サーバを1台別途使用する。また、キャッシュへの書き込み時に禁則文字が含まれないようBase64エンコードを行っている。文字列の3byteは4桁のBase64で表されるため、各通信路で伝送するデータは約33%増加することに留意されたい。

3.2. 物体入力

詳細な計算過程を図2に示す。はじめに入力した3Dオブジェクトを文字列化し、日時に一意なキーを生成して3Dオブジェクトデータとともにキャッシュへ書き込む。ローカルはこれ以降、3.4節にて合成されるCGHがキャッシュへ書き込まれるまで待機する。

3.3. CGH計算

キャッシュへのオブジェクトデータ入力を起点として計算サーバは入力データを読み込み、割り当てられた領域について物体光伝搬計算、参照光計算、干渉縞パターン計算を実行する。生成したCGHをキャッシュに書き込むことで計算サーバのプロセスが完了となる。なおデータ読み込み時では、計算領域に関わらず全ての計算サーバがオブジェクト全体を読み込む。これはレイトレーシングを行う際に、仮想空間に配置されているポリゴン全てを参照するためである。

3.4. 合成処理とCGH出力

入力データのキーをもとに分割されたCGH（以降「部分CGH」と呼ぶ。）を待機する。分割数に応じた必要な部分CGHがすべてキャッシュに保存されると、合成プロセスが起動し部分CGHを繋ぎ合わせることにより1枚のCGHを作成する。これをキャッシュに保存し、ローカルがCGHをダウンロードすることによりCGHの生成が完了する。

3.5. 通信路と伝送されるデータ

本手法において、キャッシュを経由する通信路は3つの経路がある。1つ目はローカルから計算サーバまでの通信路で3Dオブジェクトデータを、2つ目は計算サーバから合成サーバまで部分CGHを、そして3つ目が合成サーバからローカルまで合成したCGHを伝送する。

4. 評価実験

4.1. 実験概要

提案手法の有効性を検証するため、 1920×1080 [px] の CGH 計算に対して計算サーバ台数を 1, 4, 16 台としたときの光学再生像と処理時間（5 回の平均値）を測定した。使用した光学系の配置図とパラメータをそれぞれ図 3, 表 1 に示す。また、処理時間を測定する項目は以下の通りである。

- システム全体
- 光波伝搬計算
- 合成処理
- インターネットを経由したデータ通信
- 遅延 1: ローカルから計算サーバ
- 遅延 2: 合成サーバからローカル

今回はクラウドリソースに AWS(Amazon Web Services)を利用しておらず、クラウドサーバのパラメータは表 1 を参照されたい。なお、合成サーバは計算サーバと同じ仕様で構成した。また、キャッシュにはインメモリキャッシュである Amazon ElastiCache の Redis クラスターを採用することによりディスクに比べて高速に書き込み及び読み出しが行えるように構成した。

表 1 光学系のパラメータ

SLM	Pixel pitch	$8.0 \mu\text{m} \times 8.0 \mu\text{m}$
	Number of pixels	1920×1080 pixels
Light source	Green	$512 \mu\text{m}$

表 2 クラウドサーバのパラメータ

Instance type	g4dn.xlarge
CPU architecture	Intel® Cascade Lake
RAM	16GB
GPU	NVIDIA Tesla T4
OS	Windows Server 2019

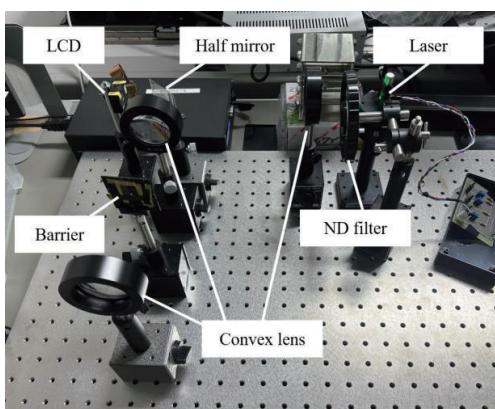


図 3 使用した光学系



図 4 光学再生像

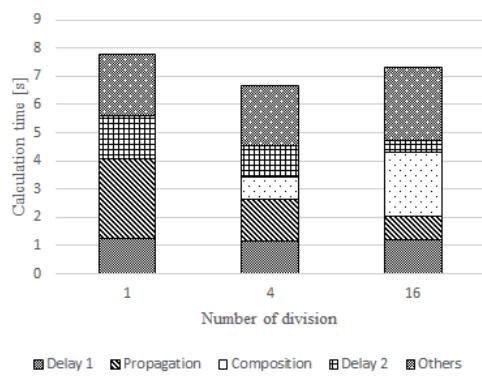


図 5 分割数に対する処理時間

4.2. 実験結果

光学再生像を図 4 に示す。隠面消去が施され、背面の点光源が透過することのない再生像を確認した。

測定した処理時間を図 5 に示す。分割数に応じて物体光伝搬計算の処理時間は短縮しており、単一サーバの場合 2.83[s] であった光波伝搬処理は最長でも 0.80[s] まで短縮され、処理の分散が有効に行われたといえる。一方で、全体として高速化はみられなかった。その理由としては、合成処理の要因があげられる。分割数を増加した際、部分 CGH を参照するインデックスの処理が煩雑化したことにより、シングルスレッドで行った合成処理の計算時間が増加したと考えられる。これに対しては、近傍の画素に依存性がないため GPU による並列計算を行うことによって高速化が見込める。インターネット回線での遅延についてはローカルから計算サーバまでの通信路(Delay 1)は約 1.22[s]、合成サーバからローカルへの通信路(Delay 2)では約 0.40[s] の遅延があり、処理全体に対し約 22% の通信オーバーヘッドであった。回線状況により 0.1[s] 程度前後するこれらの遅延は現状ではボトルネックには至らないため遅延を許容した動画生成の用途には実用性があるといえるが、リアルタイム処理を想定した場合には不安定な遅延要因になると推察される。

286.1762	284.855	284.3462	283.526
498.0092	517.6142	508.8348	417.8218
501.283	804.3378	746.9794	519.4392
531.0792	774.3524	753.1398	503.6474

(a) 物体を中央に配置した場合

283.5402	308.742	298.627	300.5798
291.703	512.71	506.4619	544.1731
286.8955	541.6442	805.8896	796.5872
289.1581	580.1098	761.3504	787.2604

(b) 物体を右方向に移動した場合

図 6 (a) 各領域の光波伝搬計算時間
(16分割, 単位 ms)

各分割領域に注目すると、計算サーバごとに計算時間の偏りが確認できたため、その原因を考察する。図6に物体を移動した際の各領域の光波伝搬計算時間を示した。16個の各領域は部分 CGH の位置に対応し、数値は光波伝搬計算の処理時間である。(a)(b)どちらの場合でも最大 2.84 倍の差があり、またその計算時間の長さは物体位置に応じて分布していることが確認できる。これは、SSB 法(Single-side Band method)による周波数制限によって生じた差分であると考えられる。点光源からの光波伝搬をホログラム面に記録すると、同心円状の FZP(Fresnel Zone Plate)が生じ、円の中心から離れていくほど間隔が狭くなる。ディスプレイ上では画素の集合体で映像を再生しているため、ピクセルピッチよりも狭い間隔を表現することはできず、エイリアシングを生じる。エイリアシングの生じた CGH は再生像にゴーストが発生し観察を阻害するため、CGH レンダリング時に高周波成分を除去している。ホログラム面において、物体に対して近い部分、すなわち点光源の比較的低い周波数成分を多く含む領域は記録する回数が減らないため計算量が多く、高周波成分を多く含む物体から離れた領域は記録する回数とともに計算量が少なくなることからこのようない偏りが生じたといえる。したがってこの偏りは何らかの要因で一方の計算量が増加したのではなく、もう一方の計算量が減少したことによる結果である。しかし、本手法ではすべての計算サーバが処理を完了するまで合成に移行し

ないため、先行研究[4]のような逐次的に処理を分配することや、各サーバへの負荷が均一になるように分散方法を再検討することで CGH の効率的かつ連続的な生成が期待できる。

5. おわりに

本研究では、CGH 領域分割によって光波伝搬計算を分散し、分割数に応じて計算量が減少した。クラウド化によって生じる通信オーバーヘッドの検証では、全体の約 22%程度でほぼ一定の値を示し、リアルタイム処理には悪影響であるが、遅延を許容することで画像を連続生成する用途としての一定の実用性が見受けられた。また、部分 CGH は物体位置によって計算負荷が大きく偏るため、より均質な分散法の検討が必要であり、それらの合成アルゴリズムについても大きく改善が必要である。

6. 謝辞

本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究 06801 により得られたものです。

文 献

- [1] 辻 雄太, 鈴木広隆：“両眼立体視における立体感の支配要因に関する研究：瞳孔間距離、テクスチャー、图形の複雑さの立体感への効果”，日本建築学会環境系論文集, vol. 71, no. 605, pp. 111–117(2006)
- [2] D. Gabor : “A new microscopic principle”, Nature, vol. 161, no. 4098, pp.777–778(1948)
- [3] James P. Waters : “HOLOGRAPHIC IMAGE SYNTHESIS UTILIZING THEORETICAL METHODS”, Appl. Phys. Lett., 9, 11, pp.405–407 (December 1966)
- [4] Hiroaki Niwase, Naoki Takada, Hiromitsu Araki, Yuki Maeda, Masato Fujiwara, Hirotaka Nakayama, Takashi Kakue, Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito : “Real-time electroholography using a multiple-graphics processing unit cluster system with a single spatial light modulator and the InfiniBand network”, Opt. Eng. 55, 9 (September 2016)
- [5] Takanobu BABA, Shinpei WATANABE, Boaz JESSIE JACKIN, Kanemitsu OOTSU, Takeshi OHKAWA, Takashi YOKOTA, Yoshio HAYASAKI, Toyohiko YATAGAI : “Fast Computation with Efficient Object Data Distribution for Large-Scale Hologram Generation on a Multi-GPU Cluster”, IEICE Transactions on Information and Systems, 2019, E102.D , 7 , pp.1310-1320(July 2019)
- [6] K. Watanabe and Y. Sakamoto : “Hidden surface removal method using object point based ray tracing in CGH”, International Workshop on Advanced Imaging Technology (IWAIT), vol. 11766(March 2021)

位相アンラッピングにおける空間関係を考慮したモジュールの導入 — Spatial Relation Aware Module (SRAM) の開発 —

吾妻 千織^{†‡} 下馬場 朋禄[†] 伊藤 智義[†]

[†] 国立大学法人千葉大学大学院工学研究院 〒263-8522 千葉県千葉市稻毛区弥生町 1-33

[‡] 株式会社コンピュータマインド 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-6-2 新宿国際ビルディング 4F

E-mail: ^{†‡} 21wd9303@student.gs.chiba-u.jp, [†] shimobaba@faculty.chiba-u.jp, [‡] itot@faculty.chiba-u.jp

あらまし 位相アンラッピングとは $(-\pi, \pi]$ の範囲に折り畳まれた位相から元の位相を復元する技術である。正確な位相アンラッピングを行うためには、位相の空間的な連続性や大域的な関係性を考慮する必要があるが、従来の畳み込みニューラルネットワークを使用した手法は、畳み込みの過程で局所的な位置情報やピクセル同士の関係性を捨てているため、位相復元性能が低下している。そこで我々は、位相の連続性や、大域的な関係性を考慮した特徴量を獲得する CNN ベースのモジュールを提案する。

キーワード 位相アンラッピング、深層学習、畳み込みニューラルネットワーク、大域カーネル

Spatial Relation Aware Module for Phase Unwrapping — Development of Spatial Relation Aware Module (SRAM) —

Chiori AZUMA^{†‡} Tomoyoshi SHIMOBABA[†] and Tomoyoshi ITO[†]

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

[‡] Computermind Corp, Shinjuku Kokusai Building 4F, 6-6-2 Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, 160-0023, Tokyo, Japan

E-mail: ^{†‡} 21wd9303@student.gs.chiba-u.jp, [†] shimobaba@faculty.chiba-u.jp, [‡] itot@faculty.chiba-u.jp

Abstract Phase unwrapping is a technique used to recover the original phase from the wrapped phase in the range $(-\pi, \pi]$. Conventional convolution neural network (CNN) based methods discard the local position information and relationships between pixels in the convolution process, resulting in poor phase unwrapping performance. Therefore, we proposed a CNN-based module to extract features that take into account phase continuity and global relationships.

Keyword Phase unwrapping, Deep learning, Convolution neural network, Large kernel

1. まえがき

位相アンラッピングは Digital Holography, Magnetic Resonance Imaging (MRI), Synthetic Aperture Radar (SAR) など実用的な様々な分野において、変異や表面形状などの物理量の測定に利用されている。一般的に位相計測はアークタンジェント関数によって求められるため、値が $(-\pi, \pi]$ の範囲で折り畳まれる。従って、位相シフト量がその範囲を超える場合、得られる画像は $2n\pi$ (n は整数) のジャンプを含む不連続なものとなる。従って、目的の物理量を得るために観測値に対して適当な 2 の倍数を加え、真の連続した位相分布に戻す手続きが必要となる。これを位相アンラッピングと呼ぶ。位相アンラッピングは、ノイズの無い理想的な環境であれば、簡単に真の位相を計算することができるが、ノイズ、不連続領域、急激な変化等が存在する環境では困難になる。

位相アンラッピング問題への従来のアプローチとして、Path following approach や、Minimum norm

approach などの手法が挙げられる。一般的に Path following approach は、比較的計算効率が高いがノイズに対するロバスト性が低く、一方で Minimum norm approach は、計算効率が低いがノイズに対するロバスト性が高いとされている。

近年では深層学習、とりわけ畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を使用した位相アンラッピングに関する手法が研究されている。CNN をベースとしたモデルは、従来手法が苦手としていたノイジーな環境に対しても良好な性能を示している。

正確なアンラッピングを行うためには、位相の空間的な連続性や大域的な関係性を考慮する必要がある。従来の CNN を使用した手法は、比較的小さなカーネルを用いて畳み込みを繰り返すことによって特徴抽出を行っている。これにより Localization に関するロバスト性を獲得しているが、一方で畳み込みの過程で局所的な位置情報やピクセル同士の関係性を捨てている。そこで我々は、位相の連続性や、大域的な関係性を考慮し

た特徴量の抽出を行う Spatial Relation Aware Module (SRAM) と名付けた新たなモジュールを提案する。SRAM 及び本研究で使用した SRAM を組み込んだ CNN ベースのアーキテクチャを図 1 に示す。SRAM は、Encoder-decoder 形式のモデルのスキップ構造に対して適用し、位相復元に有用なピクセル位置関係を考慮した大域的な特徴を decoder に提供する。

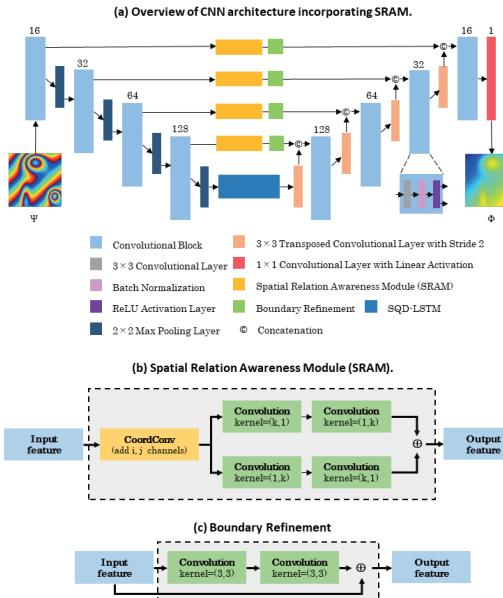


図 1 提案手法のアーキテクチャ概要

2. 提案手法

提案手法である SRAM を組み込んだアーキテクチャは、Encoder-decoder 形式の構造で、直接的に真の位相を推論する回帰アプローチを採用した。構築したアーキテクチャの構造を図 1 に示す。一般的な CNN では、畳み込みを繰り返していく過程で局所的な位置情報やピクセル間の関係性を捨てている。アンラッピング位相の復元には、ピクセル間の関係性を考慮することが重要であり、提案手法では、ピクセルの位置情報を保存するために、Encoder と Decoder 間を結ぶスキップ接続に、Global Convolution Network (GCN) [1] 及び CoordConv 層[2]を組み合わせた、SRAM を適用した。

GCN は入力と同様のサイズのカーネルを用いて畳み込みを行い、入力画像から大域的な特徴抽出を行うことを目的とした手法である。CoordConv は、畳み込み層の入力特徴マップに対して、行・列方向の座標情報を付与した 2 チャンネルを加える手法であり、これによりカーネルが、自身が画像中のどの座標を畳み込んでいるかを考慮した特徴抽出が可能となる。図 2 に

CoordConv の概要を示す。

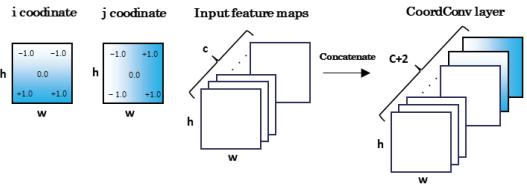


図 2 CoordConv [2] の概要図

本研究で使用するアーキテクチャの詳細について記載する。Encoder と Decoder の接続部（ボトルネック）には、大域的な空間依存関係を学習するために[3]で提案されている SQD-LSTM モジュールを採用した。しかし、ボトルネックに SQD-LSTM モジュールを採用したとしても、Encoder 側で畳み込みとブーリング処理が繰り返し行われると、その過程で大域的な空間依存関係が消失してしまう。この対策として、Encoder 側で抽出する特徴マップを、対応する解像度の Decoder 側へ受け渡すスキップ接続に SRAM を適用した。

損失関数には、[3]で提案された予測された位相 $\hat{\phi}$ と真の位相 ϕ の間の類似性を高めつつ、収束時に他の解を許容する損失関数を採用した。これは一意解を持たない位相アンラッピングタスクに対して効果が期待できる。

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_c &= \lambda_1 \mathcal{L}_{var} + \lambda_2 \mathcal{L}_{tv} \\ \mathcal{L}_{var} &= \mathbb{E}[(\hat{\phi} - \phi)^2] - (\mathbb{E}[\hat{\phi} - \phi])^2 \\ \mathcal{L}_{tv} &= \mathbb{E}[|\hat{\phi}_x - \phi_x| + |\hat{\phi}_y - \phi_y|] \end{aligned}$$

λ_1, λ_2 は各損失関数の重みを表し、 $\mathbb{E}[\cdot]$ は期待値を表す。誤差損失の分散 \mathcal{L}_{var} は複数の代替解の学習を可能にし、誤差損失の全変動 \mathcal{L}_{tv} は、 $\hat{\phi}$ と ϕ の勾配を一致させるようネットワークに強制することで、 $\hat{\phi}$ と ϕ の類似性が高まるほど増加していく。

SRAM の実装はシンプルであり、且つ Encoder-decoder 形式のネットワークであれば、基本的にどのようなネットワークにも適用可能である。

3. 実験結果

提案手法の有効性を示すための検証について記載する。

3.1. 位相画像の生成方法

本検証では、混合ガウス分布に基づいて位相データを生成した。本研究で使用するデータセットは、ランダムな形状を含む合成位相画像と、それに対応するラップ位相画像から構成される。

位相のランダムな形状は、形状や位置が異なる複数

のガウシアンの加算・減算及び、垂直方向と水平方向に沿ってランダムに選択した勾配を持つランプ位相を追加することで実現した。

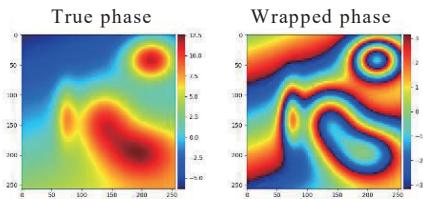


図 3 データセットのサンプル画像

3.2. 実験のセットアップ

本検証では、位相画像は 256×256 ピクセル、1 チャンネルのグレースケール画像とした。我々は 2,000 枚の位相画像からなる 2 つのデータセットを作成した。これらのデータセットのうち 1 つは、実世界のラップ位相画像に広く見られるノイズをシミュレートするために、ラップする前に 0, 5, 10, 20, 60dB の加法ガウスノイズレベルをランダムに与えた。このデータセットを ”Noisy”，もう一方のクリーンなデータセットを ”Noise Free” データセットとした。各データセットは、Train と Test データ用に 1,000 枚ずつ分割した。表 1 にデータセットの詳細を示す。

表 1 検証用データセットの詳細

Dataset	Noise (dB)	Number of images		Computation time (ms)
		Train	Test	
Noisy	[0.5,10,20,60]	1,000	1,000	
Noise Free	None	1,000	1,000	

学習時のハイパーパラメータ λ_1, λ_2 は、それぞれ 0.1 と 1.0 に設定した。バッチサイズは 8 とし、最適化関数には ADAM を採用した。学習率は 10^{-3} , $\beta_1 = 0.9$, $\beta_2 = 0.999$, epoch 数は 100 とした。

提案手法の有効性を示すため、比較用に以下に示すモデルを使用して検証を実施した。

1. QGPU:[4]で提案されている Path following approach に分類されるアルゴリズム。
2. SQD-LSTM: [3]で提案されている CNN ベースのモデル。
3. SRAM (Ours): スキップ接続に SRAM を採用した提案手法。
4. -CoordConv: 提案手法である SRAM のうち、CoordConv を削除した Ablation モデル。
5. -GCN: 提案手法である SRAM のうち、GCN を削除した Ablation モデル。

位相アンラッピングの性能評価指標には Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) を使用した。

3.3. NRMSE 及び処理時間の評価

表 2 に Noisy, Noise Free データセットを用いて学習及び定量評価を実施した結果を示す。NRMSE については、各モデルで初期パラメータを変えて 5 回学習を行い、その平均値を示した。処理時間については、Noisy データセット、Noise Free データセット、Noise Level を 0dB に設定し生成したデータセットを使用し、各データセットの画像 1,000 枚を推論し、1 枚当たりの平均推論処理時間を算出した。

表 2 Noisy/Noise Free データセットにおける定量評価

Method	NRMSE		Computation time (ms)		
	Noise Free	Noisy	Noise Free	Noisy	0 (dB)
QGPU	0.00	7.08	12.33	14.68	243.12
SQD-LSTM	2.19	2.75	42.26	42.60	42.22
SRAM	1.65	2.10	44.86	45.05	44.81
- CoordConv	2.12	2.33	44.89	45.06	45.11
- GCN	1.87	2.39	42.12	42.37	42.03

QGPU は、Noise Free なデータセットに対しては、完璧な位相復元を行った。一方で、Noisy なデータセットについては著しい性能低下が確認された。提案手法は、どちらのデータセットに対しても性能向上が確認され、ノイズに対するロバスト性が示された。また、Ablation モデルでの性能評価の結果、どちらの Ablation モデルも性能低下が確認されたため、CoordConv と GCN を組み合わせることにより、ピクセルの連続性や大域的な関係性を考慮する能力が増強されたことが示された。

処理時間については、Noisy データセット、Noise Free データセットに対しては QGPU が約 12~14ms、深層学習系モデルが約 42~45ms の時間を要した。ただし、深層学習モデルは入力データに依存せずに処理時間は一定であるのに対し、QGPU のアルゴリズムは推論画像のノイズレベルに大きな影響を受け、Noise Level が 0dB のデータに対しては、1 枚当たり 243.12ms の時間を要した。提案手法の処理時間は入力データに依存せず、また、ノイズに対するロバスト性も高いため、実用的な手法であることが示された。

3.4. ノイズに対する応答性評価

各モデルのノイズに対するロバスト性を測るために、0, 5, 10, 15, 20, 25dB の各ノイズのテストデータセットを 200 枚ずつ作成し、Noisy データセットを学習したモデルで NRMSE を算出した。結果を表 3 及び図

4 に示す。

表 3 Noisy データセットを学習したモデルによるノイズ応答性評価 (NRMSE)

Method	Noise Level (dB)					
	0	5	10	15	20	25
QGPU	24.44	4.42	1.73	0.89	0.49	0.29
SQD-LSTM	3.47	2.41	2.47	2.64	2.50	2.54
SRAM	2.09	1.69	1.85	1.96	1.83	1.87
- CoordConv	2.59	2.12	2.28	2.17	2.25	2.31
- GCN	2.81	2.14	2.38	2.39	2.14	2.63

QGPU は、0, 5dB の強いノイズを有するデータに対する性能が著しく低い。一方で提案手法は、Ablation モデルも含む他の手法を比較しても、広いノイズレベルの範囲において高精度で位相復元を実現しており、ノイズに対する高いロバスト性を持つことが確認した。

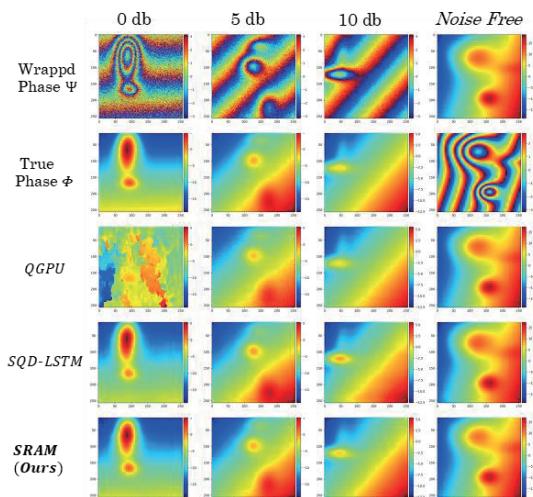


図 4 各手法による位相画像の推論結果

補足として、Noise Free なデータセットで学習したモデルを用いて、ノイズに対する応答性の評価を実施した。結果を表 4 に示す。ここで QGPU の結果は、表 3 と同様であることに注意されたし。

表 4 Noise Free データセットを学習したモデルによるノイズ応答性評価 (NRMSE)

Method	Noise Level (dB)					
	0	5	10	15	20	25
QGPU	24.44	4.42	1.73	0.89	0.49	0.29
SQD-LSTM	33.55	27.22	6.95	2.67	2.38	2.64
SRAM	23.58	12.13	3.37	1.94	1.57	1.49
- CoordConv	25.98	15.47	7.60	3.60	3.11	3.12
- GCN	26.02	8.75	4.04	2.64	2.03	1.99

深層学習系のモデルについては、Noisy な画像を学

習していないため、ノイズを含むデータに対する位相復元の性能が低下している。提案手法は SQD-LSTM と比較すると高い性能を示していることが確認できる。これは SRAM がピクセルの連続性や、大域的な空間依存関係を学習し、その結果、ノイズのような局所的な影響に対してロバスト性を得たためだと考えられる。

4. 結論

近年、位相アンラッピング問題について、CNN を利用した手法が数多く提案されており、ノイズに対して高いロバスト性を示したという報告がされている。CNN を使用した手法は、畳み込みの過程で位相アンラッピングを行う上で重要な情報である局所的な位置情報や、ピクセル同士の関係性を捨てている。そこで我々は、位相の連続性やピクセルの関係性を考慮した特徴抽出を実現する CNN ベースのモジュールである SRAM を開発した。

ノイズを含んだラップ位相に対する位相アンラッピングの検証では、提案手法は、従来手法である QGPU と比較して 4.98%、CNN ベースの手法である SQD-LSTM と比較して 0.65% の NRMSE の向上を確認した。

SRAM は実装がシンプルで、Encoder-decoder 形式のアーキテクチャに簡単に適用可能であるため、応用範囲は広い。位相アンラッピングだけでなく、セグメンテーションや再構成、画像生成タスクにも有効性を示す可能性がある。

本研究は千葉大学国際高等研究基幹 (IAAR) 研究支援プログラムの支援により行われました。

文 献

- [1] Chao Peng, Xiangyu Zhang, Gang Yu, Guiming Luo, and Jian Sun. Large kernel matters—improve semantic segmentation by global convolutional network. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pages 4353–4361, 2017.
- [2] Rosanne Liu, Joel Lehman, Piero Molino, Felipe Petroski Such, Eric Frank, Alex Sergeev, and Jason Yosinski. An intriguing failing of convolutional neural networks and the coordconv solution. Advances in neural information processing systems, 31, 2018.
- [3] Malsha V Perera and Ashwin De Silva. A joint convolutional and spatial quad-directional lstm network for phase unwrapping. In ICASSP 2021-2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pages 4055–4059. IEEE, 2021.
- [4] Hai Lei, Xin-yu Chang, Fei Wang, Xiao-Tang Hu, and Xiao-Dong Hu. A novel algorithm based on histogram processing of reliability for two dimensional phase unwrapping. Optik, 126(18):1640–1644, 2015.

令和5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： 2023年9月8日（金） 13:30～17:50

■場 所： 日本大学理工学部駿河台キャンパス タワースコラ4階S403教室

■テーマ： 計算機合成ホログラムの最前線

■プログラム：

13:30-13:35 HODIC 会長挨拶（5分）

(1) 13:35-14:00 デニシュク型波面プリンタによる全方向視差高解像度 CGVH の描画
○竹村裕貴・西 寛仁・松島恭治（関大）

(2) 14:00-14:25 大型化した積層 CGVH による高品質フルカラー3D 映像
○藤木駿介・西 寛仁・松島恭治（関西大）

(3) 14:25-14:50 光線サンプリング面を用いた光波計算の波動光学的特性
○桂 諒介・西 寛仁・松島恭治（関西大）

14:50-15:00 休憩（10分）

(4) 15:00-15:25 Non-Periodic Line Photon Sieve を用いたホログラム表示の検討
○佐々木隼暉・高木康博（東京農工大）

(5) 15:25-15:50 小型プロジェクタを用いたフルカラーホログラフィック
ビデオディスプレイ ○霍 翔・吉川 浩・山口 健（日大）

(6) 15:50-16:15 リニアブレンディングを用いた多視点 DFD(Depth-fused 3D)
レンダリング ○森下雄登（徳島大）・伊達宗和（徳島文理大）・
水科晴樹・陶山史朗・山本健詞（徳島大）

16:15-16:25 休憩（10分）

(7) 16:25-16:50 計算機合成ホログラムにおける任意曲面における鏡像の
計算アルゴリズム ○新井大也・坂本雄児（北大）

(8) 16:50-17:15 計算機ホログラムにおけるクラウドサーバ群を用いた計算負荷の分散
および処理時間に対する効果の検証
○山内啓瑚・柏木暁史・坂本雄児（北大）

(9) 17:15-17:40 位相アンラッピングにおける空間関係を考慮したモジュールの導入
－Spatial Relation Aware Module (SRAM)の開発－
○吾妻千織・伊藤智義・下馬場朋禄（千葉大）

17:40-17:50 情報交換と閉会の挨拶（10分）

■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

令和 5 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

- 開催日： 2023 年 11 月～12 月ころを予定
- 場 所： 未定
- テー マ： 未定
- プロ グラム： 未定
- 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

- 研究会について: e-mail meeting@hodic.org

- その他全般: HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川 浩 宛

TEL/FAX 047-469-5391

e-mail office@hodic.org

HODIC の WEB ページとメールリストのご案内

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

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

です、ぜひアクセスしてみてください。

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

ホログラフィック・ディスプレイ研究会役員（敬称略）

名 誉 会 長	辻内 順平	会 長	山本 健詞（徳島大学）
副 会 長	高橋 進（凸版印刷）	前 会 長	伊藤 智義（千葉大学）
国際担当	松島 恭治（関西大学）	企画委員長	角江 崇（千葉大学）
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）	岩田 藤郎	鎌田 康昌（凸版印刷）
坂本 雄児（北海道大学）	下馬場朋禄（千葉大学）	白木 厚司（千葉大学）
白倉 明（アーティエス・ラボ）	西辻 崇（東邦大学）	橋本 信幸
山口 健（日本大学）	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（コニカミノルタフ・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	久保田敏弘（久保田かげらむ工房）	酒井 朋子（千葉大学）
佐藤 甲癸	永田 忠昭（arts-unis）	三田村峻右
堀内 道夫（光と風の研究所）	本田 捷夫（本田ひかり技研）	

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. 43, No. 3 (Sep. 2023)

2023年9月8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