

## ホログラムカレンダー

2023 年 6 月 26 日（月）～7 月 1 日（土）12th International Symposium on Display Holography,  
Seoul, Korea <http://isdh2023.kr/>

2023 年 7 月 13 日（木），14 日（金）3 次元画像コンファレンス

kokoka 京都市国際交流会館＋オンライン併設 <http://www.3d-conf.org/>

2023 年 8 月 14 日（月）～17 日（木）Digital Holography and Three-Dimensional Imaging meeting  
(Optica Imaging Congress) Boston Park Plaza, Massachusetts United States

[https://www.optica.org/en-us/events/congress/imaging\\_and\\_applied\\_optics\\_congress/program/adaptive\\_optics\\_methods\\_analysis\\_and\\_applications/](https://www.optica.org/en-us/events/congress/imaging_and_applied_optics_congress/program/adaptive_optics_methods_analysis_and_applications/)

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

abstract 6 月 7 日締切 <https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-asia?SSO=1>

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

abstract 6 月 27 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, abstract 7 月 19 日締切 <https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-west/>

### 目 次

1. ホログラムカレンダー:	表紙
2. 2022年度 HODIC鈴木・岡田記念賞選考報告	高橋 進 1
3. High density multiplexed vortex beam generation using digitally printed holograms on azo carbazole polymer film	Boaz Jessie Jackin, 他 13
4. ポリゴン法 CGH における透明物体のレンダリング手法	西 寛仁, 他 18
5. The generation pipeline of polygon-based holograms	Fang Wang, 他 22
6. Computer-generated holography for 3D lines and curves	David Blinder, 他 28
7. 次回研究会のお知らせ	巻末

## 2022 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞選考報告

2022 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞選考委員長 高橋進（凸版印刷）

2022 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞選考委員会は、2023 年 4 月 7 日に開催した委員会にて慎重に審議を行い、2022 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞として以下のように技術部門賞 2 件と技術部門奨励賞 1 件、特別賞 1 件を選出いたしました。後日幹事会において承認され、受賞が決定しましたのでここにご報告します。

### ■技術部門賞（2 件）

・野村孝徳 氏（和歌山大学）

野村氏は、光波を利用した計測や記録などの情報処理技術に関する研究に長年取り組み、ホログラフィックディスプレイやホログラフィによる計測などで多くの研究を発表されている。今回の受賞対象論文では、深層学習によるバイナリーホログラムの画質改善について発表され、その内容は高く評価できる。さらに野村氏の研究室はホログラムに関係する多くの優秀な研究者を輩出されている。以上のようにホログラムに長年貢献をしている野村氏に対し、さらなるホログラム及び HODIC への貢献を期待するものである。

対象論文：

野村孝徳、後井宏亮（和歌山大学）、「深層学習を用いた振幅型バイナリーホログラムおよび多値ホログラム」令和 4 年第 4 回ホログラフィック・ディスプレイ研究会

・インコヒーレントデジタルホログラフィー研究グループ（NHK 放送技術研究所）

今回の受賞対象論文のインコヒーレントデジタルホログラフィーは、白色光でホログラムを撮影する技術であり、ホログラムを社会実装するうえでの課題の一つである撮影時にレーザーを使わなければならないという課題の解決が期待できるものである。このように今後の映像技術の創出を感じさせる研究を放送技術の視点で開発したことは意義があり、今後の活躍を期待する。

対象論文：

信川輝吉、片野祐太郎、後藤正英、萩原啓、室井哲彦（NHK 放送技術研究所）、「高精細 3 次元撮像技術の実現に向けたインコヒーレントデジタルホログラフィの研究」令和 5 年第 1 回ホログラフィック・ディスプレイ研究会

## ■技術部門奨励賞（1 件）

・原 貴之 氏（長野工業高等専門学校）

長野工業高等専門学校（長野高専）の原氏は、インコヒーレントホログラフィの研究に従事しており、2020 年に発表した筆頭著者論文（Opt. Express 28(7) 10078）で「第 36 回電気通信普及財団テレコムシステム技術学生賞」を受賞し、2022 年発表の論文（IEEE Access 10 76906）が「光学」誌の「2022 年日本の光学研究」の 1 編に選ばれるなど、めざましい活躍を見せている若手研究者である。HODIC での研究発表も協賛の 3D コンファレンスも含め、コンスタントに行っており本賞にふさわしいものである。

対象論文：

原貴之（長野高専），角江崇，下馬場朋禄，伊藤智義（千葉大学），「インコヒーレントデジタルホログラフィのためのフレネル回折計算回路の設計と実装」令和 4 年第 3 回ホログラフィック・ディスプレイ研究会

## ■特別賞（芸術部門貢献）

・石井勢津子 氏（美術家）

石井氏は 2022 年に北九州市立美術館で大規模な回顧展を開催、規模・内容的にも素晴らしく、一人のホログラムアーティストの展示としては世界的にも類をみないものである。また、本展示は多くの人にホログラムの良さを伝え、若手研究者に対しても良い影響を与えた。今回の展示では作品は決して新しいものではないが、インスタレーションによる空間表現の展示の完成度は高いものであった。過去の例と比較しても石井氏の貢献の大きさは特筆すべきものであり、特別賞に十二分に相応しいものである。

対象展示：

2022 年「ホログラフィ・アートの先駆者(パイオニア)石井勢津子」

北九州市立美術館（福岡）

---

## 受賞者のプロフィール

技術部門 野村孝徳 氏（和歌山大学）

### 【抱負・コメント】

栄誉ある、また歴史ある HODIC 鈴木・岡田記念賞 技術部門賞をいただき、誠にありがとうございます。岡田先生とは特に学生時代に学会等でよくお会いしていたこともあり、先生のお名前が入った賞の受賞、感慨深いものがあります。今回の受賞はこれまでの研究室の活動が評価されたものと思っています。学生時代のインコヒーレントデジタルホログラフィ（そのような表現をすることはありませんでしたが）に始まり、デジタルホログラフィを用いた光暗号化、コンピュータ処理をうまく活用した単一露光一般化位相シフ

トデジタルホログラフィ、今回受賞対象となった深層学習を活用したホログラムの設計など 30 年以上、広義のデジタルホログラフィの研究に携わってきました。その間に出た多くの方（恩師、研究者仲間、学生）に改めて感謝する次第です。これを励みに老け込むことなく、今後もデジタルホログラフィの研究を通して当該分野の発展に貢献していきます。

### 【略歴】

1986 年 3 月 大阪大学工学部応用物理学科卒業

1991 年 3 月 大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士後期課程修了（工学博士）

1991 年 4 月 神戸大学工学部助手

1995 年 4 月 和歌山大学システム工学部創設準備室講師

1995 年 10 月 和歌山大学システム工学部講師

1998 年 6 月～1999 年 3 月 アメリカ合衆国コネティカット大学客員助教授

1999 年 10 月 和歌山大学システム工学部助教授（2007 年 4 月 准教授）

2009 年 4 月 和歌山大学システム工学部教授、現在に至る

### 【研究分野】

情報フォトリクス、デジタルホログラフィ、計算イメージング・センシング、位相計測

### 【主要な研究業績】

1. Naru Yoneda, Yusuke Saita, and Takanori Nomura, "Polarization imaging by use of optical scanning holography," *Opt. Rev.* **30**, 26-32, (2023).
2. Naru Yoneda, Yusuke Saita, and Takanori Nomura, "Common-path off-axis single-pixel holographic imaging," *Opt. Express* **30**, 18134-18144 (2022).
3. Yusuke Saita, Naru Yoneda, Aoto Matsumoto, Takanori Nomura, "Enhanced Recording Density via Multilevel Phase Retrieval and Correlation-based Multiplexed Recording in Computer-generated Holographic Data Storage," *ITE Trans. Media Technol. Appl.*, **10**, 69-74 (2022).
4. Yusuke Saita, Daiki Shimoyama, Ryohei Takahashi, and Takanori Nomura, "Single-shot compressive hyperspectral imaging with dispersed and undispersed light using a generally available grating," *Appl. Opt.* **61**, 1106-1111 (2022).
5. Takanori Nomura, "Single-shot digital holography with no or less prominent twin-images based on random phase modulation," *Asian J. Phys.* **30**, 1457-1463 (2021).

6. Bahram Javidi, ..., Takanori Nomura, et al, "Roadmap on digital holography," Opt. Express, **29**, 35078-35118 (2021).
7. Joseph Rosen, ..., Takanori Nomura, et al, "Roadmap on Recent Progress in FINCH Technology," J. Imaging, **7**, 197 (2021).
8. Naru Yoneda, Shunsuke Kakei, Koshi Komuro, Aoi Onishi, Yusuke Saita, and Takanori Nomura, "Single-shot higher-order transport-of-intensity quantitative phase imaging using deep learning," Appl. Opt. **60**, 8802-8808 (2021).
9. Takafumi Ito, Koshi Komuro, and Takanori Nomura, "Pupil-modulation ghost phase-imaging," Appl. Opt. **60**, 4398-4403 (2021).
10. John T. Sheridan, ..., Takanori Nomura, et al, "Roadmap on holography," J. Opt. **22**, 123002 (65 pages) (2020).
11. Hiroaki Goi, Koshi Komuro, and Takanori Nomura, "Deep-learning-based binary hologram," Appl. Opt. **59**, 7103-7108 (2020).
12. Shota Sakamaki, Naru Yoneda, and Takanori Nomura, "Single-shot in-line Fresnel incoherent holography using a dual-focus checkerboard lens," Appl. Opt. **59**, 6612-6618 (2020).

---

## 受賞者のプロフィール

技術部門 インコヒーレントデジタルホログラフィー研究グループ  
(NHK 放送技術研究所)

### 【抱負・コメント】

歴史のある HODIC 鈴木・岡田記念賞 技術部門賞を賜りまして、大変光栄に存じます。この度の受賞は、ホログラフィー分野で研究する私たちにとって大きな価値があり、今後の研究の励みとなります。選考委員のみなさまに深く感謝申し上げます。私たちは、メディア技術、特に自然光下での 3 次元撮像を念頭に、インコヒーレントデジタルホログラフィーの研究を進めており、ホログラフィーの応用分野・適用範囲を一層拡張できるものと考えています。今後も研究に邁進し、技術的な課題を一つずつ着実に克服しながら、魅力的な技術の創出を目指し、ひいてはホログラフィー分野の発展に貢献していきます。

### 【略歴】

・信川輝吉

2015 年—2017 年 日本学術振興会特別研究員 DC2.

2017 年, 和歌山大学大学院システム工学研究科博士後期課程修了.

2017 年, 産業技術総合研究所 特別研究員.

2017 年—2019 年，日本放送協会放送技術研究所 ポストドクター研究員。

2019 年，日本放送協会に入局，同年—現在，同放送技術研究所。

・片野 祐太郎（かたの ゆうたろう）

2011 年，早稲田大学大学院先進理工学研究科修士課程修了，同年，日本放送協会に入局。

2014 年—現在，同放送技術研究所。

2022 年，早稲田大学大学院先進理工学研究科 博士（工学）取得。

・後藤 正英（ごとう まさひで）

2000 年，東京大学大学院工学系研究科修士課程修了，同年，日本放送協会に入局。

2000 年—現在，同放送技術研究所。

2013 年，東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。

・萩原 啓（はぎわら けい）

1995 年，千葉大学工学部卒業，同年，日本放送協会に入局。

1998 年—現在，同放送技術研究所。

2015 年，東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。

・室井 哲彦（むろい てつひこ）

2002 年，電気通信大学大学院電気通信学研究科博士課程修了。

2002 年—2003 年，日本放送協会放送技術研究所 ポストドクター研究員。

2004 年，日本放送協会に入局。

2004 年—現在，同放送技術研究所。

## 【研究分野】

インコヒーレントデジタルホログラフィー，コンピューテーショナルフォトグラフィー

## 【主要な業績】

- 1) T. Nobukawa, T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Single-shot phase-shifting incoherent digital holography with multiplexed checkerboard phase gratings,” *Optics Letters* 43, 1698–1701 (2018).
- 2) T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Bimodal incoherent digital holography for both three-dimensional imaging and quasi-infinite-depth-of-field imaging,” *Scientific Reports* 9, 3363 (2019).

- 3) T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Sampling requirements and adaptive spatial averaging for incoherent digital holography,” *Optics Express* 27, 33634–33651 (2019).
- 4) R. Usami, T. Nobukawa, M. Miura, N. Ishii, E. Watanabe, and T. Muroi, “Dense parallax image acquisition method using single-pixel imaging for integral photography,” *Optics Letters* 45, 25–28 (2020).
- 5) T. Nobukawa, Y. Katano, M. Goto, T. Muroi, N. Kinoshita, Y. Iguchi, and N. Ishii, “Coherence aperture restricted spatial resolution for an arbitrary depth plane in incoherent digital holography,” *Applied Optics* 60, 5392–5398 (2021).
- 6) T. Nobukawa, Y. Katano, M. Goto, T. Muroi, N. Kinoshita, Y. Iguchi, and N. Ishii, “Incoherent digital holography simulation based on scalar diffraction theory,” *Journal of the Optical Society of America A* 38, 924–932 (2021).
- 7) J. Rosen, S. Alford, V. Anand, J. Art, P. Bouchal, Z. Bouchal, M. Erdenebat, L. Huang, A. Ishii, S. Juodkazis, N. Kim, P. Kner, T. Koujin, Y. Kozawa, D. Liang, J. Liu, C. Mann, A. Marar, A. Matsuda, T. Nobukawa, T. Nomura, R. Oi, M. Potcoava, T. Tahara, B. L. Thamh, and H. Zhou, “Roadmap on recent progress in FINCH technology,” *Journal of Imaging* 7, 197 (2021).
- 8) T. Nobukawa, M. Maezawa, Y. Katano, M. Goto, T. Muroi, K. Hagiwara, and N. Ishii, “Transformation of coherence-dependent bokeh for incoherent digital holography,” *Optics Letters* 47, 2774–2777 (2022).
- 9) T. Nobukawa, Y. Katano, M. Goto, T. Muroi, K. Hagiwara, and N. Ishii, “Grating-based in-line geometric-phase-shifting incoherent digital holographic system toward 3D videography,” *Optics Express* 30, 27825–27540 (2022).
- 10) T. Muroi, T. Nobukawa, Y. Katano, K. Hagiwara, and N. Ishii, “Compensation for reconstructed image distortion using camera model with lens distortion in incoherent digital holography,” *Optical Review* 29, 420–428 (2022).
- 11) Y. Katano, M. Usui, T. Nobukawa, K. Hagiwara, and T. Muroi, “Coded aperture imaging for super-resolution using inverted coding patterns,” in *Proceedings of the 2022 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory (ISOM) and the 13th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (ODF)*, Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2022), paper ITuAE\_03.
- 12) M. Goto, T. Nobukawa, Y. Katano, K. Hagiwara, and T. Muroi, “Synthetic aperture with image interpolation for incoherent digital holography,” in *Proceedings of the 2022 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory (ISOM) and the 13th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (ODF)*, Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2022), paper ITuPI\_03.
- 13) T. Muroi, R. Higashida, T. Nobukawa, Y. Katano, and K. Hagiwara, “Optical reconstruction of 3D information acquired by incoherent digital holography,” in *Proceedings of the 29th*

International Display Workshops (2022) 29, 574–575, 3D6-2.

- 14) T. Tahara, Y. Zhang, J. Rosen, V. Anand, L. Cao, J. Wu, T. Koujin, A. Matsuda, A. Ishii, Y. Kozawa, R. Okamoto, R. Oi, T. Nobukawa, K. Choi, M. Imbe, and T.-C. Poon, “Roadmap of incoherent digital holography,” *Applied Physics B* 128, 193 (2022).
- 15) 信川 輝吉, 片野 祐太郎, 萩原 啓, 室井 哲彦, “インコヒーレントデジタルホログラフィーの動画像撮影に向けた複数ホログラムの一括撮影技術,” *映像情報メディア学会誌* 77, 114–118 (2023).

---

## 受賞者のプロフィール

技術部門奨励賞 原 貴之 氏 (長野工業高等専門学校)

### 【抱負・コメント】

この度は、HODIC 鈴木・岡田記念賞技術部門奨励賞という名誉ある賞を賜り、大変嬉しく思います。選考委員の皆様およびホログラフィック・ディスプレイ研究会の皆様に厚く御礼申し上げます。また、日頃より多大なご指導をいただいております、千葉大学の伊藤智義先生、下馬場朋禄先生、角江崇先生ならびに研究室の皆様に感謝申し上げます。そして、研究遂行のため、日頃よりサポートいただいております、長野高専の教職員の皆様に心から御礼申し上げます。

本研究は、インコヒーレントデジタルホログラフィにおける像再生計算処理の高速化が目的となっています。記録したホログラムから 3 次元像を再構成するために行う回折計算を FPGA に実装し、その計算性能を評価した研究となります。FPGA を用いたリアルタイムな 3 次元イメージングを実現するためには、乗り越えなければならない課題がまだまだ残っておりますが、今回の受賞を励みに研究に邁進して参ります。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。

### 【略歴】

2020 年 3 月	千葉大学工学部電気電子工学科 卒業
2022 年 3 月	千葉大学融合理工学府基幹工学専攻電気電子工学コース 博士前期課程 修了
2022 年 4 月—現在	千葉大学融合理工学府基幹工学専攻電気電子工学コース 博士後期課程
2022 年 4 月—現在	長野工業高等専門学校 工学科情報エレクトロニクス系 助教

### 【研究分野】

FPGA 回路設計、インコヒーレントデジタルホログラフィ、3 次元イメージング



**【主要な研究業績】**

- 1) T. Shimobaba, M. Makowski, H. Shiomi, F. Wang, T. Hara, M. Sypek, J. Suszek, T. Nishitsuji, A. Shiraki, T. Kakue and T. Ito, “Accelerating hologram generation using oriented-separable convolution and wavefront recording planes,” *Optics Express*, 30, 36564-36575 (2022).
- 2) T. Hara, T. Kakue, T. Shimobaba and T. Ito, “Design and Implementation of Special-Purpose Computer for Incoherent Digital Holography,” *IEEE Access*, 10, 76906-76912 (2022).
- 3) T. Shimobaba, T. Tahara, I. Hoshi, H. Shiomi, F. Wang, T. Hara, T. Kakue and T. Ito, “Real-valued diffraction calculations for computational holography,” *Applied Optics*, 61, B96-B102 (2022).
- 4) T. Shimobaba, I. Hoshi, H. Shiomi, F. Wang, T. Hara, T. Kakue and T. Ito, “Mitigating ringing artifacts in diffraction calculations using average subtractions,” *Applied Optics*, 60, 6393-6399 (2021).
- 5) T. Hara, T. Tahara, Y. Ichihashi, R. Oi and T. Ito, “Multiwavelength-multiplexed phase-shifting incoherent color digital holography,” *Optics Express*, 28, 10078-10089 (2020).

---

**受賞者のプロフィール**

特別賞（芸術部門貢献） 石井勢津子 氏（美術家）

**【抱負・コメント】**

受賞のご連絡をいただきました時、全く予期せぬ出来事に驚きと身の引き締まる思いであります。鈴木正根様との出会いは私がホログラフイー分野に足を踏み入れる大きなきっかけとなりました。私が辻内研究室に研究生となったころ、同時期国内でもホログラフイー展が活発に開催され始め、世の中の認知度が高まってきました。ホログラムの制作や発表活動に夢中になっておりました時、鈴木様が申されたことが思い出されます。「ホログラフイーアートが認められるにはあなたが活躍するだけではだめで、後輩を育てることが大事なのです。それをしなければいけません。」というような趣旨でした。当時の私は「伝統芸術ならいざ知らず、現代アートでは・・・」と聞き流してしまいました。これまでの40年を振り返りますと、技術分野では活発に多くの研究者が育っておられます。それに比べ残念なことに国内のアート分野はとても寂しい現状です。改めて鈴木様が申されていた意味が腑に落ちた気がいたします。この度の受賞はもっと後輩が育ってくれるよう力を注ぎなさいと叱咤激励され襟をただされた思いでございます。また、選考理由となりました展覧会は6年がかりの準備期間を経て実現した北九州市立美術館の皆様のご苦労とご尽力の

たまものです。美術館の活動への感謝とホログラフィーアートへのエールと受け止め、皆様のお力もお借りしながら、微力ではございますがホログラフィーアートに貢献できるようもう少し活動を頑張って続けて参る所存でございます。

ありがとうございました。

### 【略歴】

1970 東京工業大学応用物理学科卒業

1974 創形美術学校造形科卒業

1974~75 パリ国立美術学校留学

1978~81 東京工業大学像情報工学研究施設に研究生としてホログラフィを学ぶ

1981 文化庁芸術家在外研修員,マサチューセッツ工科大学高等視覚研究所客員研究員

1987 創形美術学校パリ国際芸術家会館第一回派遣員

2000 ビジティング・アーティストとして招聘、CALARTS (カリフォルニア・インスティテュート・オブ・アート)

2003 ビジティングアーティストとして招聘、韓国国立芸術大学

2005 東京工業大学にて学位取得 (学術博士)

2006 国立台湾師範大学客員研究員

2006~2013 東京工業大学世界文明センター特任教授

### 【作品発表 主な個展】

1978 「ホログラフィーの展開-そのはじめに」 スルガ台画廊 (神田、東京)

以降毎年、田村画廊 (神田、東京)、真木画廊 (日本橋、東京)、銀座スルガ台画廊 (銀座、東京) などにて開催。(~2000)

1982 「石井勢津子展」 Musée de l'Holographie (パリ,フランス)

「Setsuko Ishii」 Palazzo Fortuny (ベニス,イタリア)

1985 「SETSUKE ISHII-New Experience in Perception」 Museum of Holography (ニューヨーク,アメリカ)

1987 「SETSUKE ISHII: Holographische Raum Installationen」 Museum für Holographie und Neue Visuelle Medien (プルハイム,西ドイツ)

「Setsuko Ishii HOLOGRAPHY」 Walker Hill Art Center (ソウル,韓国)

1988 NEW サイエンスアート展「光のイリュージョン」 コニカプラザ (東京)

1993 「光を紡ぐー石井勢津子の世界ー」 美ヶ原高原美術館 (長野)

1995 「自然を紡ぐひかりたちー石井勢津子展」 高崎市美術館 (高崎、群馬)

2000 「石井勢津子ホログラフィーの世界」 池田町立美術館 (安曇野、長野)

「Light Time Space—Setsuko Ishii Holographic Environment」 California Institute of Art (ロスアンゼルス, アメリカ)

2003~04 「ホログラフィアート展 Featuring 石井勢津子」 ハウステンボス美術館

(長崎)

- 2006 「光を紡ぐ石井勢津子ホログラフィ・アートの世界」 鶴岡アートフォーラム(山形)  
 2007 「SETSUO ISHII Olografie: Percorsi di Luce Nel Tempo」 Villa dei Quintili  
 (古代ローマ遺跡におけるホログラフィインスタレーション, ローマ, イタリア)  
 2022 「ホログラフィ・アートの先駆者(パイオニア)石井勢津子」 九州市立美術館 (福岡)

【作品発表 主なグループ展】

- 1978 「第12回日本国際美術展」 東京都美術館 (東京), 京都市美術館 (京都) ('80)  
 1979 「第1回ヘンリー・ムーア大賞展」 彫刻の森美術館 (箱根, 神奈川)  
 「New Space: The Holographer's Vision」 The Franklin Institute (フィラデルフィア, アメリカ)  
 「The 15<sup>th</sup> Bienal International de São Paulo」 Ibirapuera (サンパウロ, ブラジル)  
 1981 「開館記念特別展第1部「現代日本の美術」 宮城県美術館 (仙台, 宮城)  
 1983 「現代のリアリズム」 埼玉県立近代美術館 (埼玉)  
 「第2回現代芸術祭—芸術と工学展」 富山県立近代美術館、(富山)  
 「幻想と造形展—ホログラフィと振動の不思議な世界 石井勢津子 佐藤慶次郎」  
 岐阜県美術館 (岐阜)  
 「Light Dimentions」 National Center of Photography( バース, イギリス),  
 The Science Museum (ロンドン, イギリス)  
 1984 「Licht-Blicke Holographie; die 3.Dimension für Technik und Kunst」  
 Deutsches Filmmuseum (フランクフルト, 西ドイツ)  
 「第5回日本の美—現代女流美術展」 上野の森美術館 (東京), 彫刻の森美術館 (箱根)  
 以降 2000 まで毎年出品  
 1985 「ホログラフィシャンデリア」 つくば EXPO'85, 三井パビリオン (筑波)  
 「Japan Avant-Garde of the Future」 Palazzo Rosso (ジェノバ, イタリア)  
 1986 「HOLOMEDIA '86, Faszination in Licht und Ton 」 Städtischen Galeria  
 (カールスルーエ, 西ドイツ)  
 1987 「Images du Futur '87」 (モントリオール, カナダ) ('88, '94)  
 1988 「Art Ware Fest: Kunst und Elektronik」 Hannover-Messe (西ドイツ)  
 1989 「In Anderem Licht Holographie und Umraum」 AII Artforum (ミュンヘン),  
 Karl Ernst Osthaus Museum Hagen (ハーゲン, 西ドイツ)  
 「第1回名古屋国際ビエンナーレ・ARTEC '89」 世界デザイン博(名古屋, 愛知)  
 1990 「オマージュ・ゴッホ in T-BRAIN」 東京国際美術館 (多摩, 東京)  
 1991 「Räume aus Licht: Hologramme aus der Sammlung Fielmann」  
 Akademie galerie (ベルリン, 西ドイツ)  
 1992 「セビリア万博'92」 日本政府館、(セビリア, スペイン)

- 1993 「The 3<sup>rd</sup> Studio Internacional deTecnologias de Imagem」 SESC Pompeia  
(ブラジル) (’95)  
「世界のホログラフィ・アート展 ‘93 虚と実のイメージ」 大丸ミュージアム (東京)
- 1994 「Point of View」 Retretti Art Center (フィンランド)
- 1996 「光の原風景、サイエンス・アート展」 茨城県つくば美術館 (茨城)
- 1997 「UNFOLDING LIGHT: Evolution of Ten Holographers」 巡回展、M.I.T Museum  
6 都市 11 会場 (アメリカ) (~2000)  
「美の冒険—水のいたずら—」 滋賀県立近代美術館 (滋賀)
- 1998 「芝山野外アート展 ‘98」 芝山仁王尊観音教寺、芝山公園 (芝山、千葉)  
「Vision into the 21st Century: The New Age of Holography」 Canton Museum of  
Art (アメリカ) (~1999)
- 1999 「Mirage: Exhibition of Holographic Art」 Rauman taidemuseo j 巡回展 5 都市,  
(フィンランド) (~2000)
- 2000 「ホログラフィック・イメージ展」 東京都写真美術館 (東京)
- 2001 「現代美術の手法 (6) 光とその表現展」 練馬区立美術館 (東京)
- 2002 「映像体験ミュージアム—イマジネーションワークス」 倉敷市立美術館 (岡山)
- 2003 「LEADING LIGHTS: Woman in Holography」 Saint Mary’s College  
(ノートルダム、アメリカ)  
「瞑想としての球体」 川崎市立美術館 (川越、埼玉)
- 2006 「ホログラフィーサイエンスからアートへ」 東京工業大学 100 年記念館 (東京)
- 2007 「DOMANI・明日展」 新国立美術館 (東京) (~2008)
- 2012 「The Jewel Net— Views of Contemporary Holography」 (MIT Museum, Cambridge,  
USA) (~2015)
- 2015 「MAGIC OF LIGHT」, Elisseev Palace, (サンクトペテルブルグ, ロシア)
- 2017 「IRIDESCENCE」 ESPACE 24B (パリ), HOLOCENTER (ニューヨーク)
- 2018 「Art in Holography: Light ,Space &Time ISDH2018」 Aveiro City Museum  
(ポルトガル)

#### 【主な収蔵および常設】

収蔵：美ヶ原高原美術館 (長野)、富山県立近代美術館 (富山)、O 美術館 (東京)、池田町立美術館 (長野)、北九州市立美術館 (福岡)、下関市立美術館 (山口)、フィールマンコレクション (ハンブルグ)、国立科学技術館 (オタワ、カナダ)、大阪市、エソンヌ県 (フランス)、M.I.T ミュージアムコレクション (マサチューセッツ、アメリカ)、ホログラムファンデーション (パリ)、

常設：山陽印刷株式会社 (横浜)、関西電力 (大阪)、NEXT 21 (新潟)、東京工学院 (東京)、諫早市健康福祉センター (長崎)、晴海トリトンスクエア (東京)、新宝くじドリーム館 (東京)、東京工業大学本館 (東京)、CIC センター (東京)、国立台湾師範大学 (台北、台湾)、国立交通大学 (新竹キャンパス、台南キャンパス、台湾)

## 【アワード】

- 1980 アーティストインレジデンス授与, Museum of Holography NY (82,85)  
1988 シェアウオーター基金 (アメリカ) よりホログラフィアウワードを授与  
1993 プルハイム市 (ドイツ) よりヨーロッパアンホログラフィアアワード' 93 を授与  
2000 第3回ホロセンターアワード (ニューヨーク、アメリカ)  
2007 HODIC 鈴木・岡田賞貢献賞授与、  
2013 ホロセンターアワード 2013 (オハイオ州立大学、コロンバス、アメリカ)  
2016 ホログラフィアアートグラント Hologram Foundation, Paris

## 【出版・論文・著書】

- 1) Setsuko Ishii, The concept of Fragment of Nature- Multicolor rainbow hologram receives Holographic Art Grant 2016 -, Proceeding of ISDH 2018 University of Aveiro pp.85-87, 2018
- 2) Setsuko Ishii, Holography as an Architectural Decoration, Encycropedia of Computer Graphics and Games, Springer, 2018
- 3) Setsuko Ishii Holography as an Architectural Decoration, Proceeding of ISDH 2015, ITMO University pp.68-74, 2015
- 4) Setsuko Ishii, Installation with sunlight and holography -As environmental art-, Proceeding of ISDH 2009, Holography-Culture, Art and Information Technology, 科学技术文献出版社, pp.197-209, 2012
- 5) Setsuko Ishii, Jumpei Tsujiuchi, Where are We Going in Art Holography?, New Directions in HOLOGRAPHY and SPECKLE, Chapter 6, American Scientific Publishers, pp.95-113, 2008
- 6) Setsuko Ishii, Artistic Representation with Holography, paper in the Journal of the Society for Science on Form, Forma, 21, pp.81-92. 2006
- 7) 石井勢津子, アート・インテリア・装飾, ホログラフィア材料・応用便覧, 第2部, 第1章 1.1, NTS, pp.205-213, 2007
- 8) 石井勢津子, ホログラフィアアート, 3次元映像ハンドブック, 第II編, 4.1, 朝倉書店, pp.257-265, 2006
- 9) 石井勢津子, 太陽光を紡ぎ表現する環境芸術, 共著 物理がわかる, AERA Mook, pp.90-91, 2003
- 10) Setsuko Ishii, A Novel Architectural Application for Art Holography, Holographic Imaging and Material, SPIE, Vol. 2043 pp.101-103, 1993/8
- 11) 石井勢津子, ホログラフィアートの制作を通して, 佐々木晃彦編, 企業と文化の対話, 東海大学出版会刊, pp.100-108, 1991
- 12) 石井勢津子, ホログラフィア芸術, 辻内順平編著, ホログラフィックディスプレイ, 第1編, 産業図書, pp.69-81, 1990

# High density multiplexed vortex beam generation using digitally printed holograms on azo carbazole polymer film

Boaz Jessie JACKIN<sup>†</sup> Kenji KINASHI\* Naoto TSUTSUMI\* and Wataru SAKAI\*

<sup>†</sup>Materials Innovation Laboratory, Kyoto Institute of Technology, Kyoto, 606-8585 Japan

\*Faculty of Material Science and Engineering, Kyoto Institute of Technology, Kyoto, Japan

E-mail: jackin@kit.ac.jp

**Abstract** The capabilities and quality of an analog hologram depends mainly on the characteristics of the recording material. In case of a digital hologram, it depends on the characteristics of computed hologram and the digital light modulating device. Here we try to combine analog hologram recording material (azo benzene carbazole) with digital hologram printing technique, for generation of structured light beams. A set of 100 vortex beams could be successfully reconstructed only from a hologram of size 1mm x 1mm. Other advantages include high diffraction efficiency, long retention time and re-writability. These holograms could play an important role in future optical communication and information processing applications.

**Keyword** Computer generated holography, Hologram printing, Holographic materials, Photo anisotropy, Vortex beams

## 1. Introduction

In the early days of holography, holograms were usually recorded on a photosensitive material through beam interference. They are known as ‘analog holograms’ and were used for static displays, beam steering, shaping, optical testing etc. Later, due to the advancements in digital electronics and digital light modulation capabilities, holography too became digital. They are often termed as ‘computer generated holography’ (CGH) or ‘digital holography’ (DH) and are more popular than analog holograms due to their dynamic capabilities. But till date, analogue holograms are known to offer significantly higher space-bandwidth product than digital holograms. In this research we try to combine the higher space-bandwidth product offered by analog holograms and the dynamic capabilities of digital holograms in-order to realize holograms with higher potentials.

Laser beam shaping is one area where digital holograms have significant advantage, especially when shaping beams into structured beam modes (eg. Laguerre-Gaussian, Bessel, Airy etc.)[1]. Spatial light modulators (SLM) or Digital micro mirror devices (DMD) are the popular devices used for practical generation of these structured light beams. Due to limitations in space-bandwidth product capabilities of these digital light modulating devices, beam modes could find applications only in few areas such as STED microscope, optical tweezers, material processing etc. Hence the full potentials of beam modes, especially in the areas of optical information processing and communications remain unutilized.

Here we propose to overcome the issue by developing holograms with high density optical vortex beam array generation capabilities. Azo benzene carbazole is being used as the hologram material and the holograms are

fabricated using the digital hologram printing technique. An array  $10 \times 10 = 100$  vortex beams with arbitrary topological charges were successfully generated using a hologram of size  $1\text{mm}^2$ . The advantages are compactness, higher diffraction efficiency, re-writability and longer retention time.

## 2. Material and Method

The main motive is to fabricate a hologram that can reconstruct a large number of optical vortex beams when simply illuminated without any additional optics. This is accomplished in a four-step process which include, a) sample preparation, b) hologram computation, c) hologram printing and d) hologram reconstruction.

### a) Sample preparation

The material used for hologram recording is an azo derivative called as azocarbazole. It is made of an azobenzene-functionalized copolymer, poly(CACzE-MMA), which is composed of 3-[(4-cyanophenyl)azo]-9Hcarbazole-9-ethanol (CACzE), methyl methacrylate (MMA), CACzE, and diphenylphthalate (DPP), as shown in Fig.1(a). The procedure for synthesis of poly(CACzEMMA) and CACzE was reported earlier by Kinashi et al [2]. In this study, the composition of polymer/CACzE/DPP was fixed at 45/15/5 by weight. The mixture was first stirred in tetrahydrofuran (THF) for 48 hours, and then cast on a hot plate at  $70^\circ\text{C}$  for another 48 hours. The resulting polymeric powder was pressed

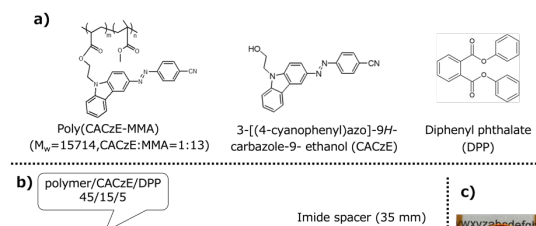


Figure 1 Schematic showing the, a) the compounds used, b) sample preparation process and c) photograph of prepared sample

between two glass substrates at  $180^\circ\text{C}$  as shown in Fig.1(b). Polyimide (or Teflon) spacers were used to adjust the thickness of the working layer to be  $35\mu\text{m}$ . The size of the sample was  $3\text{cm} \times 3\text{cm}$  and a photograph of the synthesized sample is shown in Fig.1(c). The stability of the recorded grating pattern (retention time) for the synthesized sample was experimentally obtained using the procedure reported earlier [2]. The measured retention rate was 70% after a period of 50 days, which indicates good stability at room temperatures.

### b) Hologram Computation

Since the amplitude and phase of a vortex beam are well defined mathematical function, it is not required to do wave propagation computations (as in the case of conventional CGH). Instead, it is simply required to construct 2D matrices that represent the phase of the vortex beam cross-section (spiral phase) and a carrier beam cross-section (linear phase). Adding these two matrices and wrapping them by  $2\pi$  gives rise to the hologram pattern  $H_1$  (also known as fork grating) as shown in Fig.2(a,b). This hologram is known as the ‘phase hologram’ and is a simple hologram encoding

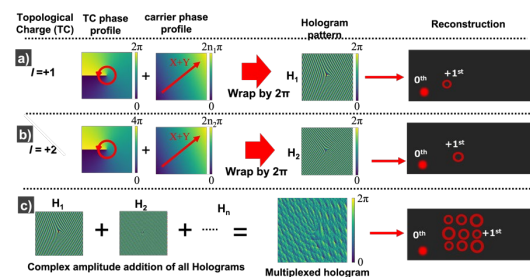


Figure 2 The hologram computation process, a,b) holograms of two different vortex beams (TC) encoded with different carrier phase and c) summation of all the different holograms to form a single hologram

technique commonly used. By choosing an appropriate carrier beam to be added with each vortex beam, an array of non-overlapping vortex beams can be created. In other

words, each vortex beam emerges from the hologram at a slightly different angle during reconstruction and is also known as ‘angular multiplexing’. Multiple holograms ( $H_1, H_2, \dots, H_n$ ) can be computed by adding each vortex beam with a different carrier beam. Adding all these multiple holograms together ( $H_1 + H_2 + \dots + H_n$ ) gives rise to a single multiplexed hologram as shown in Fig.2(c).

### c) Digital Hologram Printing

The optical setup used to transfer the computed hologram onto the fabricated polymer film is shown in Fig.3. The beam from a laser source of wavelength 532nm is filtered and collimated and send into an SLM. The SLM displays the computed hologram pattern and the beam reflected from the SLM is modulated accordingly in amplitude. The SLM used is Holoeye LC-R 1080 which is configured to work in amplitude only mode using a combination of quarter wave plate and polarizing beam splitter (PBS) as shown in Fig.3. The sample is mounted on a three-axis translation stage at a distance parallel to and facing the SLM. The light reflected from the SLM reaches the sample through a set of de-magnifying and

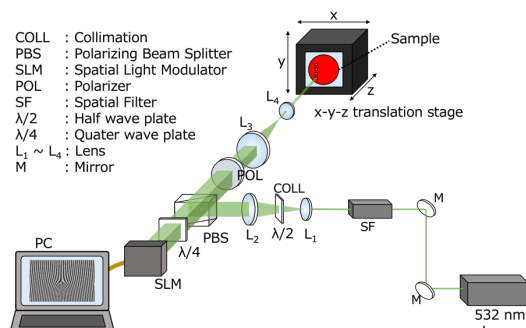


Figure 3 Schematic of the hologram printing system.

imaging lenses. Though only two lenses ( $L_3$  &  $L_4$ ) are shown in Fig.3 for simplicity, and it should be noted that is composed of 7 lens elements to cancel out aberrations.

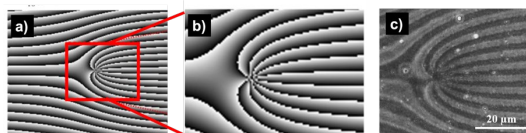


Figure 4 a) Computed hologram pattern, b) Zoomed-in image of pattern, and c) phase contrast microscopic image of pattern b) printed on the sample.

It is this imaging optics that enables the efficient transfer of the pattern displayed by the SLM onto the sample with a 10x de-magnification. Raytracing simulations (zemax software) showed the spot size on the imaging plane to be  $0.8\mu\text{m}$  with a tolerance of  $20\mu\text{m}$  in the z-axis. So, it is necessary to place the sample at the focal plane of the lens with an accuracy of  $20\mu\text{m}$ . This is realized by mounting the sample on a high accuracy motorized 3-axis motion stage equipped with an encoder based feedback. The power of the laser beam at the recording plane was  $32\text{mW}/\text{mm}^2$  and the exposure time for recording is 5 seconds (single exposure). The recorded refractive index modulations on the sample were then verified using a phase contrast microscope. The computed fork grating of topological charge  $l=10$  and the corresponding phase contrast microscopic images of sample after recording are shown in Fig.4(c). The size of each pixel on the SLM is  $8\mu\text{m}$  which is de-magnified 10-times onto the polymer sample resulting in a pixel pitch of  $0.8\mu\text{m}$ . The displayed hologram consisted of  $1200 \times 1200$  pixels which results in a printed hologram of size  $0.960\text{mm} \times 0.960\text{mm}$  in size. The printed pixel pitch and size were verified experimentally to agree with the numbers mentioned above, through microscopic measurements (Fig.4c).

### d) Reconstruction – results

The reconstruction experiments were carried out by simply illuminating the sample with a laser beam of 1mm diameter and of wavelength  $633\text{nm}$ . Optical vortex beams are emitted in all diffraction orders when



illuminated since the hologram (grating) here functions a thin grating that belongs to the Raman-Nath regime. It should be noted that even though the sample film had a thickness of  $35\mu\text{m}$ , it does not qualify as a volume Bragg grating since the recording is done using a single beam in an imaging configuration. It is only the first order diffracted that is of importance since it possesses most of the power and all the information. The zeroth-order ( $I_0$ ) and first-order ( $I_{-1}$ ,  $I_{+1}$ ) diffracted beam intensity is measured using photodiodes and the diffraction efficiency is calculated to be 32% which is close to the theoretical maximum of thin holograms.

Figure.5 shows the 0th and 1st order diffracted beams captured using a charge coupled device (CCD) sensor, from holographic reconstructions. The recorded pattern in these holograms correspond to a single vortex beam (not array) each with a different topological charge ( $l=-4$ ,  $-10$ ,  $-20$ ,  $-50$ ,  $-100$ ,  $-125$ ). The increase in radius of the reconstructed donut pattern with

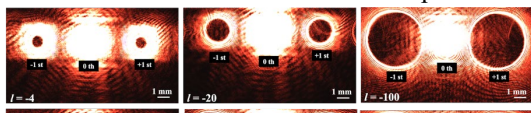


Figure 5 Reconstructed vortex beam (+1 and -1 diffraction orders) of topological charges ( $l=-4$ ,  $-10$ ,  $120$ ,  $-50$ ,  $-100$ ,  $-125$ ) from a 1mm sized hologram

increasing topological charge can be observed from Fig.5. It can also be concluded that the largest topological charge that can be reconstructed with high fidelity, from a single vortex (not array) hologram of size  $1\text{mm}^2$  is  $l=50$ , on the CCD sensor.

Multiplexed hologram patterns corresponding to a  $6 \times 6$  and  $10 \times 10$  vortex array were recorded on the polymer and then subjected to reconstruction tests. The reconstructions were captured directly using a CCD camera at a distance of 5cm from

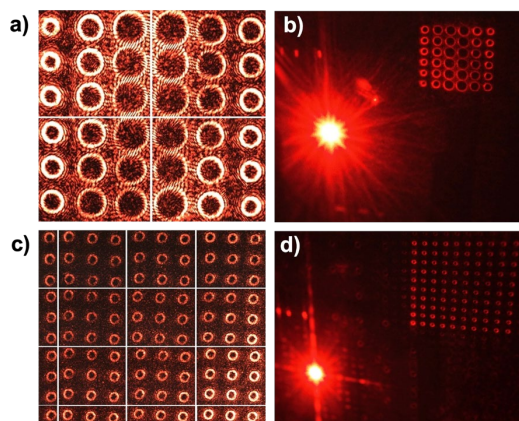


Figure 6 Reconstructed vortex beam array a,c captured directly on a CCD and b,d captured from a screen using a camera.

the sample and are shown in Fig.6(a,c). The horizontal and vertical lines seen in the images are due to a tiled capturing procedure adapted to circumvent the issue of vortex array size being larger than the CCD sensor area. Figures.6(b,d) represent the reconstructions captured from a screen placed at a distance of 10cm from the hologram sample using a photographic camera. These images show the 0th-order and +1st-order reconstructed beams. A few donut shaped pattern seen close to the 0th order beam correspond to the weak autocorrelation term in holographic reconstruction. From the above experimental results, it can be concluded that a  $10 \times 10$  optical vortex array with arbitrary topological charge up to  $l=10$  can be successfully generated from a sample of size  $1\text{mm}^2$ . More details on the generated results and its application potentials can be found in [3].

### 3. Conclusion

A simple and compact device for static optical vortex array generation is reported. The method utilizes digital hologram printing on azo carbazole polymer to record an optical vortex array of arbitrary shape and topological charge into hologram of size  $1\text{mm}^2$ . This hologram when illuminated, emits the recorded optical vortex array into

the first-order diffracted beam. An array consisting of  $10 \times 10$  optical vortices each with a topological charge of  $\pm 10$  has been achieved. Here the size of the hologram increases linearly with the size of the array making the device ‘scalable’. Moreover, the size of the hologram is in the order of millimeter, making it ‘compact’ and suitable for optical integration. Hence the reported technique has the potential to serve as an integrated device in optical computing and communication applications.

The array size and the maximum topological charge can be further increased by stitching multiple holograms together using a tiled hologram printing technique. The diffraction efficiency can be further increased, and the unwanted higher order diffraction orders can be avoided by adapting a volume hologram recording setup. We plan to implement the above mentioned in the future

## References

- [1] Shen, Y., Wang, X., Xie, Z. et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities. *Light Sci Appl* 8, 90 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41377-019-0194-2>
- [2] Kinashi, K., Nakanishi, I., Sakai, W., Tsutsumi, N.: Material Design of Azo-Carbazole Copolymers for Preservation Stability with Rewritable Holographic Stereograms. *Macromolecular Chemistry and Physics* 220(2), 1800456 (2019). doi:10.1002/macp.201800456
- [3] Jackin, B.J., Shirai, M., Haginaka, H. et al. Compact and Scalable Large Vortex Array Generation Using Azocarbazole Polymer and Digital Hologram Printing Technique. *Nanoscale Res Lett* 17, 44 (2022). <https://doi.org/10.1186/s11671-022-03675-7>.

# ポリゴン法 CGH における 透明物体のレンダリング手法 Rendering technique of transparent objects in polygon-based computer-generated hologram

西 寛仁 松島恭治

Hirohito Nishi Kyoji Matsushima

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

Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, Kansai University

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

E-mail: h\_nishi@kansai-u.ac.jp

**あらまし** ポリゴン法 CGH における透明物体のレンダリング法を改善する新手法を提案する。従来法は物体形状の制限として物体背面を 1 枚の平面で構成する必要があった。新手法では背面ポリゴンから入射した光波を物体の中間面に伝搬することでこの制限を緩和した。また、物体を分割することで計算時間を短縮する手法についても提案を行う。

**Abstract** A novel technique is proposed to improve the method for rendering transparent objects in the polygon-based method. The previous method strictly restricted the object shape whose backside must be a plane. The new method gets rid of the restriction by employing an intermediate plane where all incident wavefields entering through the backside polygons are superposed. Moreover, a technique, dividing an object into sub-models, is proposed to reduce the computation time.

**キーワード** 計算機合成ホログラム, 全方向視差, 質感表現

**Keywords** Computer-generated hologram, Full-parallax, Realistic rendering

## 1. はじめに

近年の技術進歩により、1000 億画素を超える全方向視差計算機合成ホログラム (Full-parallax computer-generated hologram, 以下 FP-CGH) の製作が可能となり、深い奥行きを有する美しい 3D 物体を再生できるようになった [1]。これに伴い様々なレンダリング手法が提案され、FP-CGH の質感の表現力も向上している。その内、透明物体についても複数の手法が提案されており、その一つに光線サンプリング面 (Ray-Sampling plane: 以下 RS 面) を利用した手法がある [2]。これは、多視点画像をフーリエ変換して光線情報を波面情報に変換し RS 面上に複数枚並べることで 3D 像を再

生させる手法である。この手法は、CG の高度なレンダリング手法を用いることができ大規模 FP-CGH も作製可能である。一方、RS 面から遠い物体の再生像が不鮮明になる問題がある。この他にも CG のレイトレーシングを点光源法に応用した手法も提案されている [3]。この手法は様々な材質を表現できる可能性があるが、計算時間が膨大となり大規模な FP-CGH を数値合成することは困難である。一方、我々はポリゴン法と呼ばれる仮想物体にポリゴン形状の面光源を貼り付け、この光源毎に計算を行う手法を提案している。本手法は非平行間の伝搬計算が必要でありソフトウェア実装が難しいものの、大規模な FP-CGH を作

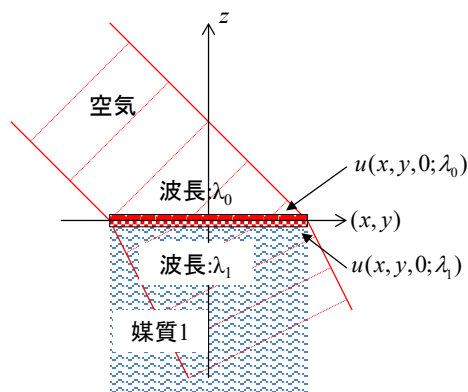


図 1. 媒質への光波の入射

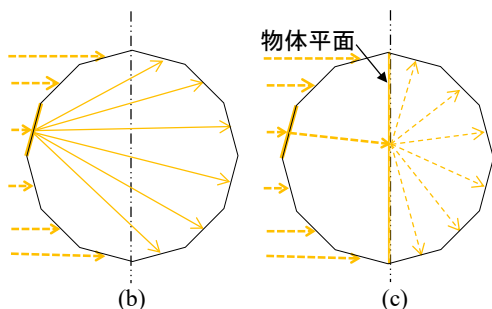
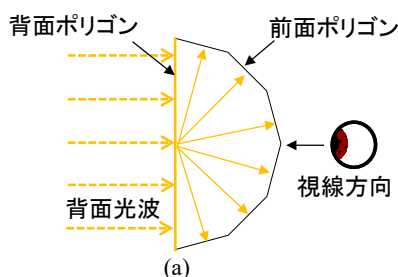


図 2. 物体形状の制限によるポリゴン間の伝搬回数の削減

成することが可能である。また、ポリゴン単位で計算するため隠面消去法との相性が良い。

我々は本手法に基づく質感表現レンダリングとして、鏡面反射のレンダリング手法を提案しており大規模 FP-CGH の作製に成功している [4]。一方、以前に提案した透明物体のレンダリングの手法では、計算時間の短縮のために物体背面が平面である必要があり実用性に乏しかった[5]。そこで、この制約を緩和する手法、及び物体分割により計算量を削減する高速化手法を提案している[6,7]。なお、本稿ではこれらの手法を詳述する。

## 2. 波動光学における透明物体レンダリング

ポリゴン法では 3 種類の座標系，グローバル座標系，平行なローカル座標系，傾いたローカル座標系を用いている。個々のポリゴン毎に定義した 2 つのローカル座標系の原点は一致しており，ポリゴン平面上にある。

### 2.1. 屈折光の計算原理

図 1 の様に，空気から媒質 1 に光波が入射し波長が  $\lambda_0$  から  $\lambda_1$  に変化するとし，境界面に入射する光波を外側で  $u(x, y, 0; \lambda_0)$ ，内側で  $u(x, y, 0; \lambda_1)$  とする。この時，光波の振幅成分はフレネルの公式に従い線形的に変化する。一方，波動の連続性のため位相は変化せずに光波の波長のみが変化する。そのため，

$$u(x, y, 0; \lambda_0) \propto u(x, y, 0; \lambda_1) \quad (1)$$

となる。なお，簡単化のため本研究では境界面で生じる反射については考慮せず，(1)式の比例係数を 1 とする。

### 2.2. 物体形状の制限

以前の手法では，図 2(a)のように背面を平面にする必要があった。しかし，本手法ではこの制限を緩和し，自己オクルージョンが無く(凹部が無く)，断面積が最大となる平面(以下，物体平面)の前後で背面ポリゴンと前面ポリゴンを判別可能なモデルを条件とする。この場合，(b)の様に背面ポリゴンから入射する光波をそれぞれ前面ポリゴンに伝搬計算して出射させる必要がある。そのため，背面ポリゴン数を  $N$  とし，前面ポリゴン数を  $M$  としたとき，そのままでは伝搬計算の回数は  $N \times M$  回となり計算量が膨大になる。一方，今回の新手法では図 2(c)の様に背面ポリゴンからの光波をまず物体平面まで伝搬して重畳し，それを全ての前面ポリゴンに伝搬計算する。この場合，伝搬計算回数は  $N + M$  回となり，大幅に計算量を削減することができる。

### 2.3. ポリゴン単位の計算手順

光波が背面ポリゴン  $P_n$  に入射した場合の計算手順を図 3 に示す。(a)の様に，入射光波を  $f_n(\hat{x}_n, \hat{y}_n; \hat{z}_n, \lambda_0)$  とする。ここで， $\hat{z}_n$  はポリゴ

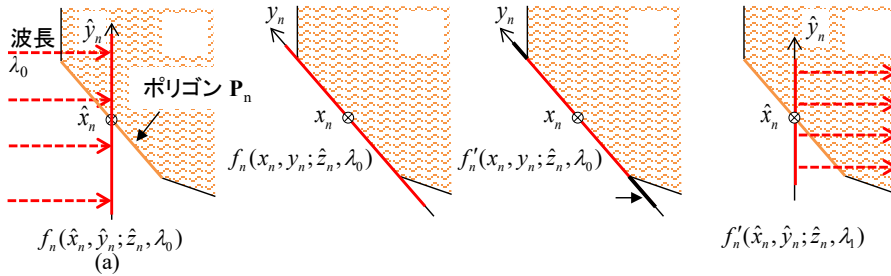


図 3. ポリゴン単位の計算手順

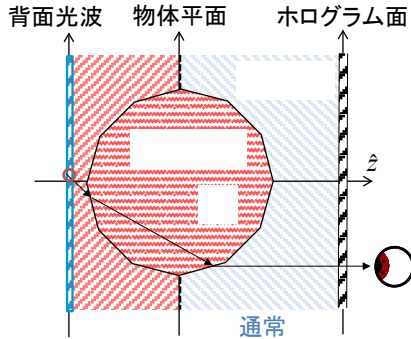


図 4. 屈折による影響と高密度サンプリングが必要な領域

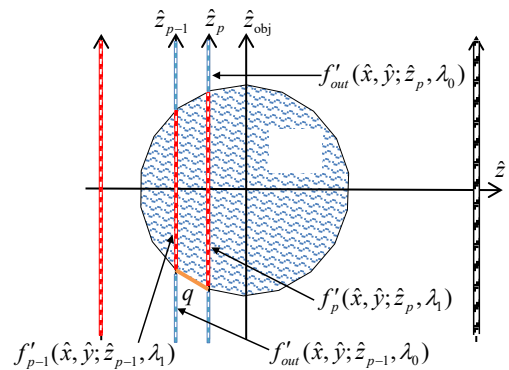


図 5. サブモデル単位の計算手順

ン  $P_n$  のグローバル座標系での  $z$  座標を表す。(b)に示すとおり、ポリゴン面と平行になるようにこの光波の回転変換を行う。

$$f_n(x_n, y_n; \hat{z}_n, \lambda_0) = R_n^{-1} [f_n(\hat{x}_n, \hat{y}_n; \hat{z}_n, \lambda_0)] \quad (2)$$

ここで、 $R_n^{-1}[\cdot]$  はポリゴン  $P_n$  の平行なローカル座標の  $(\hat{x}_n, \hat{y}_n, 0)$  面の光波を傾いた  $(x_n, y_n, 0)$  面に伝搬する光波回転変換を示す ([1]Sect.9)。次に、(c)の様に、物体内に入射しない余分な光波をカットするためにポリゴン形状のマスクを乗算する。

$$f'_n(x_n, y_n; \hat{z}_n, \lambda_0) = A(x_n, y_n) f_n(x_n, y_n; \hat{z}_n, \lambda_0) \quad (3)$$

ここで、 $A(x_n, y_n)$  はポリゴンの内側で 1、外側で 0 となるマスク関数である。この後は、透明媒質内の光波として扱い、(d)の様に、波長を媒質内の波長に変化させて再度回転変換を行い、ホログラムと平行な媒質内光波を求める。

$$f'_n(\hat{x}_n, \hat{y}_n; \hat{z}_n, \lambda_1) = R_n [f'_n(x_n, y_n; \hat{z}_n, \lambda_1)] \quad (4)$$

原理的には、この光波を物体平面まで伝搬計算するが、次節で述べるとおり高速化のため分割処理を行うため、実際にはサブモデルの境界面まで伝搬計算を行なう。なお、前面

ポリゴンから出射する光波の計算は、波長の变化が逆になること以外は同じため省略する。

### 3. 計算の高速化

#### 3.1. 屈折現象で生じる問題

屈折光をレンダリングするためには通常よりも広い空間スペクトルを有した光波を計算する必要がある。図 4 に示すように透明物体越しに背景を観察した場合、屈折の影響により大きく斜行する光波を扱うため、波長の半分程度の微細なサンプリング間隔で光波計算を行う必要がある。一方で、全ての領域で微細な間隔を設定する必要はなく、物体前方に他の透明物体がなければ図 4 に示す赤色の範囲のみが高密度のサンプリングが必要な範囲となる。ただし、この処理でも計算量の増大が問題となるため、本研究では次節の物体分割を活用して計算量を更に削減している。

#### 3.2. 物体分割による高速化

本研究では図 5 のように物体を奥行き方向に複数のサブモデルへ分割することで、個々のポリゴンの計算量が減少させた。全体の計算手順は、このサブモデル間の伝搬計算の繰

り返しとなる．ここでは，サブモデル  $p$  の背面の  $\hat{z}_{p-1}$  平面から前面の  $\hat{z}_p$  平面までの物体内外の光波の計算手順を述べる． $\hat{z}_{p-1}$  平面の光波  $f'_{p-1}(\hat{x}_n, \hat{y}_n; \hat{z}_{p-1}, \lambda_1)$  を  $\hat{z}_p$  平面まで伝搬計算し，更に前述の方法でサブモデル  $p$  の各ポリゴンから入射する光波も同  $\hat{z}_p$  平面に伝搬させる．

$$f_p(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_p, \lambda_1) = \text{Prop}_{\hat{z}_p} \left[ f'_{p-1}(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_{p-1}, \lambda_1) \right] + \sum_q \text{Prop}_{\hat{z}_p} \left[ f'_q(\hat{x}_q, \hat{y}_q; \hat{z}_q, \lambda_1) \right] \quad (5)$$

ここで， $\text{Prop}_{\hat{z}_p}[\cdot]$  は  $\hat{z}_p$  平面への伝搬計算を示す． $q$  はサブモデル  $p$  に含まれるポリゴンの番号である．このままでは，物体外に出てしまう光波が含まれるため，

$$f'_p(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_p, \lambda_1) = A_p(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_p) f_p(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_p, \lambda_1) \quad (6)$$

のようにサブモデル  $p$  の出射側の  $\hat{z}_p$  面において，物体内で 1，外で 0 のマスク関数  $A_p(x, y; \hat{z}_p)$  を乗算する．

物体の外側を伝搬する光波も求める必要があるため， $\hat{z}_{p-1}$  平面の物体外光波  $f'_{out}(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_{p-1}, \lambda_0)$  を  $\hat{z}_p$  平面まで伝搬計算して余分な光波を反転マスク  $[1 - A_p(x_n, y_n; \hat{z}_p)]$  で除去し， $\hat{z}_p$  平面の物体外光波  $f'_{out}(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_p, \lambda_0)$

$$= [1 - A_p(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_p)] \sum_{n'} \text{Prop}_{\hat{z}_p} \left[ f'_{out}(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_{p-1}, \lambda_0) \right] \quad (7)$$

を求める．以上がサブモデル間の伝搬計算の手順である．この手順を繰り返すことで物体内外を伝搬する光波を計算することができる．ただし， $\hat{z}_{obj}$  平面（物体平面）以降は，波長の関係が反転するので注意が必要である．

#### 4. CGH の光学再生

提案法の確認のために FP-CGH を作製し CG のレンダリングとの比較を行った．この 3D シーンを図 6，計算パラメータを表 1 にそれぞれ示す．図 7 の CG イメージと FP-CGH の再生像は一致しており，提案法が正しいことを確認できる．

#### 5. まとめ

本研究では，ポリゴン法の透明物体レンダリング法における従来法の物体形状の制約を無くし，更に，計算を高速化する手法を提案している．実際に FP-CGH を作製し提案法により正しくレンダリングが行えていることを確認した．

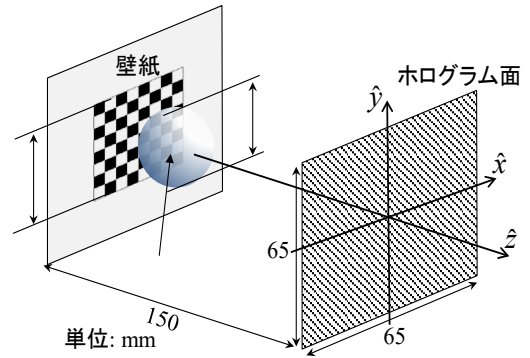


図 6. 作製した FP-CGH の 3D シーン

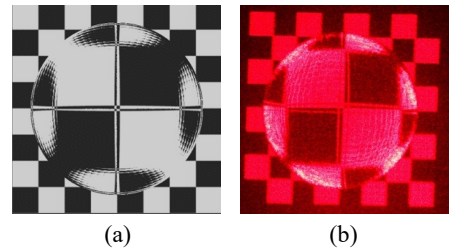


図 7. 作製した FP-CGH, (a)CG イメージ, (b)CGH の光学再生像

表 1 作製した FP-CGH のパラメータ

ピクセル数	65,536 × 65,536
ピクセル間隔	1 μm × 1 μm
波長	632.8 nm
透明球体の屈折率	1.5

#### 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] S. Wakunami, and M. Yamaguchi, Opt. Express. **19**, 9086-9101 (2011).
- [3] T. Ichikawa, K. Yamaguchi, and Y. Sakamoto, Appl. Opt. **52**, A201-A209 (2013).
- [4] H. Nishi, and K. Matsushima, Appl. Opt. **56**, F37-F44 (2017).
- [5] H. Nishi, and K. Matsushima, Information Photonics 2017, IP-21PM-1-8 (2017).
- [6] 西寛仁, 松島恭治, 3 次元画像コンファレンス 2022, 10-1(2022).
- [7] H. Nishi, and K. Matsushima, Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2022, Tu1A.4(2022).



# The generation pipeline of polygon-based holograms

Fan Wang<sup>†</sup> Tomoyoshi Ito<sup>†</sup> Tomoyoshi Shimobaba<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Graduate School of Engineering, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan

E-mail: wangfan@chiba-u.jp

**Abstract** We present a comprehensive high-speed production pipeline of polygon-based holograms. The proposed pipeline includes a new acceleration algorithm, an improved shading rendering method, and a novel occlusion-culling technique. The acceleration algorithm can be nearly 30 times faster due to the use of spectral energy concentration and thereby the reduction of computational kernel. The shading rendering method is developed from the idea of subdividing triangles, and the proposed improved version simplifies the process and increases efficiency. The novel occlusion-culling technique can closely crop the overlapping areas by using collision detection, while the octree data structure greatly reduces the complexity of the search. With these, we can rapidly generate holograms of complex polygonal objects and acquire 3D reconstruction with realism.

**Keyword** polygon-based hologram, acceleration algorithm, smooth rendering, occlusion-culling

## 1. Introduction

Holography is a promising technology for real 3D displays that can reconstruct all depth information of objects. Computer-generated holograms (CGHs) enable simulation of virtual objects, making dynamic 3D displays and augmented reality interactions possible. However, computing holograms efficiently is essential for achieving video-rate 3D displays due to the huge computations involved. Many studies have reported efficient methods for CGHs, including point-based [1, 2], layer-based [3, 4], line-based [5, 6], and polygon-based methods [7, 8].

The polygon-based method represents objects as a set of triangles and has evolved from interpolation-based method [9,10] to analytical-based method [7, 8, 11]. The interpolation-based method rotates the tilted triangles in the frequency domain through fast Fourier transform (FFT) and interpolation of the spectrum. This easily renders the shading or texture information for individual polygons; however, each loop must

perform one FFT and one interpolation, which is relatively costly [10]. Analytical-based method derives an analytical expression of the spectrum for each triangle using rotational or affine transformation, which improves computational efficiency. However, it assumes uniform transmittance within the triangle mesh, requiring further subdivision surfaces for detailed renderings such as shading [12]. Although some solutions present continuous shading without subdivision surfaces, they either lack specular reflection or add considerable overhead [13].

In this study, we made improvements to three aspects of the production pipeline to improve the efficiency and realism of polygon-based holograms: (1) using compact spectral regions to accelerate spectrum calculation while maintaining hologram quality, (2) introducing a shading method based on sub-triangles to render smooth shading without increasing the number of triangles, and (3) developing a novel

occlusion-culling method using sub-triangles and an octree structure to quickly search for possible collision objects.

We observed that most spectral energy is concentrated in a small region with low frequency, so calculating only the low-frequency region can significantly accelerate the spectrum calculation. The shading method uses the vertex-normal of sub-triangles, which can render very smooth shading without increasing the number of triangles. To improve the occlusion-culling technique, we adopted the concept of collision detection and used an octree structure to quickly search for possible collision objects. This method can determine whether the ray from the viewpoint to the detection point intersects with other triangles in the view frustum and is computationally efficient.

## 2. Acceleration: spectral energy focus method

An arbitrary triangle  $\Gamma$  in the global coordinate system  $(x, y, z)$  is mapped onto a fixed triangle  $\Delta$  in the local coordinate system  $(x_0, y_0, z_0)$ , as shown in Fig. 1. A plane light wave passes through the triangular polygon  $\Gamma$  with a uniform transmittance defined as  $I$ , then the complex amplitude on the triangular surface is

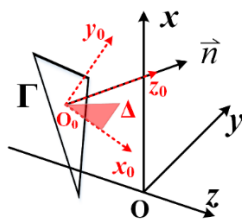


Fig. 1. Schematic of affine transformation [8].

$$E_0 = I \cdot \exp(j2\pi z/\lambda), \quad (1)$$

where  $j = \sqrt{-1}$ , and  $\lambda$  is wavelength. The

spectrum of the triangle  $\Gamma$  in the hologram located at the  $z = 0$  plane can be analytically calculated by the fixed triangle  $\Delta$  as follows:

$$F(f_x, f_y) = I \iint_{\Delta} \exp[-j2\pi(\mathbf{f}' \cdot \mathbf{v}_0)] dx dy, \quad (2)$$

where the vector  $\mathbf{v}_0 = [x_0, y_0, z_0, 1]$ , and the vector  $\mathbf{f}' = [f'_x, f'_y, 0, f'_z]$ , which follows

$$\mathbf{f}' = \mathbf{f}\mathbf{T}, \quad (3)$$

where  $\mathbf{T}$  is 3D affine transformation matrix that can be obtained by the vertex coordinates of  $\Gamma$  and  $\Delta$ .

The frequency sampling  $(f_x, f_y)$  in Eq. (2) should be twice the number of hologram pixels with the consideration of convolution errors [14], and the frequency range is determined by the sampling pitch  $p$ , i.e.,  $f_{max} = 1/(2p)$ . However, the spectrum region involving most of signals is in the low frequency component, as shown in Fig. 2. Therefore, we use only a small region whose signal occupies a major proportion of the whole region. The sampling boundary of this region is  $(f_{xCE}, f_{yCE})$  as shown in Fig. 2, and can be calculated by the spectral energy density [15].

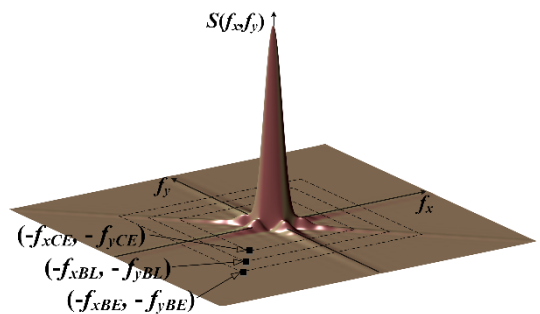


Fig. 2. Spectrum distribution of a triangle [8].

According to the spectral energy density distribution, we can easily target the region with major spectral energy, thus Eq. (2) can be performed in a small



computational kernel. In addition, the inverse non-uniform fast Fourier transform (NUFFT) must be used to generate the spatial field distribution from the spectral, due to the change in the number of spectral samples.

### 3. Rendering: smooth shading

Equation (2) shows that the triangle surface has a uniform transmittance, implying a uniform intensity when it reflects light. However, in a real environment with lighting, the curved surface of the object appears as a shading. According to the Blinn-Phong reflection model, the amplitude of the triangle surface is:

$$I = K_a + K_d(\mathbf{n} \cdot \mathbf{R}) + K_s(\mathbf{n} \cdot \mathbf{H})^{N_s}, \quad (4)$$

where the constants  $K_a, K_d, K_s$  and  $N_s$  represent the ambient, diffuse, specular reflection factors and shininess factor, respectively.  $\mathbf{n}$  is the surface normal of the triangle,  $\mathbf{R}$  is the reflection direction,  $\mathbf{H}$  is determined by the incident direction and the view direction.

Blinn-Phong reflection in Eq. (4) makes the flat shading model easy to implement, as shown in Fig. 3. The two 3D objects, teapot and rings, are illuminated by a parallel beam of light. The light ray is reflected in the hologram plane following the Blinn-Phong reflection model and is observed along the  $z$ -axis. From the reconstructions in Figs. 3(a) and (b), the exaggerated step of adjacent triangles produces a distinct ridge, called the Chevreul illusion.

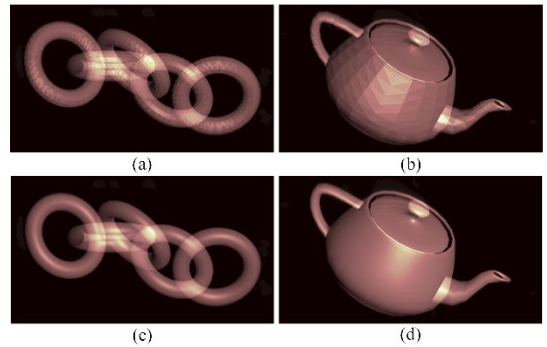


Fig. 3. (a) and (b) are the flat shading exhibiting the Chevreul illusion. (c) and (d) are the smooth shading by the proposed method [8].

To address the Chevreul illusion, Phong shading model suggests that the point normal within the triangle surface is used to calculate the pixel amplitude by Eq. (4). However, the idea based on the point normal is not allowed to be used for the polygon-based hologram, thereby we propose an improved method for triangle subdivision, as shown in Fig. 4.

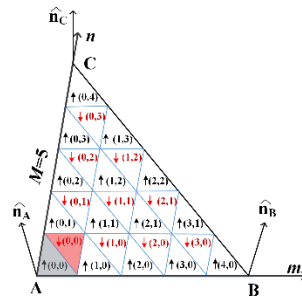


Fig. 4. The triangle subdivision concept [8].

Each side of the mother triangle is equally divided into  $M$  segments, yielding  $M^2$  sub-triangles, which include  $M(M + 1)/2$  upper sub-triangles denoted  $\uparrow$  and  $M(M - 1)/2$  lower sub-triangles denoted  $\downarrow$ . A nonorthogonal coordinate system is established

with  $\overrightarrow{AB}$  as  $m$ -axis and  $\overrightarrow{AC}$  as  $n$ -axis. The vertex normal of each sub-triangle can be obtained by interpolating the vertex normal of the triangle  $\Delta ABC$ , and we can calculate the spectrum with reflection intensity for each triangle, defined as  $F_{\uparrow}(m, n)$  and  $F_{\downarrow}(m, n)$ . Therefore, the spectrum of the mother triangle  $\Delta ABC$  with smooth shading, can be calculated as follows:

$$F_{\Delta ABC}(f_x, f_y) = \sum_{n=0}^{M-1} \sum_{m=0}^{M-n-1} I_{\uparrow}(m, n) F_{\uparrow}(m, n) + \sum_{n=0}^{M-2} \sum_{m=0}^{M-n-2} I_{\downarrow}(m, n) F_{\downarrow}(m, n). \quad (4)$$

Figures 3 (c) and (d) show reconstructions obtained by the above equation, which renders a very smooth shading. In terms of computational efficiency, the improved sub-triangle shading method simplifies the computational process, and thus also outperforms the traditional method of rendering by increasing the number of mother triangles.

#### 4. Occlusion-culling

Occlusion provides the most powerful monocular depth cues. As in the reconstructed images shown in Fig. 3, 3D objects appear as unusually bright areas because of the overlap of triangles along the same light of sight, which is known as incorrect occlusion.

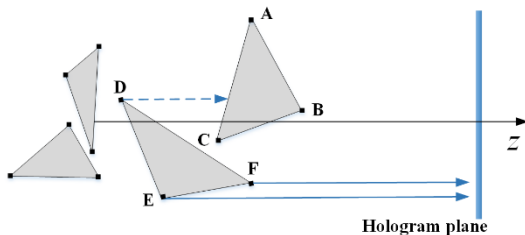


Fig. 5. Collision detection for triangles' vertices [8].

We used collision detection to implement occlusion-culling. Unlike computer graphics, where collisions are detected for each rasterized pixel, the proposed method performs collision detection for the vertices of all the forward triangles. To avoid redundant queries for a more accurate intersection test, we developed an octree spatial data structure to organize the object geometry. An octree is a type of hierarchical structure, that is, the data are arranged at different levels from top to bottom. The topmost level contains eight children, each of which has its own eight or no children.

Collision detection returns the result of whether each vertex is occluded and the collision box if it is occluded. Among the triangles formed by these vertices, we classify them into four types: the first type is the fully visible triangle, i.e., none of the three vertices is occluded, defined as the set  $T_0$ ; the second and third types are those with one and two invisible vertices, respectively, defined as the sets  $T_1$  and  $T_2$ , which are partially occluded; the fourth type is the fully invisible triangle, three vertices of which are occludees, defined as  $T_3$ . The group of  $T_3$  triangles is ignored to address in the pipeline; and the group of  $T_0$  directly enters the rendering pipeline; while the group of  $T_1$  and  $T_2$  will be further be handled.

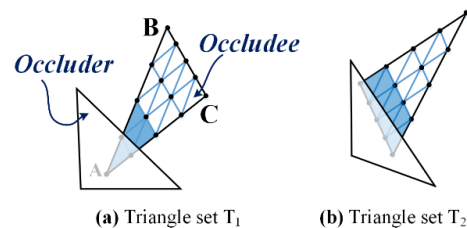


Fig. 6 Further subdivision for the groups of  $T_1$  and  $T_2$  [8]

Figures 6 show two exemplary cases of  $T_1$  and  $T_2$ , we follow the idea of subdividing the triangles presented in Section 3 to be able to use the analytic spectrum of triangle. Then, starting from vertex A, each sub-triangle vertex is again fed into the collision detection loop for the interaction test. If the vertex is obscured, all subtriangles using this vertex are culled, as shown by the blue-shaded subtriangles in Fig. 6. Figure 7 shows the numerical reconstructs and the optical reconstructions of the rings and the teapot after occlusion culling.

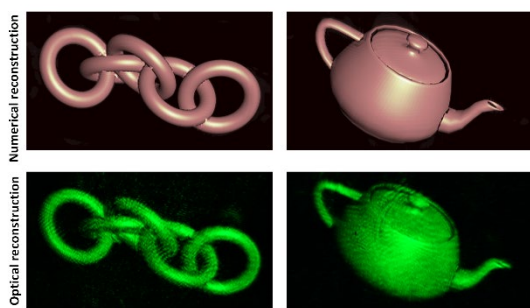


Fig. 7. The numerical and optical reconstructions processed with occlusion culling [8].

## 5. Occlusion

This study first applied the analytical spectrum method based on the principle of spectral energy concentration to computer-generated hologram, which can achieve high speed and generate high-resolution holograms with lower memory requirements. Then, Phong illumination model and sub-triangles method are employed in a shading rendering algorithm to achieve realistic reconstructions with low computational efforts. In addition, we proposed an original occlusion culling method that is capable of rendering a 3D parallax

sense. Benefiting from the octree structure, the proposed occlusion culling method performed very well in terms of efficiency. With this, a comprehensive high-speed rendering pipeline of polygon-based holograms capable for computing any complex 3D object, was built.

## 6. Acknowledgements

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers 22H03607 and 19H01097, and IAAR Research Support Program, Chiba University, Japan.

## REFERENCE

1. S.-C. Kim and E.-S. Kim, "Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method," *Appl. Opt.* **47**, D55–D62 (2008).
2. T. Shimobaba, N. Masuda, and T. Ito, "Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recording plane," *Opt. Lett.* **34**, 3133–3135 (2009).
3. J.-S. Chen and D. Chu, "Improved layer-based method for rapid hologram generation and real-time interactive holographic display applications," *Opt. Express* **23**, 18143–18155 (2015).
4. H. Zhang, Y. Zhao, L. Cao, and G. Jin, "Layered holographic stereogram based on inverse Fresnel diffraction," *Appl. Opt.* **55**, A154–A159 (2016).
5. T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito, "Fast calculation of computer-generated hologram of line-drawn objects without FFT," *Opt. Express* **28**, 15907–15924 (2020).
6. D. Blinder, T. Nishitsuji, and P. Schelkens, "Real-time computation of 3D wireframes in computer-generated holography," *IEEE Trans. Image Process.* **30**, 9418–9428 (2021).
7. Zhang Y, Fan H, Wang F, et al. Polygon-based computer-generated holography: a review of fundamentals and recent progress[J]. *Applied Optics*, 2022, **61**(5): B363–B374.
8. Wang F, Ito T, Shimobaba T. High-speed rendering pipeline for polygon-based holograms[J]. *Photonics Research*, 2023, **11**(2): 313–328.
9. K. Matsushima, "Computer-generated holograms for three dimensional surface objects with shade and texture," *Appl. Opt.* **44**, 4607–

- 4614 (2005).
10. H. Nishi and K. Matsushima, “Rendering of specular curved objects in polygon-based computer holography,” *Appl. Opt.* **56**, F37–F44 (2017).
  11. Wang F, Shimobaba T, Zhang Y, et al. Acceleration of polygon-based computer-generated holograms using look-up tables and reduction of the table size via principal component analysis[J]. *Optics Express*, 2021, **29**(22): 35442-35455.
  12. J.-H. Park, S.-B. Kim, H.-J. Yeom, H.-J. Kim, H. Zhang, B. Li, Y.-M. Ji, S.-H. Kim, and S.-B. Ko, “Continuous shading and its fast update in fully analytic triangular-mesh-based computer generated hologram,” *Opt. Express* **23**, 33893–33901 (2015).
  13. H.-J. Yeom and J.-H. Park, “Calculation of reflectance distribution using angular spectrum convolution in mesh-based computer generated hologram,” *Opt. Express* **24**, 19801–19813 (2016).
  14. K. Matsushima and T. Shimobaba, “Band-limited angular spectrum method for numerical simulation of free-space propagation in far and near fields,” *Opt. Express* **17**, 19662–19673 (2009).
  15. Wang F, Shimobaba T, Kakue T, et al. Controllable energy angular spectrum method[J]. *Optics Communications*, **520**, 128506 (2022).

# Computer-generated holography for 3D lines and curves

David BLINDER<sup>†,‡,\*,\*\*</sup> Takashi NISHITSUJI<sup>\*\*\*</sup>

Peter SCHELKENS<sup>†,‡</sup> Takashi KAKUE<sup>\*\*</sup>

<sup>†</sup>Department of Electronics and Informatics (ETRO), Vrije Universiteit Brussel (VUB)

Pleinlaan 2, B-1050 Brussels, Belgium

<sup>‡</sup>IMEC, Kapeldreef 75, B-3001 Leuven, Belgium

\*JSPS International Research Fellow, Kojimachi Business Center Building,

5-3-1 Kojimachi, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0083, Japan

\*\*Graduate School of Engineering, Chiba University,

1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522, Japan

\*\*\*Faculty of Science, Toho University, 2-2-1 Miyama, Funabashi, Chiba, 274-8510, Japan

E-mail: david.blinder@vub.be

**Abstract** Numerical diffraction can be simulated with computer-generated holography (CGH). This process is highly calculation-intensive and critical for real-time applications such as holographic video display systems. We present an analytical model for calculating the interference pattern for general line segments in 3D and adapt this model for freely drawing 3D splines. We implemented efficiently computable approximations for GPU in C++/CUDA and reported 77-fold speed gains over the reference point-wise algorithm. The results are validated on a holographic display setup.

**Keyword** Digital holography, computer-generated holography, analytical diffraction models

## 1. はじめに

計算機合成ホログラム(CGH)の研究では、ホログラフィにおける様々な数値回折パターン of 効率化が問題として取り組まれており、ビーム成形 [1]、光トラッピング [2]、光学歪み補正が応用先として挙げられる [3]。

CGH 生成における主な課題は、ホログラフィの光波に基づく性質に関連している。すべての仮想シーン要素は、すべてのホログラムピクセルに影響を与える可能性のある光波を放出する。これは多対多のマッピングであるため、CGH は従来の光線に基づくイメージレンダリングよりも大幅に計算が複雑になる。従来の光線に基づくイメージレンダリングでは、ピクセルは概念的に単一の光線に対応する。ホログラフィックビデオディスプレイでは、高解像度で

リアルタイムな CGH 生成を必要とすることから、一層、計算が複雑になる。

本研究では、ホログラフィックディスプレイを対象としている。ホログラフィックディスプレイは、3次元認知に必要なすべての視覚的な要件を満たせるため、究極の 3D ディスプレイテクノロジーと見なすことができる [4]。これまでに、多くの種類の CGH 生成アルゴリズムが考案されており、それぞれ計算時間、視覚効果、およびオブジェクトの次元が異なる [5]。これらの方法の中には、点群法 [6]、レイヤー法 [7]、およびポリゴン法 [8]がある。また、スパース性に基づく手法 [9, 10, 11]や LUT(Look-up table)手法 [12]、深層学習手法 [13, 14, 15]など、様々な高速化手法もある。

これらの研究の中で、我々は線状の光源に対

する CGH 計算技術を検討している。具体的には、3次元像を密集した一連の点としてサンプリングするのではなく、線と曲線によってサンプリングすることで、作成される波面パターンを効率に計算する。

効率的な計算のため、様々なテクニックを提案している。初期の研究では、ホログラム平面に平行な平面曲線のみをサポートしていた [16, 17, 18, 19]。その後の研究により、3D ワイヤフレームの CGH を計算するアルゴリズムを提案し [20]、サンプル可能な曲線の制約を部分的に解消できた。この技術では直線しか作成できなかったが、最近の研究では、両方の技術を組み合わせて、スプラインに基づく 3D 曲線のホログラムを実現することに成功した [21]。本稿では、3D 曲線を再生可能なホログラム計算手法を紹介する。

本稿は以下のように構成される。セクション 2 では、直線状の光源から発せられる波動場の解析をまとめる。セクション 3 では、スプライン曲線を計算できる拡張モデルについて説明し、アルゴリズムによる近似を詳説する。提案手法を、セクション 4 で数値的および光学的に評価し、セクション 5 でまとめる。

## 2. 直線状の開口に対する波動場の解析モデル

点群法は3次元シーンを点光源の集合で表現し、各点光源が発する光波は式

$$P(x, y) = \frac{a}{\zeta} \cdot \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda\zeta} [(x - \delta)^2 + (y - \epsilon)^2]\right) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $(\delta, \epsilon, \zeta)$  は点光源の座標、 $a \in \mathbb{C}$  は振幅であり、 $i$  は虚数単位、 $\lambda$  は波長である。式

$$\begin{aligned} H(x, y) &= \sum_j P_j(x, y) \\ &= \sum_j \frac{a_j}{\zeta_j} \cdot \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda\zeta_j} [(x - \delta_j)^2 + (y - \epsilon_j)^2]\right) \end{aligned} \quad (2)$$

を用いて各点光源から発する光波を足し合わせることで、ホログラムを生成できる。本セクションの目標は、この計算を点光源から線状光源に拡張することである。この式を積分すると、ホログラム平面  $L(x, y)$  に直線状の光源から作成される波面を取得できる。

$$\begin{aligned} L(x, y) &= \sqrt{1 + m^2} \int_0^\ell \frac{a}{\zeta(u)} \\ &\quad \cdot \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda\zeta(u)} [(x - u)^2 + y^2]\right) du \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\ell$  は線分の長さ、 $\zeta(u) = mu + d$  は線形関数である。対称性のため、線分は一般性を失うことなく  $x - z$  平面にあると仮定できる。置換  $\rho = \frac{d}{m}$ ,  $r = \sqrt{(x + \rho)^2 + y^2}$ ,  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda m}$ ,  $u = mrv - \rho$  を使用すると、以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} &\frac{a}{m} \sqrt{1 + m^2} \cdot \exp(-i\beta(x + \rho)) \\ &\quad \cdot \int_0^{mr\ell - \rho} \frac{1}{v} \exp\left(\frac{i\beta r}{2} \left[v + \frac{1}{v}\right]\right) dv \end{aligned} \quad (4)$$

この積分は、中点  $(-\rho, 0)$  を中心に  $r$  に関して放射状の対称性を持つ。式(4)の積分部は、別の代入  $e^\mu = v$ ,  $w = -\log(mr\ell - \rho)$  使用して、次のように解ける。

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{-w} \frac{1}{e^\mu} \exp\left(i\beta r \cdot \frac{e^\mu + e^{-\mu}}{2}\right) de^\mu \\ &= \int_w^\infty \exp(i\beta r \cosh \mu) d\mu = K_0(w, \beta r) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $K_0$  は次数 0 の不完全な第 2 種変形ベッセル関数である [22, 23]。この式は、数値法を

使用してすべてのピクセルで効率的に評価できる [20]。このアルゴリズムを、C++/CUDA を用いて GPU に実装し、回転する宇宙船のワイヤフレームモデルのビデオをリアルタイムでレンダリングした。また、式(2)を用いて、点群法と比較した。光学再生像を図 1 に示す。CGH の生成時間は平均で 3.8 ms であり、リアルタイムレンダリングを実現するには十分であった。また、点群法では平均 62.8 ms を要した。この計算時間では、リアルタイムレンダリングは不可能である。

しかし、この方法では、直線線分を持つオブジェクトのホログラムしか計算できない。次のセクションでは、曲線への拡張について説明する。

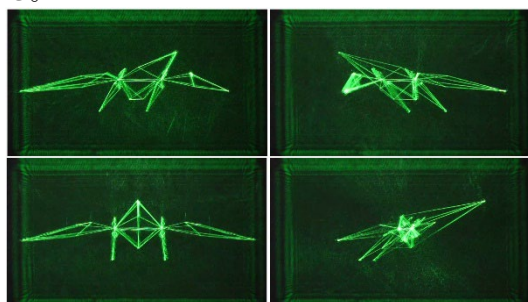


図 1: 回転する宇宙船のホログラムを用いた光学再生像

### 3. 曲線への拡張解析モデル

曲線開口が作る光の波面を純粋な解析解として表現するには不可能な場合がある。そのため、別の視点から着想した近似を提案する [21]。

無限の長さの光直線に対して式 (3) の極限を取ると、

$$\lim_{\ell \rightarrow \infty} L(x, y) = a\sqrt{1+m^2} \cdot \exp(-i\beta(x+\rho)) \cdot \frac{-2\pi i}{m} J_0(\beta r) \quad (6)$$

となる。ここで、 $J_0$  は次数 0 の第 1 種ベッセ

ル関数である。なお、この式は  $r$  で放射状に対称であることに注意されたい。この効果は実験的にも観察できる。短く傾斜した線分状の開口が作る波面は、図 2 のように、半径  $\rho$  で放射状に対称なパターンを生成する。したがって、曲線を連続した一連の長さ無限小の線分として扱えば、式 (6) に従って円に沿って光の波面パターンを描くことができ、曲線に対応したホログラムを高速計算できる。そこで、本研究では、3D スプラインを使用して曲線をモデル化する。

$t \in [-1, +1]$  で囲まれた 3D 二次スプライン  $g(t)$  を考えると、空間座標は 3 つの二次多項式で記述される。

$$g(t) : \begin{cases} g_x(t) = a_x t^2 + b_x t + c_x \\ g_y(t) = a_y t^2 + b_y t + c_y \\ g_z(t) = a_z t^2 + b_z t + c_z \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $\{g_x(t), g_y(t), g_z(t)\}$  はすべての次元に沿ったスプラインのデカルト成分を表す。

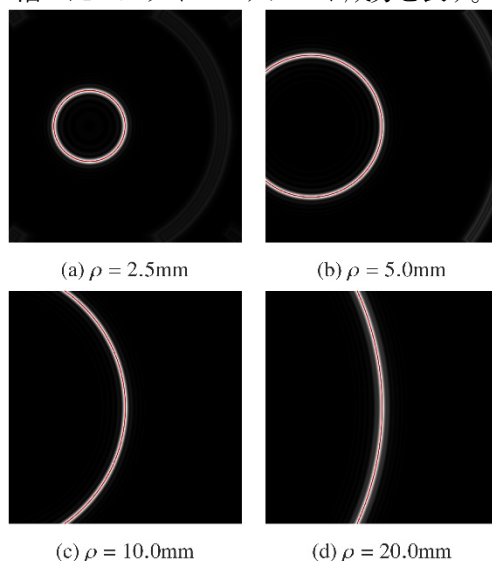


図 2: 短い傾斜した線分から生成されたホログラムの強度分布。重ね合わされた赤い円セグメントは、半径  $\rho$  と原点  $(-\rho, 0)$  を持ち、派生モデルの精度を示している。

提案手法では、ホログラム平面上のすべての画



素について、スプライン上のどの点が、ホログラフィック信号の、どの部分に寄与するかを調べる必要がある。これは、図 3 に示す幾何学的問題を解くことになる。すなわち、ホログラム平面上の座標  $(u, v)$  にある画素について、 $g(t)$  から放射される半径  $\rho(t)$  の円がそれと交差するものを見つける必要がある。図 2 に示すように、 $\rho$  は勾配  $\frac{d}{m}$  に依存する。 $t$  にわたって変化するスプラインの場合、 $\frac{g'_z(t)}{g_z(t)}$  が得られる。ここで、プライム記号 ' は  $t$  の導関数を表す。相対横距離を

$$h(t) : \begin{cases} h_x(t) = g_x(t) - u \\ h_y(t) = g_y(t) - v \end{cases} \quad (8)$$

で表せば、交差問題は、ベクトル内積を使用して、次の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} h(t) \cdot g'_{xy}(t) &= |h(t)| \cdot |g'_{xy}(t)| \cdot \cos \theta \\ &= |h(t)|^2 \cdot |g'_{xy}(t)| \frac{g'_z(t)}{2g'_z(t)} \end{aligned} \quad (9)$$

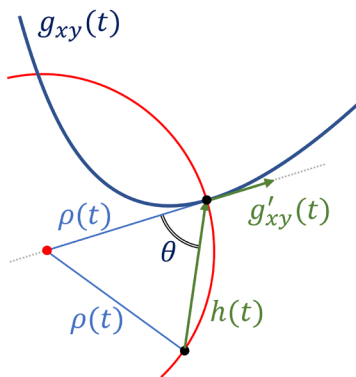


図 3: 3D スプラインに対応する光の波面を計算するために解くべき幾何学的問題。

$t$  を解いてすべての交点を取得し、CGH を計算する必要がある。

方程式 (9) を解析的に解くことは、6 次多項式と  $t$  の平方根項の積で構成されるため、一

般的に実行不可能である。制限された間隔  $t \in \{-1, +1\}$  内で解を探しているため、これは求根アルゴリズムで数値的に解くことができる。しかし、GPU の使用には適さない。なぜならば、CGH 計算にかかる複雑な式をホログラムの画素ごとに毎回、求根アルゴリズムを使用して解決する必要があり、高い計算負荷とスレッドの発散につながるためである。

そこで、この式を 3 次多項式に簡略化して近似することを提案する。ありがたいことに、式 (9) の一部はすべてのピクセルに共通である。これらの共有部分は、CPU で事前に処理できる。これは、一度だけ実行する必要があるため、計算コストが無視できるほど小さくなる。

$f_0(t) + f_1(t)u + f_2(t)v + f_3(t)(u^2 + v^2)$  (10) という形の式を得ることができ、 $f_j(t)$  は純粋に  $t$  内の式である。したがって、元の式は、各  $f_j(t)$  の最小二乗 3 次多項式近似  $p_j(t)$  を取得するという目標、つまり、

$$\begin{aligned} \operatorname{argmin}_{p_j} \int_{-1}^{+1} (f_j(t) - p_j(t))^2 dt \\ p_j(t) = \sum_{k=0}^3 p_{j,k} \cdot t^k \end{aligned} \quad (11)$$

行列の式として書き直すことができる。

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{u} = \begin{pmatrix} p_{0,0} & p_{1,0} & p_{2,0} & p_{3,0} \\ p_{0,1} & p_{1,1} & p_{2,1} & p_{3,1} \\ p_{0,2} & p_{1,2} & p_{2,2} & p_{3,2} \\ p_{0,3} & p_{1,3} & p_{2,3} & p_{3,3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ u \\ v \\ u^2 + v^2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$\mathbf{M}$  を数値的に見つけるには、間隔  $t \in \{-1, +1\}$  を一様にサンプリングして、行列システムの最小二乗解を見つけることで実現できる。

要約すると、3D スプラインによって作成された波面パターンを決定するには、多項式係数が行列積 (12) によって与えられるすべてのピクセルについて、 $t$  の 3 次方程式を解く必要が



ある。これにより、1 つまたは 3 つの実数解が生成される。実数解が  $t \in \{-1, +1\}$  を満たす場合、式 (6) を使用してその複素数値の振幅寄与を計算できる。

#### 4. 実験

すべての実験は、AMD Ryzen Threadripper PRO 5995WX CPU、256 GB RAM、NVIDIA RTX A6000 GPU、Windows 11 OS を搭載したマシンで実行した。使用した仮想テストオブジェクトを図 4 に示す。

数値実験には、解像度 4096x4096 ピクセル、ピクセルピッチ  $4\mu\text{m}$ 、波長  $\lambda = 532\text{nm}$  のホログラムを使用している。点群法の場合、スプラインはピッチに等しい最小点密度を使用してサンプリングされ、線が確実に連続して表示される [17]。提案手法と点群法は、計算時間を平均化するために両方とも 20 回実行した。点群法の計算時間が 2290.7 ms であったのに対し、提案手法は 29.7 ms であった。また、数値再生像の画質は 30.85dB だった [21]。

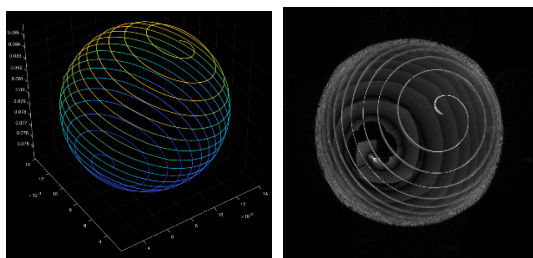


図 4：使用した 3D「球体」モデル (左) と提案手法による数値再生像 (右)

光学実験では、ホログラフィックディスプレイシステムでホログラムをレンダリングした。システムの構成は以下の通りである。解像度 4096 x 2400 ピクセル、画素ピッチ  $3.74\mu\text{m}$  の

位相変調型空間光変調器 (SLM) (Jasper、「JD7714」)、波長  $\lambda = 532\text{nm}$  のグリーンレーザー (Thorlabs、「CPS532」)、ビームエキスパンダー (Thorlabs、「GBE10-A」)、偏光子 (Thorlabs、「WP25M-VIS」)、偏光ビームスプリッター (Thorlabs、「CCM1-PBS251/M」)、1/2 波長板 (Thorlabs、「WPH10M-532」)、および 1/4 波長板 (Thorlabs、「WPQ10M-532」)、平凸レンズ (Thorlabs、「LA1433-A-ML」と、3M のアルミニウムコーティングテープで作成された手作りの  $\phi = 0.5\text{ mm}$  円形ブロックフィルター。光学再生像は、接眼レンズ (MEADE、「602416」) を備えた Sony ILCE-6000 カメラで記録した。

回転する「球体」モデルのビデオを 30 fps でレンダリングした。モデルは、ホログラムの原点に対して中心に配置され、深さ 8 cm に配置した。CGH パラメーターは、SLM とレーザーのパラメーターと一致するように構成した。1 フレームあたりの平均生成時間は 16.9 ms で、30 fps のリアルタイムレンダリングを実現するには十分であった。一方、点群法は平均 1028.5 ms を要し、リアルタイムレンダリングには遅すぎる結果となった。

CGH アルゴリズムで生成されたフレームの例を図 5 に示す。SLM は位相のみであるため、SLM に表示する前に一部の情報を複素 CGH から抽出する必要がある。

#### 5. まとめ

3D 光曲線の CGH を効率的に計算するためのアルゴリズムを提示した。傾斜した線分の分析式を導き出し、3D 曲線がどのように円形状の波面パターンを掃引するかを示した。

GPU に適した最適化された実装が提示し、許容可能な視覚品質を備えた 4K ホログラムのリアルタイムビデオ計算を実現した。

提案手法の有用性を検証し、基準となる点群法よりも 77 倍高速化した。本研究は今後、ディスプレイ用途に限らず、様々な目的における CGH 計算アルゴリズムの加速化に寄与でき、ホログラフィ以外の数値回折理論の新しい洞察につながる可能性がある。

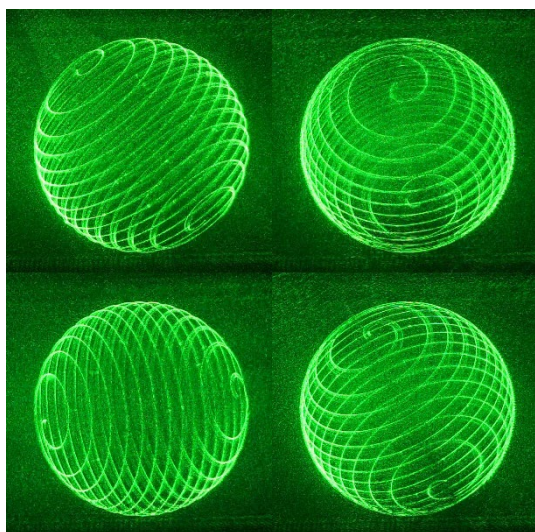


図 5: 光学実験から得られた 4 つのビデオ フレーム

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP23KF0011 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] Y. Guo, Y. Wang, Q. Hu, X. Lv, S. Zeng, “High-resolution femtosecond laser beam shaping via digital holography,” *Opt. Lett.*, Vol. 44, p. 987-990, 2019.
- [2] J. Liesener, M. Reicherter, T. Haist, H. J. Tiziani, “Multi-functional optical tweezers using computer-generated holograms,” *Optics*

*Communications*, Vol. 185, p. 77-82, 2000.

- [3] X. Zeng, X. Zhang, D. Xue, Z. Zhang, J. Jiao, “Mapping distortion correction in freeform mirror testing by computer-generated hologram,” *Appl. Opt.*, Vol. 57, p. F56-F61, 2018.
- [4] D. Blinder, A. Ahar, S. Bettens, T. Birnbaum, A. Symeonidou, H. Ottevaere, C. Schretter, P. Schelkens, “Signal processing challenges for digital holographic video display systems,” *Signal Processing: Image Communication*, Vol. 70, pp. 114-130, 2019.
- [5] D. Blinder, T. Birnbaum, T. Ito, T. Shimobaba, “The state-of-the-art in computer generated holography for 3D display,” *Light: Advanced Manufacturing*, Vol. 3, p. 1-29, 2022.
- [6] P. W. M. Tsang, T.-C. Poon, Y. M. Wu, “Review of fast methods for point-based computer-generated holography [invited],” *Photonics Research*, Vol. 6, p. 837-846, 2018.
- [7] N. Okada, T. Shimobaba, Y. Ichihashi, R. Oi, K. Yamamoto, M. Oikawa, T. Kakue, N. Masuda, T. Ito, “Band-limited double-step Fresnel diffraction and its application to computer-generated holograms,” *Opt. Express*, Vol. 21, p. 9192-9197, 2013.
- [8] K. Matsushima, Introduction to Computer Holography: Creating Computer-Generated Holograms as the Ultimate 3D Image, Springer Nature, 2020.
- [9] T. Shimobaba, N. Masuda, T. Ito, “Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recording plane,” *Optics Letters*, Vol. 34, p. 3133-3135, 2009.
- [10] M. Yamaguchi, H. Hoshino, T. Honda, N. Ohya, “Phase-added stereogram: calculation of hologram using computer graphics technique,” *Proceedings of SPIE*, Vol. 1914, pp. 25-31, 1993.
- [11] H. G. Kim, Y. M. Ro, “Ultrafast layer based computer-generated hologram calculation with sparse template holographic fringe pattern for 3-D object,” *Optics Express*, Vol. 25, p. 30418-30427, 2017.
- [12] S.-C. Kim, E.-S. Kim, “Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method,” *Applied Optics*, Vol. 47, p. D55-D62, 2008.
- [13] L. Shi, B. Li, C. Kim, P. Kellnhofer, W. Matusik, “Towards real-time photorealistic 3D

- holography with deep neural networks,” *Nature*, Vol. 591, p. 234-239, 2021.
- [14] M. H. Eybposh, N. W. Cairra, M. Atisa, P. Chakravarthula, N. C. Pégard, “DeepCGH: 3D computer-generated holography using deep learning,” *Opt. Express*, Vol. 28, p. 26636-26650, 2020.
- [15] S. Choi, M. Gopakumar, Y. Peng, J. Kim, G. Wetzstein, “Neural 3D holography: Learning accurate wave propagation models for 3D holographic virtual and augmented reality displays,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 40, p. 1-12, 2021.
- [16] T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, T. Ito, “Fast calculation of computer-generated hologram of line-drawn objects without FFT,” *Opt. Express*, Vol. 28, p. 15907-15924, 2020.
- [17] D. Blinder, T. Nishitsuji, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, P. Schelkens, “Analytic computation of line-drawn objects in computer generated holography,” *Opt. Express*, Vol. 28, p. 31226-31240, 2020.
- [18] T. Nishitsuji, D. Blinder, T. Kakue, T. Shimobaba, P. Schelkens, T. Ito, “GPU-accelerated calculation of computer-generated holograms for line-drawn objects,” *Opt. Express*, Vol. 29, p. 12849-12866, 2021.
- [19] T. Nishitsuji, T. Kakue, D. Blinder, T. Shimobaba, T. Ito, “An interactive holographic projection system that uses a hand-drawn interface with a consumer CPU,” *Scientific Reports*, Vol. 11, p. 1-10, 2021.
- [20] D. Blinder, T. Nishitsuji, P. Schelkens, “Real-Time Computation of 3D Wireframes in Computer-Generated Holography,” *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 30, pp. 9418-9428, 2021.
- [21] D. Blinder, T. Nishitsuji, P. Schelkens, “Three-dimensional spline-based computer-generated holography,” *Opt. Express*, Vol. 31, p. 3072-3082, 2023.
- [22] M. M. Agrest, M. S. Maksimov, H. E. Fettis, J. W. Goresch, D. A. Lee, *Theory of incomplete cylindrical functions and their applications*, Vol. 160, Springer, 1971.
- [23] D. S. Jones, “Incomplete Bessel functions. I,” *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, Vol. 50, p. 173-183, 2007.

## 令和 5 年第 2 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

■開催日： 2023 年 6 月 2 日（金） 13:30～17:30

■場 所： 日本大学理工学部船橋キャンパス 14 号館 1433 教室

■テーマ： 計算機合成ホログラムの最前線

■プログラム：

1. HODIC 鈴木岡田記念賞授賞式及び記念講演（13:30-14:45）

HODIC 鈴木岡田記念賞について

ホログラフィック・ディスプレイ研究会会長 山本 健詞

選考経緯と選考結果の報告

2022 年度 HODIC 鈴木岡田記念賞選考委員長 高橋 進

授賞式および記念講演

技術部門賞 野村孝徳 氏（和歌山大学）

技術部門賞 インコヒーレントデジタルホログラフィー研究グループ

（NHK 放送技術研究所）

技術部門奨励賞 原 貴之 氏（長野工業高等専門学校）

特別賞（芸術部門貢献） 石井勢津子 氏（美術家）

休憩（14:45-15:00）

2. 講演会（15:00-17:30）

15:00-15:30 「High density multiplexed vortex beam generation

using digitally printed holograms on azo carbazole polymer film」

Boaz Jessie Jackin（京工繊大）

15:30-16:00 「ポリゴン法 CGH における透明物体のレンダリング手法」

西 寛仁（関西大）

16:00-16:15 休憩

16:15-16:45 「The generation pipeline of polygon-based holograms」

Fang Wang（千葉大）

16:45-17:15 「Computer-generated holography for 3D lines and curves（仮）」

David Blinder（VUB, 千葉大）

17:15-17:30 情報コーナー，閉会

■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 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：現地参加の場合は当日／オンライン参加の場合は事前申込
- 参加費：現地参加の場合は HODIC 会員 無料，非会員 2,000 円，学生で会報不要の場合は無料／オンライン参加の場合は会員，非会員ともに無料
- 問合せ先
  - ・研究会について： e-mail [meeting@hodic.org](mailto: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](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

<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	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（アーティエンス・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（ユニカム・ラボ）	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（久保田ホログラム工房）	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. 2 (June 2023)

2023 年 6 月 2 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**