

電子ホログラフィーのための デジタル処理開発の 15 年とこれから

神戸大学大学院システム情報学研究科
仁田功一

私がホログラフィックディスプレイに関する研究を始めたのは、2005 年のことです。情報系の学科に赴任し、情報と光技術を関連させた卒業論文のテーマとして取り組みました。ステレオカメラで取得した 3 次元データから計算機合成ホログラム (CGH; Computer Generated Hologram) を生成させ、空間光変調素子 (SLM; Spatial Light Modulator) によりホログラム再生を行うシステムの開発を目的としました。干渉計測を用いて 3 次元物体を再生するためのホログラムが得られる構成をその特徴とするシステムです。当初は研究のオリジナリティとしての確信はもておりませんでしたが、三角測量によるステレオカメラを用いた 3 次元測定、スカラー回折に基づく計算機ホログラムの生成等、基本技術の教育にも適しており、自分の主たる研究テーマである並列光演算に関するアイデアのフィードバックもあるのではないかと期待していました。当時、数 10 万画素かつ、画素間隔が 10um 未満である高精細な LCoS(Liquid Crystal on Silicon) SLM を利用できる研究所や大学の研究室は限られていたのではないかと記憶しています。私の研究室でも SLM を購入し、実験的に再生像を確認したのは、研究を開始して 3 年近く後のことでした。(1 ページにつづく)

目 次

1. 卷頭言：電子ホログラフィーのためのデジタル処理開発の 15 年とこれから	仁田功一 表紙
2. 2018 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞選考報告	角江 崇 2
3. ホログラムの工業標準の使い方	高橋 進 10
4. ホログラムの画質評価と国際標準化の動向	吉川 浩 15
5. 線形予測による干渉縞の無損失圧縮方法	金 恵炫, 他 18
6. 点群のベクトル量子化に基づく電子ホログラフィの圧縮伝送方式	西辻 崇, 他 24
7. 次回研究会のお知らせ	卷末

研究開始後、グラフィックプロセッシングユニット (GPU; Graphic Processing Unit) を数値計算に導入する技術が注目されつつあること、CGH にも適用が可能であることを知りました。GPU に興味を持った学生と共に、ステレオ画像計測データからホログラムパターンを生成するための実装を試み、高速化をはかりました。2008 年頃より数年間 GPU は汎用処理プロセッサとしての性能の向上や、開発環境の整備の進歩が著しい時期であり、我々の研究においてもその寄与は大きいものでした。

2010 年に Microsoft 社より販売が開始された Kinect デバイスは、私の研究の転機になりました。Kinect デバイスに関しては、多くの方がご存知かと思いますので、デバイスの詳細の説明は割愛します。このデバイスの開発キットが発売された直後に購入し、動作確認を行いました。動作を見て「干渉計測を用いずに 3 次元ホログラフィックディスプレイ」を実現するための計測装置として Kinect が利用できることがわかり、Kinect の性能と価格を考えても自分のステレオイメージングに基づく方法はインパクトが出せないと判断しました。

この後、電子ホログラフィーの広視域化に関する研究を始めています。いくつかの方法を検討しましたが、現在、空間光変調素子の一部の領域を遮蔽することで"擬似的な高精細化"を実現することを考えています。遮蔽部位に規則性があると、高次光がノイズ成分となるために、各画素毎の遮蔽部位がランダムになるようにマスクパターンを設計している点が特徴です。図 1 に示すような構成により、SLM の画素間隔の $1/2$ で設計、計算された CGH の再生像が得られること、視域が広がることを実験的に確認できています。現在、この方法の拡張を取り組んでいます。

以上、ホログラフィー表示とデジタル技術の関わりの観点から、私の研究を紹介させていただきました。イメージセンサーと空間光変調素子の進歩から始まり、ホログラフィーの可能性は大きく広がりました。様々な要素技術を利用できるようになり、私もその恩恵を受け研究を進めました。一方、研究自体がデジタル技術の導入に偏ってしまった反省点もあります。時折、各種展示会や博物館の展示で見る写真乾板のホログラムを鑑賞し、自分が開発しているシステムにより得られる画像との差を痛感します。この過程をこの 10 年の間繰り返しています。

今後も人工知能をはじめとする情報技術との融合と協調はホログラフィックディスプレイの開発を進めるうえで必須であるようです。最先端の技術を取り入れながらも立体表示システムとしての将来像を見失わないように研究する必要性を感じています。まずは、写真乾板と電子ホログラフィーの画像を一般の方にクイズとして問えるくらいにできようにしたいという素朴な目標を達成できよう、研究に取り組みたいと改めて考えております。

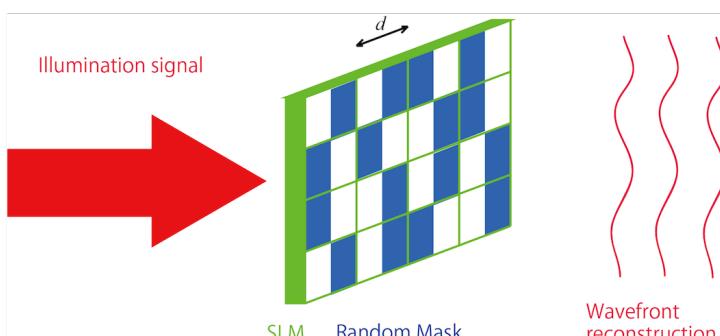


図 1 ランダムマスキングを用いた疑似高精細変調型電子ホログラフィーの概要図。

2018 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞選考報告

2018 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞選考委員長 角江（千葉大学）

2018 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞選考委員会は、2019 年 4 月 17 日に開催した委員会にて慎重に審議を行い、2018 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞として以下のように貢献賞 1 件、技術部門奨励賞 3 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。

■貢献賞

勝間 ひでとし 氏（湘南 LRT&Holography 研究グループ）

勝間氏はディスプレイホログラフィの黎明期において、いち早く、芸術・デザイン分野の学生を対象とした教養科目の物理教育にホログラフィを取り入れられた。実際のホログラム製作が可能な設備を自身で整え、実技実習の実践教育に注力された結果、作品の表現媒体としてホログラフィに興味を持つ学生が多く育つききっかけを作られた。活動は学内に留まらず、一般の方を対象にした講習会も数多く開かれ、世の中の多くの人へホログラフィの魅力を伝える啓蒙活動や人材育成にも尽力された。勝間氏の講習会をきっかけにホログラフィの道へ歩まれた方も多く、それはこれまでに HODIC 研究会にて活躍されている方も例外ではない。

勝間氏は HODIC 研究会の立ち上げにも大きく尽力されており、現在に至るディスプレイホログラフィ分野の芸術、研究活動に携わる多くの人々に多大な影響を与えていた。以上より、勝間氏のご活躍は貢献賞として十二分に相応しいものと考えられる。

■技術部門奨励賞（3 件）

（1）西辻 崇 氏（首都大学東京）

対象論文では、ホログラフィ計算専用プロセッサにおいて問題となっていた、メモリ（三角関数テーブル）を全く不要にする手法が報告されている。ビットシフトと加減算のみで三角関数計算用の近似回路を構成し、従来プロセッサと比較して、画質を十分に保ちながら回路リソースを 30% 以下に抑えられた。ホログラフィック HMD の実現には小型なプロセッサが有用であり、回路リソースを大きく削減した手法の意義が高く評価できる。

対象論文：

1. 西辻崇他, "ホログラフィ計算における三角関数近似手法の高精度化," 平成 30 年第 3 回ホログラフィック・ディスプレイ研究会.

2. Takashi Nishitsuji, "Recent Progress of Dedicated Computer for Electro-holography," The 8th international symposium on holography (HODIC in Taiwan5).

(2) 五十嵐 俊亮 氏 (東京工業大学)

対象論文では、写実的かつ大型の立体像を再生できるホログラムの計算手法が提案されている。ホログラム面に入射しない角スペクトル成分に相当する光波の計算を省略することで計算量を大幅に削減できる、正射影光線サンプリング面を用いた計算法に基づいて、128K×128K 画素で構成される 105mm 四方のホログラムから、奥 1m 立方の空間内に形成される立体像の光学再生に成功した。ホログラフィックディスプレイの実用化だけでなく、メディアアートとしてのホログラム生成手法という観点からもたいへん有用な技術であり、高く評価できる。

対象論文 :

1. 五十嵐俊亮他, "大型の 3D 室内空間を再生する計算機合成ホログラムの計算法," 平成 30 年第 3 回ホログラフィック・ディスプレイ研究会.

(3) 國枝 織絵 氏 (関西大学)

対象論文では、フルカラー積層体積型計算機合成ホログラムにおいて問題となっていた、ガラス基板の厚みによって生じる収差が原因となる色ずれの補正手法が提案された。原版となるホログラムの転写時、および転写して得られたホログラムの再生時の両方において、ガラス基板により収差が生じる。提案手法では、この収差を適切に考慮した光波の伝搬計算に基づいて干渉縞を形成することで、色ずれを補正した。ホログラフィの専門家ではない一般の方でも、フルカラー再生像を容易にかつ鮮明に観察できるようにした技術はたいへん素晴らしい、高く評価できる。

対象論文 :

1. 國枝織絵, 松島恭治, "フルカラー積層体積型 CGH における基板収差の補正," 平成 30 年第 3 回ホログラフィック・ディスプレイ研究会.
2. Orie Kunieda, "Stacked-volume CGH: A novel technique to create full-color CGHs," The 8th international symposium on holography (HODIC in Taiwan5).

受賞者のプロフィール

貢献賞 勝間 ひでとし 氏

・貢献賞受賞によせて

早大大学院応用物理学修士課程終了（1970年）後に、1970年頃から多摩美術大学・芸術学園（専門学校）で、物理学と自然科学概論（芸術と科学）を教えることになり、2010年まで自然科学ゼミ・画像工学・環境問題への科学・工学等の科目を加えて非常勤を含めて、40余年務めてきました。ホログラフィを用いた科学教育を大学・専門学校の写真、映画、デザイン、建築、舞台美術、その他の芸術等の学生を対象に進めてきました。理工系の大学と異なり実験室・暗室などもなく、増して実験設備等も無く、予算なども無く、全てゼロからの出発でした。ホログラムに芸術系の学生は興味を示してくれて、物作りの得意な学生を動員して、実験室作り更に実験室設備作りと進めました。写真光学、写真化学を利用したホログラムから電子デバイス（LCD, LD, CCD）を利用しての電子ホログラムの基礎実験へと進めました。1975年頃東海大学の光工学科の横田英嗣先生の勧めで、彼の研究室でもホログラム作りを開始しました。この横田研究室でのホログラフィ実験の中で、ホログラフィ実験台の振動の干渉縞をCCDカメラで撮影してLCDに表示し、撮影のタイミングを捉えました。

これらのホログラフィ教育方法は応用物理学会・物理教育分科会、SPIE、HODIC等で発表してきました。また本学の学生以外の方々に講義に参加することもできる機会をつくりました。講義の形は、演示実験を中心としました。即ちホログラムを学生の前で作ることから始めました。実験設備はA.レーザー、B.レンズ・ミラー、C.前記以外の光学部品・光学装置、除振台、光学実験台、このうちC.の分野は手づくりでした。美大の学生からのホログラムへの期待としては、A.建築模型の記録、建築材料への応用、B.舞台美術への応用などがあります。

これまで“芸術と科学”の科目で、HODICの皆さま、マサチューセッツ工科大学のBenton先生の指導を受けながら“良いホログラムを作る”ことを教えてきました。今私が計画していることは、長野県の村で自然エネルギーを利用した電力でホログラムを作るという構想です。AIでは出来ない“芸術と科学”、即ちホログラムを利用した科学教育です。芸術系の学生、専門家も利用可能な施設にしたいと考えています。

・略歴

1972年－1981年 多摩美術大学美術学部学科 非常勤講師

1981年－1987年 多摩美術大学美術学部学科 講師

1987年－1993年 多摩美術大学美術学部学科 助教授

1993年－1998年 多摩美術大学美術学部学科 教授

1997年－1998年 マサチューセッツ工科大学 客員研究員
1998年－2010年 多摩美術大学美術学部共通教育 教授
現在 湘南 LRT&Holography 研究グループ

・主な業績

- 1) Hidetoshi Katsuma, Takehisa Shibuya, Moriaki Wakaki, Hideshi Yokota, and Kouichi Hasebe, "Development of Holography Camera in Classroom and the Application to Science & Physics Education," Proceedings of The Second Japan-China Symposium on Physics Experiment Education in Universities, pp. 273-276 (2000).
- 2) Hiroshi Murotani, Takehisa Shibuya, Moriaki Wakaki, Hidetoshi Katsuma, and Hideshi Yokota, "Fabrication of BGO and BSO films for image recording," Proceedings of SPIE Practical Holography XIV and Holography Materials VI, **3956**, pp. 383-388 (2000).
- 3) Hiroshi Murotani, Takehisa Shibuya, Moriaki Wakaki, and Hidetoshi Katsuma, "Fabrication of BGO and BSO films for image recording," Electronic Imaging 2000 Science & Technology, **3956B-47**, 85 (2000).
- 4) 一新賢二, 長瀬隼人, 室谷裕志, 渋谷猛久, 勝間ひでとし, 若木守明, "画像記録のための Bi₁₂Ge_{0.2}O₂₀ 薄膜の構造評価," "00 SAS Intelligent Symposium, F-1 (2000).
- 5) Kenji Isshin, Hayato Nagase, Hiroshi Murotani, Takehisa Shibuya, Hiroshi Yoshida, Hidetoshi Katsuma, and Moriaki Wakaki, "Optical characterization of BGO and BSO films for image recording," Proceedings of SPIE Practical Holography XV and Holography Materials VII, **4296**, pp. 341-346 (2001).
- 6) Hidetoshi Katsuma, Takehisa Shibuya, Moriaki Wakaki, and Hideshi Yokota, "Development of Holography Camera in Classroom and the Application to Physics Education," Electronic Imaging 2000 Science & Technology, **4296-31**, 83 (2001).
- 7) Takehisa Shibuya, Hidetoshi Katsuma, and Moriaki Wakaki, "Holography for physics education in university and college," Proceedings of SPIE Three - Dimensional TV, Video, and Display, **4864**, pp. 136-145 (2002).
- 8) Hidetoshi Katsuma, Takehisa Shibuya, Moriaki Wakaki and Hiromichi Matsumoto, "Holography for physics education using the simple optical setup," Proceedings of SPIE Practical Holography XVII and Holography Materials IX, **5005**, pp. 390-397 (2003).
- 9) Hidetoshi Katsuma, Toshinori Kimura, Takehisa Shibuya, and Moriaki Wakaki, "Holography for physics education in universities and colleges," Proceedings of SPIE Three-Dimensional TV, Video, and Display II, **5243**, pp. 89-95 (2004).
- 10) Hidetoshi Katsuma, Takehisa Shibuya, Moriaki Wakaki, and Hiromichi Matsumoto, "Holography for Physics Education Using the Simple Optical Setup," Electronic Imaging Science & Technology, **5005 - 38**, 109 (2003).
- 11) Takehisa Shibuya, Toshinori Kimura, Toshiharu Sumi, Shofar Tada, Huang Iju, Hidetoshi Katsuma, and Moriaki Wakaki, "Multi-imaging hologram for physics education in

- university and college," Proceedings of SPIE Practical Holography XVIII: Materials and Applications, **5290**, pp. 243-249 (2004).
- 12) Hidetoshi Katsuma, Takehisa Shibuya, and Moriaki Wakaki, "The Students Experiments for Electroholography in Universities and Colleges" Frontiers in Optics 2005, FThL6 (2005).
- 13) Takehisa Shibuya, Toshinori Kimura, Moriaki Wakaki, and Hidetoshi Katsuma, "Multi-imaging hologram for physics education," Journal of Advanced Science, **19**, pp. 36-40 (2007).

受賞者のプロフィール

技術部門 西辻 崇 氏（首都大学東京）

【抱負・コメント】

名譽ある賞を頂戴いたしましたことを大変嬉しく思っております。これまでお世話になりました皆様に心より御礼を申し上げます。大学4年でホログラフィ技術に出会い、就職により一度離れた後も、ホログラフィ研究の魅力を忘れられず、形を変えながら、なんとか研究を続けられていることに、この上ない喜びを感じております。電子ホログラフィ方式の3次元映像は近い将来、必ず実用化されると思っています。それに向けて、どのような貢献ができるのか、自問自答や対外発信を続けながら、今後もホログラフィ技術の研究に全力を注いでいく所存です。

【略歴】

2011年3月 千葉大学 工学部 電子機械工学科 卒業
2013年3月 千葉大学大学院 工学研究科 人工システム科学専攻 博士前期課程 修了
2013年4月～2018年3月 三菱電機株式会社 情報技術研究所 研究員
2016年9月 千葉大学大学院 工学研究科 人工システム科学専攻 博士後期課程 修了
博士（工学）取得
2018年4月 首都大学東京 システムデザイン学部 電子情報システム工学科 助教

【主要な研究業績】

- 1) **Takashi Nishitsuji**, Yudai Hosono, Takashi Kakue, Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito, and Takuya Asaka, "Compression scheme of electro-holography based on the vector quantization of point light sources," *Optics Express* 58, 8, pp. 11594-11607 (2019).

- 2) Tomoyoshi Shimobaba, Takayuki Takahashi, Yota Yamamoto, Yutaka Endo, Atsushi Shiraki, **Takashi Nishitsuji**, Naoto Hoshikawa, Takashi Kakue, and Tomoyoshi Ito, “Digital holographic particle volume reconstruction using deep neural network,” *Applied Optics* 58, 1900-1906 (2019.3).
- 3) Yota Yamamoto, Hirotaka Nakayama, Naoki Takada, **Takashi Nishitsuji**, Takashige Sugie, Takashi Kakue, Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito, “Large-scale electroholography by HORN-8 from a point-cloud model with 400,000 points,” *Optics Express* 26, 34259-34265 (2018.12).
- 4) **Takashi Nishitsuji**, Yota Yamamoto, Takashige Sugie, Takanori Akamatsu, Ryuji Hirayama, Hirotaka Nakayama, Takashi Kakue, Tomoyoshi Shimobaba, and Tomoyoshi Ito, “Special-purpose computer HORN-8 for phase-type electro-holography,” *Optics Express* 26, 26722-26733 (2018.9).
- 5) Tomoyoshi Shimobaba, Takayuki Takahashi, Yota Yamamoto, **Takashi Nishitsuji**, Atsushi Shiraki, Takashi Kakue, and Tomoyoshi Ito, “Efficient diffraction calculations using implicit convolution,” *OSA Continuum* 1, 642-650 (2018.10).
- 6) Takashi Kakue, Yoshiya Wagatsuma, Shota Yamada, **Takashi Nishitsuji**, Yutaka Endo, Yuki Nagahama, Ryuji Hirayama, Tomoyoshi Shimobaba, and Tomoyoshi Ito, “Review of real-time reconstruction techniques for aerial-projection holographic displays,” *Optical Engineering* 57, 061621 (2018.5).
- 7) Takashige Sugie, Takanori Akamatsu, **Takashi Nishitsuji**, Ryuji Hirayama, Nobuyuki Masuda, Hirotaka Nakayama, Yasuyuki Ichihashi, Atsushi Shiraki, Minoru Oikawa, Naoki Takada, Yutaka Endo, Takashi Kakue, Tomoyoshi Shimobaba, and Tomoyoshi Ito, “High-performance parallel computing for next-generation holographic imaging,” *Nature Electronics* 1, 254-259 (2018.4).
- 8) Tomoyoshi Shimobaba, Yutaka Endo, **Takashi Nishitsuji**, Takayuki Takahashi, Yuki Nagahama, Satoki Hasegawa, Marie Sano, Ryuji Hirayama, Takashi Kakue, Atsushi Shiraki, and Tomoyoshi Ito, “Computational ghost imaging using deep learning,” *Optics Communications* 413, 147-151 (2018.4).
- 9) Takashi Kakue, Yutaka Endo, **Takashi Nishitsuji**, Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito, “Digital holographic high-speed 3D imaging for the vibrometry of fast-occurring phenomena,” *Scientific Reports* 7, 10413 (2017.9).
- 10) Tomoyoshi Shimobaba, Yutaka Endo, Ryuji Hirayama, Yuki Nagahama, Takayuki Takahashi, **Takashi Nishitsuji**, Takashi Kakue, Atsushi Shiraki, Naoki Takada, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito, “Autoencoder-based holographic image restoration,” *Applied Optics* 56, F27-F30 (2017.2).
- 11) **Takashi Nishitsuji**, Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, and Tomoyoshi Ito, “Review of Fast Calculation Techniques for Computer-generated Holograms with the Point Light Source-based Model,” *IEEE Transaction on Industrial Informatics* 13, 2447-2454 (2017.2).
- 12) **Takashi Nishitsuji**, Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, Daisuke Arai, and Tomoyoshi Ito, “Simple and fast cosine approximation method for computer-generated hologram calculation,” *Optics Express* 23, 32465-32470 (2015.12).
- 13) **Takashi Nishitsuji**, Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, and Tomoyoshi Ito, “Fast calculation of computer-generated hologram using run-length encoding based recurrence relation,” *Optics Express* 23, 9852-9857 (2015.4).

-
- 14) Takashi Nishitsui, Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito, "Fast calculation of computer-generated hologram using circular symmetry of zone plate," *Optics Express* 20, 27496-27502 (2012.11).
 - 15) Tomoyoshi Shimobaba, Jiantong Weng, Takahiro Sakurai, Naohisa Okada, Takashi Nishitsui, Naoki Takada, Atsushi Shiraki, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito, "Computational wave optics library for C++: CWO++ library," *Computer Physics Communications* 183, 1124-1138 (2012.1).
-

受賞者のプロフィール

技術部門 五十嵐 俊亮 氏（東京工業大学）

【抱負・コメント】

この度は大変栄誉ある HODIC 鈴木・岡田記念賞を賜りまして、誠にありがとうございます。これまでご指導頂きました先生方と研究室の皆様に心より感謝申し上げます。よりリアリティと解像度の高い計算機合成ホログラムの実現を目指に、多くの方々のご協力を経て研究に邁進しております。学部時代は 1cm 程度の立体像を作るのがやっとでしたが、現在は実物大の人間に挑戦できる程になりました。アナログホログラムに追いつき、追い越すようなホログラムを計算できるよう、今後も努力してまいります。

【略歴】

2015 年 3 月 東京工業大学 工学部電気電子工学科卒業

2017 年 3 月 東京工業大学 総合理工学研究科物理情報システム専攻修士課程卒業

2017 年 4 月 - 現在 東京工業大学 工学院情報通信系博士後期課程

2018 年 4 月 - 現在 日本学術振興会 特別研究員 DC2(現在に至る)

【主要な研究業績】

- 1) S. Igarashi, T. Nakamura, K. Matsushima, and M. Yamaguchi, "Efficient tiled calculation of over-10-gigapixel holograms using ray-wavefront conversion," *Optics Express* 26 (8), pp. 10773-10786 (2018).
- 2) S. Igarashi, K. Kakinuma, T. Nakamura, K. Ikeya, J. Arai, T. Mishina, K. Matsushima, M. Yamaguchi, "Computer-generated holograms of a life-size human captured from multi-viewpoint cameras," *Digital Holography & 3-D Imaging* (2019).
- 3) S. Igarashi, T. Nakamura, K. Matsushima, and M. Yamaguchi. "Reconstruction of realistic 3D images using over-10-gigapixel computer-generated holograms," 11th International Symposium on Display Holography (2018).
- 4) 五十嵐俊亮, 中村友哉, 松島恭治, 山口雅浩, "大型の 3D 室内空間を再生する計算機合成プログラムの計算法," ホログラフィック・ディスプレイ研究会, 38 (3), pp. 6-9 (2018).
- 5) S. Igarashi, T. Nakamura, K. Matsushima, and M. Yamaguchi, "GPU acceleration of hologram calculation using an orthographic ray-sampling plane," 7th Japan-Korea

- Workshop on Digital Holography and Information Photonics pp. 20-39 (2017).
- 6) S. Igarashi, T. Nakamura, K. Matsushima, and M. Yamaguchi, "Continuous Tiling Fresnel Diffraction and Its Application to over 10-Gigapixel Computer-Generated Holograms," 24th Congress of the International Commission for Optics (2017).
 - 7) 五十嵐俊亮, 中村友哉, 石井勢津子, 松島恭治, 山口雅浩, "計算機合成ホログラムにおける視点移動に伴う視覚効果"ホログラフィック・ディスプレイ研究会, 37 (3), pp. 2-5 (2017).
 - 8) S. Igarashi, T. Nakamura, K. Matsushima, and M. Yamaguchi, "3D physically based rendering of computer generated holograms by orthographic ray sampling," OPIC2017 Information Photonics (2017).
 - 9) S. Igarashi, T. Nakamura, and M. Yamaguchi, "Fast method of calculating a photorealistic hologram based on orthographic ray-wavefront conversion," Optics Letters 41 (7), pp. 1396-1399 (2016).

受賞者のプロフィール

技術部門 國枝 織絵 氏 (関西大学)

【抱負・コメント】

栄誉ある HODIC 鈴木・岡田記念賞の技術賞をいただくことができ、大変光栄に思います。私の研究は元々先輩から引き継いだものであり、長い間問題が解決できず停滞していました。そんな中で私がこれまで研究成果をあげることができたのは、アドバイスを下さった教授や先輩方、友人達のお陰であると感じています。今後は一層研究に励み、フルカラーホログラムの高品質化や大型化、形状の複雑化などの視覚的な発展を目指し、ホログラム映像技術の普及に向けて邁進したいと思います。

【略歴】

2014 年 4 月 関西大学システム理工学部電気電子情報工学科 入学

2018 年 3 月 関西大学システム理工学部電気電子情報工学科 卒業

2018 年 4 月～現在 関西大学理工学研究科システム理工学専攻電気電子情報工学
分野前期課程

【主要な研究業績】

- 1) O. Kunieda, H. Nakao, K. Matsushima: "Full-color CGHs created by stacking monochromatically-transferred volume CGHs," International Symposium on Display Holography 2018 (ISDH2018), Aveiro (Portugal), (2018).
- 2) 國枝織絵, 松島恭治 "フルカラー積層体積型 CGH における基板収差の補正," HODIC Circular 38, No. 2(2018)
- 3) O. Kunieda, K. Matsushima: "Stacked-volume CGH: A novel technique to create full-color CGHs," HODIC in Taiwan5, Tainan (Taiwan), (2018).

ホログラムの工業標準の使い方

How to use Industry Standards for Holograms

高橋 進

Susumu Takahashi

凸版印刷（株） 新事業開発本部 ビジネスイノベーションセンター
New Business Development Division, Toppan Printing Co.,Ltd.

Abstract:

Work on industrial standards for holograms started in 2001 with a discussion on standardization of hologram measurement methods at the Future Hologram Study Committee in HODIC. In 2011, 2 standards were established, and in 2015, the international standard ISO was established.

Here, the background of the need for an industrial standard for holograms and points to be noted in using these two industrial standards will be described.

1. はじめに

ホログラムの工業標準に関する取り組みは、2001年にスタートしたHODIC内のホログラム将来検討委員会でのホログラムの測定方法の標準化についての議論にはじまり^{1,2)}、2006年のホログラムJIS素案作成委員会、2008年の「ホログラムの光学的特性測定方法」に関する工業標準原案作成委員会³⁾での原案の作成を経て、2011年にJIS Z 8791:2011とJIS Z 8792:2011の2件の規格に制定⁴⁾、さらに2015年に国際規格であるISOの制定に至った⁵⁾。(ISO 17901-1:2015, ISO 17901-2:2015)

ここでは、ホログラムの工業標準が必要とされた背景と、この2件の工業標準を使用するうえで注意すべきポイントについて説明する。

2. 標準（規格）とは

日本工業規格における標準（規格）の定義⁶⁾は、

- (1) 最適な秩序を達成することを目的に,
- (2) 共通的に繰り返して使用するために,
- (3) 活動又はその結果に関する規則、指針又は特性を規定する文書であって,
- (4) 合意によって確立し、一般に認められている団体によって承認されているもの。とされている。

例えば、トイレットペーパーは、日常生活でどこのメーカーの商品を買っても

ホルダーに取り付けることが出来るが、これは中央の穴の直径が38mmで、巻取りの径が120mmと決められているからである⁷⁾。（ちなみに100秒以内に水にとけるという決まりまでも記載されている。）このように市場に流通する製品は、様々な標準化を進めることで効率のよい経済活動や研究活動を可能にしている。

一方、ホログラムにおいてホログラムの明るさを示す指標として用いられている回折効率には様々な測定方法が存在する。このことは、回折効率の測定法を揃えなければ、回折効率の高いホログラムより回折効率が低いホログラムの方が明るい場合が生じてしまうし、製品仕様書に回折効率が書かれていたとしても、どの測定方法で測定された回折効率であるかが記載されていないと、望む性能のホログラムであるかは製品を手にするまではわからないことを示している。

また、ホログラムを干渉露光によって作製する際、そこで用いる記録材料の感度はホログラムを作製する際に重要なパラメータとなるが、その感度の測定方法がまちまちであると、結局は撮影するたびに条件だしを行なう必要が生じてしまう。

このようにホログラムを産業として広めるためには標準化が必要であり、この考え方から作られたホログラムの規格がJIS Z 8791:2011とJIS Z 8792:2011である。JIS Z 8791ホログラムそのものの標準に関するもの、JIS Z 8792がホログラム向け記録材料の標準に関するものになっている。

3. ホログラムの標準

JIS Z 8791では、ホログラムの回折効率、角度選択性、波長選択性について説明している⁸⁾。

回折効率は、ホログラムの方式や目的によって回折効率を使い分けるように絶対回折効率、相対回折効率、分光反射回折効率、分光透過回折効率の4つを説明している。

絶対回折効率は、入射する光に対する再生波の比を表し、ホログラムの材料による光の吸収や表面反射などの光の損失も含めた効率を示すもので、主にホログラムを

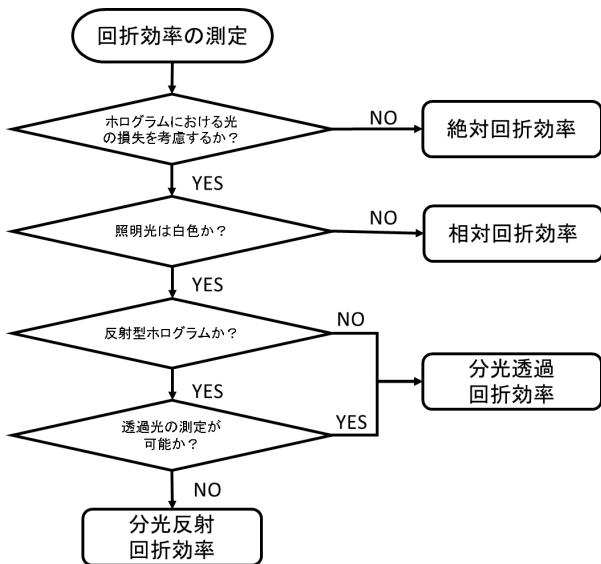


図1 回折効率測定法の選び方

デバイスとして使用する立場で評価する際に用いる。

相対回折効率は、ホログラムによる光の吸収や表面反射などの光の損失を除いた（考慮した）うえで効率を計算したもので、主にホログラムの構造そのもののもたらす影響を評価する際に用いる。

分光透過回折効率と分光反射回折効率は、主に波長選択性のある厚いホログラムの評価に用いられ、後述する波長選択性と合わせてホログラムの明るさが判断される。厚いホログラムの場合、一般には分光透過回折効率を用いるが、ホログラムの構造によって、透過光束の測定が出来ない場合、分光反射回折効率を用いる。

この使い分けをフロー化したものを図1に示すので参考にして頂きたい。なお、分光反射回折効率は材料の光損失も含めた効率ではあるが、誤差が出やすい測定法であるため、厳密な光の利用効率の測定には適さないとの考え方から、あえてこの位置に配置した。このフローは回折効率の使い分けの一般的な考え方を示したものであり必ずしも縛られる必要はないが、どの回折効率測定法を用いたかについては必ず回折効率の値と合わせて記載しなければならない。

厚いホログラムに関しては、回折効率に合わせて角度選択性、波長選択性についても規格に記載されている。これは、厚いホログラムの場合に、照明波の入射角度や照明波の波長によって回折効率が変わるためにある。

厚いホログラムを白色光で照明した場合、そのホログラムの明るさは分光透過回折効率と波長選択性の半値幅の積によって判断することができる。また、再生像の色、鮮銳さも波長選択性に依存する。

4. ホログラム用記録材料の標準

JIS Z 8792 では、ホログラム記録材料の記録特性を示す露光特性曲線、半値露光量、R 値、屈折率変調量について説明している⁹⁾。

ホログラム記録材料の記録特性を測定する前に、目的や用途を明確にしたうえで、以下の項目を予め決定する。

1. 使用するレーザーの波長
2. 反射型か透過型か
3. 想定される干渉縞の空間周波数（縞の間隔の逆数）

上記の条件によってホログラムを記録する際の露光条件が異なることがあるため、複数の使い方が想定される場合は、都度上記の条件を変えて記録特性を測定することが望ましい。撮影方法などの詳細情報は本規格に詳細に記載してあるので参照していただきたい。

半値露光量と R 値は、本規格で新しく取り入れた記録材料の記録特性であり、その規格が作られた背景・目的について説明する。

半値露光量は、露光特性曲線において最も高い回折効率の半分の回折効率が得る露光量であり、ホログラムの記録材料の感度を表す尺度である（図 2 参照）。これは露光量に対して回折効率が飽和した場合、最大回折を示す露光量の決定が難しいことから取り入れた概念である。この半値露光量は、露光量を決定する目安の一つに過ぎず、必ずしも最適な露光量を示すものではないことに注意が必要である。

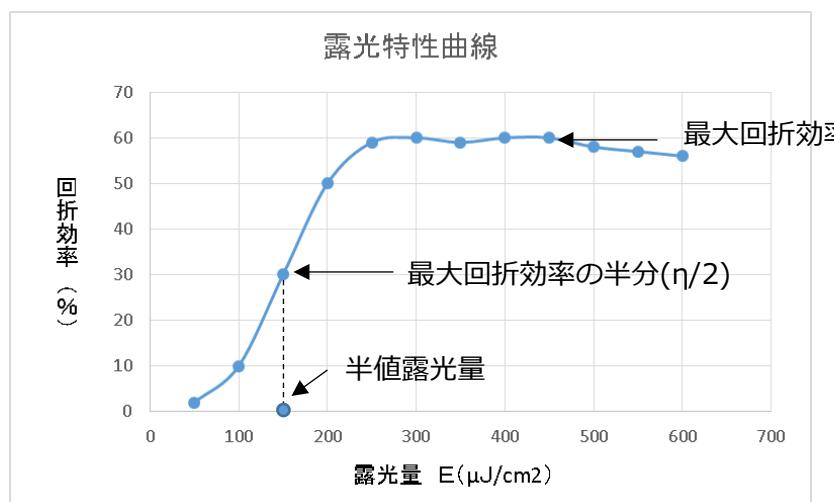


図 2 露光特性曲線と半値露光量

R 値は、ホログラムの記録材料の解像力を示す指標である。ホログラムの記録材料には微細な干渉縞を記録する必要があることから、高い解像力が求められる。しかしながら記録材料によっては、5000 本/mm のパターンの記録には適しているが、500 本/mm のパターンの記録には適していない材料もある。そこで目的や用途に応じて、最適な材料が選択できるように空間周波数に対するホログラムの応答（回折効率）を示すこととした。なお、R 値で用いられる空間周波数は記録材料位置での空気中 ($n=1.0$) の干渉縞の空間周波数を示すものであり、記録材料内の干渉縞の空間周波数ではないことに注意して欲しい。

例えば平均屈折率 $n=1.5$ の記録材料に対して、波長 $\lambda=514.5\text{nm}$ のレーザー光を用いて参考波の入射角 $\theta_1=180$ 度、物体波の入射角 $\theta_2=45$ 度の角度で入射したとする。この場合、材料内の干渉縞の空間周波数 ν は 5656 本/mm であり、空気中の空間周波数 ν_{air} は 3591 本/mm となる。この時の分光透過回折効率が 60% で

あった場合、R (3591) =60 と表すことになる。

5. 日本工業標準の入手

日本の工業標準は、日本規格協会から購入できる。

<https://webdesk.jsa.or.jp/>

また日本工業標準調査会の HP から無料で閲覧することができる。

<http://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISSearch.html>

6. 今後の期待

JIS 規格が出来て 8 年ほどたっているが、まだ十分に活用されているとは言い難い。本報告をきっかけにし、ホログラムの二つの規格を産業活動や研究活動に活用することで、ホログラム技術が様々な分野に水平展開されることを期待したい。

また、今回紹介したホログラムの二つの規格は、ホログラムを評価するうえで最低限の光学評価についてまとめたものにすぎない。3 次元の像再生の品質に関する標準化や拡散物体を撮影における評価方法の標準化など、必要とされる規格はまだ存在する。ぜひ、我々の志を引き継いで頂くことを切に願う。

7. 参考文献

- 1) 高橋進," ホログラム分野における規格化・標準化メンバーの募集", HODIC Circular Vol.21 No.4(2001)
- 2) 谷川英夫," 卷頭言:ホログラフィの標準・規格化", HODIC Circular Vol.23 No.4 (2003)
- 3) 福田隆史," 卷頭言:ホログラム光学特性評価の標準化", HODIC Circular Vol.29 No.4 (2009)
- 4) 久保田敏弘他,“ホログラム関連の規格（JIS）制定のお知らせ”, HODIC Circular Vol.31 No.1 (2011)
- 5) 吉川浩,”卷頭言：ホログラム光学特性評価の国際標準化”, HODIC Circular Vol.35 No.2 (2015)
- 6) 日本工業規格 JIS Z 8002(2006).
- 7) 日本工業規格 JIS P 4501(1993).
- 8) 日本工業規格 JIS Z 8791(2011).
- 9) 日本工業規格 JIS Z 8792(2011).

ホログラムの画質評価と国際標準化の動向

Image quality evaluation and trends in international standardization of holograms

吉川 浩

日本大学理工学部

Hiroshi Yoshikawa

College of Science & Technology, Nihon University

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

1. はじめに

計算機合成ホログラム (CGH)^{1, 2, 3)} は 2 次元画像や 3 次元データなどからホログラムの干渉縞を生成するものであり、ディスプレイなどに広く利用されている。これまでに多数のモデルや計算方法が提案されており、静止画や動画の出力装置としても数多くの提案がなされている。また、最近では高画質を目指した計算法や出力方法も提案されている。しかし、異なるホログラムを比較しようとした時に、評価方法の国際標準等は存在しておらず評価者の主観的評価によるものが一般的である。本文では、これまでに試みられてきた評価法と筆者の最近の客観的評価に向けた研究を紹介する。また、最近の国際標準化に向けた活動などを紹介する。

2. ホログラムの画質評価

ホログラムの画質評価は、通常は他のホログラムとの比較により観察者の主観で判定されている。例えば、干渉縞データを不可逆圧縮して展開したホログラムの再生像を、評定尺度法による妨害評価による主観評価⁴⁾ が行われた。この方法では、観察者に対して非圧縮の画像を提示したのちに評価画像を提示し、劣化が認められるかどうかを 5 段階で主観的に評価を行う。客観的な画質評価法としては、元画像と評価画像の誤差を信号対雑音比 (SN 比) もしくはピーク信号対雑音比 (PSNR) で表す方法がよく用いられている⁵⁾。3 次元の SN 比として体積信号対雑音比 (VSNR) が提案されている⁶⁾。その他の客観的評価の指標としては、コントラスト、クロストーク、色分散および均一性などが評価されている⁷⁾。

著者のグループによるこれまでの研究では、輝度 (回折効率) と SN 比もしくは構造的類似度 (SSIM) を用いて振幅型と位相型のフーリエ変換ホログラムの画質の客観的評価を試みた。その結果、振幅型では輝度は低いが PSNR が高く再生画像の忠実度が高い⁸⁾ のに対し、位相型では輝度は振幅型の 10 倍程度はあるが再生画像の忠実度が低くなる⁹⁾ ことが明らかになった。また、ホログラムの計算において複素数の計算ではなくて実数で計算すると物体光の自己干渉成分を取り除いて高画質の計算ができることが経験的に知られていたが、そのことを客観的評価により明らかにすることができた。ホログラムの再生像を明るくするために、画質は低下するが干渉縞を非線形変換してコントラストを上げることが有効であることが経験的に知られている¹⁰⁾。

このことも、振幅型フーリエ変換ホログラムに対して折れ線変換を行うことで高い忠実度を維持したままで輝度を 2 倍以上上げられることを客観的評価により示すことができた^{11, 12)}。この評価においては、PSNR ではなく SSIM で忠実度を評価した。2 次元の画質評価では、PSNR が常に人間の視覚を忠実に反映しているわけではないことが知られている。人間の視覚は構造情報の抽出に適合しているため、SSIM は知覚画像品質を評価するための客観的方法として提案されている¹³⁾。SSIM による客観的評価の有効性を検証するために、妨害評価による主観評価 (DMOS: Degradation Mean Opinion Score) との比較を行った結果を図 1 に示す。

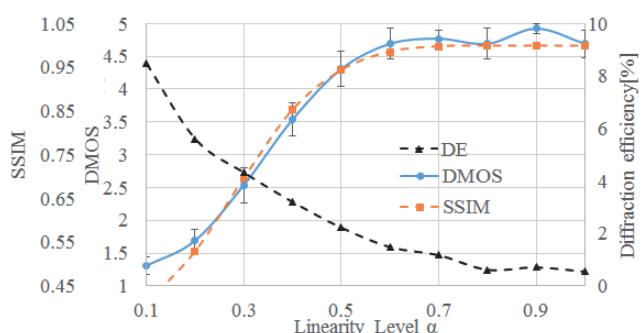


図 1 振幅ホログラムの非線形変換に対する回折効率 (DE)、構造的類似度 (SSIM)、主観評価値 (DMOS) の変化

振幅型ホログラムを非線形変換により再生像の忠実度を制御し、主観評価により画像の劣化が気にならない評定値4以上となる範囲と、SSIMで高忠実度の目安となる0.9以上となる範囲がほぼ一致した結果、SSIMによる客観的評価が有効であることが確認できた^{14, 15)}。一連の研究で検討している位相ホログラムは、光学的に記録した銀塩ホログラムを漂白するモデルであり、干渉縞の光強度に比例した位相変化を与えている。CGHではその他のモデル、例えばキノフォーム¹⁶⁾のようにホログラム面での振幅を一定と仮定して位相のみを用いる方法では、位相分布を繰り返し処理で最適化することにより極めて忠実度の高い再生像が得られることが明らかになった¹⁷⁾。ただし、この方法では最適化計算を50回以上繰り返す必要があり、実時間表示のためには他の方法を検討しなければならない。これらの研究はフーリエ変換ホログラムであるため2次元画像としての画質評価である。今後はVSNRのような3次元的な評価も検討していく予定である。

3. 國際標準化の動向

ホログラムに関する国際標準としては、HODIC有志の活動からスタートした回折効率等の国内規格JISを発展させて国際規格のISO(国際標準化機構)化を行った^{18, 19)}。回折効率はホログラムの重要な特性であるが、画像としてのホログラムの国際規格についてはこれといったものは制定されていない。3次元ディスプレイの標準化を検討しているグループがホログラムについても検討しているという情報はあったものの、具体的な活動は明らかではなかった。

そんな中で、静止画像の符号化で有名なJPEGの規格を制定したグループが新領域の探求として2014年に調査を開始したJPEG Pleno²⁰⁾が、ホログラフィ²¹⁾も含めた国際規格を検討しているとの情報を得た。JPEGはISOとIEC(国際電気標準会議)が合同して情報分野の標準化を検討する第一合同技術委員会(JTC 1)の第29副委員会(SC 29)の第一作業グループ(WG 1)である。合同静止画専門家グループの英文名称Joint Photographic Experts Groupの略称で、同時に規格の名称にもなっている。ちなみに、JPEG Plenoのplenoとは「すべて」を意味するラテン語のplenusに由来し、plenopticは「ある空間に存在する全ての光線を扱う光学」としてライトフィールドと同義語としても用いられる。JPEG Plenoでは、ホログラムやライトフィールドに加えポイントクラウドのデジタルデータの不可逆圧縮と展開後の画質評価等について検討し、国際標準化を目指している。ホログラムに関しては、既に製品が発売されているデジタルホログラフィック顕微鏡(DHM)のデジタルデータの不可逆圧縮・展開と評価を最初のターゲットとしているようである。DHMでは、位相シフト法などによりホログラム面での物体光の複素振幅が求められることから、対象としているデジタルデータは複素振幅もしくは振幅と位相で表現されたデータが標準と考えられているが、ホログラフィックディスプレイの研究者にとっては実数の干渉縞データに親しみがあるので、複素表現には違和感を感じる。画質評価については、ホログラムおよび再生像の双方に対して検討されている。ホログラム画像の特徴として、例えば干渉縞の輝度値が反転しても再生像は不变なので、符号化し複合化したホログラムが元のホログラムと違っていても、再生像がそれに比例して変化するとは限らないので、あくまでも再生像に対しての評価を重視するべきである。ただし、ホログラムは2次元画像なので従来の評価方法が適用できるが、再生像が3次元の場合はそれに適した評価方法を検討しなければならない。DHMの場合はホログラムから任意の距離だけ離れた面での再生像を計算により求めることが一般的なので、VSNRの様に多層断面での元データと複合データの比較が有効である。ただし、この多層面データは例えばホログラフィックビデオディスプレイで視覚的に観察される像とは異なるので、ディスプレイ用途の場合は他の評価方法も検討する必要がある。また、現時点での再生像の評価はDHMのため光学再生像ではなく、計算機による再生シミュレーション像であるため、再生計算の方法等も検討の対象となっている。

すでに商業化されているホログラフィックステレオグラムプリンタや研究の進むCGH用ホログラフィックプリンタ、さらにはホログラフィックビデオディスプレイなどに関してはまだ調査段階である。

4. むすび

本文では、ホログラムの再生像の客観的な画質評価について、筆者の最近の研究を中心に紹介した。指標としては、回折効率とピーク信号対雑音比(PSNR)もしくは構造的類似度(SSIM)を用いて原画像との比較を行ない、主観評価と同様の傾向が得られた。今後は、体積信号対雑音比(VSNR)など3次元像としての評価も行っていきたい。

また、ホログラムの画質評価の国際標準化の活動としてJPEGにおける活動を紹介した。この活動はまだ初期の段階であるので、有用な国際規格となるように協力を行っていきたい。

本研究はJSPS科研費JP16K00282の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Lohmann, A. W. and Paris, D. P., "Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer," *Applied Optics* **6**, 1739–1748 (10 1967).
- 2) Waters, J. P., "HOLOGRAPHIC IMAGE SYNTHESIS UTILIZING THEORETICAL METHODS," *Applied Physics Letters* **9**, 405–407 (12 1966).

- 3) Yoshikawa, H., "Computer-Generated Holograms for White Light Reconstruction," in [*Digital Holography and Three Dimensional Display*], Poon, T.-C., ed., ch. 8, 235–255, Springer (2006).
- 4) 佐々木, 丹治, 吉川, "ホログラフィック 3 次元画像の情報圧縮," テレビジョン学会誌 **48**(10), 1238–1244 (1994).
- 5) Buckley, E., "Real-Time Error Diffusion for Signal-to-Noise Ratio Improvement in a Holographic Projection System," *Journal of Display Technology* **7**, 70–76 (2 2011).
- 6) Suzuki, K. and Sakamoto, Y., "Measurement method for objective evaluation of reconstructed image quality in CGH," in [*Proceedings of SPIE*], Bjelkhagen, H. I. and Bove, V. M., eds., 864412–864412 (3 2013).
- 7) Seo, W., Song, H., An, J., Seo, J., Sung, G., Kim, Y.-T., Choi, C.-S., Kim, S., Kim, H., Kim, Y., Kim, Y., Kim, Y., Lee, H.-S., and Hwang, S., "Image Quality Assessment for Holographic Display," in [*Electronic Imaging: Image Quality and System Performance XIV*], 186–190 (1 2017).
- 8) Yoshikawa, H. and Yamaguchi, T., "Image Quality Evaluation of a Computer-Generated Hologram," in [*Digital Holography & 3-D Imaging Meeting*], **2**, DT2A.8, OSA, Shanghai, China (2015).
- 9) Yoshikawa, H. and Yamaguchi, T., "Image Quality Evaluation of a Computer-Generated Phase Hologram," in [*10th International Symposium on Display Holography*], 4–4, 10th ISDH Committee, Saint Petersberg (2015).
- 10) Nakaguchi, Y., Yamaguchi, T., and Yoshikawa, H., "Image quality improvement of large size image type computer-generated hologram," in [*The 2012 International Workshop on Advanced Image Technology*], 572–575 (2012).
- 11) 植竹, 吉川, 山口, "構造類似度を用いた計算機合成ホログラムの客観的評価方法の検討," *HODIC Circular* **36**(3), 7–10 (2016).
- 12) Uetake, H., Yoshikawa, H., and Yamaguchi, T., "Image quality evaluation and control of computer-generated hologram with structural similarity index," in [*International Workshop on Advanced Imaging Technology*], 1C–1 (2017).
- 13) Wang, Z., Bovik, A., Sheikh, H., and Simoncelli, E., "Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity," *IEEE Transactions on Image Processing* **13**, 600–612 (4 2004).
- 14) 植竹, 吉川, 山口, "計算機合成ホログラムにおける客観的評価方法の妥当性検証," *HODIC Circular* **37**(3), 26–29 (2017).
- 15) Yoshikawa, H., Yamaguchi, T., and Uetake, H., "Validation of objective image quality evaluation for computer-generated hologram," in [*Practical Holography XXXII: Displays, Materials, and Applications*], Bjelkhagen, H. I. and Bove, V. M., eds., 105580F, SPIE (2 2018).
- 16) Lesem, L. B., Hirsch, P. M., and Jordan, J. A., "The Kinoform: A New Wavefront Reconstruction Device," *IBM Journal of Research and Development* **13**, 150–155 (3 1969).
- 17) Yoshikawa, H., Yamaguchi, T., and Uetake, H., "Image quality evaluation and control of computer-generated holograms," in [*Proc. SPIE*], Bjelkhagen, H. I. and Bove, V. M., eds., 97710N (3 2016).
- 18) International Organization for Standardization, "Optics and photonics – Holography – Part 1: Methods of measuring diffraction efficiency and associated optical characteristics of holograms ISO 17901-1:2015," (2015).
- 19) International Organization for Standardization, "Optics and photonics – Holography – Part 2: Methods for measurement of hologram recording characteristics ISO 17901-2:2015," (2015).
- 20) Ebrahimi, T., Foessel, S., Pereira, F., and Schelkens, P., "JPEG Pleno: Toward an Efficient Representation of Visual Reality," *IEEE Multimedia* **23**, 14–20 (10 2016).
- 21) JPEG, [JPEG Pleno Holography], <https://jpeg.org/jpegpleno/holography.html>.

線形予測による干渉縞の無損失圧縮方法
Lossless Compression Applying Linear Predictive Coding Based on
Directionality of Interference Patterns

金惠炫 玉川恒平 坂本雄児

Kim Duk Hyun, Kohei Tamagawa, Yuji Sakamoto

Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

This paper proposes lossless linear predictive coding based on the directionality of the interference patterns of a hologram. We approached this study from two aspects. First, to determine the directionality of the interference patterns, we performed differential pulse coding modulation (DPCM), segmenting interference patterns into n blocks and scanning the pixels in eight directions for each block. Then, we determined the direction that has the minimum entropy, calculating entropy in each direction. Lastly, we encoded the difference by DPCM. Second, we attempted the linear prediction using the prediction coefficients for the determined direction by the first process, and encoded it. Experimental results showed that the compression rate of 26.7% could be obtained through the first process.

1. はじめに

デジタルホログラムの放送サービスを実現するために、圧縮プロセスは必須である。Matsushima らは、1枚のホログラムに対して $0.8 \times 0.8 \mu\text{m}$ pixel ピッチで $65,536 \times 65,536$ pixel の高解像度ホログラムを実現させた[1]。このような膨大なデータの効率的な保存及び、伝送において限られた伝送帯域幅のために圧縮技術は必要である。

圧縮符号化は損失圧縮と無損失圧縮に分けられ、無損失圧縮は大きく二つの過程を経る。一番目は、アルゴリズムが復元可能な範囲内でエントロピーが最小化になるようデータを表現、二番目は、表現したデータに対してエントロピーに最も近接したビット率を持つよう符号化する過程である。しかし、2D画像の場合、輝度値が徐々に変化する一方、ホログラムの場合、2~4 pixel の周期で輝度値変化の幅が大きく現れる。また、speckle noise の発生は、現れる信号と相関性が大きく落ちるので、エントロピーを増加させ、無損失圧縮法の効率が落ちる原因となった[2]。

本論文では、computer-generated hologram(CGH)で生成したホログラムに対して無損失圧縮の効率を高める方向性基盤予測符号化法を提案する。

2. ホログラムでの圧縮アルゴリズム

2D画像と比較してホログラムの圧縮アルゴリズムは相対的に多くの研究が行われておらず、研究されたアルゴリズムとしても主に損失圧縮について進められてきた。ホログラムで損失圧縮として主に使用されたアルゴリズムは、JPEG、JPEG2000 及び vector quantization が挙げられる。Darakis と Soraghan は、光学的に記録したデジタルホログラムに対して JPEG と JPEG2000 圧縮技法の効率性について提案した[3]。[3]の提案手法は、広い範囲に渡る圧縮率によって拡張的な流動性を提供したが、speckle noise の発生により、かなりの画質劣化が観察された。また、Tsang [4]は、

vector quantization を適用する損失圧縮アルゴリズムを提案し、1600 : 1 の高い圧縮比を達成した。しかし、スペックルノイズの発生に起因する激しい画質劣化が観察された。このように損失圧縮は、情報の削除によって高い圧縮率を提供するが、それによる画質劣化及びノイズの発生を伴う。したがって、ホログラムに損失圧縮を適用する前に使用目的を明確に定義する必要がある。

ホログラムの無損失圧縮手法については、これまで研究が行われていなかった。その理由として、データの発生頻度を統計的に分析し、codeword を作る Huffman 符号化あるいは頻繁に登場するデータをパターンにして出現するデータとパターンをマッチングする辞書基盤のアルゴリズムである LZW などは、ホログラムの特性に適合していないためである。ホログラムでデータ変化の幅が激しく、またスペックルノイズの発生は、エントロピーをむしろ増加させることにより、無損失圧縮アルゴリズムの研究に困難があった。

3. 提案手法

3.1 干渉縞の方向性

方向性は二つの方式で解釈可能である。一つ目は干渉縞上に存在する方向性を見つけることであり、もう一つは、ランダム性の強い領域でエントロピーが最小となる方向へ pixel 当たり最小ビットを得るものである。そこで、干渉縞の方向性に着目し、干渉縞の方向性が存在すれば、方向に沿って隣接した pixel の間には高い相関度を持ち、したがって方向に沿って pixel 間冗長性除去によって高い圧縮率の達成が可能であると仮定した。方向性を探すためにブロックサイズ内に 8 つのスキャン方向を設定し、最小エントロピーを持つ方向をそのブロックを代表する方向に選択した。図 1 は、ブロックの方向性を示している。

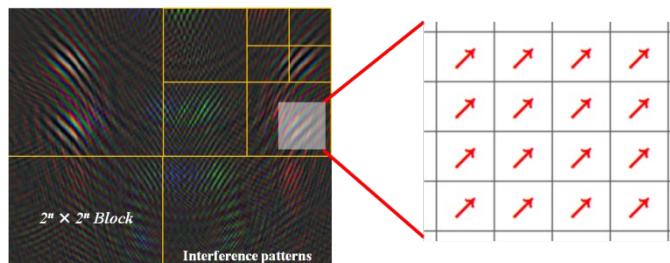


図 1. 干渉縞の方向性

3.2 Differential pulse coding modulation(DPCM)

DPCM は差分予測符号化手法であり、各 pixel の輝度値が前の pixel の輝度値で予測されるという原理に基づき、二 pixel の差のみを符号化する方法である[5]。予測プロセスは、次の式によって行われる。

$$e_i = x_i - \tilde{y}_i = x_i - x_{i-1} \quad (1)$$

ここで、 x_i は現在の信号、 x_{i-1} は前の信号、 \tilde{y}_i は予測値、 e_i は現在の信号と前の信号との差分である。DPCM は pixel 間の冗長性を除去して dynamic range を減らすことにより、優れた圧縮率を得ることが可能である。提案手法として 8 つのスキャン方向に沿って DPCM を適用し、エントロピーの計算を通して最小エントロピーを持つ方向を選択した。

3.3 2nd-order linear predictive coding、 $a_n(n=2)$

2 次線形予測手法は、DPCM を一層拡大させた方法で、現在の pixel 値を前の二つの pixel 値から予測する手法であ

る。予測プロセスは、次の式によって行われる。

$$\hat{e}_i = x_i - (2x_{i-1} - x_{i-2}) \quad (2)$$

係数 $a_1 = 2$ 、 $a_2 = -1$ であり、 a_1 、 a_2 は固定型として係数の記録が必要ではない。従って、圧縮されたファイルサイズが増加する問題は発生しないが、固定であるために予測が正確に行われない場合、圧縮性能が低下する欠点がある。

3.4 nth-order linear predictive coding (LPC)

n 次の線形予測手法は、予測係数を $a_{n(n \in [1, k])}$ まで拡張して一般化させた方法である[6]。予測係数 a_n は、以下の式から求められる。

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(y_n - \left(- \sum_{i=1}^k a_i y_{n-i} \right) \right)^2 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(y_n + \sum_{i=1}^k a_i y_{n-i} \right)^2 \quad (3)$$

予測係数は、元の pixel と予測値との誤差を最小化させる費用関数 E を定義し、 $\frac{\partial E}{\partial a_j} = 0$ に対して数学的に求めることが可能である。LPC の適用のための a_n について $n \leq \text{block size} / 2$ 、 $n \in N$ であり、 $a_n \in R$ である。 a_n で n がブロックサイズの半分を超えない理由に対し、trade-off の関係により n が増加するほど記録する a_n の数が増加し圧縮されたファイルサイズの増加を招くためである。LPC の予測プロセスは 3.1 節の DPCM によって決定された方向に行われ、予測された値と元の値との差分について符号化が進行される。図 2 は、予測プロセスについて説明している。これまでの提案手法に対するアルゴリズムの全体進行過程を図 3 に示す。

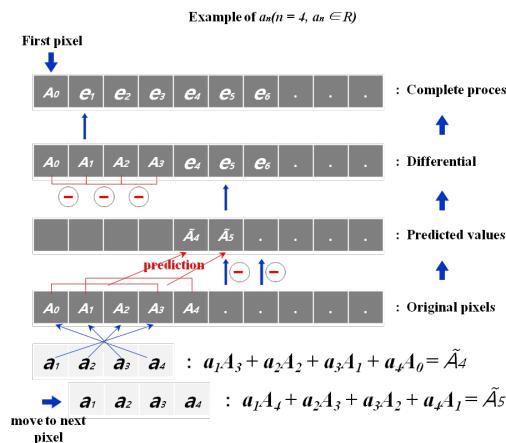


図 2. LPC の予測プロセス

4. 実験結果

実験に使用したホログラムは 4 種類 ("uniformity"、"normal"、"brown"、"pink") であり、それぞれの位相乱数調整を通して作成した[7, 8]。"uniformity" は任意の位置で位相の発生確率が統計的に均一であることを意味する。"normal" は位相発生が Gaussian 分布に従い、"brown" と "pink" は空間周波数 f がそれぞれ $1/f^2$ 、 $1/f$ に従うことを意味する。使用されたホログラムのファイルサイズは 2.95MB であり、 1280×768 pixel、フルカラー (8bit × 3) である。全体の圧縮結果を表 1 に示した。提案手法との比較のために Huffman 符号化、Run-length 符号化及びブロック分割をしていない raster scan のみを適用した DPCM 圧縮結果を挿入した。圧縮率の計算は次の式で定義し、パーセンテージ

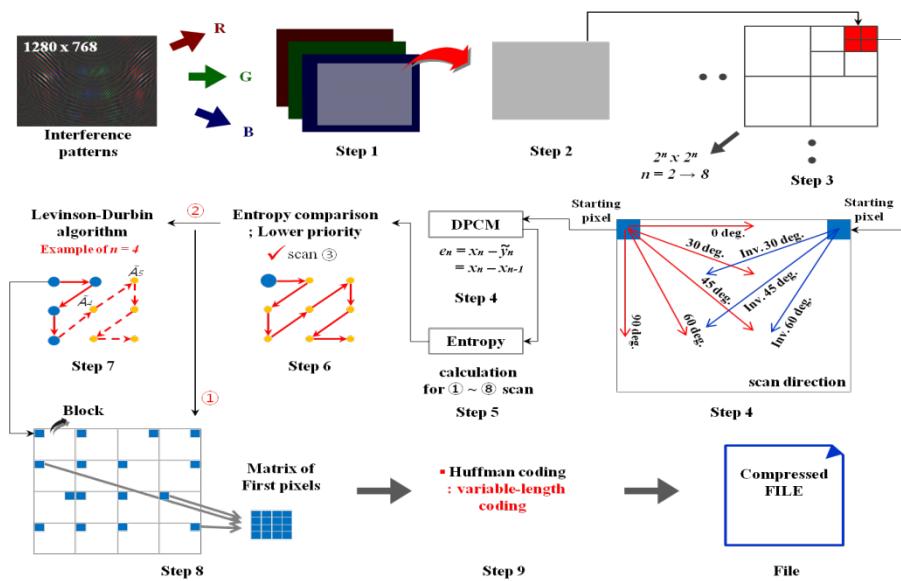


図3. 全体プロセス

が低いほど優れた結果を表す。

$$CR(\%) = \frac{\text{compressed size}}{\text{uncompressed size}} \times 100 \quad (4)$$

提案手法の圧縮率は、全体的に 27~36% の範囲で現れ、比較として挿入された他の無損失圧縮法よりも約 13~20% 減少したことがわかる。この結果として、方向性に基づいた無損失圧縮がより優れていることがわかる。

線形予測結果で、8 つの方向に対して a_2 と a_{16} の結果から a_{16} の場合が予測性能が優れていることがわかる。 a_2 の結果は、全体の圧縮結果で最も高い圧縮率を示し、固定係数により変化が激しいホログラムデータに対して予測がうまく行われなかつた。一方、 a_{16} は a_n 係数記録量（約 200KB）を除けば、非常に優れた圧縮率を示している。しかし、無損失圧縮法であるため、復元のための係数記録が欠点として作用する。

Kind	Uniformity	Normal	Brown noise	Pink noise
Info.				
Best block ($W \times H$)*		32 x 32		
4-directions(DPCM)	33.7% (99KB)	27.5% (810KB)	27.8% (819KB)	30.4% (896KB)
8-directions(DPCM)	33.6% (990KB)	26.7% (787KB)	27.1% (799KB)	30.1% (888KB)
8-directions(a_2)	36.8% (1,085KB)	29.5% (871KB)	29.9% (882KB)	33.2% (978KB)
8-directions(a_{16})	34.4% (1,015KB)	27.7% (818KB)	28.2% (831KB)	31.1% (917KB)
DPCM + Huff.	46.3% (1,366KB)	39.5% (1,164KB)	49.8% (1,173KB)	42.7% (1,259KB)
Huffman	53.0% (1,562KB)	45.3% (1,335KB)	45.6% (1,344KB)	49.1% (1,449KB)
Run-length	50.3% (1,484KB)	48.1% (1,417KB)	47.8% (1,409KB)	48.8% (1,440KB)

* 'Best block' means the best result of any blocks

表1. 圧縮結果

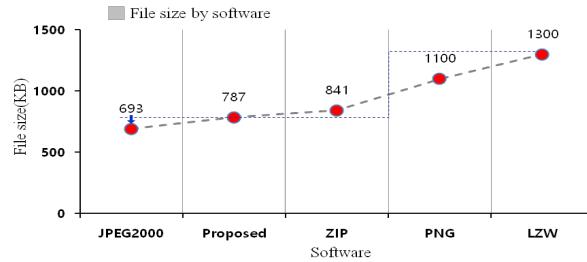


図4. 商業 software とのファイルサイズ比較(normal)

図4は、無損失圧縮と関連した商業softwareとの比較結果を示す。結果から、他のsoftwareより優れた結果を示したが、JPEG2000と約90KBの差が存在する。しかし、JPEG2000と単純なファイルサイズの比較よりデータを処理する圧縮アルゴリズムの観点から考える必要がある。JPEG2000の場合、色空間の相関度及びブロック分割に最適化されたEBCOTアルゴリズムが適用され、また、符号化のためのbit-plane基盤の4つのエントロピー符号化を行う。一方、提案手法は、ホログラムの特性を生かした方向性に基づく予測符号化のみが適用されている。したがって、このような点を勘案した時、JPEG2000と比べファイルサイズのわずかな差が存在するが、提案手法の性能向上の余地も十分にある。

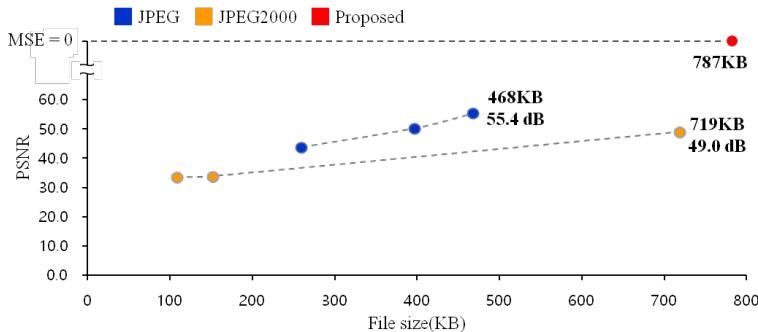


図5. 損失圧縮適用によるPSNR(normal)

図5は、JPEG及びJPEG2000アルゴリズムを利用した損失圧縮の適用によるPSNRの結果を示す。提案手法は無損失圧縮であるため、MSEが0になる。損失圧縮でJPEGは、提案手法と比べPSNR 49dBに約70KBのファイルサイズの減少が行われた。また、JPEG2000の場合、PSNR 55.4dBに300KB程度減少した。PSNR 40dB以上の観点から、損失圧縮の効率は優れているが、損失圧縮とファイルサイズを比較すると、かなり大きな差は存在しない。また、ホログラムでPSNRは絶対的基準ではなく、40dB以上でも観察者によって影響が異なることを考慮すると、無損失圧縮が効率向上によって有望になることが期待できる。

5. 結論

ホログラムの干渉縞上に存在する方向性に基づき、方向に沿って予測符号化手法の適用を提案して従来の無損失圧縮より優れた圧縮率を達成した。予測符号化手法でLPCの予測性能は優れていたが、係数の記録のためにファイルサイズの増加をもたらした。したがって、計算コストを考慮したとき、4-directions(DPCM)と8-directions(DPCM)の

圧縮結果について大きな差がないことで 4-directions のアルゴリズムを適用しても十分であると判断される。また、損失圧縮との比較で極端に大きな差はないため、損失圧縮とほぼ同等のレベルに性能を向上させることにより、ホログラムにおける視野角の制限と画質劣化のような問題について解決可能である。今後無損失圧縮の性能向上に関する研究が必要である。

References

- [1] Y. TSUCHIYAMA and K. MATSUSHIMA, "Full-color image-scaled computer-generated holograms using RGB color filters," Opt. Express 25(3), 2016-2030 (2017).
- [2] T. J. Naughton, Y. Frauel, B. Javidi, and E. Tajahuerce, "Compression of digital holograms for three-dimensional object reconstruction and recognition," Appl. Opt. 41, 4124-4132 (2002).
- [3] E. Darakis and J. J. Soraghan, "Compression of interference patterns with application to phase-shifting digital holography," Appl. Opt. 45, 2437-2443 (2006).
- [4] P. Tsang, K. W. K. Cheung, and T.C. Poon, "Low-bit-rate computer-generated color Fresnel holography with compression ratio of over 1600 times using vector quantization [Invited]," Appl. Opt. 50(34), H42-H49 (2011).
- [5] C. C. Cutler, "Differential quantization of communication signals," US2605361_DPCM patent (1950).
- [6] D. O'Shaughnessy, "Linear predictive coding," IEEE Potentials, Vol. 7, 29-32 (1988).
- [7] K. Tamagawa, M. Mitobe, Y. Sakamoto, "Comparison of Influence of Phase Random Distribution on Speckle in Computer-Generated Hologram," 3D Image Conference, 1-4, (2018).
- [8] K. Tamagawa, M. Mitobe, Y. Sakamoto, "Simulating the effects of statistical characteristics of random phases on speckle noise in Computer-generated Hologram," Proc. SPIE 10944, 109440W (2019).

点群のベクトル量子化に基づく電子ホログラフィの圧縮伝送方式

西辻 崇[†] 細野 淳大[‡] 角江 崇[§] 下馬場 朋禄[§] 伊藤 智義[§] 朝香 卓也[†]

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

[‡]首都大学東京大学院 システムデザイン研究科 〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6

[§]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

E-mail: nishitsuji@tmu.ac.jp

あらまし 電子ホログラフィ方式による3次元映像システムにおいて、映像伝送に伴う情報量の膨大さは実用化に向けた課題の1つである。映像の記録媒体である計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram: CGH)は画像情報として扱えるが、空間周波数特性や連続フレーム間の冗長性等において一般的な動画像と性質が異なるため、既存の動画像圧縮手法を用いた効率的な圧縮は困難である。本研究では、3次元情報である点群を圧縮伝送し、受信側で高効率にCGHに変換する方式により、かかる課題の解決を図った。ベクトル量子化を用いた点群圧縮手法と、点群のベクトル量子化とテーブル参照法に基づく高効率なCGH変換手法により、非圧縮のCGH伝送に比較して76%の伝送量削減に成功した。また、受信側における計算を削減し、従来のテーブル参照に比較して1.34倍の計算高速化に成功した。

キーワード 電子ホログラフィ、圧縮符号化、伝送

Compression scheme of computer-generated hologram based on the vector quantization of point cloud

Takashi NISHITSUJI[†] Yudai HOSONO[‡] Takashi KAKUE[§]

Tomoyoshi SHIMOBABA[§] Tomoyoshi ITO[§] and Takuya ASAKA[†]

[†] Faculty of Systems Design, Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan

[‡] Graduate School of Systems Design, Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan

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

E-mail: nishitsuji@tmu.ac.jp

Abstract A huge amount of information in a three-dimensional television system based on electro-holography is one of the significant issues for practical uses. Computer-generated hologram (CGH) which is a recording medium of three-dimensional image could be treated as an image data; however, due to the difference of characteristics (e.g., spatial frequency, the similarity of adjacent frames) between CGH and general moving pictures, applying the existing compression scheme for the digital image to CGH is ineffective. In this study, we propose the compression and transmission scheme for electro-holography based on the vector quantization of point cloud with effective CGH calculation method based on the look-up table method on a receiver side. According to those methods, we succeeded in reducing the data rate by 76% compared to the transmission amount of uncompressed CGH and speeding up the computational speed by 1.34 times compared to the conventional look-up table method.

Keyword Electro-holography, compression, encoding, transmission, point cloud

1.はじめに

テレビジョン等の遠隔映像配信において、データ伝送容量の圧縮は長く重要な問題として取り組まれている。これは映像再生に伴うデータ量が一般的に膨大であることに起因しており、情報量の多い3次元映像においては更に深刻な問題になることが予想される。

電子ホログラフィ方式の3次元映像方式においても、3次元映像の圧縮伝送方式は多く研究されている[1]-[7]。電子ホログラフィは計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram: CGH)と呼ばれる2次元データを記録媒体とするため、自然画像に対する動画像圧縮符号化技術をCGHに適用した手法が検討され

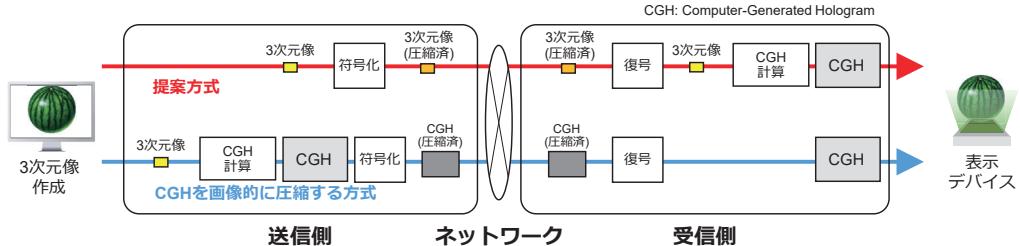


図 1 提案方式の概要・比較

ている[1][2]。しかし、CGH と自然画像では周波数空間における情報の重要度や、隣接フレーム間での類似性などの特性が一般に異なることから、自然画像ほど高い圧縮効果が得られていない[4]。そのため、空間変換等を用いて圧縮率向上を図る手法も提案されている[5]。

一方、CGH ではなく点群等の 3 次元情報自体を圧縮伝送する方式も検討されている[6][7]。ホログラフィは冗長性の高い情報記録手法であるため、3 次元情報の情報量は CGH に比較して小さくなることが予想される。また、自然画像と同様に隣接フレーム間での高いデータの類似性が期待できる。本研究では、圧縮伝送観点におけるこれらの優位性に着目し、3 次元点群のベクトル量子化に基づく電子ホログラフィの圧縮伝送方式を提案する。提案方式では、奥行き方向に連続する点群をベクトル量子化によって圧縮符号化し、受信側で CGH に変換する。また、ベクトル量子化とテーブル参照法 (Look-Up Table 法) を組み合わせ、符号化情報から直接 CGH を高効率に生成する VQ-LUT (Vector Quantization based Look-Up Table) 法[7]により、受信側における計算負荷軽減を図った。

2. 提案方式

図 1 に提案方式の概要と、CGH を画像的に圧縮伝送する方式との比較を示す。以下、提案方式について、送信側（符号化）と受信側（復号）に分けて詳細を示す。

2.1. ベクトル量子化に基づく点群の符号化

図 2 に符号化方式の概要を示す。提案方式では、まず 3 次元点群を奥行き方向に一定間隔 L で区切った領域として定義した Group Of Layers (GOL) ごとに分割する。図では一例として $L = 5$ のケースを示している。 j 番目の点群座標を (x_j, y_j, z_j) とすると、奥行き手前から k 番目の GOL には $kL \leq z_j < (k+1)L$ に該当する点群が所属する。すなわち、

$$k = \lfloor z_j / L \rfloor, \quad (1)$$

である。

次に、各 GOL の点群について、奥行き方向に連続する

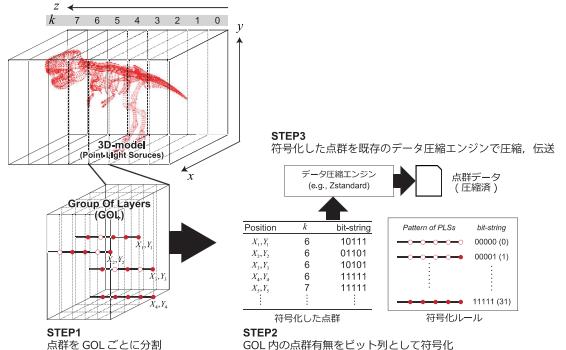


図 2 点群のベクトル量子化方式の概要

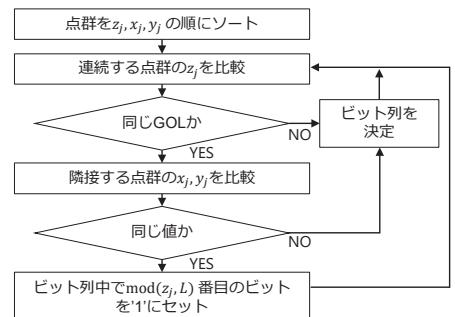


図 3 符号化のフローチャート

点群の有無をビット列として符号化する。例えば図中 $k = 3$ の GOL において、座標 (X_3, Y_3) を通る軸上には、1 番目、3 番目、5 番目に点群が存在していることから、ビット列は 10101 となる。したがって、符号化データは、点群位置を示す (x, y) 、GOL の番号 k とビット列を 1 要素とするデータとなる。

以上の符号化処理は点群座標を z_j, x_j, y_j の順にソートすることで容易に実現できる。図 3 に符号化のフローチャートを示す。 z_j をソート後、式(1)により同じ GOL に所属する点群を抽出、さらに同じ x_j, y_j の座標を持つ点群を抽出し、ビット列に変換することで同一要素として符号化する。ベクトル量子化により、3 次元情報の 1 要素を構成するパラメータは 1つ増加するものの、要素数はベクトル量子化により縮減されるため、特に

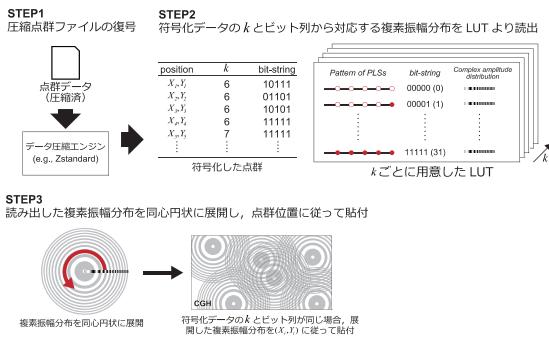


図 4 VQ-LUT 法の概要

高密度な3次元点群等においては高い圧縮効果が期待できる。

また、提案方式では符号化データに既存のデータ圧縮方式を適用する。今回は圧縮効率や計算負荷の観点から ZStandard ライブラリ[8]を使用した。

2.2. VO-LUT 法

図 4 に VQ-LUT 法の概要を示す。VQ-LUT 法では、ベクトル量子化した点群の符号化データから事前準備した LUT を直接参照することで、計算の効率化を図った。

z 軸上の $(0,0,z)$ にある点光源が仮想平面 (x_α, y_α) に作る複素振幅分布 $C(x_\alpha, y_\alpha; z)$ は、

$$C(x_\alpha, y_\alpha; z) = A_j \exp \left\{ i \frac{2\pi p}{\lambda} (x_\alpha^2 + y_\alpha^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2)$$

で表せる。ただし、 A_j は点群の振幅、 i は虚数単位、 λ は照明光の波長、 p は表示デバイスの画素ピッチであり、すべての座標は p で規格化されている。一方、 N 個の点群で構成される3次元像からのCGH計算は、点光源が作る複素振幅分布のパターンが点光源の奥行き z にのみ依存することから、

$$I(x_\alpha, y_\alpha) = \sum_{j=0}^{N-1} \exp \left\{ i \frac{2\pi p}{\lambda} (x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2 + z_j^2)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (3)$$

$$= \sum_{i=0}^{N-1} C(x_\alpha - x_j, y_\alpha - y_j; z_j) \quad (4)$$

と表せる。ここで、 (x_j, y_j, z_j) は j 番目の点群座標、 (x_α, y_α) は CGH の座標、 $x_{\alpha j} = x_\alpha - x_j, y_{\alpha j} = y_\alpha - y_j$ である。なお、各点群の振幅は簡単のため 1 を仮定した。式(4)より点群からの CGH 計算は、式(2)で計算できる各点光源の複素振幅分布を $x_\alpha - y_\alpha$ 平面上で水平移動させながら重畳する計算と解釈できる。そのため、取りうる全ての z_j について式(2)を事前計算し、メモリに格納した値を利用することで、CGH 計算を大幅に削減できる計算手法が知られている[9]-[12]。また、式(2)の計算結果は原点を中心とした同心円形状をなすことから、円対称性を利用したメモリ量の削減手法が知られている。

[11][12].

VQ-LUT 法では、式(2)を拡張し、奥行方向に連続する点群の複素振幅を事前計算することで計算の効率化を実現した。 k 番目の GOL の範囲において、 z 軸上に存在し、かつ奥行方向に連続する点群、すなわち、 z_j のみが異なる点群が作る複素振幅分布 C_k は、式(2)より、

$$C_k(x_\alpha, y_\alpha; B_j) = \sum_{z_l \in b_j} C(x_\alpha, y_\alpha; z_l) \quad (5)$$

と表現できる。ここで、 B_j はベクトル量子化によって得られる j 番目のビット列、 b_j はビット列に対応する奥行き位置の集合である。式(5)を用いれば、式(3)は、

$$I(x_\alpha, y_\alpha) = \sum_{k=0}^{D-1} \sum_{j=0}^{N_k-1} C_k(x_{\alpha j}, y_{\alpha j}; B_j) \quad (6)$$

となり、ベクトル量子化した点群に対応する複素振幅分布から CGH を合成できる。ここで、 N_k は k 番目の GOL における符号化データの要素数、 D は GOL の総数である。VQ-LUT 法では、式(5)で得られる複素振幅分布を GOL ごとに用意し、LUT 法における事前計算値として使用する。複数の点群を包含した複素振幅分布を同時に重畠できるため、従来の LUT 法に比較して重畠処理の回数を削減できる。また、ベクトル量子化によって得られたビット列をインデックスとして直接用いられるため、点群の復号作業は不要となり、復号にかかる計算負荷を削減できる。さらに、式(5)によって得られる複素振幅分布が同心円形状をなすことを利用し、文献[12]のメモリ量削減手法を適用することで、受信側の必要計算リソースを抑制できる。

3. 評価と考察

圧縮率、受信側の計算負荷、再生画質の3点より提案方式を評価した。評価条件を表1に示す。比較としてJPEG2000、HEVC Intraを用いたCGHの画像的圧縮を行った。JPEG2000、HEVCの圧縮にはffmpeg 3.4 for windows x64[13]を使用した。なお、入力するCGHはVQ-LUT法($L=1$)で作成したものである。

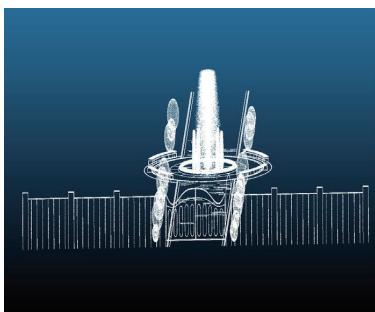
評価用として図5に示す2種類の点群を用いた。点群の密度による圧縮率の変化を考察するため、オリジナルデータから10,000点ごとにランダムに抽出した点群も合わせて用意した。

表 1 評価条件

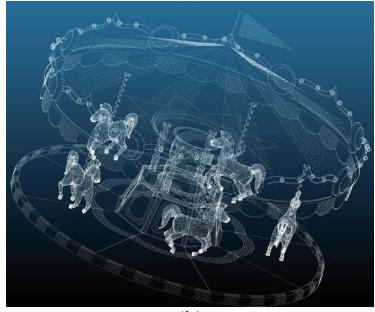
項目	値
CGH 解像度	2,048×1,024pixels
CGH ピット深度	8bit
光源波長 λ	520nm
表示デバイスの画素ピッチ p	8μm
点群の存在範囲	$0 \leq x_j < 2,048$ $0 \leq y_j < 1,024$ $0 \leq z_j < 512$
点群数	モデル 1 (Fountain)[図 5 (a)] 320,000 点 モデル 2 (Merry-go-round)[図 5 (b)] 90,000 点
GOL 長 L	1, 4, 8
Compression Rate Factor (HEVC)	28
Compression Level (JPEG2000)	1, 2

表 2 計算機環境

項目	値
CPU	Intel Core i7 8700K 3.7GHz
Memory	DDR4-2400 32GB
OS	Windows 10 64bit
Compiler	Microsoft Visual C++ compiler



(a)



(b)

図 5 評価用点群: (a)Fountain, (b)Merry-go-round

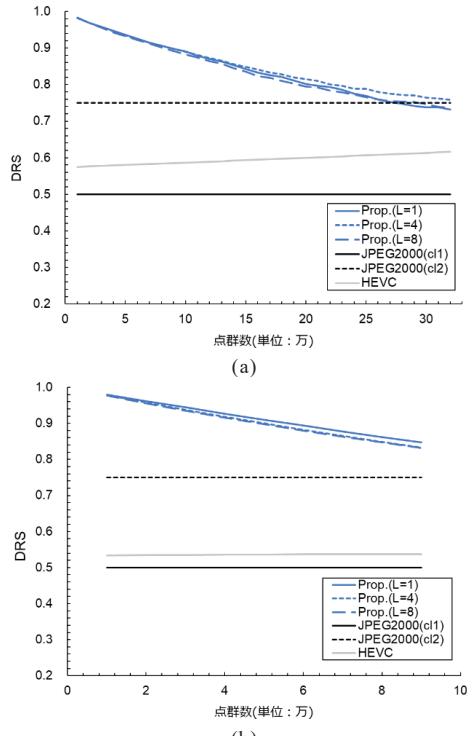


図 6 DRS: (a)Fountain, (b)Merry-go-round

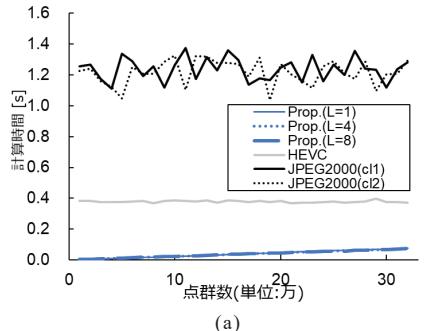
3.1. 圧縮率

Data Rate Saving (DRS)を圧縮率の評価指標として採用した。DRSは、

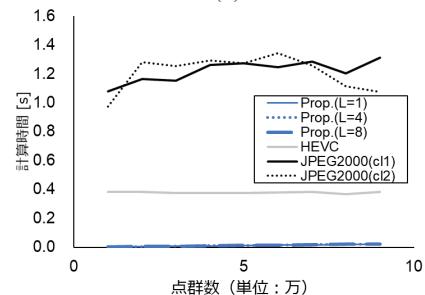
$$DRS = 1 - \frac{\text{圧縮後のデータ容量}}{\text{圧縮前のデータ容量}} \quad (6)$$

として定義される。本稿では、式(6)における圧縮前のデータ容量として、表 1 の条件下における非圧縮のCGHの容量である2MBを設定した。

図 6にFountain, Merry-go-roundの評価結果を示す。図 6より、いずれのモデルであっても、ほぼすべての点群数について提案手法のDRSがJPEG2000, HEVCより優れていることがわかる。各圧縮手法の傾向として、提案手法は点群数の増大に従いDRSが劣化し、JPEG2000, HEVCはほぼ一定であることがわかる。これは、JPEG2000, HEVCの圧縮率がCGHの解像度に依存し、提案手法が点群数に依存していることによる。また、提案手法のDRSの減衰傾向は、点群数の増大に従ってなだらかになっていることがわかる。これは、点群密度の増加により、複数点群を含むベクトル量子化要素への符号割当率が向上しているためである。本稿に示した検証の範囲では、提案手法とJPEG2000のDRSは点数の増大に従って接近しているが、提案手法

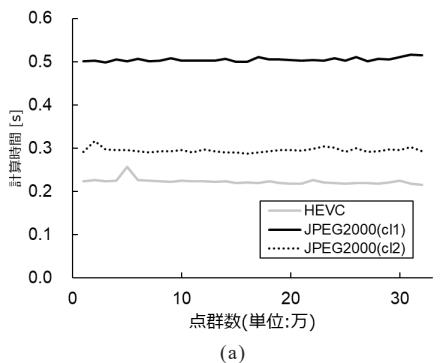


(a)

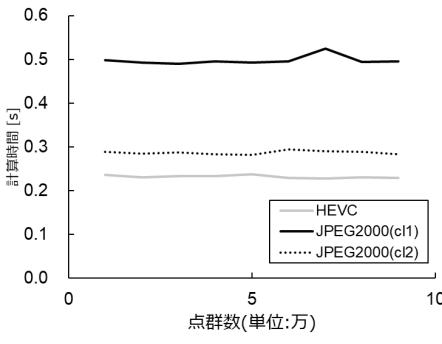


(b)

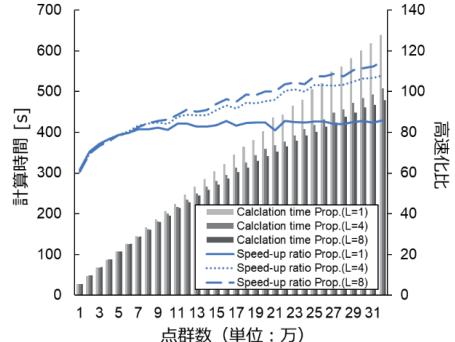
図 7 計算時間の比較（符号化）



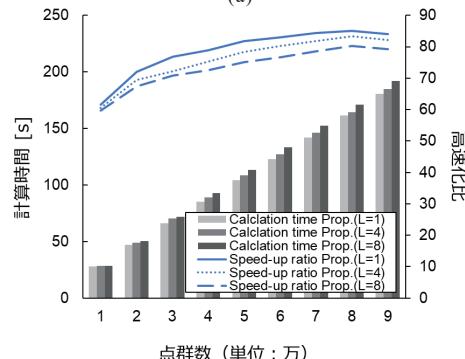
(a)



(b)

図 8 計算時間の比較（復号,JPEG2000, HEVC）
の DRS は CGH の解像度に依存しないことから、実用的な高解像度 CGH の圧縮伝送においては、提案手法

(a)



(b)

図 9 計算時間の比較（復号, VQ-LUT）

の優位性がより強調されることが予想される。

3.2. 計算時間

図 7 に提案方式の送信側（符号化）の計算時間の比較を示す。提案方式における送信側の計算処理は、点群のベクトル量子化と ZStandard の圧縮処理で構成され、すべてのケースにおいて処理時間に占める後の割合は約 25%程度であった。また、JPEG2000, HEVC の送信側処理は CGH の圧縮処理のみであり、CGH の計算時間は含めていない。図 7 より、提案方式の計算負荷は JPEG2000 や HEVC より小さいことがわかる。

図 8 に JPEG2000, HEVC の受信側計算時間の比較を、図 9 に提案方式の受信側計算時間として VQ-LUT 法による CGH 作成時間を示す。提案方式における受信側の計算処理は、ZStandard の解凍処理と、VQ-LUT 法による CGH 作成処理によって構成される。また、JPEG2000, HEVC の受信側処理は画像復号の処理である。図 9 では、比較のため式(3)を直接適用した場合の CGH 計算時間を求め、VQ-LUT 法使用時との高速化比を求めた。VQ-LUT 法では Fountain の場合で最大 115 倍($L = 8, N = 320,000$ の場合)、Merry-go-round の場合で最大 85 倍($L = 1, N = 80,000$ の場合)の高速化に成功し

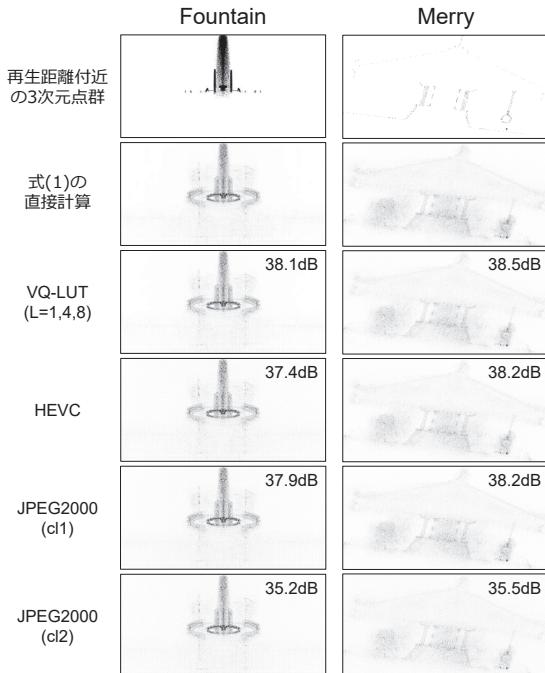


図 10 数値シミュレーションによる再生像例

た。また、Fountainにおいては、従来の LUT 法(VQ-LUT 法における $L = 1$ に相当)に比較して、 $L = 8$ の場合、最大で 1.37 倍の高速化に成功した。

3.3. 画質

画質評価のため、VQ-LUT 法で作成した CGH, JPEG2000, HEVC で圧縮、復号した CGH について、数値シミュレーションによる再生画質評価を行った。数値シミュレーションには CWO++ライブラリ [14]に実装されている角スペクトル法を使用し、3 次元像の記録位置である 0.3m から 2,048μm 刻みで 128 通りの強度分布像を画像として出力、式(2)を直接計算して得た CGH の強度分布像を真値とした PSNR (Peak-Signal to Noise Ratio)を各距離において計算し、平均値を算出した。

図 10 に強度分布画像の一例を、図 11 に点群数による各方式の PSNR の推移を示す。なお、図 10 中の数値は、各シミュレーションにおける PSNR である。より、表 1 の実験条件下においては、提案方式は他方式の PSNR を上回る結果を得られた。なお、一般に自然画像においては PSNR が 30dB を上回る画像を画質基準としており、今回の例ではいずれの方式でもこの条件を満たしていることから、十分な画質の 3 次元映像が再生可能であることが示唆される。

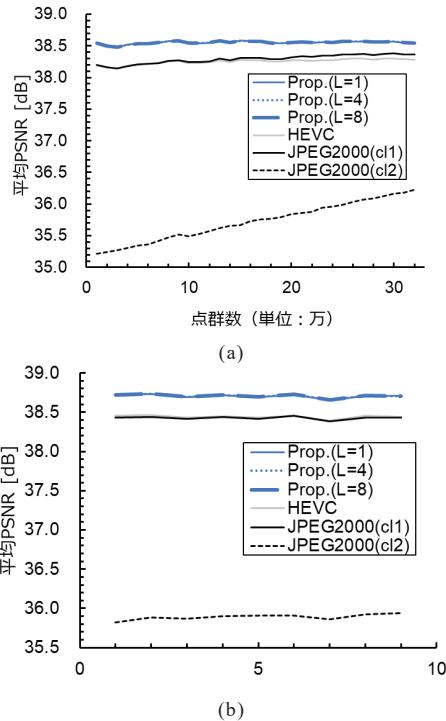


図 11 平均 PSNR: (a)Fountain, (b)Merry-go-round

4. おわりに

本稿では、3 次元点群のベクトル量子化に基づく電子ホログラフィの圧縮伝送技術について報告した。提案方式は、点群をベクトル量子化により圧縮する送信側の機能と、符号化した点群情報を直接参照し、CGH を高効率に生成する受信側機能である VQ-LUT 法により、3 次元映像の再生に必要な伝送容量の圧縮と、受信側の計算負荷軽減を両立できた。提案方式は CGH 解像度に依存しないため、実用的な高解像度 CGH の伝送においては特に高い有効性が期待できる。

謝辞

本研究は科研費 18H06468 の助成、および矢崎科学技術振興記念財団 特定研究助成によりなされたものである。

文 献

- [1] J. P. Peixheiro, C. Brites, J. Ascenso, and F. Pereira, "Holographic data coding: Benchmarking and extending hevc with adapted transforms," *IEEE Trans. Multimedia* **20**(2), 282–297 (2018).
- [2] Y. Xing, B. Pesquet-Popescu, and F. Dufaux, "Compression of computer generated phase-shifting hologram sequence using AVC and HEVC," in *Applications of Digital Image Processing XXXVI* (International Society for Optics and Photonics, 2013), **8856**, p. 88561M.
- [3] E. Darakis and J. J. Soraghan, "Compression of interference patterns with application to phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.* **45**(11), 2437–2443 (2006).
- [4] D. Blinder, A. Ahar, S. Bettens, T. Birnbaum, A. Symeonidou, H. Ottevaere, C. Schretter, and P. Schelkens, "Signal processing challenges for digital holographic video display systems," *Signal Processing: Image Communication* **70**, 114–130 (2019).
- [5] D. Blinder, C. Schretter, and P. Schelkens, "Global motion compensation for compressing holographic videos," *Opt. Express*, **26**(20), 25524–25533 (2018).
- [6] T. Senoh, K. Wakunami, Y. Ichihashi, H. Sasaki, R. Oi, and K. Yamamoto, "Multiview image and depth map coding for holographic TV system," *Optical Engineering* **53**(11), 112302 (2014).
- [7] T. Nishitsuji, Y. Hosono, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, and T. Asaka, "Compression scheme of electro-holography based on the vector quantization of point light sources," *Opt. Express*, **27**(8), 11594–11607 (2019).
- [8] Facebook, "Zstandard – Real-time data compression algorithm," <https://facebook.github.io/zstd/>.
- [9] M. E. Lucente, "Interactive computation of holograms using a look-up table," *J. Electron. Imaging* **2**(1), 28 (1993).
- [10] S.-C. Kim, J.-H. Kim, and E.-S. Kim, "Effective reduction of the novel look-up table memory size based on a relationship between the pixel pitch and reconstruction distance of a computer-generated hologram," *Appl. Opt.* **50**(19), 3375–3382 (2011).
- [11] T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, N. Masuda, and T. Ito, "Fast calculation of computer-generated hologram using the circular symmetry of zone plates," *Opt. Express* **20**(25), 27496–27502 (2012).
- [12] T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito, "Fast calculation of computer-generated hologram using run-length encoding based recurrence relation," *Opt. Express* **23**(8), 9852–9857 (2015).
- [13] FFmpeg, "FFmpeg website," <https://www.ffmpeg.org/>.
- [14] T. Shimobaba, J. Weng, T. Sakurai, N. Okada, T. Nishitsuji, N. Takada, A. Shiraki, N. Masuda, and T. Ito, "Computational wave optics library for C++: CWO++ library," *Comput. Phys. Commun.* **183**(5), 1124–1138 (2012).

令和元年第2回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

- 日時： 2019年5月31日(金) 13:00～17:00
 - 場所： 千葉大学西千葉キャンパス
アクセス：<http://www.chiba-u.ac.jp/access/index.html>
 - テーマ ホログラフィの標準化とデータの圧縮
 - プログラム 最新情報は HODIC の WEB ページで公開いたします。
1. HODIC 鈴木岡田記念賞授賞式及び記念講演 (13:00-14:15)
 - 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长 伊藤 智義
 - 選考経緯と選考結果の報告
2018年度 HODIC 鈴木岡田記念賞選考委員長 角江 崇
 - 授賞式および記念講演
 - 技術賞(1) 西辻 崇 氏 (首都大学東京)
 - 技術賞(2) 五十嵐 俊亮 氏 (東京工業大学)
 - 技術賞(3) 國枝 織絵 氏 (関西大学)
 - 貢献賞 勝間ひでとし 氏 (湘南 LRT&Holography 研究グループ)

14:15-14:30 休憩

2. 講演会

- 14:30-15:10 ホログラムの工業標準の使い方 高橋 進 (凸版印刷株式会社)
- 15:10-15:50 ホログラムの画質評価と国際標準化の動向 吉川 浩 (日本大学)
- 15:50-16:00 休憩
- 16:00-16:40 線形予測による干渉縞の無損失圧縮方法
金憲炫, 玉川恒平, 坂本雄児 (北海道大学)
- 16:40-17:20 点群のベクトル量子化に基づく電子ホログラフィの圧縮伝送方式
西辻 崇, 細野湧大 (首都大学東京), 角江崇,
下馬場朋祿, 伊藤智義(千葉大学), 朝香卓也 (首都大学東京)

- 研究会参加申込 当日受付 (事前の申込は不要です)
- 参加費 会員 無料, 非会員 2,000円, 学生で会報不要の場合は無料
- 問合せ先

HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付

E-mail: office@hodic.org

令和元年第3回 ホログラフィック・ディスプレイ 研究会のお知らせ／講演募集

ホログラフィック・ディスプレイ研究会では、2019年9月13日（金）に公募形式の研究会を開催します。今回は「立体映像およびホログラフィー」というテーマで、技術・アート・デザイン等の観点での発表を公募します。下記の申込み方法をご参照の上、ぜひご応募下さい。

- 開催日： 2019年9月13日（金）13:00-17:00（予定）

- 場 所： 首都大学東京（秋葉原サテライトキャンパス）

https://www.tmu.ac.jp/university/campus_guide/access.html

- テーマ： 立体映像およびホログラフィー

- 共 催： 映像情報メディア学会

映像表現＆コンピュータグラフィックス研究会

立体映像技術研究会

- 発表申込方法：

申し込みについては、共催の映像情報メディア学会の研究会発表申込システムを使用します。

申し込み方法等が不明な場合は、下記までご連絡ください。

- ・映像情報メディア学会のWEBページより（研究会発表申し込みシステム）

<http://www.ite.or.jp/> → 「投稿する/参加する」 → 「研究会」 → 「研究発表のお申し込み方法」 映像表現＆コンピュータグラフィックス研究会 または 立体映像技術研究会 を選択

または以下のURLへアクセス。

<http://www.ite.or.jp/ken/program/index.php?tgid=OSJ-HODIC>

- ・講演申込み締め切り：2019年7月6日（土）

- 問合せ先

- ・HODIC 事務局 日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付
E-mail: office@hodic.org

ホログラフィック・ディスプレイ研究会役員（敬称略）

名 誉 会 長	辻内 順平	会 長	伊藤 智義（千葉大学）
副 会 長	山本 健詞（情報通信研究機構）	前 会 長	橋本 信幸（シチズン時計）
国際担当	西辻 崇（首都大学東京）	企画委員長	山口 健（日本大学）
会計幹事	山内 豪（大日本印刷）	事務局長	岸本 康（凸版印刷）
編 集 長	吉川 浩（日本大学）		

幹 事（50音順）

石井勢津子（美術家）	石川 淳（石川光学造形研究所）	岩田 藤郎
植田 健治（大日本印刷）	太田 和哉（トリマティス）	鎌田 康昌（凸版印刷）
久保田敏弘（久保田ねぐらム工房）	酒井 朋子（千葉大学）	坂本 雄児（北海道大学）
佐藤 甲癸	佐藤 俊一（シャープ）	下馬場朋祿（千葉大学）
白倉 明（アーティエヌ・ラボ）	高木 康博（農工大）	高橋 進（凸版印刷）
田中 賢一（長崎総合科学大）	谷口 幸夫（大日本印刷）	福田 隆史（産総研）
本田 捷夫（本田ひかり技研）	松島 恭治（関西大学）	三科 智之（日本放送協会）
森田 正紀（アルファバグ）	山口 雅浩（東京工業大学）	渡邊恵理子（電気通信大学）

相 談 役（50音順）

上田 裕昭（ヨニカミルタフ・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	永田 忠昭（arts-unis）	三田村畯右
堀内 道夫（光と風の研究所）		

編集部よりのお知らせ

編集部では皆様からの情報を募集いたしております。ホログラフィ関連のお知らせや報告などがございましたら、下記編集部連絡先までお送り下さいますようお願い申し上げます。

なお、次号会報に掲載するためには研究会開催日の1ヶ月前が締切となります。

HODIC Circular, Vol. 39, No. 2 (May 2019)

2019年 5月 31日発行

編 集 日本光学会 ホログラフィック・ディスプレイ研究グループ

編 集 長 吉川 浩(日本大学)

HODIC 事務局 (入会・連絡先変更・各種問合せ等)

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

〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

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

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

ご連絡はなるべく電子メールまたはFAXにてお願ひいたします。

For foreign members, any corresponding to

Hiroshi Yoshikawa, Dept. Computer Engineering, Nihon University

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

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

HODIC