

ホログラムではない『ホログラム』の話

東京農工大学 長浜佑樹

私は千葉大学の伊藤智義教授、下馬場朋禄教授、角江崇助教のもとで学位を取得し、現在は東京農工大学の高木康博教授のもとで助教として研究を続けております。学生の頃からホログラフィによる映像表示や3次元計測技術に関する研究を続けており、その中でも特に、ホログラムによる光波制御を用いた映像投影技術や、そこで用いられる計算アルゴリズムなどの研究に注力しております。

(1ページにつづく)

目 次

1. 卷頭言：ホログラムではない『ホログラム』の話	長浜佑樹 表紙
2. ホログラフィック網膜投影型ディスプレイのための インタラクティブな屈折補正システムの構築	長浜佑樹, 他 2
3. Computer-Generated Hologram based on Gradient Descent Algorithm	Shujian Liu, 他 5
4. ランダム位相フリー法を用いた位相型ホログラムの画質改善と シミュレーションによる検証	山口由美, 他 8
5. 可変正射影光線サンプリング面による広深度ホログラムの計算法	五十嵐俊亮, 他 12
6. 点光源の空間分解能を考慮したベクトル量子化とフレーム間差分による 電子ホログラフィの圧縮伝送方式	細野湧大, 他 16
7. 平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡のカラー化へ向けた基礎評価	井元克駿, 他 20
8. 波長選択抽出位相シフト法に基づく複数波長定量位相イメージング	田原 樹, 他 23
9. 次回研究会のお知らせ	巻末

さて、ここ数年で専用の眼鏡なしで見られるような様々な方式の3次元ディスプレイが製品レベルでよくみられるようになりました。しかしながら、それらの3次元ディスプレイはホログラフィの技術を用いていないにもかかわらず『3D ホログラム』と紹介されることがままあり、何とも言えない居心地の悪いような思いをすることがあります。

また、私は大学が実施する小中高生向けの科学教室でホログラムの制作体験を担当することがあります。その中で参加者の方からよく受ける質問の1つに、「ネットで調べるとスマホで作れる3D ホログラムみたいのがよく出てくるけど、あのホログラムとこのホログラムって何が違うの?」というものがあります。ここで『3D ホログラム』と言われているものは、いわゆるペッパーズゴーストと呼ばれるもので、図1のようにスマートフォンで表示した映像をプラスチック板で反射させてあたかも空中に映像が浮かんでいるように見えるという仕組みになっているものです。もちろんこの『3D ホログラム』は学術的な意味でのホログラムとは異なるものなので、両者の仕組みを説明すると質問してきた参加者の方には何となくわかってもらえるのですが、やっぱり3D 表示=ホログラム、というイメージは根強いようです。

しかしながら、このように学術的に正しい意味であれ異なる意味であれ、ホログラムという言葉がよく聞かれるようになった背景には、ヘッドマウントディスプレイや視差バリア型のディスプレイをはじめとした3次元ディスプレイを搭載した家庭用ゲーム機などが普及してきており、3次元映像技術に対する興味や期待が高まっていることがあるのではないかと思います。そのような3次元映像技術の分野をさらに盛り立てていけるよう、ホログラフィの分野から微力ながら貢献していきたいと思います。

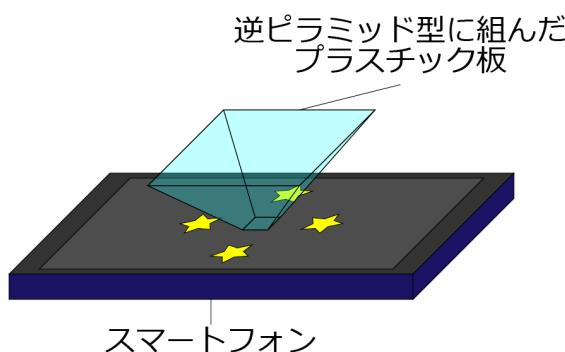


図1: 『3D ホログラム』の例

ホログラフィック網膜投影型ディスプレイのための インタラクティブな屈折補正システムの構築

長浜 佑樹[†] 高木 康博[†]

† 東京農工大学 〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

E-mail: † yuki-nagahama@go.tuat.ac.jp

あらまし 本講演ではホログラムを用いた網膜投影型ディスプレイにおいて、利用者の水晶体の屈折特性をインタラクティブに取得し、その屈折状態に応じてホログラムによる波面変調を用いて屈折補正を行い、利用者の水晶体の屈折状態にかかわらず鮮明な映像表示を行うシステムについて発表を行う。

キーワード ホログラフィー、網膜投影型ディスプレイ、計算高速化

Interactive refractive error correction system for holographic retinal view display

Yuki NAGAHAMA[†] and Yasuhiro TAKAKI[†]

† Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo 184-8588 Japan

E-mail: † yuki-nagahama@go.tuat.ac.jp

Abstract In this research, we accelerated hologram generation for the holographic retina view display using GPU. we also constructed a holographic retinal view display system that the user's eye aberrations were interactively acquired and corrected.

Keyword Holography, Retinal view display, Fast calculation

1.はじめに

マクスウェル視を用いると、水晶体中心に収束する光を用いて水晶体の屈折状態によらない網膜への画像提示ができるため、網膜投影型ディスプレイが実現できる[1,2]。そのため、眼鏡による屈折矯正が困難な場合や、水晶体を摘出した場合においても映像提示が行える。しかし、従来のマクスウェル視では、レンズ等を用いて光を収束するため、集光点を移動させるのが困難であるという問題点がある。この問題点を解決するため、われわれは過去にホログラフィーによる波面制御を用いた網膜投影型ディスプレイを提案した[3]。これによって眼球の移動に合わせて集光点を電子的に移動することが可能となった。また、ホログラムによる波面変調が可能なため、利用者の水晶体の屈折状態に応じた波面補正を行うことも可能である。しかしながら、利用者の水晶体の屈折状態をインタラクティブに取得し波面補正を行うためには、利用者の操作に応じてホログラムを高速に生成する必要がある。

そこで本研究では、ホログラフィック網膜投影型ディスプレイにおいて、ホログラムの生成計算のリアルタイム化を Graphics Processing Unit (GPU)を用いることで実現する。また、マクスウェル視またはホログラムによる波面変調を用いた映像提示を行い、網膜像の比較を行う。

2.原理

2.1. ホログラフィック網膜投影型ディスプレイ

ホログラフィック網膜投影型ディスプレイの原理図を図1に示す。なお、本研究では水晶体や角膜など

をまとめて1つのeye lensとして扱う。図1の光学系では、image plane上にある表示画像から発せられたeye lensを経由して網膜に到達する光の波面を記録したホログラムをコンピュータで計算し、空間光変調器(SLM)に表示することで映像を提示する。さらに、eye lensの中心でのビーム径を制限することでマクスウェル視状態を実現し、またはeye lensにおける光の屈折異常を相殺するように波面補正を行うことで屈折補正を行う。

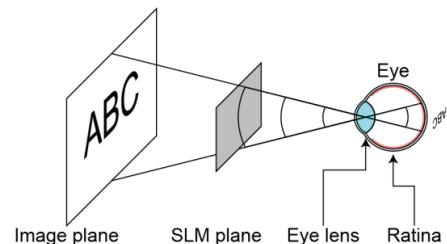


図1. ホログラフィック網膜投影型ディスプレイの原理図

ホログラムを表示する SLM、表示画像および眼球の位置関係を図2に示す。ホログラムの計算手順は以下のようになる。

1. 表示画像のある image plane から pupil plane へ回折計算を行う。
2. pupil plane 上でビーム径の調整または光の波面変調を行う。pupil plane 上での光の波面変調については次項で述べる。

3. Pupil plane から SLM plane へ逆回折計算を行い、ホログラムを求める。

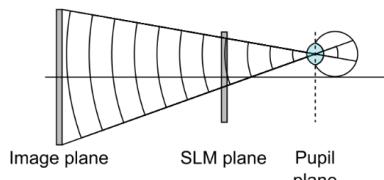


図 2. ホログラム計算の概念図

2.2. pupil plane における波面変調

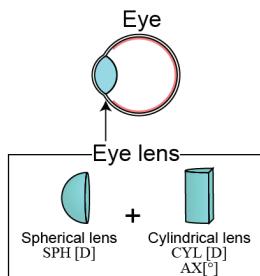


図 3. Eye lens のモデル化

ホログラフィック網膜投影型ディスプレイでは、使用者の eye lens の状態に応じた屈折補正を行うことが可能である。本研究では eye lens における波面収差を、球面レンズとシリンドリカルレンズの組み合わせによる光の波面変調として図 3 のようにモデル化した。なお、図 3 中の SPH, CYL, AX はそれぞれレンズの球面度数、乱視度数、乱視軸である。Pupil plane において eye lens における光の波面収差を相殺するよう光の波面変調を行うことで、利用者の eye lens の状態に応じた屈折補正を実現する。

3. 実験

今回はホログラムの計算部分を GPU で実装し、計算時間の計測を行った。また、レンズを用いて疑似的な屈折異常を持った eye lens を作製し、その状態においてマクスウェル視または pupil plane における波面変調を用いた映像提示を行い、網膜像の比較を行った。ホログラムの計算手順および CPU と GPU の計算の役割分担を図 4 に示す。

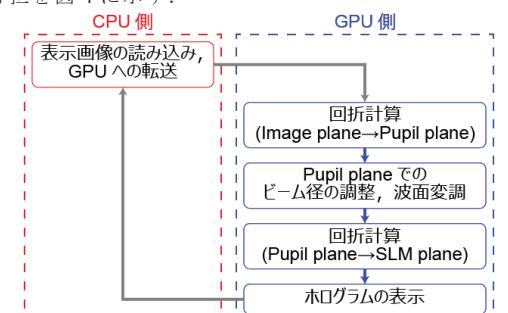


図 4. ホログラムの計算手順および CPU と GPU の役割分担

ホログラムの計算、再生時のパラメータを表 1 に示す。

表 1. 実験条件

SLM resolution [pixels]	$1,920 \times 1,200$
SLM pixel pitch [μm]	8.1
Wavelength of light [nm]	640

また、ホログラムの計算に用いた計算系の仕様を表 2 に示す。

表 2. 計算系の条件

CPU	Intel Core i5 8500
GPU	NVIDIA Geforce GTX 1080
RAM	16 [GB]
OS	Windows 10 Home 64bit
Compiler	Visual C++ 2017
Library	OpenCV 4.0.0 CUDA 10.0

3.1. 計算時間の計測

計算時間を計測した結果、ホログラム 1 枚当たりの計算時間は約 32 ms であった。これはフレームレートに換算すると約 31 fps である。

3.2. 網膜像の比較

マクスウェル視による eye lens の屈折力を回避する効果と、pupil plane 上での波面変調による eye lens の波面補正効果の網膜像への影響を比較するため、本研究では図 5 のように球面レンズとシリンドリカルレンズを組み合わせることで疑似的な屈折異常を持った eye lens を作製し、ホログラフィック網膜投影型ディスプレイの光学系と組み合わせることで網膜像の撮影を行った。また、表示画像として図 6 に示す放射状のラインパターンを用いた。

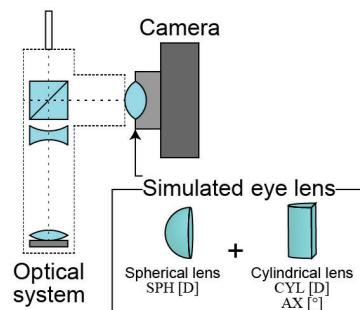


図 5. ホログラフィック網膜投影型ディスプレイの光学系および網膜像の撮影システム

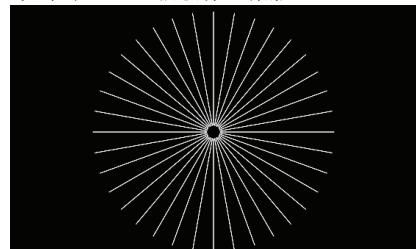


図 6. 表示画像

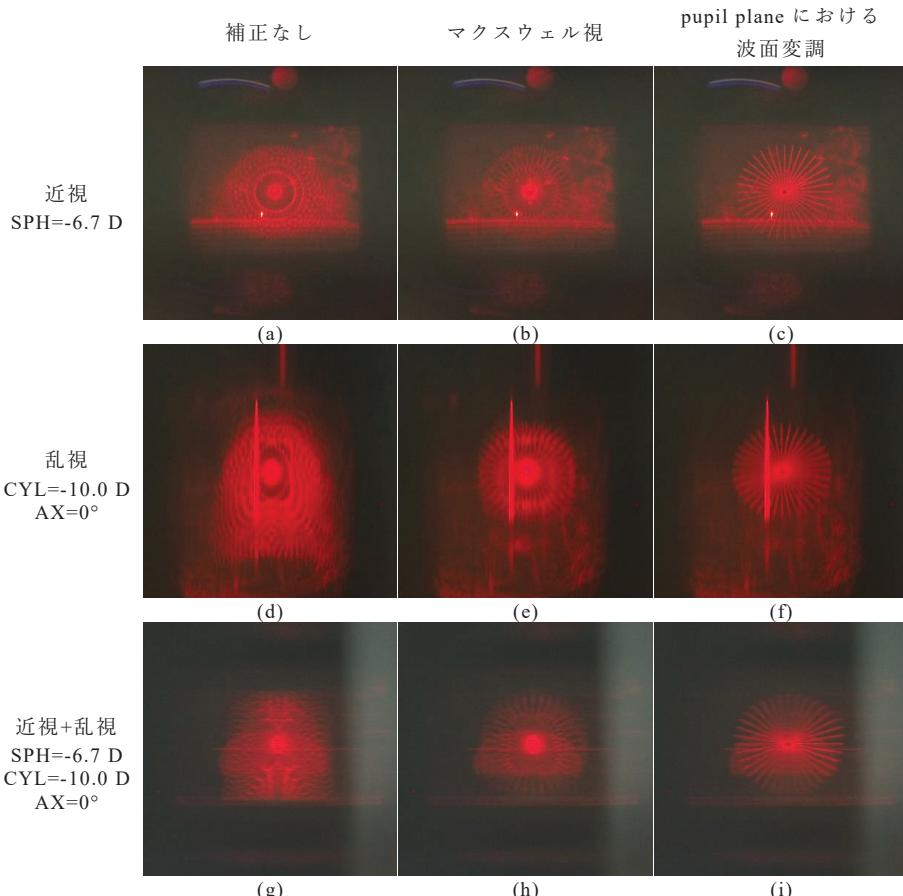


図 7. ホログラフィック網膜投影型ディスプレイによる網膜像

近視、乱視、近視と乱視の組み合わせを模した疑似的な eye lens に対して、補正なしの場合、マクスウェル視状態を実現した場合、pupil plane 上で波面変調を行った場合の網膜像をそれぞれ図 7 に示す。補正なしの場合の図 7(a), (d), (g) とマクスウェル視状態の図 7(b), (e), (h) を比較すると、マクスウェル視状態を実現することによってより表示画像に近い網膜像が得られていることがわかる。しかしながら、図 7(b), (e), (h) の網膜像では表示画像の中心付近のラインパターンが解像できていないことも確認できる。これは、マクスウェル視状態を実現するために pupil plane 上でのビーム径を制限することによって高い空間周波数の情報が失われることに起因している。一方で、pupil plane 上で波面変調を行った場合の図 7(c), (f), (i) では、中心付近のラインパターンも解像できいて、表示画像と同様の網膜像が得られていることが確認できた。これは、pupil plane における波面変調では、pupil plane 上でのビーム径を制限していないため、高い空間周波数の情報が失われなかつたためであると考えられる。

4.まとめ

ホログラフィック網膜投影型ディスプレイにおいて、利用者の eye lens の屈折状態をインタラクティブ

に取得し波面補正を行うために GPU を用いてホログラムの生成計算のリアルタイム化を行った。その結果、ホログラム 1 枚当たりの計算時間は約 32 ms となった。

また、マクスウェル視またはホログラムによる波面変調を用いた映像提示を行い、網膜像の比較を行った。

今後の展望として、実際の屈折異常を持った被験者に対して、eye lens の屈折状態をインタラクティブに取得し波面補正を行うことが可能かどうかを検証することが挙げられる。

本研究の一部は JSPS 科研費 15K12078 の助成により行われた。

文 献

- [1] G. Westheimer : "The Maxwellian view", Vision Res, 6, pp.669-682 (February 1966)
- [2] M. Watanabe, H. Takayama, N. Asai, R. Matsuda and S. Yamada: "A retinal scanning display with a wavefront curvature modulator", Journal of the SID, 11, 3, pp.511-515 (June 2012)
- [3] Y. Takaki and N. Fujimoto : "Flexible retinal image formation by holographic Maxwellian-view display", Opt. Express, 26, 18, pp.22985-22999 (September 2018)

Computer-Generated Hologram based on Gradient Descent Algorithm

Shujian Liu† Yuki Nagahama† and Yasuhiro Takaki†

† Department of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakacho, Koganei, Tokyo,
184-0012 Japan

E-mail: † s194671u@st.go.tuat.ac.jp, fu6404@go.tuat.ac.jp, ytakaki@cc.tuat.ac.jp

Abstract Holography is a technology that reconstructs the light filed through a film that records a certain interference fringe. After the invention of computer, a technology that controlling a spatial light modulator through the computer appeared. An algorithm to compute the holograms on the spatial light modulator was needed. As the conventional algorithm failed to produce the hologram efficiently, in this paper, a new thinking of computer-generated holograms is proposed that produce hologram more efficiently.

Keyword Holography, Fast calculation, Algorithm

1.はじめに

ホログラムは、光の干渉・回折を用いることで光の波面を記録・再生する技術で、物体から発せられる物体光を記録・再生することによって立体表示を実現できる[1, 2]。また、位相型ホログラムは光の波面を直接変調できるため共役像が生じることがなく、さらに、光の吸収がないため光の利用効率が高いなどといった特徴がある[3]。

ホログラムを計算機で合成する計算機合成ホログラム(CGH)では、干渉縞を計算で求めることによって、計算機上に存在する3次元形状データを立体表示することができる[4-7]。しかしながら、位相型ホログラムの場合では、振幅分布と位相分布で構成される物体波をホログラムの位相分布のみで再生することになる。そのため、情報量が落ちてしまい、単純な回折計算でホログラムを設計すると再生像の精度が低くなってしまうという問題がある。このことから、位相型ホログラムの最適計算法が研究されており、さまざまなアルゴリズムが提案されている。位相型ホログラムの最適設計アルゴリズムとしては、ダイレクトバイナリーサーチ法[8]、シミュレーテッドアニーリング[9]、遺伝的アルゴリズム[10]、Gerchberg-Saxton(GS)アルゴリズム[11]などが知られている。いずれも回折計算を繰り返し行う必要があるが、GSアルゴリズムは計算の収束性が良いため、位相型ホログラムの最適設計に広く利用されている。さらに最近では、GSアルゴリズムを改良した Mixed Region Amplitude Freedom (MRAF)アルゴリズム[12]や、MRAFアルゴリズムをさらに改良した Offset MRAF (OMRAF)アルゴリズム[13]などが提案されている。

本研究では、位相型ホログラムの新しい最適設計法として、再生像の二乗誤差(MSE)に対して勾配降下法を適用して位相型ホログラムを最適設計する手法を提

案する。また、提案手法と GS アルゴリズムを比較し、その結果を報告する。

2.提案手法

再生像の強度分布を I_{mn} 、目的とする再生像、つまり表示画像の強度分布を \hat{I}_{mn} 、再生像の MSE を E でそれぞれ表すと、 I_{mn}, \hat{I}_{mn}, E の関係は以下の式で与えられる。

$$E = \frac{1}{MN} \sum_m^M \sum_n^N (\hat{I}_{mn} - I_{mn})^2 \quad (1)$$

ただし、ホログラムの解像度を $M \times N$ とした。ここで位相分布に対する MSE の勾配を求めるとき、

$$\frac{\partial E}{\partial \theta_{pq}} = -4[e^{-j\theta_{pq}} F^{-1}[(\hat{I}_{mn} - a_{mn}^2) a_{mn} e^{j\phi_{mn}}]] \quad (2)$$

で与えられる。なお、 θ_{pq} はホログラムの位相分布、 a_{mn} は再生像の振幅分布、 ϕ_{mn} は再生像の位相分布をそれぞれ表す。ここで、ホログラムの位相分布を次式に従って更新する。

$$\theta_{pq}^{t+1} = \theta_{pq}^t - \gamma_t \frac{\partial E}{\partial \theta_{pq}} \quad (3)$$

ただし、 γ_t はステップ幅である。式(3)の処理を繰り返し行うことで位相分布を最適化する。

次にステップ幅の決定方法について説明する。ここでは、次式で表される MSE を考える。

$$E' = \frac{1}{MN} \sum_m^M \sum_n^N [\hat{I}_{mn} - (I_{mn} + \Delta I_{mn})]^2 \quad (4)$$

ここで ΔI_{mn} は、位相を $\Delta \theta_{pq}$ だけ変化させた場合の再生像の強度変化を表している。 $\frac{\partial E'}{\partial \gamma} = 0$ を満たす γ を求める式(5)のようになる。

$$\gamma = \frac{\sum_m^M \sum_n^N (\hat{I}_{mn} - a_{mn}^2) \text{Im} \left\{ a_{mn} e^{j\phi_{mn}} \left[F - \frac{\partial E}{\partial \theta_{pq}} e^{j\theta_{pq}} \right] \right\}}{2 \sum_m^M \sum_n^N \left\{ \text{Im} \left\{ a_{mn} e^{j\phi_{mn}} \left[F - \frac{\partial E}{\partial \theta_{pq}} e^{j\theta_{pq}} \right] \right\} \right\}} \quad (5)$$

3. 結果

3.1. 数値シミュレーションによる結果

提案手法を用いて位相型ホログラムの設計を行った。表示画像を図 1 に示す。グレースケール画像と白黒 2 値画像の両方を用意した。

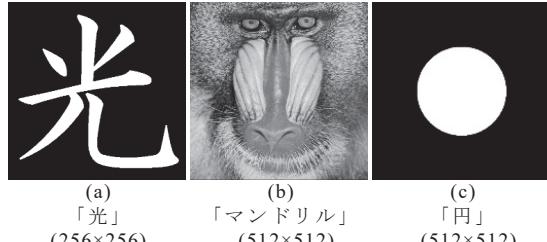


図 1. 表示画像

提案手法を用いて最適設計した位相型ホログラムの再生像を図 2(a1), (b1), (c1)に示す。また、比較のために GS アルゴリズムを用いた場合も図 2(a2), (b2), (c2)に示す。なお、繰り返し回数は 100 とした。

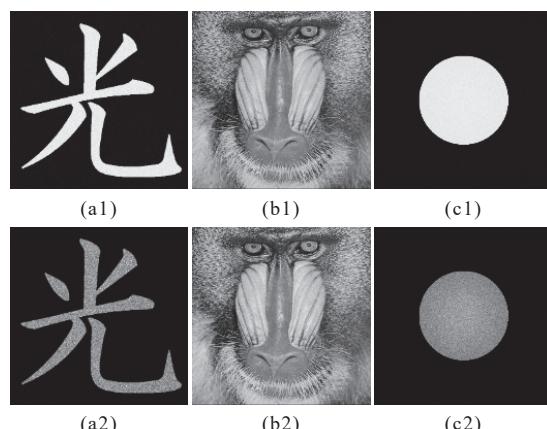
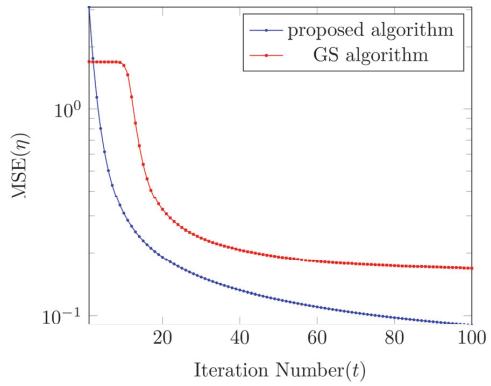


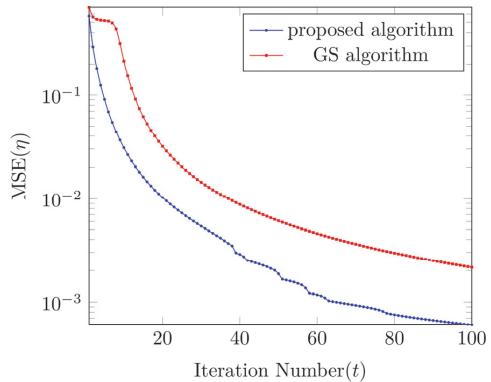
図 2. 提案手法および GS アルゴリズムを用いて設計した位相型ホログラムの数値シミュレーションによる再生像

図 2(a1), (b1), (c1)と図 2(a2), (b2), (c2)を比較すると、提案手法によるホログラムの再生像の方が再生像に重畳するノイズが少なくなっていることがわかる。

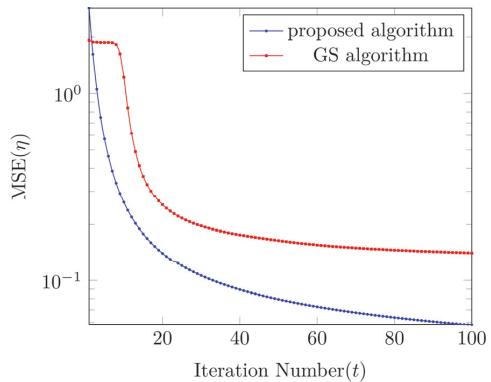
次に、繰り返しの回数による MSE の変化を比較する。横軸に繰り返し回数、縦軸に MSE をそれぞれ取ったグラフを図 3 に示す。提案手法と GS アルゴリズムを比較すると、提案手法の方が少ない繰り返し回数で低い MSE が得られていることがわかる。



(a) 「光」



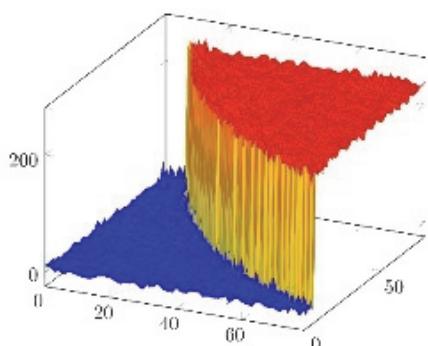
(b) 「マンドリル」



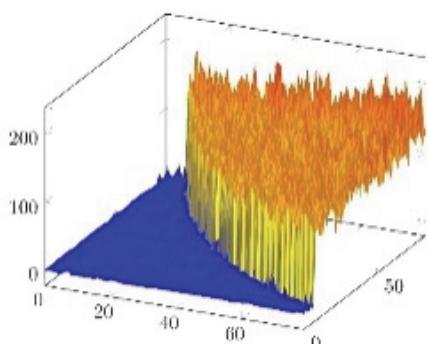
(c) 「円」

図 3. 繰り返し回数による MSE の変化

さらに、図 2(c1)と図 2(c2)の一部の強度分布をグラフにしたものを作成して図 4 に示す。図 4(a)と図 4(b)を比較すると、提案手法の方が、GS 法と比べて再生像の強度分布を精度良く制御できていることがわかる。



(a) 図 2(c1)の一部の強度分布



(b) 図 2(c2)の一部の強度分布

図 4. 図 2(c1)と図 2(c2)の一部の強度分布

3.2. 光学再生による結果

次に、実際の光学系を用いて、提案手法によって設計した位相型ホログラムの光学再生を行った。使用した光学系を図 5 に、得られた光学再生像を図 6 にそれぞれ示す。また、位相変調器は、PLUTO-2 (HOLOEYE Photonics AG) を用いた。



図 5. 使用した光学系

図 6 をみると、所望の光学再生像が得られていることがわかる。

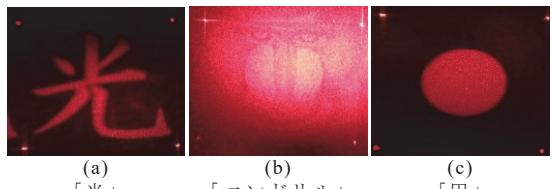


図 6. 提案手法によって設計した位相型ホログラムの光学再生像

4.まとめ

再生像の強度分布の MSE に対して勾配降下法を適用する新しい位相型ホログラムの最適設計法を提案した。従来の最適設計法として良く用いられる GS アルゴリズムに比べ、少ない繰り返し回数で精度の良い再生像が得られることが確認できた。

文 献

- [1] D. Gabor "A New Microscopic Principle," *Nature*. **161**, 777-778(1948)
- [2] D. Gabor "Microscopy by reconstructed wavefronts," *Proceedings of the Royal Society*. **197** (1051), 454-487 (1949)
- [3] L. B. Lesem, P. M. Hirsch, and J. A. Jordan, Jr., "The kinoform, a new wavefront reconstruction device," *IBM J. Res. Dev.*, **13**, 150-155 (1969).
- [4] Ch. Slinger, C. Cameron and M. Stanley, "Computer-Generated Holography as a Generic Display Technology," *Computer*. **38** (8): 46-53 (2005)
- [5] F. Yaras, H. Kang and L. Onural, "Real-time phase-only color holographic video display system using LED illumination," *APPLIED OPTICS*. **48**(34), H48-H53 (2009)
- [6] WH. Lee, "III Computer-Generated Holograms: Techniques and Applications," *Progress in Optics*. **16**, 119-232 (1978)
- [7] F. Wyrowski and O. Bryngdahl, "DIGITAL HOLOGRAPHY AS PART OF DIFFRACTIVE OPTICS," *REPORTS ON PROGRESS IN PHYSICS*. **54**(12), 1481-1571 (1991)
- [8] M. A. Seldwitz, J. P. Allebach and D. W. Sneedey: "Synthesis of digital holograms by direct binary search", *Appl. Opt.*, **26**, 2788-2798 (1987).
- [9] N. Yoshikawa, T. Yatagai : "Phase Optimization of a Kinoform by Simulated Annealing", *Applied Optics*, **33**(5), 863-868 (1994).
- [10] Quantized phase optimization of two-dimensional Fourier kinoforms by a genetic algorithm. N. Yoshikawa, M. Itoh, and T. Yatagai *Opt. Lett.* **20**(7) 752-754 (1995).
- [11] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, "A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures," *Optik*. **35**(2), 237-246 (1972)
- [12] M. Pasienski and B. DeMarco, "A high-accuracy algorithm for designing arbitrary holographic atom traps," *Opt. Express* **16**, 2176-2190 (2008).
- [13] A. L. Gaunt and Z. Hadzibabic, "Robust digital holography for ultracold atom trapping," *Scientific Reports* **2**, 721 (2012).

ランダム位相フリー法を用いた位相型ホログラムの 画質改善とシミュレーションによる検証

山口 由美[†] 長浜 佑樹[‡] 山本 洋太[†] 下馬場 朋祿[†] 角江 崇[†] 伊藤 智義[†]

[†]千葉大学大学院工学研究科 〒263-8522 千葉県千葉市弥生町 1-33

[‡]東京農工大学大学院工学研究院 〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

E-mail: [†]yumi.k@chiba-u.jp [‡]yuki-nagahama@go.tuat.ac.jp

あらまし ホログラムの計算手法の一つであるランダム位相フリー法を用いて振幅ホログラムを計算した場合、画質の良い再生像を得ることができるが、位相型ホログラムの場合、再生像が劣化する問題があった。本研究では、X. Li らによる位相型ホログラムのエンコード法をランダム位相フリー法に適用し、再生像の改善を図る。シミュレーションにより提案手法と従来手法の再生像画質の比較を行い、提案手法の有効性を確認した。

キーワード ホログラム、位相型ホログラム、キノフォーム、ランダム位相フリー法、誤差拡散法

1. まえがき

計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram: CGH)は3次元ディスプレイ¹⁾や、ホログラフィックプロジェクタ²⁻⁴⁾といった装置への応用が提案されている。しかしながら、それらの表示装置の実現に向けた技術的課題のひとつとしてスペックルノイズによる再生像の画質劣化が挙げられている⁵⁾。元画像の光の波面を記録したCGHを生成する場合、元画像からの光を拡散させ、ホログラムに記録するために元画像にランダム位相を付加するが、これがホログラムの再生像にスペックルノイズが重畠する一因となる。

一方で、ランダム位相の代わりに仮想的な球面波の位相パターンを用いて元画像から発せられる光をホログラムに集め、スペックルノイズの発生を抑えるランダム位相フリー法が提案されている⁵⁾。しかしランダム位相フリー法は、振幅型ホログラムに対してはスペックルノイズの抑制効果が認められたが、位相型ホログラムに対しては直接適用出来ないという課題がある。そのため、ランダム位相フリー法と誤差拡散法を位相型ホログラムに適用させる手法が提案されている⁶⁾。しかし、再生像の画質が劣化する問題があった。

本研究では、ランダム位相フリー法を位相型ホログラムに適用させる各種手法に対して、数値シミュレーションを行い、再生像の画質、回折効率および計算時間について比較を行う。なお、本研究における数値計算では、いざれも波動光学計算ライブラリであるCWO(Computational Wave Optics)⁷⁾ライブラリを用いた。

2. ランダム位相フリー法

CGHを計算するにあたっては従来、元画像にランダム位相を掛け合わせて、物体光を拡散させていた。し

かしそれにより、スペックルノイズの発生が問題となっていた。そこで、ランダム位相の代わりに、仮想収束光の位相パターンを用いて物体光を拡散させる手法がランダム位相フリー法である。図1に元画像及びホログラムと、仮想収束光の位置関係を示す。

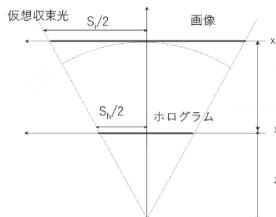


図1 ランダム位相フリー法

図1の元画像の面積は $S_i \times S_i$ で、ホログラムの面積は $S_h \times S_h$ で与えられる。ランダム位相フリー法でCGHの計算を行う手順は、まず元画像 $u_i(x_i, y_i)$ に、収束球面光 $w(x_i, y_i)$ を掛け合わせる。 $w(x_i, y_i)$ は式(1)で与えられる。

$$w(x_i, y_i) = \exp(-i\pi(x_i^2 + y_i^2)/f_i\lambda) \quad (1)$$

$f_i = z_1 + z_2$ は収束球面光の焦点距離で、 f_i は式(2)で与えられる。

$$f_i : z_1 = S_i : S_h \quad (2)$$

次に、元画像からホログラム面へ回折計算を行う。ホログラム面上における複素振幅 $U_h(x_h, y_h)$ は式(3)のようになる。

$$U_h(x_h, y_h) = \text{Prop}_{z_2}\{u_i(x_i, y_i)w(x_i, y_i)\} \quad (3)$$

$\text{Prop}_{z_2}\{\cdot\}$ は図1に示す元画像から距離 z_2 のホログラム面までの回折計算を示している。振幅型ホログラムを生成する場合、 $U_h(x_h, y_h)$ の実部を取り出せばよい。また、位相型ホログラムを生成する場合、 $U_h(x_h, y_h)$ の

位相を取り出せばよい。振幅型ホログラム $g(x_h, y_h)$ 及び位相型ホログラム $\theta(x_h, y_h)$ はそれぞれ式(4), 式(5)で与えられる。本研究では、回折計算アルゴリズムとして ARSS フレネル回折⁸⁾を用いる。

$$g(x_h, y_h) = \operatorname{Re}(U_h(x_h, y_h)) \quad (4)$$

$$\theta(x_h, y_h) = \operatorname{Arg}(U_h(x_h, y_h)) \quad (5)$$

従来のランダム位相フリー法を更に改良した手法(物体光センタリング法)が提案されている⁹⁾。この手法は、元画像の光をホログラムのより中心付近に記録できるように仮想収束光の位相パターンを変更する。これにより元画像とホログラムの縁における回折の影響を軽減できる。その結果リンクギングアーティファクトと呼ばれるノイズを除去し、画質の改善がかかる。

図 2 にランダム位相フリー法を用いた振幅型のホログラムと位相型ホログラム(キノフォーム)の再生シミュレーション像を示す。また、表 1 にシミュレーション条件を示す。オフセットは、ホログラムの中心と再生像の中心のずれを表している。オフセットを用いる理由は、実機再生を想定した際に空間光変調器からの直接光が再生像に重なることを回避するためである。拡大倍率とは、元画像に対する、再生シミュレーション像の倍率である。



(a)元画像 (b)振幅型 (c)位相型
図 2 ホログラムの再生シミュレーション像

表 1 シミュレーション条件

元画像のピクセル数	512×512
拡大倍率	1.0
ホログラム面のサンプリング間隔	4.0 [μm]
投影距離	0.5 [m]
オフセット	400 [μm]
レーザ波長	532.0 [μm]

図 2(b)をみると、ランダム位相フリー法によって生成した振幅型ホログラムでは、所望の再生像が得られている。一方で図 2(c)をみると、ランダム位相フリー法によって生成した位相型ホログラムでは、所望の再生像が得られていない。このことから、ランダム位相フリー法は振幅型ホログラムには適用が可能であるが、位相型ホログラムに対しては直接適用できないことがわかる。

3. ランダム位相フリー法の複素振幅の位相型ホログラムへの変換手法

2 章で述べたように、ランダム位相フリー法には、位相型ホログラムに直接適用できないという問題がある。そこで、位相型ホログラムに対してランダム位相フリー法を適用させるための手法が検討されている。本章ではランダム位相フリー法によって得た光の複素振幅の位相型ホログラムへの変換手法のうち、既に提案されている誤差拡散法を組み合わせたランダム位相フリー法⁶⁾および、本論文で組み合わせを試みた、X. Li らによる位相型ホログラム¹⁰⁾を組み合わせたランダム位相フリー法について述べる。

3.1. 誤差拡散法を組み合わせたランダム位相フリー法

ランダム位相フリー法に誤差拡散法を組み合わせた手法では、ホログラム面上における複素振幅と位相型ホログラムの画素単位での誤差を周囲のピクセルに拡散する。誤差拡散の重みづけは、フロイド・スタイルバーグ係数を用いた¹¹⁾。この係数を用いた誤差拡散法は、注目画素における誤差の7/16を直後のピクセルに分配し、次の列の三つのピクセルにそれぞれ3/16, 5/16, 1/16づつ分配し誤差を拡散することで、なめらかな再生像が得られる。

3.2. X.Li らによる位相型ホログラムのエンコード法を組み合わせたランダム位相フリー法

CGH によって光の位相変調を行う場合、ホログラム面上の複素振幅をホログラムに変換する方法として、式(5)に示すようなキノフォームが用いられることが多い。一方で CGH におけるホログラム面上の複素振幅からホログラムへの変換に写真乾板で作成する位相型ホログラムの考え方を適用したエンコード法が X. Li らによって提案されている¹¹⁾。X. Li らによって提案された位相型ホログラムは式(6)によって与えられる。

$$U_h'(x_h, y_h) = \operatorname{expi}(g(x_h, y_h)) \quad (6)$$

式(6)をランダム位相フリー法に適用した手法はまだ提案されていないため、本研究ではこの適用が可能か否か、及び、その画質の改善が図れるかを検証する。また、文献 5 と 6 のランダム位相フリー法の問題点を改善した物体光センタリング法⁹⁾の適用も試みる。

4. シミュレーションにおける検証結果

本章では、2 章と 3 章で述べたランダム位相フリー法を位相型ホログラムに適用する手法について、画質、回折効率及び計算時間の観点でシミュレーションを用いて比較を行う。シミュレーション条件を表 2 に示す。図 3 に再生像の再生像イメージ及び回折効率の定義を示す。各手法によって生成したホログラムの再生シミ

ユレーション像を図 4 に示し、再生シミュレーション像の数値評価の結果を表 3 に示す。本シミュレーションにおける回折効率とは、ホログラムに照射された再生照明光が、どの程度の割合で再生像の形成に寄与しているかを示した値である。再生像(図 3 内の E2 の領域)の光強度の総和を、再生像、共役光、直接光すべて(図 3 内の E1 の領域)の総和で割った値を回折効率として用いた。図 4 に示した画像は E2 の領域の再生像である。回折効率 η_i の式を(7)に示す。

$$\eta_i = \frac{\sum_{i=0}^n \sqrt{\operatorname{Re}(U_I(x_i, y_i))^2 + \operatorname{Im}(U_I(x_i, y_i))^2}}{\sum_{i=0}^m \sqrt{\operatorname{Re}(U_I(x_i, y_i))^2 + \operatorname{Im}(U_I(x_i, y_i))^2}} \quad (7)$$

n は再生像のピクセル数であり、 m は再生像面上に光が照射されている全範囲のピクセル数である。 U_I は再生像の複素振幅、 $\operatorname{Re}(\cdot)$ は実部の値を示し、 $\operatorname{Im}(\cdot)$ は虚部の値を示している。

表 2 シミュレーション条件

元画像のピクセル数	512×512
拡大倍率	3.0
ホログラム面のサンプリング間隔	4.0 [μm]
投影距離 z_2	0.5 [m]
オフセット	400 [μm]
レーザ波長	532.0 [μm]

表 3 再生シミュレーション像の画質、回折効率、計算時間の比較(計算時間は 8 回の平均)

ホログラムの種類	PSNR [dB]	SSIM	回折効率	計算時間 [ms]
(b) 振幅型	14.61	0.88	13.15	271.88
(c) 位相型 (式(5))	5.40	0.67	45.69	291.50
(d) 誤差拡散 位相型	9.45	0.76	23.15	316.00
(e) 提案手法 (ランダムフリー法)	14.24	0.87	12.29	276.00
(f) 提案手法 (物体光センタリング法)	14.18	0.90	15.54	280.50

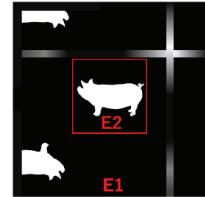


図 3 観察領域を拡大したホログラムの再生シミュレーション像(E1 は再生像、共役光、直接光すべてを含み、E2 は再生像のみを含む。)

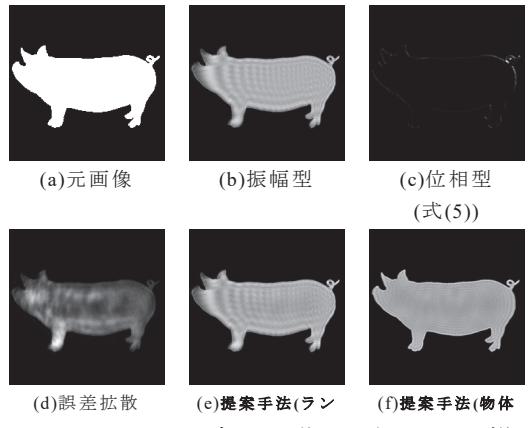


図 4 ホログラムの再生シミュレーション像

図 4(b)～(f)はランダム位相フリー法にそれぞれの手法を適用した再生シミュレーション像である。図 4(b)は元画像と同様のパターンが確認できるが、図 4(c)は画像が暗く、輪郭が一部だけ再生されている。図 4(d)は元画像と同様のパターンが確認できるが、輪郭に対して中心部が暗い。図 4(e)は提案手法による再生像であり、元画像と同様のパターンが確認され、ランダム位相フリー法に文献 11 の手法を適用できることができた。この再生像は図 4(d)と比較して輪郭が明瞭になっているが、輪郭の中心部に縞状のノイズがあり、リングアーティファクトの影響が見られる。図 4(f)は物体光センタリング法を用いた提案手法による結果である。この再生像はリングアーティファクトが除去され更に明瞭な再生像が得られた。

表 3 では、まず再生シミュレーション像と元画像を、PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)及び SSIM(Structural SIMilarity)にて画質評価をした。PSNR と SSIM は元画像がどれだけ再現できたかを数値的に表せる画質評価方法であり、定量的な画質評価として用いた。表 3 (b)と表 3(c)の画質を比較すると、PSNR, SSIM 共に表 3(c)の値が低く、2 章で述べた課題が顕在化している。表 3(d)の誤差拡散法は、PSNR, SSIM 共に表 3(c)より値が改善されている。表 3(e)の提案手法は PSNR が 14.24, SSIM は 0.87 であり、いずれも誤差拡散法を組

み合わせた手法よりも値が高く、表 3(b)と遜色ない画質が得られている。表 3(f)の提案手法(物体光センタリング法)は、PSNR が 14.18, SSIM が 0.90 であり、人の目の感覚に一番近いとされる SSIM の値が最も高い。

次に、回折効率を比較する。表 3(b)が 13.15 で、表 3(c)が 45.69 であった。表 3(b)は計算式の特性上、領域 E1 内に直接光の影響を受けるが、表 3(c)は領域 E1 内に直接光の影響を受けないため、回折効率が上がっていている。表 3(d)は 23.15 であり、表 3(c)よりも回折効率が下がった。表 3(e)の提案手法は 12.29、表 3(f)の提案手法(物体光センタリング法)は 15.54 であった。いずれも表 3(b)と同等の回折効率が得られた。

最後に計算時間を比較した。計算時間は 8 回計算を行い、平均値を取っている。図 4(b)の計算時間が最も早く、図 4(c)は計算時間が増している。図 4(d)の誤差拡散法は、計算時間が増している。図 4(e)の提案手法は位相型のホログラムの中では最も計算時間が短く、図 4(b)と同程度の計算速度であった。図 4(f)の提案手法(物体光センタリング法)は図 4(c)よりも計算時間が短い。ただし、図 4(e)に比べて、物体光をセンタリングするための計算式を含んでいる分、計算時間が増している。

5. むすび

本論文では、位相型ホログラムにランダム位相フリー法を文献 10 の手法に適用し、画質改善を図った。提案手法は、既存の手法である誤差拡散法を組み合わせたランダム位相フリー法と比べ、より画質の高い再生像がシミュレーションにより得られた。画質の数値比較では PSNR, SSIM 共に値が高くなっている、ランダム位相フリー法における位相型ホログラムの画質改善がなされたと言える。また、物体光センタリング法を適用することで、振幅型ホログラムだけでなく、位相型ホログラムにおいても更なる画質及び回折効率の向上が図れることが示された。

効率は通常の位相型ホログラムが最も高いが、要因の一つは位相型ホログラムの式の特性上、領域 E1 内に直接光の影響を受けていないためと考えられる。

提案手法は、SSIM, PSNR, 回折効率、計算時間、いずれの値を比較した場合も、振幅型ホログラムと遜色のない結果が得られている。つまり、提案手法を用いれば、位相型ホログラムにおいてもランダム位相フリー法を用いることが可能であると示された。今後は光学実験において更なる検証を行う予定である。

文 献

- [1] H. Sasaki, K. Yamamoto, K. Wakunami, Y. Ichihashi, R. Oi, and T. Senoh : “Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators”, Sci.Rep., 4, 6177 (2014)

- [2] M. Makowski, I. Ducin, M. Sypek, A. Siemion, A. Siemion, J. Suszek, and A. Kolodziejczyk: “Color image projection based on Fourier holograms”, Opt. Lett. **35**, 8, pp.1227–1229 (2010)
- [3] T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito: “Real-time and low speckle holographic projection”, in IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp.732–741 (2015)
- [4] J. Amako, H. Miura, and T. Sonehara: “Speckle-noise reduction kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator”, Appl. Opt. **34**, 17, pp.3165–3171 (1995)
- [5] T. Shimobaba and T. Ito : “Random phase-free computer-generated hologram”, Opt. Express **23**, 7, pp.9549–9554 (2015)
- [6] T. Shimobaba, T. Kakue, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, Y. Nagahama, M. Sano, M. Oikawa, T. Sugie, and T. Ito: “Random phase-free kinoform for large objects”, Opt. Express **23**, 13, pp.17269–17274 (2015)
- [7] T. Shimobaba, J. Weng, T. Sakurai, N. Okada, T. Nishitsuji, N. Takada, A. Shiraki, N. Masuda, T. Ito: “Computational wave optics library for C++: CWO++ library”, Comput. Phys. Commun., **183**, 5, pp.1124–1138 (2012)
- [8] T. Shimobaba, T. Kakue, N. Okada, M. Oikawa, Y. Yamaguchi, and T. Ito: “Aliasing-reduced Fresnel diffraction with scale and shift operations”, J. Opt. **15**, 7, 075405 (2013)
- [9] Y. Nagahama, T. Shimobaba, T. Kakue, Y. Takaki, and T. Ito: “Image quality improvement of random phase-free holograms by addressing the cause of ringing artifacts”, Appl. Opt. **58**, 9, pp.2146–2151 (2019)
- [10] X. Li, J. Liu, J. Jia, Y. Pan, and Y. Wang: “3D dynamic holographic display by modulating complex amplitude experimentally”, Opt. Express **21**, 18, pp.20577–20587 (2013)
- [11] R. W. Floyd, L. Steinberg: “An adaptive algorithm for spatial grey scale”, Proceedings of the Society of Information Display, **17**, 2, pp.75–77 (1976)

可変正射影光線サンプリング面による広深度ホログラムの計算法

五十嵐 俊亮¹ 柿沼 建太郎¹ 中村 友哉^{1,2} 松島 恭治³ 山口雅浩¹

1. 東京工業大学 工学院情報通信系 〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G2-28

2. JST さきがけ 〒102-0076 東京都千代田区五番町 7

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

E-mail: igarashi.s.ab@m.titech.ac.jp

あらまし 計算機合成ホログラムにおいて任意の3次元物体を再生することは究極の目標の一つであるが、そのような計算手法は確立しておらず表現可能な3Dシーンに制限があるのが現状である。筆者らはこれまで複数の光線サンプリング面とそれらの間での相互オクルージョン処理を用いて広い深度の立体像を計算する手法を提案したが、計算量と立体像の分解能に関して依然として問題が残っていた。本研究では光線の出射深度を可変とするような新たな計算手法を提案し、広い深度を持つ立体像をより効率的に計算することを可能とする。原理の実証としてシミュレーションによる立体像の分解能向上を確認し、また128K×256Kのホログラムを生成し10ギガピクセルを超えるホログラム計算が可能であることを確認した。

キーワード ホログラフィ、計算機合成ホログラム、3Dディスプレイ

Calculation of Holograms in Wide Range of Depth using Variable Orthographic Ray-Sampling Plane

Shunsuke IGARASHI¹ Kentaro KAKINUMA¹ Tomoya NAKAMURA^{1,2}

Kyoji MATSUSHIMA³ and Masahiro YAMAGUCHI¹

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

2. JST PRESTO, 5-7 Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0076, Japan

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

E-mail: igarashi.s.ab@m.titech.ac.jp

Abstract In computer-generated holograms, it is one of the ultimate goals to reproduce arbitrary 3D objects; however, such calculation methods have not been established, and that limits 3D scenes that can be computed. Authors have proposed methods for calculating 3D images at a wide range of depth using plural ray-sampling planes and mutual occlusion among them. However, issues still remain unsolved in the computational complexity and the resolution of images. In this paper, we propose a calculation method to enable more efficient computing of 3D images in a wide range of depth by making the depth of rays variable. As a proof-of-principle, we numerically confirmed that the resolution of the 3D image was improved, and a hologram of 128K x 256K was generated.

Keyword Holography, Computer generated Hologram, 3D Display

1.はじめに

ホログラフィを用いた3Dディスプレイは3次元物体の波面を再生することで、人間の奥行き知覚要因を全て満たす立体像表示を可能にする。これを計算機によって生成する計算機合成ホログラム(CGH: Computer-Generated Hologram)の技術を用いることで空間光変調器等を用いた動画表示が可能となる。立体像再生におけるCGH計算法は、計算機上の物体を点光源やポリゴンに分解する手法[1-3]と光線に分解する手法[4-13]に大別

できる。

点光源・ポリゴン法は物体を仮想光源の集合体として表現する手法で、物体の明瞭さや正確な奥行き表現に優れる。これに加えて近年、質感表現においても鏡面反射等を含む様々な手法が提案されている[2,3]。一方で、複雑な透過・屈折や皮下散乱等の現代のフォトリアルな3DCG用いられる表現手法の実現には更なる進歩が必要となる。

また光線場を再生するCGH計算手法も以前か

ら提案されている。これらの手法では3DCGソフトウェアなどを用いた光線情報処理を直接用いることが可能であり、複雑な質感の再現やオクルージョン処理を簡便に実装できる。筆者らはこれまでに正射影光線波面変換と呼ばれる、写実的かつ深い奥行を持つホログラム計算法を提案している[11-12]。加えてこれまでに複数の光線サンプリング面とそれらの間での相互オクルージョン処理を用いて広い深度の立体像を計算する手法を提案した[13]。しかしながらより奥行幅の広い立体像、例えば手前から奥まで数十メートル連続的に広がるようなシーンに関しては、実時間での計算が困難である。これは1枚の光線サンプリング面が表現可能な奥行幅に限界があること、光線サンプリング面の間での相互オクルージョン処理に長大な時間を要することが主な原因である。従って何らかの方法で1枚の光線サンプリング面が表現可能な奥行幅の制限を打破できればより多くのシーンが計算可能になる。

本研究では光線の出射深度を可変とするような新たな計算手法を提案し、広い深度を持つ立体像をより効率的に計算することを可能とするものである。実験では原理の実証としてシミュレーションによる立体像の分解能向上を確認し、また128K×256Kのホログラムを生成し立体像の再生像を確認した。

2. 正射影光線サンプリング面を用いた計算法

正射影光線サンプリング(ORS: Orthographic Ray Sampling)面を用いた光線波面変換型CGH計算の概念図を図1に示す。始めに仮想物体の近くにORS面と呼ばれる面を定義し、この面上で正射影画像(平行光線の空間的な分布)を3DCGソフトウェア等によって様々な角度から取得する。正射影画像にランダム位相を加えフーリエ変換したものは、ORS面での角スペクトルの一領域に相当する。CGH面に入射する分の帯域に相当する正射影画像に対しこの処理を行う。生成した角スペクトルに対し伝搬伝達関数を乗算することで、CGH面での角スペクトルを得ることができる。これを逆フーリエ変換しCGH面の波面を得る。参照光との干渉を計算することで、最終的な干渉縞を計算する。

本手法の利点としてホログラム面に入射しない角スペクトルに相当する正射影画像の伝搬計算を省くことで、高速かつ大規模な計算が可能になるという特徴を持つ。この特徴を利用しこれまでに1m立方スケールの立体像を計算する手法を提案した[13]。单一のORS面では表現可能な深度に制限があるため、広い深度を表現するためには複数のORS面を用い相互オクルージョン処理を施す。この際計算量の増大が顕著であり、何らかの解決策が望まれる。

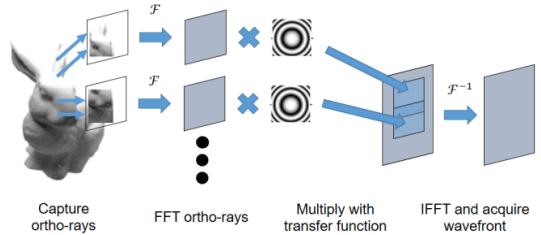


Fig. 1. Scheme of CGH calculation using ORS plane.

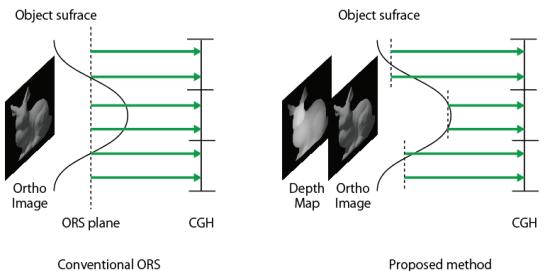


Fig. 2. Concept of the variable ORS plane.

3. 可変正射影光線サンプリング面

本発表で提案するアルゴリズムのコンセプトを図2に示す。従来のORS面を用いた計算法では光線の出射点を一定の深度に定める。これによりある角度の光線からCGH面への寄与をシフトインパリエントとし、FFTを用いた計算が可能となり、効率的な計算を実現している。これは即ち本来物体表面から出射すべき光線を、ORS面から出射した光線として近似することに相当する。従って物体表面とORS面の距離が離れるほど再生像の分解能は低下する。

一方本発表にて提案する手法ではこの分解能低下の原因に着目し、広い深度の立体像を効率的に計算することを可能とする。ギガピクセル単位の解像度を扱う大規模なCGHの計算では、CGH面を分割し独立に計算する「タイリング」というテクニックを用いる。この狭いタイルの範囲に入る正射影光線の中で光線の出射点が一定の深度にあれば、畳み込みを用いて計算することができる。従って正射影画像と同時にその深度マップを取得し、それを用いて光線の出射点を可変とし物体面に這わせることで、近似精度を高めることができる。

つまり正射影画像 $\mathbf{o}_n(x)$ におけるCGH面と物体面の距離を z_n とするとき、CGH面上の波面 $\mathbf{w}(x)$ との関係は

$$\mathcal{F}[\mathbf{w}(x)] = \begin{bmatrix} H(f_x; z_1)\mathcal{F}[\mathbf{o}_1(x)] \\ \vdots \\ H(f_x; z_N)\mathcal{F}[\mathbf{o}_N(x)] \end{bmatrix}$$

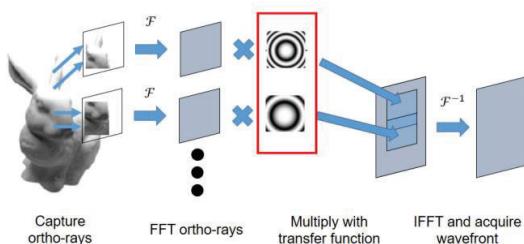


Fig. 3. Scheme of calculation using variable ORS plane.

として表すことができる。ただし $\mathcal{F}[\cdot]$ はフーリエ変換, $H(f_x; z)$ は距離 z における伝達関数である。アルゴリズムの観点でも図 3 のように、従来全方向に対し同様の伝達関数を用いていた部分を、各方向の正射影光線の深度に合わせて生成するのみで実装可能である。従って計算量としては全く変化せず、また実装も簡便である。

4. 実験結果

始めに提案手法による分解能の向上を確認するため、 $3.2 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ のホログラムの 1.6 mm 奥、 3.2 mm 奥にそれぞれ平面物体がある図 4 のような CGH を、従来の ORS 法と提案手法で生成した。ピクセルピッチを $0.8 \mu\text{m} \times 0.8 \mu\text{m}$ 、波長を 527 nm とした。また CGH 画素数を $4K \times 4K$ とし、CGH 面を 2×2 のタイルに分割して計算している。光線方向数は 16×16 とした。また従来の ORS 面を用いた計算ではある深度を指定しその面で最大の分解能を発揮するよう設定するが、今回は手前の面にピントを合わせた。計算環境は CPU: Intel Core i5-7200U, RAM: 8GB、計算時間は従来手法で 30 秒、提案手法で 109 秒であった。

計算した CGH からの再生シミュレーションの結果を図 5 に示す。図 5 (a) と (b) は従来の ORS 面を用いた手法により、(c) と (d) は提案手法により計算した CGH の再生像である。また (a) と (c) は手前の平面物体に、(b) と (d) は奥の平面物体にピントを合わせている。手前の物体に関してはどちらも高い分解能で再生できていることが分かるが、奥の物体に対しては従来の ORS 面を用いた計算ではボケてしまっている。これは光線の出射点を手前の面に合わせた結果である。一方で提案手法では手前・奥どちらの面でも高い分解能で再生できていることが分かる。この結果から提案手法が従来手法と比較し広い深度に渡って高い分解能を再生可能であることを示すことができた。

次に提案手法を用いて 10 ギガピクセルを超えるかつ深度に幅があるような CGH を計算可能であることを確認する。図 6 のような「人間と壁」の 3DCG モデルを制作し、それを用いて CGH を計算した。 $105 \text{ mm} \times 105 \text{ mm}$ の CGH の奥 $50 \text{ mm} \sim 120 \text{ mm}$ に渡り物体を配置する。生成した CGH のパラメータを表 1 に示す。

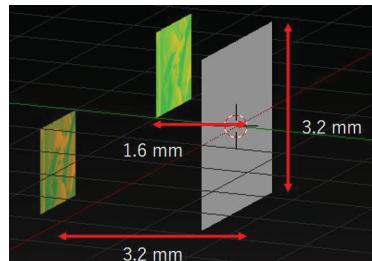


Fig. 4. Setup for generating CGH for conforming the enhancement of resolution.

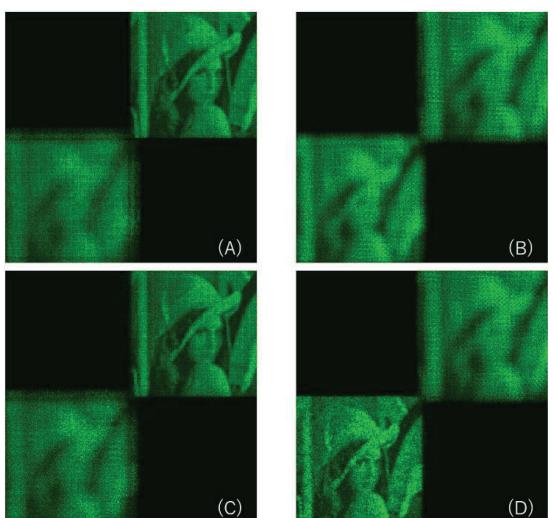


Fig. 5. Numerical reconstruction from CGHs generated using (a,b) the conventional ORS and (c,d) the proposed method. Focused on the front image in (a,c), and the backward image in (b,d).

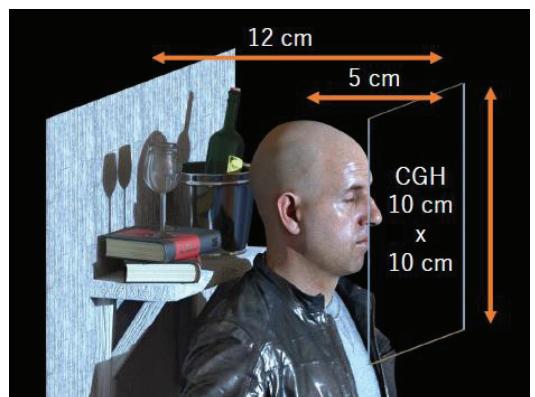


Fig. 6. Setup for generating a giga-pixel CGH.



Fig. 7. Reconstructed front and right views from generated CGH. (A) Focused on the face of the man and (B) close up view focused on books.

Table 1. Parameters used in the experiment.

CGH 面画素数	128K×256K
CGH 分割数	16×16
波長	526 nm
ピクセルピッチ	0.8 μm×0.4 μm
正射影画像解像度	512×512
光線方向数	64×64

計算環境は CPU: Intel Core i7-8700K (3.70GHz), RAM: 64GB, 計算時間はレンダリング時間を除き 31 時間であった。金属やガラス、人間の肌などの多様な質感を含み、かつ物体同士のオクルージョンも複雑なシーンであるが、図 7 のように明瞭に再生されていることが分かる。従来の ORS 面 1 枚では手前の人間を中心にはホログラムを計算した場合奥の物体がボケてしまうが、提案手法では(B)のように奥の本の文字まで見て取れる。これにより提案手法により 10 ギガピクセルを超える CGH の生成が可能であることを示すことができた。

5.まとめ

本研究では光線の出射深度を可変とする ORS 面を用いた CGH 計算を提案し、それにより幅広い深度を持つ立体像を効率的に計算する手法を提案した。実験では 105 mm×105 mm のホログラムの奥 50 mm～120 mm に渡る立体像を再生する CGH を提案手法により計算し再生シミュレーションにより像を確認した。原理的には従来と変わらない計算量でより深度の幅が広い立体像を計算できるものの、従来一度生成すればよかつた伝達関数を逐次生成するため計算時間が増大している。この点は伝達関数のルックアップテーブル化などで改善可能であろう。今後はスーパーコンピュータを用いた計算によるさらに幅広い深度を持つ立体像計算の実証を行う。

6.謝辞

本研究の一部は JSPS 特別研究員奨励費 JP201814590、および関西大学デジタルホロスタジオの助成を受けた。

文献

- [1] J. Weng, T. Shimobaba, N. Okada, H. Nakayama, M. Oikawa, N. Masuda, and T. Ito, "Generation of real-time large computer generated hologram using wavefront recording method," *Opt. Express* **20**, 4018-4023 (2012).
- [2] H. Nishi, K. Matsushima, "Rendering of specular curved objects in polygon-based computer holography," *Appl. Opt.* **56**, F33-F44 (2017).
- [3] T. Ichikawa, T. Yoneyama, and Y. Sakamoto, "CGH calculation with the ray tracing method for the Fourier transform optical system," *Opt. Express* **21**, 32019-32031 (2013).
- [4] T. Yatagai, "Stereoscopic approach to 3-D display using computer-generated holograms," *Appl. Opt.* **15**, 2722-2729 (1976).
- [5] M. Yamaguchi, H. Hoshino, T. Honda, and N. Ohya, "Phase-added stereogram: calculation of hologram using computer graphics technique," *Proc. SPIE* **1914**, 25-31 (1993).
- [6] W. Plesniak, M. Halle, V. M. Bove, Jr., J. Barabas, and R. Pappu, "Reconfigurable image projection holograms," *Opt. Eng.* **45**, 115801 (2006).
- [7] H. Zhang, Y. Zhao, L. Cao, and G. Jin, "Fully computed holographic stereogram based algorithm for computer-generated holograms with accurate depth cues," *Opt. Express* **23**, 3901-3913 (2014).
- [8] Y. Sando, M. Itoh, and T. Yatagai, "Holographic three-dimensional display synthesized from three-dimensional Fourier spectra of real existing objects," *Opt. Lett.* **28**, 2518-2520 (2003).
- [9] J. H. Park, M. S. Kim, G. Baasantseren, and N. Kim, "Fresnel and Fourier hologram generation using orthographic projection images," *Opt. Express* **17**, 6320-6334 (2009).
- [10] K. Wakunami and M. Yamaguchi, "Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane," *Opt. Express* **19**, 9086-9101 (2011).
- [11] S. Igarashi, T. Nakamura, and M. Yamaguchi, "Fast method of calculating a photorealistic hologram based on orthographic ray-wavefront conversion," *Opt. Lett.* **41**, 1396-1399 (2016).
- [12] S. Igarashi, T. Nakamura, K. Matsushima, and M. Yamaguchi, "Efficient tiled calculation of over-10-gigapixel holograms using ray-wavefront conversion," *Opt. Express* **26**, 10773-10786 (2018).
- [13] 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).

点光源の空間分解能を考慮したベクトル量子化とフレーム間差分による電子ホログラフィの圧縮伝送方式

細野 湧大[†] 西辻 崇[‡] 朝香 卓也[‡]

[†]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

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

E-mail: [†]zerodizoruba@gmail.com, [‡]{nishitsuji, asaka}@tmu.ac.jp

あらまし 現在、電子ホログラフィは3次元映像ディスプレイに応用することで、立体放送の実現が期待されている。しかし、サーバエッジ間の伝送容量や計算機合成ホログラム作製による計算時間の膨大さを理由に、未だ立体放送の実現には至っていない。本研究では、点光源の空間分解能を考慮した圧縮によって、伝送・計算対象となる点群数の削減を目的に、光学的分解能とフレーム間差分を用いた点群の圧縮手法を開発した。そして、提案方式によって計算時間において18%，伝送ビットレートにおいて27%の低減を実現した。

キーワード ベクトル量子化, 3次元映像, 点群, 電子ホログラフィ, 空間分解能

Compression scheme for electro-holography based on the vector quantization of point-light sources using frame subtraction and optical spatial resolution

Yudai HOSONO[†] Takashi NISHITSUJI[‡] and Takuya ASAKA[‡]

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

[‡]Faculty of Systems Design, Tokyo Metropolitan University 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan
E-mail: [†]zerodizoruba@gmail.com, [‡]{nishitsuji, asaka}@tmu.ac.jp

Abstract Electroholography is expected to realize 3D broadcast by applying it to 3D video display. However, 3D broadcast has not been realized because of the transmission capacity between TV station and TVs and the enormous computational load of computer-generated hologram production. In this study, I developed a point cloud compression method using axial resolution and difference between frames for the purpose of reducing the number of point clouds to be transmitted and calculated. The proposed method achieved a reduction of 18% in calculation time and 27% in transmission rate.

Keyword Vector quantization, 3D image, Point cloud, Electroholography, Optical resolution

1.はじめに

ヘッドマウントディスプレイを用いた VR(Virtual Reality)ゲームなど、身近な3次元映像はいくつも挙げられる。しかし、これらの映像技術は主に目の錯覚を利用しているため、長時間利用による眼精疲労や頭痛などの健康被害が懸念されるだけでなく、人間の立体視に必要な要件を全て満たしていないことから、臨場感の観点からも課題がある[1]。一方、電子ホログラフィは立体知覚要件を全て満たすことから、究極の3次元映像技術と言われる。

電子ホログラフィでは、計算機を用いて点群等で表現される3次元像データからホログラムを作製する。

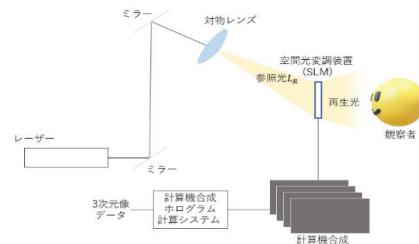
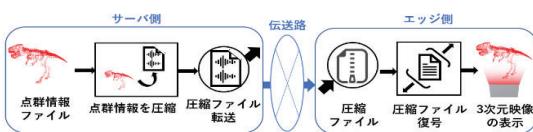
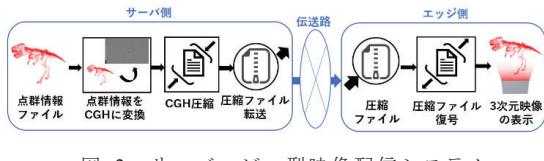


図1 電子ホログラフィの再生光学系
作製されたホログラムを計算機合成ホログラム(CGH: Computer-Generated Hologram)と呼ぶ。図1に電子ホログラフィの再生光学系を示す。CGHは空間光変



調装置(SLM:Spatial Light Modulator)に入力され, SLMにホログラム作製時と同条件のレーザー光を照射することで, 所望の3次元像を再生する.

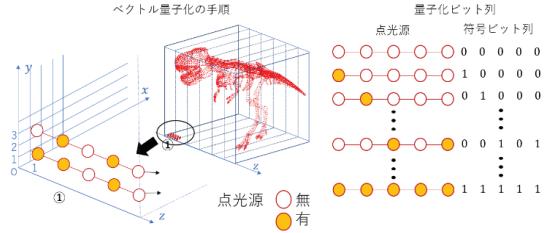
しかし, 電子ホログラフィによる立体放送の実現には, 映像伝送に必要なデータ伝送量の膨大さという課題がある. 図2と図3に, 現時点で想定されているサーバヘビー型映像配信システム(以下, サーバヘビー型システム)と, エッジヘビー型映像配信システム(以下, エッジヘビー型システム)の映像配信処理の概念図を示す[3][4]. サーバヘビー型システムは, サーバ側の高性能計算機を用いて作製したCGHをエッジ側に伝送する. サーバ側でCGHを作製するのは, CGH作製の計算時間が非常に大きいためである. しかし, 実用的なCGHのデータ量は非常に大きい上, 既存の画像圧縮方法では十分な圧縮性能が期待できない[5]. そのため, データ伝送量が現在のテレビシステムやインターネットの伝送帯域を大きく上回ってしまうことが懸念される.

他方, エッジヘビー型映像配信システムでは, 一般にCGHに比べてデータ量が少なく, 圧縮効率も高い点群等の3次元情報を圧縮伝送するため,かかる問題は生じにくい. しかし, サーバ側に比較して計算性能の低いエッジ側でCGH計算を行うため, 計算量の削減が課題になる. この解決のため, 筆者らの先行研究[3][4](以下, 従来手法)では, 点群のベクトル量子化に基づく点群符号化圧縮方式, 及び符号化データを用いた高効率なCGH合成手法を開発した. しかし, エッジ側の計算量は未だに多く, また, 3次元映像の大規模化に従って伝送量は大きくなるため, 更なる圧縮率の向上が必要である.

そこで本研究では, 従来手法に対し, 伝送・計算対象となる点群数の削減を目的に, 光学的分解能とフレーム間差分を用いた点群の圧縮手法を開発した.

2. 点群のベクトル量子化を用いた電子ホログラフィの圧縮伝送方式

本章では, 従来手法における点群のベクトル量子化



に基づく点群符号化圧縮方式, 及び符号化データを用いた高効率なCGH合成手法について説明する.

2.1. サーバ側処理(点群のベクトル量子化)

点群のベクトル量子化とは, 複数の点光源の3次元情報を1つのビット列として符号化することを言う. 図4にベクトル量化の概要図を示す. ベクトル量化によって得られるビット列を, 点群情報に代替して伝送することで, サーバエッジ間でやり取りするデータ量を削減できる. また, 可逆圧縮であるためCGHを従来の画像圧縮方式で圧縮する方式に比較して, 必要な情報が間引かれる可能性がないことが特長である.

2.2. エッジ側処理(VQ-LUT法)

まず, 点群モデルを用いた電子ホログラフィにおけるLUT(Look-Up Table)法とは, ゾーンプレートに相当する複素振幅分布を再生したい点光源の奥行き距離ごとに事前計算してテーブルに格納しておく, 必要に応じて読み出, 合成するCGHの高速計算手法を指す[6]. LUT法によって, CGH作製計算処理を削減できるが, 使用するメモリ量が大きいことが特徴である. そこで, ゾーンプレートの円対称性を利用したメモリ量削減手法が提案されている[6][7].

従来手法でもエッジ側のCGH作製処理にLUT法の一つであるVQ-LUT(Vector-Quantization based Look-Up Table)を適用している[3][4]. VQ-LUT法は, 奥行方向に連続する点群の複素振幅分布を事前計算し, ベクトル量子化によって得られる符号ビット列に対応する複素振幅分布をから合成することで, LUT法におけるゾーンプレートの合成回数を削減可能なCGH計算手法である. 奥行方向に連続する点群は同様に円対称性を持つことから, LUT法と同様にメモリ量を削減可能である.

3. 提案方式

本研究では, ベクトル量子化を用いた従来手法の圧縮率向上, 及びエッジ側での計算時間低減を目的とした点群の符号化方式を提案する.

提案方式では, 点光源の光学的空間分解能を考慮して解像不能な点群を間引き, さらにフレーム間差分を適用することで計算・伝送対象となる点群数を削減する. 次に間引かれた点群にベクトル量子化を適用する

ことで、点群列情報を符号化・圧縮する。エッジ側では、従来手法と同様に VQ-LUT 法によって CGH を合成する。従来の LUT 法に比較して実質的な計算回数の削減が可能である。以降、点光源の光学的空間分解能を考慮した圧縮のことを分解能圧縮と記述する。

分解能圧縮の特長は、点群情報を減らしつつ画質に影響が小さい圧縮が実現できることである。このような圧縮により、サーバエッジ間の伝送量の削減につながるだけでなく、エッジ側の計算時間の低減が可能である。

3.1. サーバ側処理(分解能圧縮)

空間分解能とは、空間上の 2 点を識別する尺度である。空間上に集光する点光源の光学的な奥行き分解能は以下の式に表せる[7]。

$$d = \frac{8\lambda z^2}{N\Delta^2} \quad (1)$$

ここで、 λ は参照光の波長、 Δ は表示デバイスの画素ピッチ、 N は表示デバイスのピクセル数である。

式(1)より、同じ点群モデル内でも点光源の存在する奥行き位置によって解像できる 2 点間の距離は大きく変化することがわかる。本研究ではこの性質を利用して、分解能より近距離にある点群を間引くことで、非可逆圧縮であるが画質への影響が小さい圧縮を実現した。また、後に処理する点群ベクトル量子化をより高効率に行うため、点群の存在位置における分解能を小数点以下で切り上げた数値を単位にして圧縮を行うことで、整数値で等間隔に点群が配置されるように圧縮した。図 5 に、式(1)によって求めた奥行き分解能(青線)と、本研究で適用した点群の間引き間隔(橙線)を示す。図 5 に示す間隔で間引くことで、間引き後の点群の奥行き方向の間隔が、それぞれ整数倍の間隔とすることができ、ベクトル量子化の効率を向上できる。

3.2. サーバ側処理(フレーム間差分)

本研究では、さらに分解能圧縮を行った後にフレーム間差分を適用する。前後フレームの点群を座標によって比較し、後フレームの点群が存在しない座標に前フレームの点群がある場合、該当フレーム点群のゾーンプレートを打ち消す値を CGH に重畠し、同様に前フレームに存在しない後フレーム該当点群のゾーンプレートを加える値を CGH に重畠する処理を行う。

4. 評価結果と考察

本研究では、エッジ側の計算時間、データ伝送量、3 次元像再生画質の 3 つの観点で評価する。以下、各評価項目の詳細、及び評価に使用した点群モデルについて述べる。

4.1. 点群モデル、評価パターンと CGH 作製環境

まず点群モデルについて説明する。惑星に着陸する探査機を表現した点群モデルを連続する 6 フレーム分

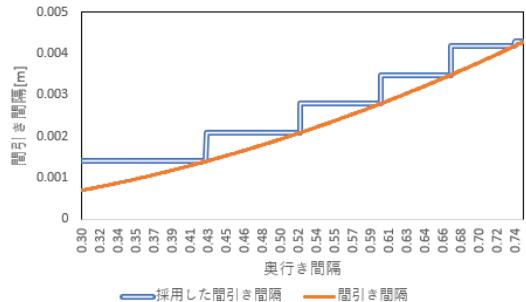


図 5 奥行き分解能と採用値

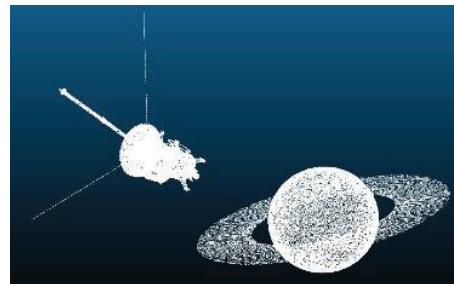


図 6 使用した 3 次元点群モデル

表 1 評価パターン

	分解能圧縮	フレーム間差分
パターン 1	無	無
パターン 2	有	無
パターン 3	有	有

表 2 CGH 作製環境

CPU	Intel Core i7-7700K 4.20GHz
メモリ	DDR 4-2400 32.0GB
浮動小数点精度	倍精度(double)
CGH の解像度	4,096 × 4,096 [pixels]
フレームレート	6 [fps]

用いて評価した。図 6 に点群例を示す。点群数は 200,000 点であり、惑星はフレーム間に渡ってほぼ動かない。

本研究では、エッジ側の計算時間、データ伝送量を表 1 の 3 パターンにて評価した。なお、すべてのパターンにおいてベクトル量子化を適用している。一方で再生画質評価は表 1 のパターン 1, 2 の 2 パターンを用いて評価した。これはフレーム間差分の有無が画質に影響しないためである。

また、本研究の CGH 作製環境を表 2 に示した。

4.2. 評価結果

まず計算時間評価である。図 7 に計算時間結果を示す。

パターン 1 に比べ、パターン 2 では約 18% の計算時間の低減となった。分解能圧縮による実質的な計算回数の削減が大きく影響した結果である。また、パターン 3 はパターン 2 に比べ約 26% の増減となった。これ

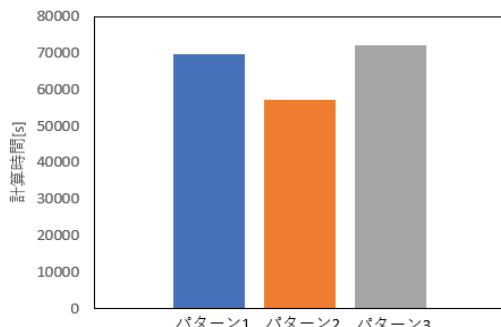


図 7 3 パターンの計算時間

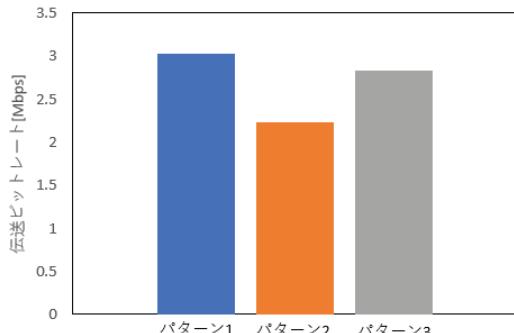


図 8 3 方式の伝送ビットレート

は、フレーム間差分によって前フレームに存在しない後フレーム該当点群のゾーンプレートを重畠する処理を行うだけでなく、後フレームに存在しない前フレーム該当点群のゾーンプレートを打ち消す値を重畠する処理を行うことで、フレーム間差分を適用しない場合に比べ処理すべき点群数が多くなったことが原因である。

次に伝送ビットレート評価である。図 8 に、伝送ビットレート結果を示す。

パターン 1 に比べ、パターン 2 では約 27% の低減となった。分解能圧縮による点群数の低減が影響した結果である。また、パターン 3 はパターン 2 に比べ約 27% の増減となった。これは、計算時間評価同様、フレーム間差分を適用しない場合に比べ処理すべき点群数が多くなったことが原因である。

最後に画質評価である。本研究では、PSNR (Peak Signal Noise to Ratio) を用いて 2 手法の画質の比較を行う。ここで、PSNR は角スペクトル法を用いて取得した所望焦点付近の光強度分布を、焦点距離を変えながら複数取得し、近似等を用いずに作成した CGH の光強度分布を真値として計算した PSNR の平均値である。所望焦点距離は 0.3m、光強度分布の取得間隔は 0.04m で、0.3m~0.7m の範囲で 100 枚の光強度分布を取得し平均 PSNR を算出した。

平均 PSNR は 35.43dB であった。一般的に 2 次元映像では 30dB 以上の数値であれば高画質とされる。3 次元映像に対して同指標が適用できるとは限らないが、今回も 30dB を評価基準とすると、今回の結果は高画質であり、分解能圧縮による画質劣化は小さいと言える。

5.まとめ

本研究では、点群のベクトル量化を用いた電子ホログラフィの符号化圧縮方式において、光学的分解能とフレーム間差分を考慮した点群の間引きによって、伝送レート、及びエッジ側での CGH 計算時間を削減した手法を開発した。提案方式によって計算時間において 18%，伝送ビットレートにおいて 27% の低減を実現した。

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。3 次元点群モデルを作成していただいた国立天文台 中山弘敬博士に御礼を申し上げます。

文 献

- [1] 独立行政法人国民生活センター，“3D 映画による体調不良”，http://www.kokusen.go.jp/pdf/n-20100804_2.pdf, (Aug. 2010).
- [2] 財団法人 機械システム振興協会，“自然な立体視を可能とする空間像の形成に関する調査研究報告書”，光産業技術振興協会，(Apr. 2008).
- [3] T. Nishitsuiji, 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, pp.11594-11607 (Apr. 2019).
- [4] 西辻崇, 細野渾大, 角江崇, 下馬場朋裕, 伊藤智義, 朝香卓也, "点群のベクトル量化に基づく電子ホログラフィの圧縮伝送方式", ホログラフィックディスプレイ研究会会報, 39, 2, pp. 24-29 (May 2019).
- [5] D. Blinder, A. Ahar, S. Bettens, T. Birnbaum, A. Symeonidou, H. Ottevaere, Colas Schretter, P. Schelkens, "Signal processing challenges for digital holographic video display systems , " Signal Processing: Image Communication, 70, pp. 114-130, (Oct. 2018).
- [6] T. Nishitsuiji, T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito, "Review of Fast Calculation Techniques for Computer-Generated Holograms With the Point-Light-Source-Based Model," IEEE Trans, 13, 5, pp. 2447-2454, (Oct. 2017).
- [7] 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, 19, pp.55-62, (Jul. 2008).
- [8] T. Latychevskaia, "Lateral and axial resolution criteria in incoherent and coherent optics and holography, near- and far-field regimes," Appl. Opt., 58, 13, pp.3597-3603, (May 2019).

平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡による カラーイメージング

井元克駿¹ 児玉周太朗¹ 五味英晃¹ 岡本勝就² 渡邊恵理子¹

電気通信大学¹〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1
岡本研究所²

E-mail: phase@fourier.grd.dp.uec.ac.jp

あらまし 我々は平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡, (PLC-DHM : (Planar Lightwave Circuit Digital Holographic Microscope)を開発してきた。PLC-DHM は PLC を用いた 2 光束干渉系に熱光学効果による位相シフトを利用することで完全レンズレス、超小型、軽量、アライメント簡易、機械的可動部無しでの 3 次元顕微イメージングが実現できる。さらに PLC-DHM では対物レンズを用いていないため、基本的には色収差の影響を受けず多波長イメージングが可能であり、またカラーイメージング化する際には光学系の変更が必要ない。本研究では平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡に、 $\lambda = 473.0 \text{ nm}$, $\lambda = 543.5 \text{ nm}$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, のレーザ光源を入射し、顕微カラーイメージングを実現した。

キーワード デジタルホログラフィック顕微鏡、平面導波路、カラーイメージング

Preliminary experimental evaluation of color imaging using Digital Holographic Microscope based on Planar Lightwave Circuit

Katsutoshi INOMOTO¹ Syutaro KODAMA¹ Hideaki GOMI¹

Katsunari OKAMOTO² and Eriko WATANABE¹

The University of Electro-Communications¹ 1-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

Okamoto laboratory²

E-mail: phase@fourier.grd.dp.uec.ac.jp

Abstract We have developed a digital holographic microscope based on planar lightwave circuit (PLC-DHM) with no moving parts and no lenses by optimizing the design of the PLC and optical systems. This PLC-DHM can easily perform multi-wavelength imaging without chromatic aberration and changing the optical system. In this study, we realized microscopic color imaging with PLC-DHM using 473.0 nm, 543.5 nm and 632.8 nm lasers.

Keyword Digital holographic microscopy, Planar lightwave circuit, color imaging

1. はじめに

デジタルホログラフィック顕微鏡(Digital Holographic Microscope: DHM)[1]は、撮影したホログラムから任意の焦点位置で 3 次元イメージング、および物体の屈折率や厚みなどの定量位相情報を非接触・非侵襲で測定可能な技術である。しかし、従来の DHM は、レンズを用いた空間光学系により装置の大型化が課題となっていた。我々はアライメントの簡易化、装置の超小型化のため、平面導波路型デジタルホログラフィック顕

微鏡 (Planar Lightwave Circuit Digital Holographic Microscope: PLC-DHM) の開発を行ってきた[2,3]。球面参照波を用いた手法を利用することで、物体と撮像素子の間に物体を拡大するためのレンズが不要となり、光学系を簡易化できる。また平面導波路は、Arrayed waveguide gratings(AWG)など、様々な導波路デバイスを組み込むことができる。そのため 1 チップの小さいデバイスを用い、様々な波長で 3 次元情報を取得することが出来る。

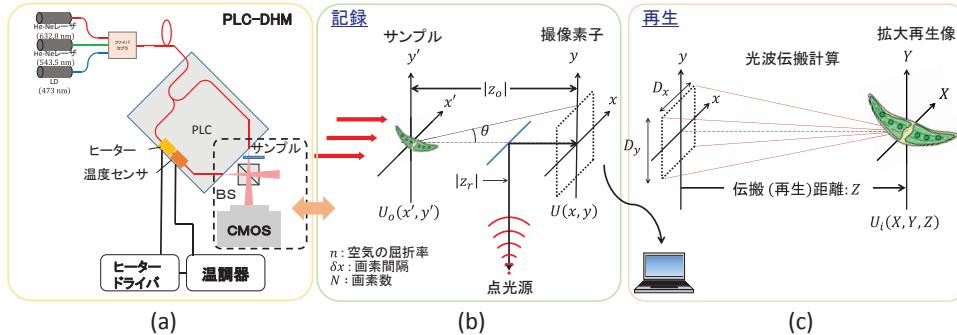


図 1 PLC-DHM の概要と実験座標系

本稿では、多波長での顕微 3 次元イメージングや定量位相イメージングの可能な PLC-DHM システムを構築する。この PLC-DHM に対し、632.8 nm, 543.5 nm と 473.0 nm のレーザ光源を用いて、カラー再構成像を得た結果を示す。

2. 平面導波路型

デジタルホログラフィック顕微鏡^[4]

2.1 実験原理

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

図 1-(b)(c)に PLC-DHM の記録と再生の座標系を示す。撮像素子面から z_0 だけ離れたサンプル(複素振幅を $U_o(x',y')$)に物体光を照射する。この物体光と撮像素子から z_r だけ離れた参照光と同軸で干渉させ、干渉縞を撮像素子で記録する。撮像素子面での物体光の複素振幅を $U(x,y)$ とする。記録した干渉縞画像に対し画像処理、光波伝搬計算を行うことで再生像 $U_i(X,Y)$ を取得する。

インラインの光学系の場合、再生光である 1 次光と 0 次光と -1 次光が重なるために再生像の画質が劣化してしまう欠点がある。PLC-DHM では参照光の位相を変化させた複数枚の干渉縞を計算機上で処理を行い、再生光を取り出す位相シフト法を用いている[5]。位相制御には熱光学効果を用いることで位相シフタを制御し相対位相差を与える参照光の位相をシフトさせる[6]。

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

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

得られた再生光の複素振幅分布に対しフレネル伝搬計算を行うことで再構成像を取得する。計算機上での再生伝搬距離 Z は式(2)で得られる[7]。

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

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

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

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

PLC-DHM の理論空間分解能 δx_0 は式(4)で定義される。

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

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

2.2 PLC-DHM によるカラーイメージングの原理

PLC-DHM によるカラーイメージングの原理について説明する。光源に 632.8 nm と 543.5 nm、473.0 nm の波長のレーザを利用し、PLC-DHM に入力する。それぞれのレーザはスイッチングされ、各波長の干渉縞を CMOS で取得し再構成が行われる。

取得した干渉縞を 2.1 で述べた原理で再構成を行う。カラーイメージングには RGB の波長の光源を用いる。そのため同様の処理では再構成像の拡大率、ピクセルサイズが異なり鮮明なカラー再構成像を取得することができない。各波長の再構成像のピクセルサイズはゼロパディングを調節することで一致させることができる。

PLC-DHM における再構成像のピクセルマッチ手法について説明する。PLC-DHM では 2.1 で述べたように

熱光学効果を用いた位相シフト法を用いて撮像面での物体の複素振幅分布を取得している。取得される複素振幅分布は 800×800 ピクセルである。設計波長である 632.8 nm では得られた複素振幅分布の四隅に 624×624 ピクセルのゼロパディングを行い、 2048×2048 ピクセルの複素振幅分布として再生伝搬計算を行う。

$543.5\text{ nm}, 473.0\text{ nm}$ の再構成像のピクセルサイズを 632.8 nm の再構成像のピクセルサイズに合わせるために式(5)を用いてゼロパディング数を変更する。

$$N_X = N_R \frac{\lambda_X}{\lambda_R}, \quad (5)$$

ここで λ_X, N_X は調整したい波長とサンプル数、 N_R, λ_R は基準となる波長とサンプル数である。本研究では $N_R = 2048, \lambda_R = 632.8\text{ nm}$ とし $N_G = 1758, N_B = 1530$ とした。

最後に取得したRGBの各再構成像を計算機上で重ね合わせることでカラーの再構成像を取得することができる。

本研究で用いたPLCは $\lambda_R = 632.8\text{ nm}$ を設計波長として作製されたもので、コア径が $2\mu\text{m}$ となっている。数值計算においては $2\mu\text{m}$ のコアのPLCに $\lambda_G = 543.5\text{ nm}, \lambda_B = 543.5\text{ nm}$ の光を導波させると、シングルモード以外のモードが混在してしまう。しかし実験的にはPLCの導波路に λ_G, λ_B の光を導波させても、他モードはホログラフィ干渉には問題ない程度に減衰し、シングルモードが主に伝搬する。

3. 実験結果

はじめに、 632.8 nm と 543.5 nm の波長の光源を用いて記録再構成した像に対してピクセルマッチを行った結果を示す。

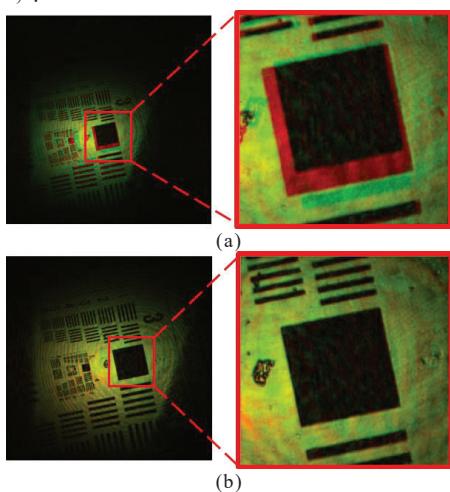


図2 ピクセルマッチ検討結果

図2(a)にピクセルマッチ前、(b)にピクセルマッチ後の

再構成像を示す。図2より2.2で述べた手法で正確にピクセルマッチされていることを確認した。

次にテストチャートを用いて各光源の空間分解能評価を行った。各光源の再構成像を図3に示す。

図3より、 $543.5\text{ nm}, 473.0\text{ nm}$ の光源での再構成像も 632.8 nm の光源での再構成像と同等の空間分解能を得ることを確認した。次にPLC-DHMでカラーフィルムの記録・再構成を行った。カラーフィルムは 0.4 mm 四方の領域について記録再構成を行った。

図2、図3よりPLC-DHMを用いてカラーイメージングが可能であることを確認した。発表時には様々な試料のカラーイメージング結果を示す。

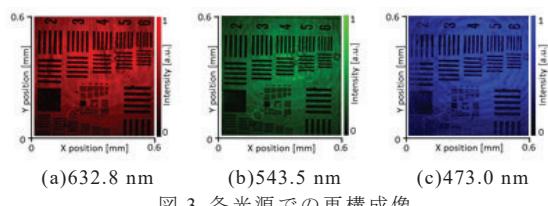


図3 各光源での再構成像

4.まとめ

本研究では複数のレーザ光源を用いたPLC-DHMを提案し、RGBカラー再構成像の取得を行った。本実験では、 $632.8\text{ nm}, 543.5\text{ nm}, 473.0\text{ nm}$ のレーザを光源にPLC-DHMで再構成像を取得し、カラーイメージングを行った。また正確なカラーイメージングを行うために再構成像のピクセルサイズを調整した。このように、単一波長でのPLC-DHMの光学系を変更することなく、複数のレーザ光源を入射させるだけで、カラーイメージングが可能であることを示した。今後、測定する試料に応じて最適な波長でのマルチスペクトルイメージングやアレイ導波路グレーティングとの組み合わせなどを実施していく。

謝 辞

本研究の一部は自動車等機械工業振興補助事業(JKA)の研究助成を受けたものである。

文 献

- [1] J. W. Goodman, et al. Appl. Phys. Lett. **11**, 77 (1967).
- [2] E. Watanabe, et al. Opt. Rev. **22**, 342C (2015).
- [3] K. Ikeda, et al. Digital Holography & 3-D Imaging DThII.2 (2016).
- [4] K. Inomoto, Japanese Journal of Applied Physics. **58**, SKKC01, (2019).
- [5] I. Yamaguchi, et al. Appl. Opt. **40**, 6177 (2001).
- [6] K. Okamoto, et al. Opt. Lett. **35**, 2103(2010).
- [7] T. Goh, et al. J. Lightwave Tech. **15**, 2107 (1997).

波長選択抽出位相シフト法に基づく複数波長定量位相イメージング

田原 樹^{†,‡}, 遠藤 優*, 涌波 光喜[†], Boaz Jessie Jackin[†], 市橋 保之[†], 大井 隆太朗[†]

* 国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

† 国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ 〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8

*金沢大学 理工研究域 機械工学系 〒920-1192 石川県金沢市角間町

E-mail: tahara@nict.go.jp

あらまし 波長選択抽出位相シフト法に基づく複数波長定量位相イメージングを紹介する。波長選択抽出位相シフト法は、複数種類の波長多重ホログラムを用いて所望の波長における光波を選択的に抽出できる干渉法である。本技術を用いれば、各波長の物体光の記録において撮像素子の空間帯域幅積を損失無く利用でき、複数波長における定量的な位相画像を得ることができる。複数波長の光を用いた定量的な位相画像センシングの一例として、複数波長位相接続を用いた定量位相イメージングに関する実験結果を報告する。

キーワード デジタルホログラフィ, 多重センシング, 位相シフト法, 定量的位相画像センシング

Multiwavelength quantitative phase imaging based on wavelength-selective phase-shifting interferometry

Tatsuki TAHARA^{†,‡} Yutaka ENDO* Koki WAKUNAMI[†] Boaz JESSIE JACKIN[†]

Yasuyuki ICHIHASHI[†] and Ryutaro OI[†]

* Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology (NICT), 4-2-1 Nukuikitamachi, Koganei, Tokyo, 184-8795, Japan

† PRESTO, Japan Science and Technology Agency, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi, Saitama, 332-0012, Japan

* Institute of Science and Engineering, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192, Japan

E-mail: tahara@nict.go.jp

Abstract We present multiwavelength quantitative phase imaging based on wavelength-selective phase-shifting interferometry. Wavelength-selective phase-shifting interferometry is a technique to selectively extract object waves at desired wavelengths from multiple wavelength-multiplexed phase-shifted in-line holograms. Using this computational coherent superposition scheme, one can utilize full space-bandwidth product of a monochrome image sensor in recording of multiwavelength object waves and obtain quantitative phase images at multiple wavelengths from wavelength-multiplexed images. We report experimental results for quantitative phase imaging with multiwavelength phase unwrapping as an example of quantitative phase-image sensing with light at multiple wavelengths.

Keyword Digital holography, Multiplexed-image sensing, phase-shifting interferometry, quantitative phase-image sensing

1.はじめに

ホログラフィ[1-3]はレンズなく単板の記録材料で3次元画像を記録・可視化できる技術である。光波の位相情報を定量的に得ることにより物体本来の3次元画像情報を復元できる特徴を有する。そして近年の電子機器の性能向上や高機能デバイスの登場に伴い、ホログラムを電子的に記録し3次元画像情報を数値的・定量的に再生する、デジタルホログラフィ[4-8]が盛んに研究されるようになった。ホログラムを電子的に取

得することにより情報通信や情報科学の分野で使われてきた信号処理技術を適用できるようになり、定量的な3次元画像情報、位相情報の数値再生により測定結果の遠隔地転送やリアルタイム動画センシング[9]、そして定量計測装置としての運用が容易になった。物体各点からの回折光を記録材料全体に記録でき、参照光を変調することにより間接的に物体光を変調できる性質などはホログラフィに特有であり、レンズレス3次元顕微鏡[10]や物体光と物体照明光に変調器を一切介

さない単一画素 3 次元画像センシングなどを実現できる。

ホログラフィにおいて、参照光を変調することにより多次元画像を多重センシングできることが Lohmann により述べられており[11]、多種の変調が利用されてきた。例えば複数波長センシングにおいて通常の画像システムでは時分割[12]、空間分割[13]、空間分割多重[14]などが一般的に用いられる。一方、ホログラフィでは参照光により干渉縞の時間または空間の周波数変調を行ない信号処理技術を適用することで、時間/空間的に波長情報を分けることなく多重センシングできる。その結果、高速性、光利用効率、測定波長レンジなどにおいてより高い性能の発揮が期待できる。ホログラフィック波長多重センシングにおいて、空間周波数変調[11,15]、時間周波数変調[16]はそれぞれ単一露光センシングまたは高空間帯域幅積のセンシングが可能であり、用途に応じた適用が期待できる。その一方で、前者の変調では視野または分解能に制限が生じ、後者では長い測定時間、多数枚のホログラム記録、並びに物体の変位に伴う波長情報の信頼性低下が課題である。そこで新たなホログラフィック波長多重技術として、位相シフト量を波長分離の鍵とする、波長選択抽出位相シフト法が提案された[17-20]。本方式は時間周波数変調に比べ測定時間と記録情報量を大幅に低減できる利点を有し、これまでに複数波長のレンズレス 3 次元画像センシング[18-20]、色吸収を視る 3 次元顕微鏡[7]へ応用してきた。本稿では複数波長の定量的位相画像センシングへの応用を報告する。

2. 波長選択抽出位相シフト法

図 1 に当該位相シフト法の概略を示す。複数波長の光を用いる位相シフト干渉計[12]で実施でき、干渉光の位相を変調させながら单板单色撮像素子で波長多重ホログラムを記録する。記録された波長多重ホログラムと各波長の光に対する位相変調量から、波長選択抽出位相シフト法に基づく信号処理[17-20]を用いて各波長における物体光を選択的に抽出する。得られた各波長の物体光に対し回折積分の計算を施すことにより任意の深さにおける複数波長光の振幅と位相分布を得ることができる。位相シフト法により波長情報を分けることが本方式の主たる特徴である。記録する波長数を N とおくと、波長多重ホログラムは $2N+1$ 変数で構成され、その結果得るべきホログラムの枚数を時間周波数変調に比べ大幅に減らせる利点がある。また、本方式において位相シフト量の 2π の多義性を利用する方法[17-19]と、任意の位相シフト量を与えて解く方法[20]の 2 種のアルゴリズムが提案されている。

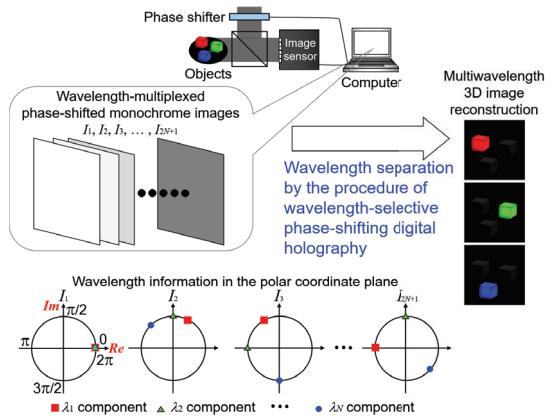


図 1. 波長選択抽出位相シフト法の概略。

3. 実験

複数波長の定量位相画像の同時取得能力を調べるために、光学系を構築して実験した。透過型のデジタルホログラフィック顕微鏡システムを構築し、顕微鏡の視野における試料の複素振幅画像を取得した。物体光と参照光の波面において曲率半径差を設け、波長毎に異なる位相分布を生成した。試料には高解像度 USAF1951 テストターゲットを用い、サブ μm の開口を可視化可能か調べるために分解能を併せて評価した。光源には発振波長 633nm である Omicron 社製半導体レーザ、532nm の昭和オプトロニクス社製半導体レーザを用い、可干渉距離を踏まえて干渉計の光路長差を調整した。撮像素子には画素間隔 0.9 μm の高画素密度の CMOS モノクロイメージセンサを用い、5 枚の 2 波長多重位相シフトホログラムを記録した。複数波長 3 次元画像センシング能力を調べるために、試料を撮像素子面上でデフォーカスするように配置し、回折積分により合焦像を再生できるかどうかを調べた。また、波長選択抽出位相シフト法により所望の波長における所望の光波を抽出できているかどうかを調べるために、比較対象として 1 枚の波長多重ホログラムに回折積分の計算を施したときの再生像を取得した。

図 3 に実験結果を示す。1 枚の波長多重ホログラムに対し回折積分の計算を施すと、所望の波長における合焦像の他に、不要な回折次数の光波と、不要な波長における回折光が同時に像再生される。その結果として、デフォーカス像の重畠が顕著にみられ、微細構造を観察することが困難となっている。一方で、提案法による再生像では、所望の波長における所望の回折光を選択的に抽出することにより、試料の明瞭な像を再生できている。USAF1951 テストターゲットの Group 9 Line 3 を解像できており、サブ μm の開口を解像でき

ることを確認した。また、不要な光波を除去できたことにより、各波長において物体光の位相分布が再生されている様子が観察されている。以上より、各波長の定量的な位相画像のセンシング能力を実験的に確認できた。また、位相飛びの無い位相画像を得るために2枚の位相画像を用いて2波長位相接続法を適用した。その結果、図3に示す通り位相飛びなく定量的な位相画像の取得を得ることができた。以上より、波長選択抽出位相シフト法の複数波長定量位相イメージング能力を示せた。

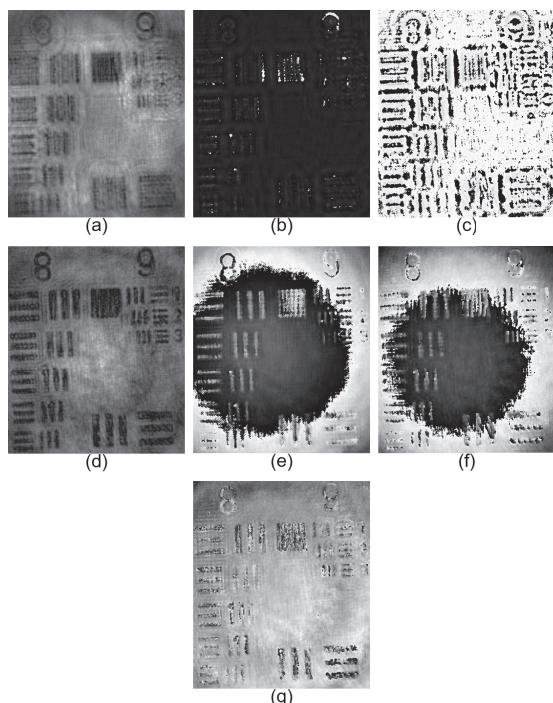


図2. 定量位相画像センシングの実験結果。(a)-(c)1枚の波長多重ホログラムから像再生した結果。(d)-(g)波長選択抽出位相シフト法を用いて測定した結果。(a),(d)波長532nmにおける振幅画像。(b),(e)波長633nmにおける位相画像。(c),(f)波長532nmにおける位相画像。(g)2波長位相接続法を用いて像再生した結果。位相画像はいずれも $0\text{--}2\pi$ を明暗の階調に変換したものであり、(e),(f)には 2π の位相飛びが見られ、(g)では合成波長を用いることで位相飛びが解消されている。

4. おわりに

波長選択抽出位相シフト法に基づく複数波長定量位相イメージングを紹介した。透過型の波長選択抽出位相シフトディジタルホログラフィッ

ク顕微鏡システムを構築し、サブ μm の構造の複素振幅イメージングが可能であることを示した。本技術を用いれば、各波長の物体光の記録において撮像素子の空間帯域幅積を損失無く利用でき、複数波長における定量的な位相画像を得ることができる。そのため固定された材料の定量計測に適しており、ホログラフィック光学素子[21-24]など透明材料の定量的観察にも適用できると期待できる。また、数枚の波長多重ホログラムにより複数波長の物体光を得られるため、測定対象の移動よりも十分に高速なホログラム記録を実現できれば、高空間分解能な複数波長ホログラフィック画像センシングを実現できる。今後の展望として、波長選択抽出位相シフト法を用いた複数波長インコヒーレントホログラム記録への適用、外乱に強いコンパクトなディジタルホログラフィシステムの試作、多波長記録システムへの展開などが挙げられる。

5. 謝辞

CMOSイメージセンサをお貸し下さいました森内 優介氏、海津 俊氏、並びにソニー株式会社に心より御礼申し上げます。本研究の一部は科学技術振興機構(JST)さきがけ(JPMJPR16P8), JSPS KAKENHI Grant Number JP 19K20293, 18H01456の助成を受けた。

文 献

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature* **161**, 777–778 (1948).
- [2] E. N. Leith and J. Upatnick, "Reconstructed wavefronts and communication theory," *J. Opt. Soc. Am.* **52**, 1123–1128 (1962).
- [3] 久保田敏弘：“新版ホログラフィ入門-原理と実際-”，朝倉書店，東京 (2010)
- [4] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.* **11**, 77–79 (1967).
- [5] M. K. Kim, ed.: "Digital Holographic Microscopy: Principles, Techniques, and Applications", Springer, (2011).
- [6] P. Picart and J.-C. Li, eds.: "Digital Holography", Wiley (2013).
- [7] T.-C. Poon and J.-P. Liu, eds.: "Introduction to Modern Digital Holography with MATLAB", Cambridge University (2014).
- [8] T. Tahara, X. Quan, R. Otani, Y. Takaki, and O. Matoba, "Digital holography and its multidimensional imaging applications: a review," *Microscopy* (Oxford Academic) **67**, 55–67 (2018).
- [9] T. Shimobaba, Y. Sato, J. Miura, M. Takenouchi, and T. Ito, "Real-time digital holographic microscopy using the graphic processing unit," *Opt. Express* **16**, 11776–11781 (2008).

- [10] Y. Takaki, H. Kawai, and H. Ohzu, "Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images," *Appl. Opt.* **38**, 4990–4996 (1999).
- [11] A. W. Lohmann, "Reconstruction of vectorial wavefronts," *Appl. Opt.* **4**, 1667–1668 (1965).
- [12] Y.-Y. Cheng and J. C. Wyant, "Two-wavelength phase shifting interferometry," *Appl. Opt.* **23**, 4539–4543 (1984).
- [13] J.-M. Desse, P. Picart, and P. Tankam, "Digital three-color holographic interferometry for flow analysis," *Opt. Express* **16**, 5471–5480 (2008).
- [14] J. Kato, I. Yamaguchi, and T. Matsumura, "Multicolor digital holography with an achromatic phase shifter," *Opt. Lett.* **27**, 1403–1405 (2002).
- [15] T. Tahara, T. Akamatsu, Y. Arai, T. Shimobaba, T. Ito, and T. Kakue, "Algorithm for extracting multiple object waves without Fourier transform from a single image recorded by spatial frequency-division multiplexing and its application to digital holography," *Opt. Commun.* **402**, 462–467 (2017).
- [16] R. Dändliker, R. Thalmann, and D. Prongué, Two-wavelength laser interferometry using superheterodyne detection, *Opt. Lett.* **13**, 339–341 (1988).
- [17] T. Tahara, S. Kikunaga, Y. Arai, and Y. Takaki, "Phase-shifting interferometry capable of selectively extracting multiple wavelength information and color three-dimensional imaging using a monochromatic image sensor," in *Proceedings of Optics and Photonics Japan 2013* (Optical Society of Japan, 2013), paper 13aE9. (in Japanese)
- [18] T. Tahara, R. Mori, S. Kikunaga, Y. Arai, and Y. Takaki, "Dual-wavelength phase-shifting digital holography selectively extracting wavelength information from wavelength-multiplexed holograms," *Opt. Lett.* **40**, 2810–2813 (2015).
- [19] T. Tahara, R. Mori, Y. Arai, and Y. Takaki, "Four-step phase-shifting digital holography simultaneously sensing dual-wavelength information using a monochromatic image sensor," *J. Opt. (IOP Publishing)* **17**, 125707 (2015).
- [20] T. Tahara, R. Otani, K. Omae, T. Gotohda, Y. Arai, and Y. Takaki, Multiwavelength digital holography with wavelength-multiplexed holograms and arbitrary symmetric phase shifts *Opt. Express* **25**, 11157–11172 (2017).
- [21] K. Wakunami, P.-Y. Hsieh, R. Oi, T. Senoh, H. Sasaki, Y. Ichihashi, M. Okui, Y.-P. Huang, K. Yamamoto, "Projection-type see-through holographic three-dimensional display," *Nature Communications* **7**, 12954 (2016).
- [22] K. Wakunami, R. Oi, T. Senoh, H. Sasaki, Y. Ichihashi, K. Yamamoto, "Wavefront printing technique with overlapping approach toward high definition holographic image reconstruction," *Proceedings of SPIE* **9867**, 98670J (2016).
- [23] R. Oi, P.-Y. Chou, B. J. Jackin, K. Wakunami, Y. Ichihashi, M. Okui, Y.-P. Huang, and K. Yamamoto, "Three-dimensional reflection screens fabricated by holographic wavefront printer," *Optical Engineering* **57**, 061605 (2018).
- [24] B. J. Jackin, L. Jorissen, R. Oi, J. Y. Wu, K. Wakunami, M. Okui, Y. Ichihashi, P. Bekaert, Y.-P. Huang, and K. Yamamoto, "Digitally designed holographic optical element for light field displays" *Optics Letters* **43**, 3738 (2018).

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

- 開催日： 2019年9月13日（金）13:00-17:20
- 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
- プログラム
 - (1) ホログラフィック網膜投影型ディスプレイのためのインタラクティブな屈折補正システムの構築
長浜佑樹・高木康博（東京農工大）
 - (2) Computer-Generated Hologram based on Gradient Descent Algorithm
Shujian Liu・Yuki Nagahama・Yasuhiro Takaki (Tokyo Univ. of Agri. and Tech.)
 - (3) ランダム位相フリー法を用いた位相型ホログラムの画質改善とシミュレーションによる検証
山口由美（千葉大）・長浜佑樹（東京農工大）・
山本洋太・下馬場朋禄・角江 崇・伊藤智義（千葉大）
- 休憩
- (4) 可変正射影光線サンプリング面による広深度ホログラムの計算法
五十嵐俊亮・柿沼建太郎・中村友哉（東工大）・松島恭治（関西大）・山口雅浩（東工大）
- (5) 点光源の空間分解能を考慮したベクトル量子化とフレーム間差分による電子ホログラフィの圧縮伝送方式
細野湧大・西辻 崇・朝香卓也（首都大）
- (6) 平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡のカラー化へ向けた基礎評価
井元克駿・児玉周太朗・五味英晃（電通大）・岡本勝就（岡本研）・渡邊恵理子（電通大）
- (7) 波長選択抽出位相シフト法に基づく複数波長定量位相イメージング
田原 樹（NICT）・遠藤 優（金沢大）・
涌波光喜・ボワズ ジェシー ジャキン・市橋保之・大井隆太朗（NICT）

- 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4回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

- 開催日： 2019年11月22日（金）13:00開始（予定）
- 場 所： 東北大学 青葉山東キャンパス 青葉記念会館 5階大会議室
<https://www.eng.tohoku.ac.jp/map/?menu=campus&area=c&build=03>
- テーマ： 液晶素子とそのホログラフィ応用（仮）
- 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

HODIC の WEB ページとメールリストのご案内

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

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

です、ぜひアクセスしてみてください。なお、WEB ページでは皆さんからの情報やメッセージも掲載できるようになっています。

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

ホログラフィック・ディスプレイ研究会役員（敬称略）

名 誉 会 長	辻内 順平	会 長	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）	角江 崇（千葉大学）
鎌田 康昌（凸版印刷）	坂本 雄児（北海道大学）	佐藤 甲癸
佐藤 俊一（シャープ）	下馬場朋禄（千葉大学）	白倉 明（アーティエス・ラボ）
高木 康博（農工大）	高橋 進（凸版印刷）	谷口 幸夫（大日本印刷）
福田 隆史（産総研）	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（コニカミノルタブレネリウム）	小野 雄三（立命館大学）	勝間ひでとし（湘南 LRT 研究 G）
桑山 哲郎	久保田敏弘（久保田ねぐら工房）	酒井 朋子（千葉大学）
永田 忠昭（arts-unis）	三田村畯右	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. 39, No. 3 (Sep. 2019)

2019年9月13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