

VR Biology はじめました

～魚に映像を見せる～

山本裕紹

宇都宮大学オプティクス教育研究センター

コトの発端は、あるプロジェクト研究について基礎生物学研究所で打ち合わせを行ったことである。プロジェクト自体は補償光学技術に関するものであり、光学的な検討が主であった。筆者は再帰反射による空中結像（AIRR: aerial imaging by retro-reflection）のデモ機材を持ち歩いており、懇親会の席上で余興代わりに、空中ディスプレイのデモを行った。生物学者の皆さんが必ずしも 3D 映像を見慣れているとは限らないため、空中映像のところにガラスコップを置いてコップの中に映像が形成される様子を見せたところ、メダカの研究者が反応した。

（1 ページにつづく）

目 次

- | | |
|--|------------------------|
| 1. 巻頭言：VR Biology はじめました ～魚に映像を見せる～ | 山本裕紹 表紙 |
| 2. Xilinx Alveo U250 を用いた振幅・位相変調型ホログラフィ向け専用計算機の開発 | 山本洋太, 他 2 |
| 3. 位相型ホログラフィックプロジェクトにおける画質改善アルゴリズム | 山口由美, 他 6 |
| 4. 波長多重位相シフトインコヒーレントマルチカラーデジタルホログラフィ | 原 貴之, 他 12 |
| 5. Gradient Descent Based Optimization of Phase-Only Computer-Generated Holograms to Generate Dual Reconstructed Images at Different Depth Positions | Shujian Liu, et.al. 17 |
| 6. 次回研究会のお知らせ | 巻末 |

基礎生物学研究所は、さまざまなメダカ系統やゲノムリソースの収集・整備、さらに始原生殖細胞や精巣・卵巣組織の凍結保存を行うなど、バイオリソース事業を通じてメダカ研究の拠点としての役割を果たしている。メダカの全ゲノム配列は解明済みで、メダカとヒトの間でもゲノム構造に多くの共通性があることから、メダカは「脊椎動物研究のモデルシステム」として遺伝子機能解析の重要なリソースとなっていることを初めて知った。

メダカが視覚刺激に反応して行動することはよく知られている。たとえば「メダカの学校」と言われる通り、メダカを認識して群れ行動を行う特性がある。また、定位行動と呼ばれる性質も顕著である。この性質により、メダカのいる円筒水槽を縞模様の描かれた円筒で取り囲み、この円筒を回転させるとメダカは回転に合わせて泳ぐ。この実験が生物学の学生実験の定番であること、ステッピングモーターで円筒を回転させるだけの機材が数十万円もすることなどを伺った。定位行動の実験を安価かつ簡便に実現できれば新しい学生実験を開発できる期待を持ちつつ、筆者もメダカ研究会の一員となり、メダカの行動実験のためのディスプレイを開発することとなった。

メダカ用の円筒ディスプレイには AIRR の原理を用いた。AIRR は光源となるディスプレイとビームスプリッター、再帰反射素子で構成される。空中像はビームスプリッターを基準として光源の面对称位置に形成される。ここでビームスプリッターを切頭円錐形状にすることで、フラットパネルディスプレイの映像を円筒形状に変換できる。こうしてできた全周型空中ディスプレイを用いてメダカに回転する縞模様をみせたところ、実験は見事に成功した。この方法ではフラットパネルディスプレイに表示する映像で刺激を提示するため、生物学科の学生さんがパワーポイントで映像を切り替えるだけで実験ができるようになった。

メダカ研究会には、メダカ研究者だけでなく、招待講演としてネオンテトラの研究者やゲノム編集フグの研究者も参加されている。ネオンテトラの背中側が明るく輝くのは、捕食者に水面の反射像を見せる一種の擬態であることを初めて知った。この研究者はブラジルの国立アマゾン研究所で共同研究を実施中であり、彼の仲介でアマゾン研究所内の博物館に空中ディスプレイを展示させていただく機会を得た。

また、水産研究・教育機構でフグの養殖を扱われている研究者とのディスカッションでフグに水中映像を見せる様々なアイデアを考案したことから、彼を分担者として大型の科研費（基盤研究 S）に申請した。基盤研究 S のヒアリング通知が 6 月に届き、今年はコロナ対応のため、ヒアリングはオンラインとなるとのことであった。そこで、フグの養殖水槽の場所からヒアリングに臨むことで審査員へのアピールを行うこととした。その結果、8 月 31 日に内定通知を（本学初めての快挙として学長からのお祝いメッセージも）いただいた。こうしてフグの養殖水槽内に設置する水中ディスプレイの開発をスタートすることとなった。

3D をはじめとする映像技術をツールとして生物学の実験を行う分野を「VR Biology」を名付けてその分野の研究発展に取り組むたいと考えている。ホログラフィック・ディスプレイは究極の 3D 映像技術と呼ばれるところであり、生き物に見せるディスプレイとしても有効であろう。VR Biology 研究の仲間がこの分野からも増えることを期待している。

Xilinx Alveo U250 を用いた振幅・位相変調型ホログラフィ向け 専用計算機の開発

山本 洋太^{†‡} 下馬場 朋禄[†] 角江 崇[†] 増田 信之^{*} 伊藤 智義[†]

[†] 千葉大学大学院工学研究院 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

[‡] 日本学術振興会特別研究員 〒102-0083 東京都千代田区麹町 5-3-1

^{*} 東京理科大学基礎工学部 〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1

E-mail: [†] y-yamamoto@chiba-u.jp

あらまし 光の波面を再生可能なホログラフィは、人間の立体知覚要因のすべてを満たせる 3 次元ディスプレイとして注目されている。しかし、その実現には、その方式で必要になる光の計算を高速に実行する必要がある。本発表では Xilinx Alveo U250 を利用し、電子ホログラフィ専用計算機の開発を行った。振幅と位相型ホログラムの計算を行う専用計算機についてそれぞれ紹介する。

キーワード 電子ホログラフィ、ホログラフィ、CGH, FPGA, 専用計算機

Special-purpose Computer for Amplitude and Phase Electroholography Using Xilinx Alveo U250

Yota YAMAMOTO^{†‡} Tomoyoshi SHIMOBABA[†]

Takashi KAKUE[†] Nobuyuki MASUDA^{*} Tomoyoshi ITO[†]

[†] Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage Ward, Chiba-shi, Chiba, 263-8522 Japan

[‡] Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science, 5-3-1 Kojimachi, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0083 Japan

^{*} Tokyo University of Science, 6-3-1 Nijjuku, Katsushika-ku, Tokyo, 125-8585 Japan

E-mail: [†] y-yamamoto@chiba-u.jp

Abstract Holography, which can reproduce the wavefront of light, has been attracting attention as a 3D display that can satisfy all factors of human stereoscopic perception. However, its implementation requires fast computation of the light. In this study, we developed a special-purpose computer for amplitude and phase-type hologram using Xilinx Alveo U250.

Keyword Electroholography, Holography, CGH, FPGA, Special-purpose computer

1. まえがき

光の波面を再生可能なホログラフィ[1]は、人間の立体知覚要因のすべてを満たせる 3 次元ディスプレイとして注目されている[2]。しかし、その実現には、その方式で必要になる光の計算を高速に実行する必要がある。

電子ホログラフィ (electroholography) [3]では、液晶ディスプレイなどを利用し、表示する Computer-Generated Hologram (CGH) を高速に切り替えることで動画化も可能となる。本来の CGH は複素分布を持つが、Spatial Light Modulator (SLM) として利用する液晶ディスプレイ (LCD) は振幅分布か位相分布のどちら

かしか表示することができない。振幅型は位相型と比べ、計算コストが小さく、高速に計算可能である。一方、位相型の計算コストは高いが、振幅型と比べ良質な再生像が得られるとされ、一長一短といった関係である [4]。

振幅型、位相型どちらかに限らず CGH 計算時間削減のため多くの研究が行われている。Look-up table (LUT)法を用いた研究 [5, 6]、差分を利用した研究 [7, 8]、波面記録面を利用した研究 [9]、スパース性を利用した研究 [10] などアルゴリズムレベルでの高速化が研究されている。しかし、CGH の計算量はディスプレイの画素数と表現したい物体データ数に比例して増加

し、飛躍的な計算性能の向上が必要である。筆者らは CGH 計算時間削減のため、Graphics Processing Unit (GPU) を利用した研究 [11, 12] や Field Programmable Gate Array (FPGA) を利用した専用計算機の開発 [13, 14] をおこなってきた。特にハードウェアを利用した CGH の高速化は効果的であり、CGH に特化した計算回路を FPGA に実装することにより、一般的な PC と比べ数百倍の高速化が実現可能である。

本稿では、Xilinx 社が提供する大規模 FPGA ボードである Xilinx Alveo U250 (U250) を用いて、振幅型ホログラムと位相型ホログラムを計算する専用計算機の開発を行った。開発した計算機のアーキテクチャと計算パフォーマンスについて紹介する。

2. ハードウェア実装向け CGH 計算アルゴリズム

点群モデルを利用した CGH の計算式は式 (1)、式 (2) で表される。

$$u_c(x_a, y_a) = \sum_{j=1}^M A_j \exp(i2\pi\theta_{aj}), \quad (1)$$

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

式 (1)、式 (2) において $\rho_j = 1/(2\lambda|z_j|)$ 、 $x_{aj} = x_a - x_j$ 、 $y_{aj} = y_a - y_j$ である。 x_a, y_a は CGH 上の座標、 x_j, y_j, z_j は点群の座標を表す。 A_j は点群の振幅強度 (本研究では 1 に固定)、 λ は光波長である。この式は $z_j \gg x_j, y_j$ の条件下で成り立つ。

実際に SLM に表示を行う際は、位相型ホログラムの場合は、

$$u_p(x_a, y_a) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}\{u_c\}}{\text{Re}\{u_c\}}. \quad (3)$$

を用いて位相分布をとり出す。ここで、 $\text{Re}\{u_c\}$ 、 $\text{Im}\{u_c\}$ は複素分布から実部と虚部をそれぞれとり出す関数である。振幅型ホログラムは $\text{Re}\{u_c\}$ を用いて実部をとり出すことで振幅分布をとり出すことが可能であるが、計算コストの関係から式 (1)ではなく、式 (4) を用いて直接計算する。

$$u_a(x_a, y_a) = \sum_{j=1}^M A_j \cos[2\pi\theta_{aj}], \quad (4)$$

ここで、ハードウェア実装向けに漸化式法[15]を導入し、新たに式 (5)、式 (6)を定義する。

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

$$A_{0j} = \rho_j\{2(x_0 - x_j) + 1\}. \quad (6)$$

漸化式法では、はじめに式 (2) を θ_{0j} として計算する。CGH 上の x 軸方向の n 番目の θ_{nj} は式 (7) で表される。

$$\theta_{nj} = \theta_{(n-1)j} + A_{(n-1)j}. \quad (7)$$

このとき、 Δ_{nj} を式 (8) により更新する。

$$\Delta_{nj} = \Delta_{(n-1)j} + \Gamma_j. \quad (8)$$

x 軸方向の隣り合う θ_{nj} に関して、式 (7) と式 (8) の計算を繰り返すことにより CGH を求めることが可能である。式 (7) と式 (8) は単純な加算のみで計算可能である。また、パイプライン実行が可能である。ハードウェア実装したとき、より少ないリソースで効率的な計算回路を実装することが可能である。

3. 実装

専用計算機システム開発の初期段階として Xilinx Alveo U250 (U250) を利用した。U250 は Virtex UltraScale+ XCU250-2LFIGD2104E FPGA を搭載した FPGA ボードである。U250 を利用し、漸化式法を利用した電子ホログラフィ専用計算回路を実装した。回路の基本アーキテクチャを図 1 に示した。

図 1 の専用計算回路は、PC から点群の数、点群データ、CGH のサイズを受け取り、FPGA 内部のメモリーブロックである UltraRAM に一時保存する。CGH の計算ユニットは CGH の x 軸方向に関して並列実行する。計算ユニットは、1 台の Basic Phase Unit (BPU) と複数の Additional Phase Unit (APU) で構成される。UltraRAM に保存された点群データは、各 BPU ヘブロードキャストされる。また、各 BPU が計算する CGH の始点座標をカウンタの初期値に設定する。点群データと CGH の座標から BPU と APU は CGH の計算を行う。

BPU は漸化式法における初期位相を計算するユニットである。式 (2) の計算を点群の数だけ繰り返す。位相型は実部と虚部の計算を行い、振幅型は式 (4) に示すように実部の計算のみを行う。また、BPU は次段の APU 向けに、式 (5)、式(6) の計算も行う。

APU は、式 (7)、式 (8) を計算するユニットである。漸化式法を利用することで式 (2) を計算する代わりに式 (7)、式 (8) の単純な加算のみで求めることが可能である。計算に利用する FPGA リソースを抑えることができ、並列数を増やせる利点を有する。

図 1 中の atan LUT は、式 (3) を計算するユニットであり、位相型にのみ搭載される。この計算には LUT 法を利用している。

本稿のシステムは、 $1,920 \times 1,080$ 画素の CGH をターゲットとしており、1 ラインの計算ユニットとして、1 台の BPU と 1,919 台の APU が実装されている。さらに、1 ラインを並列計算するユニットが振幅型は 8 ユニット、位相型は 4 ユニット実装されている。すなわち全体で、振幅型は 8 台の BPU と 15,352 台の APU が搭載されており、位相型は 4 台の BPU と 7,676 台の APU が搭載されている。数千～数万の計算ユニットが効率的に並列計算を実行することで高速な計算が可能となる。

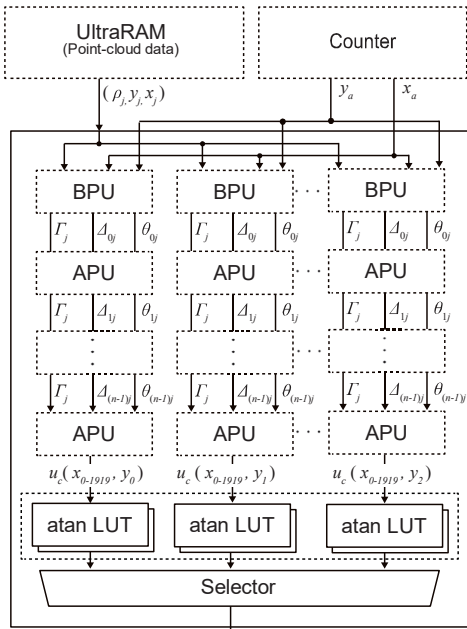


図 1 漸化式法を利用した計算回路のアーキテクチャ。

4. 結果

4.1. 計算時間比較

U250 を用いて 50,000 点の点群から $1,920 \times 1,080$ 画素の CGH 計算にかかる時間を測定した結果を振幅型は表 1 に位相型は表 2 に示した。

同様の条件で CPU (PC) と GPU による計算時間も併記した。CPU は Intel Core i9-9900K CPU 3.60GHz、メインメモリ 64GB の Ubuntu 18.04.4 LTS (Linux kernel 5.3.0-46-generic) が動作するシステムである。コンパイラは Intel C compiler 19.1.1.217 を使い、すべてのコアを利用し、並列に実行した。比較対象の GPU は NVIDIA RTX 2080 Ti を利用した。CUDA 10.2 を使い、すべてのコアを利用し、並列で実行した。

表 1 より、U250 を利用した振幅型ホログラム専用計

算機は 1 フレームの CGH を 29 ms で計算可能であった。GPU は、215 ms、CPU は 6,672 ms であった。開発した専用計算機は CPU と比べ 230 倍、GPU と比べ 7.4 倍の高速化を達成した。

表 2 より、U250 を利用した位相型ホログラム専用計算機は 1 フレームの CGH を 58 ms で計算可能であった。GPU は、232 ms、CPU は 111,068 ms であった。開発した専用計算機は CPU と比べ 190 倍、GPU と比べ 4 倍の高速化を達成した。

表 1 振幅型ホログラム計算時間の比較。

| 計算ハード | 計算時間 [ms] | fps | 高速化比 [倍] |
|------------------------|--------------|-------|-------------|
| U250 | 29 | 34.5 | 230 |
| NVIDIA RTX 2080 Ti | 215 | 4.65 | 31.0 |
| Intel Core i9-9900K | 6,672 | 0.150 | 1.00 |

表 2 位相型ホログラム計算時間の比較。

| 計算ハード | 計算時間 [ms] | fps | 高速化比 [倍] |
|------------------------|--------------|------|-------------|
| U250 | 58 | 17.3 | 190 |
| NVIDIA RTX 2080 Ti | 232 | 4.31 | 47.7 |
| Intel Core i9-9900K | 111,068 | 0.09 | 1.00 |

4.2. リソース状況

U250 で開発した専用計算機の回路規模について表 3 に示した。動作周波数は 250 MHz である。ユーザが自由に回路を構成可能な FPGA であっても Large Scale Integration (LSI) としては物理的な配線を持っており、一般的に集積度 (使用率) を上げれば上げるほど動作周波数は低下する。リソース使用率と動作周波数のバランスをとり、現状の構成となった。

振幅型の 15,360 並列に対し、位相型は 7,680 並列と半分になった。位相型は実部の計算回路だけでなく、虚部の計算回路が必要であり、2 倍の計算回路が必要である。また、実部と虚部を伝達する配線も必要であり、2 倍の配線も必要となる。位相型では、一部の計算を高速に計算が可能な digital signal processor (DSP) に置き換えることにより、計算回路と配線の問題を緩和した。

表 3 リソース使用率。

| リソース名 | 総数 | 振幅型の 使用率[%] | 位相型の 使用率[%] |
|-----------|-----------|----------------|----------------|
| LUT | 1,114,614 | 64.50 | 32.40 |
| Flip-Flop | 1,984,295 | 57.42 | 25.76 |
| UltraRAM | 40.5 Mb | 11.25 | 6.25 |
| DSP | 40 | 0.33 | 64.59 |

5. あとがき

本稿では、電子ホログラフィで利用する CGH 計算時間削減のため、振幅型ホログラムと位相型ホログラムを計算する専用計算機の開発を行った。専用計算機の開発には、Xilinx 社が提供する Alveo U250 を用いた。その結果、50,000 点の点群から $1,920 \times 1,080$ 画素の振幅型 CGH は 29 ms (34.5fps)、位相型 CGH は 58 ms (17.3fps) で計算可能なシステムの開発に成功した。その性能は、振幅型と位相型それぞれ Intel Core i9-9900K (CPU) と比べ 230 倍、190 倍、NVIDIA RTX 2080 Ti (GPU) と比べ 7.43 倍、4 倍の高速化を達成した。

一方で、位相型は複素分布の計算が必要なため、振幅型に比べ 1/2 に性能が低下した。CGH の専用計算機では、データが一方方向のみに流れ、データのボトルネックがないため、並列数に従った高速化が得られる。現状では、位相型は振幅型の半分の並列数となるため性能が半分となった。

振幅型 CGH からその直交する CGH を回復し、位相型 CGH を求める手法が提案されている[16]。今後は、[16]による計算回路を検討し、位相型専用計算機の性能向上を図る予定である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 20J10202, 19H04132, 19H01097 により行われました。ここに深く感謝いたします。

文 献

- [1] D. Gabor : “A new microscopic principle”, *Nature*, **161**, pp.777–778 (1948).
- [2] S. Reichelt, R. Häussler, G. Fütterer, and N. Leister : “Depth cues in human visual perception and their realization in 3D displays”, *Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2010 and Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics IV*, eds. By B. Javidi, J.-Y. Son, J.T. Thomas, and D.D. Desjardins, **7690**, pp.92–103 (2010).
- [3] P. St-Hilaire, S.A. Benton, M.E. Lucente, M.L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa, and J.S. Underkoffler : “Electronic display system for computational holography”, *Proc. SPIE*, **1212**, pp.174–183 (1990).
- [4] 上原寛樹, 平井大智, 加賀城宏毅, 市橋保之, 中山弘敬, 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義 : “位相変調型液晶ディスプレイを用いた電子ホログラフィ”, *映像情報メディア学会誌*, **65**, 3, pp.403–406 (2011).
- [5] M.E. Lucente : “Interactive computation of holograms using a look-up table”, *Journal of Electronic Imaging*, **2**, 1, pp.28–35 (1993).
- [6] S. Jiao, Z. Zhuang, and W. Zou : “Fast computer-generated hologram calculation with a mini look-up table incorporated with radial symmetric interpolation”, *Opt. Express*, **25**, 1, pp.112–123 (2017).
- [7] K. Matsushima and M. Takai : “Recurrence formulas for fast creation of synthetic three-dimensional holograms”, *Appl. Opt.*, **39**, 35, pp.6587–6594 (2000).
- [8] H. Yoshikawa : “Fast computation of Fresnel holograms employing difference”, *Opt. Rev.*, **8**, 5, pp.331–335 (2001).
- [9] T. Shimobaba, N. Masuda, and T. Ito : “Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recording plane”, *Opt. Lett.*, **34**, 20, pp.3133–3135 (2009).
- [10] D. Blinder and P. Schelkens : “Accelerated computer-generated holography using sparse bases in the STFT domain”, *Opt. Express*, **26**, 2, pp.1461–1473 (2018).
- [11] N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka, A. Shiraki, and T. Sugie : “Computer generated holography using a graphics processing unit”, *Opt. Express*, **14**, 2, pp.603–608 (2006).
- [12] B.J. Jackin, S. Watanabe, K. Ootsu, T. Ohkawa, T. Yokota, Y. Hayasaki, T. Yatagai, and T. Baba : “Decomposition method for fast computation of gigapixel-sized fresnel holograms on a graphics processing unit cluster”, *Appl. Opt.*, **57**, 12, pp.3134–3145 (2018).
- [13] T. Sugie, T. Akamatsu, T. Nishitsuji, R. Hirayama, N. Masuda, H. Nakayama, Y. Ichihashi, A. Shiraki, M. Oikawa, N. Takada, Y. Endo, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito : “High-performance parallel computing for next-generation holographic imaging”, *Nat. Electron.*, **1**, pp.254–259 (2018).
- [14] T. Nishitsuji, Y. Yamamoto, T. Sugie, T. Akamatsu, R. Hirayama, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito : “Special-purpose computer HORN-8 for phase-type electroholography”, *Opt. Express*, **26**, 20, pp.26722–26733 (2018).
- [15] T. Shimobaba and T. Ito : “An efficient computational method suitable for hardware of computer-generated hologram with phase computation by addition”, *Comput. Phys. Commun.*, **138**, 1, pp.44–52, (2001).
- [16] T. Shimobaba, T. Kakue, Y. Yamamoto, I. Hoshi, H. Shiomi, T. Nishitsuji, N. Takada, T. Ito : “Hologram generation via Hilbert transform”, *OSA Continuum*, **3**, 6, pp.1498–1503 (2020).

位相型ホログラフィックプロジェクタにおける 画質改善アルゴリズム

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

[†] 千葉大学大学院工学研究院 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

[‡] 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

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。そこで、振幅情報を内包した位相型ホログラムの式を用いることで振幅型と同等の画質の再生画像を得ることが可能となった。本研究では更にマルチプロジェクションへの適用及びGS法の適用を試み、シミュレーション及び光学実験により画質の比較を行い、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, ランダム位相フリー法, マルチプロジェクション, GS法

1. まえがき

ホログラフィックプロジェクタ¹⁾は、レンズを用いることなく光の制御が可能のため、装置全体の小型化が期待できる。複数のスクリーンに対して異なる映像を投影するマルチプロジェクションも可能である。

しかし、装置の実現には複数の課題が残されている。そのひとつに再生像の画質の劣化が挙げられる。計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram: 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必要がある。その手法の一つに元画像にランダム位相を付加するランダム位相法があるが、ホログラムの再生像にスペックルノイズと呼ばれるノイズが発生してしまう²⁾。

このスペックルノイズを低減させる手法に、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るランダム位相フリー法がある³⁾。元画像から発せられる光に仮想的な球面波の位相パターンを掛け合わせることで光をホログラムに集める手法である。

このランダム位相フリー法を振幅型ホログラムに用いると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用いると再生画像の画質が顕著に劣化するという課題が残されていた。

そこで、振幅情報を内包した位相型ホログラム⁴⁾を用いることで、ランダム位相フリー法を位相型のホログラムにも適用させることが可能となった⁵⁾。(以降この手法を振幅内包位相型と呼ぶ)

本研究では、マルチプロジェクション⁶⁾に振幅内包位相型を適用させることで、用途の拡大をはかるとともに、Gerchberg-Saxton (GS) アルゴリズム⁷⁾を使用することで更なる画質の向上を図った。

なお、本研究における数値計算では、いずれも波動光学計算ライブラリである CWO (Computational Wave

Optics)⁸⁾ ライブラリを用いた。

2. ランダム位相フリー法

ランダム位相フリー法は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。

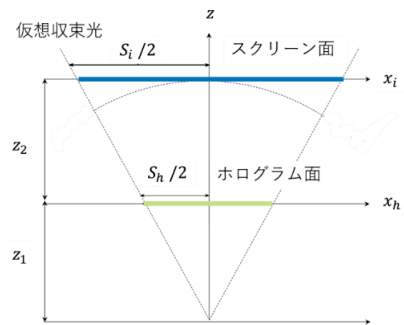


図1 ランダム位相フリー法

図1のようにスクリーン面上にサイズ $S_i \times S_i$ の元画像を配置し、 z_2 離れた位置にサイズ $S_h \times S_h$ のホログラムを配置する。ランダム位相フリー法の計算手順は、まず元画像 $a_i(x_i, y_i)$ と仮想収束光の位相分布を掛け合わせ、複素振幅 $u_i(x_i, y_i) = a_i(x_i, y_i) \times w_i(x_i, y_i)$ を得る。収束球面光 $w_i(x_i, y_i)$ は式(1)で与えられる。

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

$f_i = z_1 + z_2$ 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)で与えられる。

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

$\text{Prop}_{z_2}\{\cdot\}$ 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， $u_h(x_h, y_h)$ の実部の値 $g_h(x_h, y_h)$ を取り出す． $g_h(x_h, y_h)$ は式(4)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⁹⁾を用いる．

$$g_h(x_h, y_h) = \text{Re}(u_h(x_h, y_h)) \quad (4)$$

ここで， $\text{Re}(\cdot)$ は複素振幅の実数部分を表している．

ランダム位相フリー法を更に改良した手法として物体光センタリング法も提案されている¹⁰⁾．この手法は，仮想収束光の位相パターンを変更することで物体光をホログラムのどの領域に記録できるかを指定できる．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し，リングングアーティファクトと呼ばれるノイズの影響を低減することが出来る．

3. 振幅情報を内包した位相型ホログラムを用いたランダム位相フリー法

ランダム位相フリー法は位相型ホログラムに直接適用できないという課題が残されていたため，本章では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手法について述べる．

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．

$$\theta_h(x_h, y_h) = \text{Arg}(u_h(x_h, y_h)) \quad (5)$$

ここで， $\text{Arg}(\cdot)$ は，偏角を取り出す演算子を表している．

その一方で，ホログラム面上の複素振幅をホログラムへ変換する手法として，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手法も提案されている⁴⁾．具体的には，新たな複素振幅の値 $u'_h(x_h, y_h)$ を式(6)で与え，位相型ホログラムの値 $\theta'_h(x_h, y_h)$ を式(7)とする．

$$u'_h(x_h, y_h) = \exp(i g_h(x_h, y_h)) \quad (6)$$

$$\theta'_h(x_h, y_h) = \arg\{u'_h(x_h, y_h)\} \quad (7)$$

我々の研究においては，ランダム位相フリー法が振幅型のホログラムには機能することを鑑みて，振幅情報を内包した位相型ホログラムである式(6)，(7)をランダム位相フリー法に適用させることを試みた．その結果，位相型のホログラムにおいてもランダム位相フリー法を機能させることが可能となった．

図2にそれぞれの手法でシミュレーションを行った再生シミュレーション像を示す．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)キノフォーム



(d)振幅内包位相型



(e)物体光センタリング

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 | 3.0 |
| 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)～(e)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2(b)はランダム位相フリー法に振幅型のホログラムを適用させたときの再生シミュレーション像であり，既に確立された手法であるため画質比較の基準となる．図2(c)はランダム位相フリー法でキノフォームの式を計算した結果であり，輪郭の一部しか得られていない．

図2(d)はランダム位相フリー法に振幅内包位相型の式を適用させたときの再生シミュレーション像であり，図2(b)と同等の画質が得られている．図2(e)は物体光センタリング法に振幅内包位相型の式を適用させた（以降この手法を物体光センタリングと呼ぶ）ときの再生シミュレーション像であり，リングングアーティファクトが低減され図2(d)より更に明瞭な再生像が得られている．

4. 振幅内包位相型のマルチプロジェクションへの適用

本章では，振幅内包位相型及び物体光センタリングをマルチプロジェクションに適用させる手法について述べる．

マルチプロジェクションとは、1つのホログラムから複数の映像を別々の場所に投影させる手法である⁶⁾。この手法はホログラム固有の機能であり、ホログラフィックプロジェクトにおいては需要が見込まれるため、マルチプロジェクションへの適用を試みた。具体的な手順は以下のとおりである。

1. k 番目の元画像 $a_{ik}(x_i, y_i)$ と仮想収束光の位相分布 $w_{ik}(x_i, y_i) = \exp(-i\pi(x_i^2 + y_i^2)/\lambda f_{ik})$ を掛け合わせ、複素振幅 $u_{ik}(x_i, y_i) = a_{ik}(x_i, y_i) \times w_{ik}(x_i, y_i)$ を得る。
2. ホログラム面までの回折計算を行い、複素振幅 $u_{hk}(x_h, y_h) = \text{Prop}_{z_2}\{u_{ik}(x_i, y_i)\}$ を得る。
3. 手順 1, 2 を n 枚分の元画像に対し個々に行う。
4. ホログラム面における、光波の複素振幅 $u_{hk}(x_h, y_h)$ の総和を求める。ホログラム面における合成波の複素振幅 $u_h(x_h, y_h)$ は式(8)によって与えられる。

$$u_h(x_h, y_h) = \sum_{k=1}^n u_{hk}(x_h, y_h) \quad (8)$$

5. 新たな複素振幅の値 $u'_h(x_h, y_h) = \exp(ig_h(x_h, y_h))$ を求める。 $g_h(x_h, y_h)$ は手順 4 で得られた複素振幅 $u_h(x_h, y_h)$ の実部の値である。
6. 手順 5 の $u'_h(x_h, y_h)$ から $\theta'_h(x_h, y_h) = \arg\{u'_h(x_h, y_h)\}$ を求める。

物体光センタリング法においても同様に、個々の元画像の回折計算を行ったあと、ホログラム面上で足し合わせることで合成波の複素振幅を求めることが出来る。

5. 振幅内包位相型の GS アルゴリズムへの適用

本章では、振幅内包位相型及び物体光センタリング法を GS アルゴリズムに適用させる手法について述べる。

GS アルゴリズムはスクリーン面とホログラム面に拘束条件を与えて位相を回復させる手法であるが、振幅内包位相型及び物体光センタリングは通常のキノフォームの式と異なるため、ホログラム面の複素振幅への拘束条件として位相限定（偏角のみとする）を行う代わりに振幅限定（実部のみとする）を用いた。具体的な手順は以下のとおりである。

1. 元画像 $a_i(x_i, y_i)$ と仮想収束光の位相分布 $w_i(x_i, y_i) = \exp(-i\pi(x_i^2 + y_i^2)/\lambda f_i)$ を掛け合わせ、複素振幅 $u_i(x_i, y_i) = a_i(x_i, y_i) \times w_i(x_i, y_i)$ を得る。
2. ホログラム面までの回折計算を行い、複素振幅 $u_h(x_h, y_h) = \text{Prop}_{z_2}\{u_i(x_i, y_i)\}$ を得る。
3. ホログラム面における複素振幅 $u_h(x_h, y_h)$ から実部 $g_h(x_h, y_h) = \text{Re}(u_h(x_h, y_h))$ を取りす。これがホログラム面における拘束条件となる。
4. ホログラム面からスクリーン面へ回折計算を行い、このときの複素振幅を $u'_i(x_i, y_i)$ とする。
5. $u'_i(x_i, y_i)$ の振幅部分のみを原画像の振幅 $a_i(x_i, y_i)$ で

置き換える。式(9)がスクリーン面における拘束条件となる。

$$u_i(x_i, y_i) = a_i(x_i, y_i) \times \frac{u'_i(x_i, y_i)}{|u'_i(x_i, y_i)|} \quad (9)$$

6. 手順 1 ~ 5 をあらかじめ決めた回数もしくは画質に達するまで繰り返す。
7. 新たな複素振幅の値 $u'_h(x_h, y_h) = \exp(ig_h(x_h, y_h))$ を求める。 $g_h(x_h, y_h)$ は GS アルゴリズムの反復計算後得られた複素振幅 $u_h(x_h, y_h)$ の実部の値である。
8. 手順 7 の $u'_h(x_h, y_h)$ から $\theta'_h(x_h, y_h) = \arg\{u'_h(x_h, y_h)\}$ を求める。

本節で述べた GS アルゴリズムへの適用方法は、物体光センタリング及びマルチプロジェクションにおいても同様に適用が可能である。

6. シミュレーション及び光学実験による検証結果

本章ではシミュレーションにより画質、回折効率、計算時間の評価及び、光学実験により画質の評価を行う。

6.1 シミュレーションによる評価

シミュレーションでは、ホログラムに照射された再生照明光がどの程度再生像の形成に寄与しているかを比較するために回折効率を用いた。その模式図を図 3 に示す。

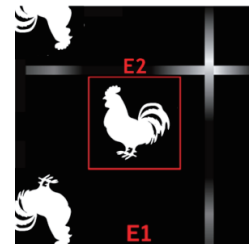


図 3 観察領域を拡大したホログラムの再生シミュレーション像

E2（取り出したい再生像のある領域）の光強度の総和を、E1（再生像、共役光、直接光を含む領域）の光強度の総和で割った値を回折効率として定義した。回折効率の値は式(7)で与えられる。

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

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_l は再領域の複素振幅、 $\text{Re}(\cdot)$ は実部の値を示し、 $\text{Im}(\cdot)$ は虚部の値を示している。

シミュレーション及び光学実験に用いる元画像を図 5 に示す。各手法によって生成したホログラムの再

生シミュレーション像を図6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。シミュレーション条件は表2に示す。表3では、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)にて比較し画質評価をした。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 |
| ホログラムのサンプリング間隔 | | | 4.0 [μm] |
| 画像 A | 投影距離 | | 0.5[m] |
| | オフセット | x | 700[μm] |
| | | y | 700[μm] |
| 画像 B | 投影距離 | | 1.2[m] |
| | オフセット | x | -600[μm] |
| | | y | 500[μm] |
| レーザ波長 | | | 532 [nm] |

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）

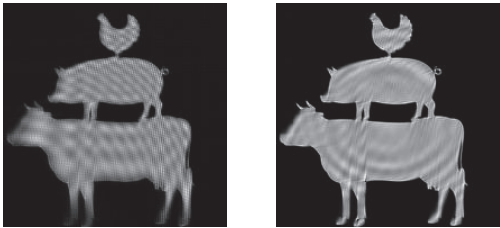
| ホログラムの種類 | GS回数 | PSNR | SSIM | 回折効率 | 計算時間 |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| スクリーン1における再生像 画像 A | | | | | |
| (a) 振幅内包位相型 | 0 | 11.3 | 0.52 | 0.77 | 2.50 |
| | 10 | 14.0 | 0.81 | 6.70 | 6.20 |
| (b) 物体光センタリング | 0 | 11.6 | 0.56 | 1.16 | 2.40 |
| | 10 | 12.1 | 0.65 | 9.69 | 8.01 |
| スクリーン2における再生像 画像 B | | | | | |
| (a) 振幅内包位相型 | 0 | 12.1 | 0.56 | 19.5 | |
| | 10 | 17.7 | 0.71 | 19.1 | |
| (b) 物体光センタリング | 0 | 12.0 | 0.51 | 28.4 | |
| | 10 | 17.2 | 0.68 | 27.2 | |

スクリーン1に投影する元画像 A スクリーン2に投影する元画像 B



図5シミュレーション及び光学実験に用いる元画像

スクリーン1の再生シミュレーション像 A
GS 0 回 GS 10 回

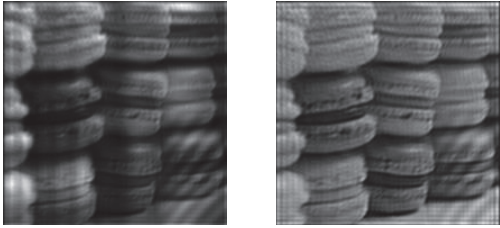


(a)振幅内包位相型

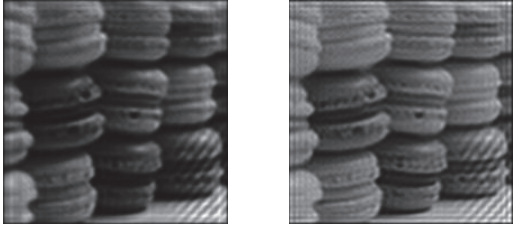


(b)物体光センタリング

スクリーン2の再生シミュレーション像 B
GS 0 回 GS 10 回



(a)振幅内包位相型



(b)物体光センタリング

図6再生シミュレーション像

図6のGS0回はGSアルゴリズムを適用させずに計算した再生シミュレーション像であり、GS10回はGSアルゴリズムを適用させて反復回数10回の再生シミュレーション像である。

それぞれのスクリーンに元画像A及び元画像Bと同様の再生シミュレーション像が得られており、どちらの手法もマルチプロジェクションへの適用が可能であることがわかる。

図6(a)振幅内包位相型のGS0回の再生シミュレ

ション像は、輪郭の端部が不鮮明であり、輪郭内には縞状のノイズがみられる。それに対し、図 6 (a) 振幅内包位相型の GS 10 回は輪郭が明瞭になり、輪郭内のノイズも低減されている。

図 6 (b) 物体光センタリングの GS 0 回の再生シミュレーション像は、図 6 (a) の GS 0 回より輪郭が明瞭であり、センタリングによる効果が表れている。図 6 (b) 物体光センタリングの GS 10 回の再生シミュレーション像は、GS 10 回に比べ輪郭内のノイズが低減されている。

表 3 を見ると、GS アルゴリズムを組み合わせることで、表 3 (a) 振幅内包位相型、(b) 物体光センタリングどちらも PSNR 及び SSIM の値が向上している。特に表 3 (a) で GS 0 回の PSNR と SSIM の値が最も低かったのに対して、GS 10 回が最も PSNR と SSIM の値が高くなっている。

回折効率については、どちらの手法においても画像 A については大幅に値が改善している。但し画像 B についてはあまり変化がみられない。

計算時間については、GS アルゴリズムを用いない場合はどの手法も同等の計算時間であり、GS アルゴリズムを用いた場合はいずれの手法も反復回数に応じて計算時間が増える。

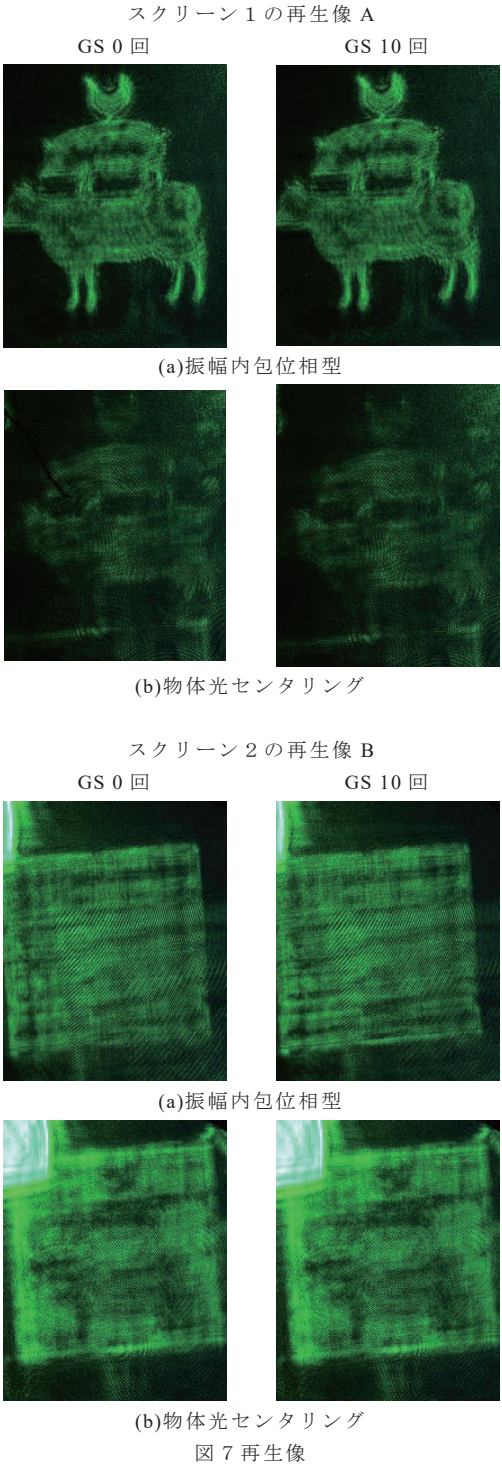
6. 光学実験による評価

次に光学実験による結果を図 7 に、光学実験条件は表 4 に示す。

表 4 光学実験条件

| | | | |
|----------------|-------|---|-------------|
| 元画像のピクセル数 | | | 1,920×1,080 |
| 拡大倍率 | | | 1.0 |
| ホログラムのサンプリング間隔 | | | 8.5 [μm] |
| 画像 A | 投影距離 | | 1.2 [m] |
| | オフセット | x | 1200[μm] |
| | | y | 800 [μm] |
| 画像 B | 投影距離 | | 1.6[m] |
| | オフセット | x | -900 [μm] |
| | | y | 900 [μm] |
| レーザ波長 | | | 513.8 [nm] |

図 7 をみると、シミュレーション結果と対応する結果となっており、どちらの手法もマルチプロジェクション及び GS アルゴリズムに対応させられることが実証できた。特に図 7 (a) 振幅内包位相型の GS10 回が最も輪郭が明瞭になり再生像も明るいものが得られた。



7. むすび

本論文では、マルチプロジェクション及びGSアルゴリズムに対して振幅情報を内包した位相型ホログラムの適用を試み、その効果を確認した。特に振幅内包位相型はGSアルゴリズムを組み合わせるとパターン輪郭が最も明瞭になり、かつ輪郭内のノイズも低減された。数値評価からも画質が改善されていることが示され、GSアルゴリズムを組み合わせる有効性が高いといえる。これは光学実験の再生像からも確認できる効果である。

今後は振幅内包位相型に用いる計算式の改良を試みて、更なる画質改善や回折効率の向上をはかる。

文 献

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] T. Shimobaba and T. Ito: "Random phase-free computer-generated hologram", *Opt. Express* **23**, 7, pp.9549-9554 (2015)
- [4] 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)
- [5] 山口 由美, 長浜 佑樹, 山本 洋太, 下馬場 朋禄, 角江 崇, 伊藤 智義, "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および光学実験による検証", *映像情報メディア学会誌*, **74**, 2 pp.390-394 (2020)
- [6] Y. Nagahama, T. Shimobaba, T. Kawashima, T. Kakue, and T. Ito, "Holographic multi-projection using the random phase-free method," *Appl. Opt.* **55**, pp.1118-1123 (2016)
- [7] Guo-zhen Yang, Bi-zhen Dong, Ben-yuan Gu, Jie-yao Zhuang, and Okan K. Ersoy, "Gerchberg-Saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: a comparison," *Appl. Opt.* **33**, pp.209-218 (1994)
- [8] 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)
- [9] 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, pp.075405 (2013)
- [10] 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)

波長多重位相シフトインコヒーレントマルチカラー デジタルホログラフィ

原 貴之¹ 田原 樹^{2,3} 市橋 保之² 大井 隆太郎² 伊藤 智義¹

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

2 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

3 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

E-mail: takayuki-330@chiba-u.jp

あらまし 波長多重位相シフトインコヒーレントマルチカラーデジタルホログラフィを紹介する。当該技術では、自然な光を用いて波長多重ホログラムを記録し、波長選択位相シフト法に基づき算機内で分光信号処理を行うことで、マルチカラーの三次元像を取得する。従来の時分割手法と比較し、機械駆動部が不要で、記録枚数を低減できることから、白色光照明下での撮影の高速化が期待される。一例にインコヒーレント光源として LED を用い、実際にシステムを構築して、反射物体と透過物体についてカラー再生像の取得及び従来手法との比較を行った。

キーワード インコヒーレントカラーデジタルホログラフィ、波長多重センシング、カラー3D イメージング

Wavelength-Multiplexed Phase-Shifting Incoherent Multicolor Digital Holography

Takayuki HARA¹ Tatsuki TAHARA^{2,3} Yasuyuki ICHIHASHI²

Ryutaro OI² and Tomoyoshi ITO¹

1 Graduate School of Engineering, Chiba University 1-33 Yayoicho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522 Japan

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

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

E-mail: takayuki-330@chiba-u.jp

Abstract We present wavelength-multiplexed phase-shifting incoherent multicolor digital holography, which is a technique that records wavelength-multiplexed holograms with general light sources and obtain a 3D multicolor image by applying wavelength-multiplexed phase-shifting interferometry. Compared with the conventional time-division method, there is no need for a mechanically moving component and the number of recorded images can be reduced. Therefore, speeding up of the measurement is expected particularly when using white-light illumination. In this study, we constructed systems using light emitting diodes (LEDs) and obtained reconstructed images of a reflective object and transparent objects, and then quantitatively evaluated them with the images obtained by a conventional method.

Keyword Incoherent color digital holography, Wavelength-multiplexed sensing, Color 3D imaging

1. 研究背景および目的

インコヒーレントデジタルホログラフィは、自然光などの干渉性の低い光源を用いてホログラムを記録し、計算機内で回折積分の計算を行うことで、物体の三次元再生像を取得する技術である[1]。レーザを用いた場合と異なり、スเปックルノイズが低減された再生像を取得できる。また、複数波長の情報を記録することにより、カラーの再生像も取得できる。従来手法としては、波長情報を時分割で記録する方法[2, 3]や、フーリエ分光法の原理を用いる方法[4, 5]が挙げられる。

しかし、波長情報を時分割で記録する場合、記録波長を変える際に、波長フィルタや光源の切り替えなどの機械駆動部が必要となる[2]。また、波長ごとに位相シフト法を適用するため、 N 波長に対して $4N$ 枚のホログラムの記録が必要となる。フーリエ分光法の原理を用いる場合は、複数波長を同時にセンシングできる。その一方で、波長分解能を向上させ、所望の波長の物体光を取得するためには、ピエゾ素子などの機械駆動

部を用いて光路長差を細かく変化させて、数波長の情報取得に対して 500~1000 枚の波長多重ホログラムを記録する必要がある[5]。そのため、カラー再生像の取得に多くの時間を要する。

そこで我々は、インコヒーレント光源として LED を用いて、機械駆動部なく、従来よりも少ない記録枚数でマルチカラーの三次元再生像を取得する、波長多重位相シフトインコヒーレントマルチカラーデジタルホログラフィを提案する[6]。機械駆動部が不要であることから、従来手法と比較して、白色光照明下での撮影の高速化が期待できる。

本稿では、提案手法の概要と、構築した光学システム及び取得した再生像を示し、時分割手法との画質の比較を行う。

2. 波長多重位相シフトインコヒーレントマルチカラーデジタルホログラフィ

図 1 に光学システムの概略を示す。複数波長の LED などの自然光源によって同時に RGB の照明光を物体に照射し、生成された物体光を偏光子によって直線偏光に変換する。物体光の水平偏光成分に対して、空間光位相変調器でフレネルレンズの位相分布を与える。これにより、水平方向の偏波のみ変調され、偏光方向が互いに直交し曲率半径の異なる二光波が生成される。その後偏光子で二光波の偏光方向が揃えられることにより、曲率半径差に応じてフレネルゾーンプレート状の干渉縞が形成される。これをイメージセンサで記録することにより、波長が多重化されたホログラムを記録することができる。また、空間光位相変調器によって水平偏光成分に対して波長ごとに異なる位相シフトを与えながら、波長多重ホログラムを複数枚記録する。カラー再生像の取得においては、記録した波長多重位相シフトホログラムに計算機内で波長選択位相シフト法[7]を適用し、各波長の物体光の複素振幅分布を算出する。その後各波長について回折積分の計算を行うことで、カラーの再生像を得る。

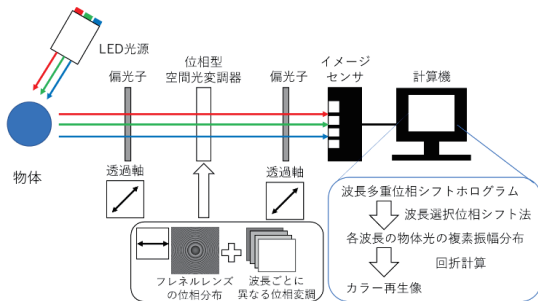


図 1 光学システムの概略

波長選択位相シフト法は、波長ごとに異なる位相シフトを与えられた複数枚の波長多重ホログラムから、各波長の物体光の複素振幅分布を算出する手法である。N 波長に対して、2N+1 枚の記録で適用可能となり、その計算アルゴリズムは

$$\begin{pmatrix} I(x, y; 0, \dots, 0) \\ I(x, y; \alpha_{11}, \dots, \alpha_{N1}) \\ I(x, y; \alpha_{12}, \dots, \alpha_{N2}) \\ \vdots \\ I(x, y; \alpha_{12N-1}, \dots, \alpha_{N2N-1}) \\ I(x, y; \alpha_{12N}, \dots, \alpha_{N2N}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & \cos \alpha_{11} & \sin \alpha_{11} & \dots & \cos \alpha_{N1} & \sin \alpha_{N1} \\ 1 & \cos \alpha_{12} & \sin \alpha_{12} & \dots & \cos \alpha_{N2} & \sin \alpha_{N2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos \alpha_{12N-1} & \sin \alpha_{12N-1} & \dots & \cos \alpha_{N2N-1} & \sin \alpha_{N2N-1} \\ 1 & \cos \alpha_{12N} & \sin \alpha_{12N} & \dots & \cos \alpha_{N2N} & \sin \alpha_{N2N} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_{0th}(x, y) \\ C_1 A_{o1}(x, y) \cos \phi_{o1}(x, y) \\ C_1 A_{o1}(x, y) \sin \phi_{o1}(x, y) \\ \vdots \\ C_N A_{oN}(x, y) \cos \phi_{oN}(x, y) \\ C_N A_{oN}(x, y) \sin \phi_{oN}(x, y) \end{pmatrix} \quad (1)$$

で表される。ただし、0 次回折光の総和を I_{0th} 、波長 λ_i の物体光の振幅、位相、スペクトル帯域幅に依存する係数をそれぞれ $A_{oi}(x, y)$ 、 $\phi_{oi}(x, y)$ 、 C_i とし、記録した 2N+1 枚の波長多重位相シフトホログラムを $I(x, y; 0, \dots, 0) \sim I(x, y; \alpha_{12N}, \dots, \alpha_{N2N})$ 、各波長に与えた位相シフト量を $\alpha_{11} \sim \alpha_{N2N}$ とする。式(1)中の $(2N+1) \times (2N+1)$ 行列は各波長における位相シフト量を示す。各波長の物体光の複素振幅分布は、この行列が正則であるとき、逆行列を計算し両辺に乗算することで算出できる。

本システムは、複数波長を同時にセンシングできるため、波長フィルタや光源の切り替えなどの機械駆動部が不要となる。また、波長選択位相シフト法を用いることで、従来手法よりも少ない枚数の記録で三次元カラー再生像を取得できる。

3. 実験

図 1 に基づき、透過物体と反射物体の二種類の被写体に対して光学系を構築し、実験を行った。また再生像の評価として、時分割記録[2]に基づいて記録したホログラムから像再生した結果を基準画像として、各波長における Peak signal-to-noise ratio (PSNR) と Structural similarity (SSIM) を計算した。

まず、透過物体の記録光学系を図 2 に示す。被写体として、黒の背景に赤で H と書いたものと、緑で T と書いたものをフィルム上にそれぞれ印刷して異なる深さに置いた。文字の大きさは 1.9 mm × 1.9 mm である。また、光源の光を互いに遮らないように図 2 のような透過領域を設けた。LED 光源として Thorlabs 社製 LED4D067 を用い、半値全幅(FWHM)が 18 nm で中心

波長 $\lambda_1 = 625 \text{ nm}$ の赤色光と、 $\text{FWHM} = 33 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 530 \text{ nm}$ の緑色光を同時に照射し実験を行った。二光波の生成と位相シフトを行う空間光位相変調器には、画素数 800×600 、画素間隔 $20 \mu\text{m}$ 、階調数 256 の、浜松ホトニクス社製 LCoS-SLM、X10468-01 を用いた。この LCoS-SLM に焦点距離 $f = 200 \text{ mm}$ で階調数が 136 のフレネルレンズの位相分布を表示し、それに加えて、中心波長 (λ_1, λ_2) に対して ($58\pi/123, 60\pi/99$) ずつの位相シフト量を与えて像再生に必要な 5 枚のホログラムを生成した。そして、画素数 2048×2048 、画素間隔 $6.5 \mu\text{m}$ の Andor 社製 sCMOS カメラ Zyla 4.2 Plus をイメージセンサに用い、ホログラムを記録した。

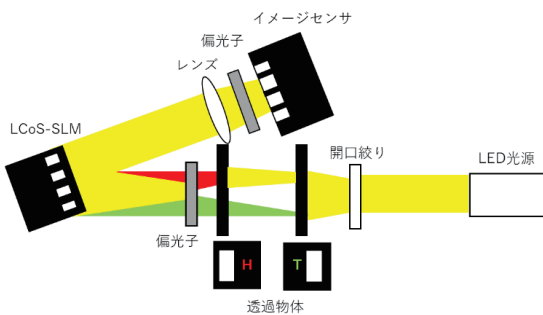


図2 透過物体の記録光学系

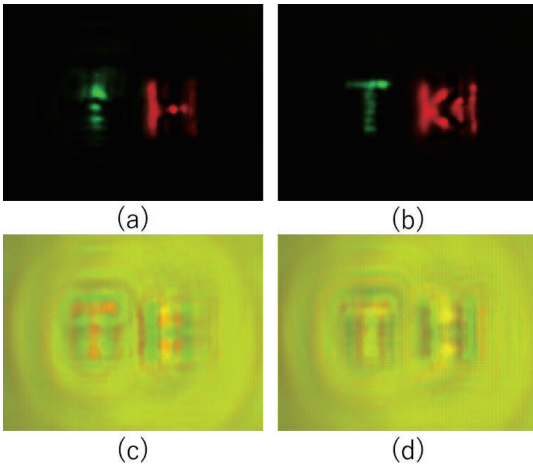


図3 透過物体の像再生結果。(a) 提案手法 (Hに合焦)、(b) 提案手法 (Tに合焦)、(c) 1枚の波長多重ホログラムを用いて得られた再生像 (Hに合焦)、(d) 1枚の波長多重ホログラムを用いて得られた再生像 (Tに合焦)。

像再生結果を図3(a),(b)に示す。像再生距離に応じてピントの合う文字が変わり、透過物体の三次元画像センシングが可能であることがわかる。また、1枚の波

長多重ホログラムから像再生した図3(c),(d)と比較して、直接光や共役像などの不要な光波を除去できていることがわかる。さらに、参考文献[6]で示した、時分割位相シフト法による再生像を基準画像として、各波長におけるPSNR, SSIMをそれぞれ計算すると表1の通りとなり、同様の再生像を取得できたことが定量的に確認できた。

表1 提案手法により得られた再生像の定量評価。

(a) Hに合焦、(b) Tに合焦。

| | PSNR [dB] | | SSIM | |
|-------------|-----------|------|-------|-------|
| | (a) | (b) | (a) | (b) |
| λ_1 | 40.0 | 32.3 | 0.979 | 0.975 |
| λ_2 | 37.9 | 39.1 | 0.976 | 0.972 |

さらに、提案手法が粗面体に対しても有効であることを確認するために、反射物体を用いた実験を行った。反射型の記録光学系を図4に示す。被写体として $6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ の抵抗をおき、反射光が光学系に入射するよう光源の位置を調整した。この系に、中心波長 λ_1, λ_2 に加えて、 $\text{FWHM} = 18 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3 = 455 \text{ nm}$ の青色光の3波長の光を同時に照射し、実験を行った。LCoS-SLMには、焦点距離 $f = 700 \text{ mm}$ で階調数が 136 のフレネルレンズの位相分布を表示し、それに加えて、中心波長 ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) に対して ($40\pi/123, 40\pi/99, 40\pi/78$) ずつの位相シフト量を与えて像再生に必要な7枚のホログラムを記録した。また、本実験では平滑化フィルタが再生像に与える効果を調べるために、 3×3 の平均値フィルタを掛けた。

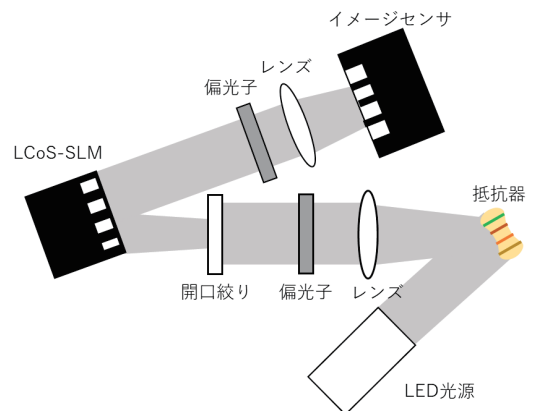


図4 反射物体の記録光学系

実験結果を図5に示す。像再生距離によってピントの合う位置が変わり、反射物体の三次元画像センシングが可能であることがわかる。また、1枚の波長多重ホログラムから像再生した図5(a),(b)と比較して、図

5(c),(d)では直接光や共役光などの不要光が除去できていることがわかる．さらに，参考文献[6]で示した，時分割位相シフト法による再生像を基準画像として，各波長における PSNR, SSIM をそれぞれ計算すると表 2 の通りとなり，同程度の再生像を取得できたことが定量的に確認できた．

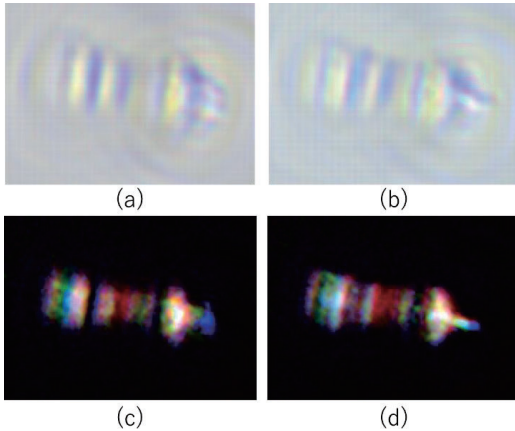


図 5 反射物体の像再生結果. (a) 1 枚の波長多重ホログラムを用いて得られた再生像 (左側のカラーコードに合焦), (b) 1 枚の波長多重ホログラムを用いて得られた再生像 (右側のカラーコードに合焦), (c) 提案手法に 3×3 の平均値フィルタをかけた再生像 (左側のカラーコードに合焦), (d) 提案手法に 3×3 の平均値フィルタをかけた再生像 (右側のカラーコードに合焦).

表 2 提案手法により得られた再生像の定量評価. (a)左側のカラーコードに合焦, (b)右側のカラーコードに合焦.

| | PSNR [dB] | | SSIM | |
|-------------|-----------|------|-------|-------|
| | (a) | (b) | (a) | (b) |
| λ_1 | 23.1 | 22.7 | 0.863 | 0.842 |
| λ_2 | 22.3 | 22.3 | 0.828 | 0.831 |
| λ_3 | 24.7 | 23.8 | 0.871 | 0.839 |

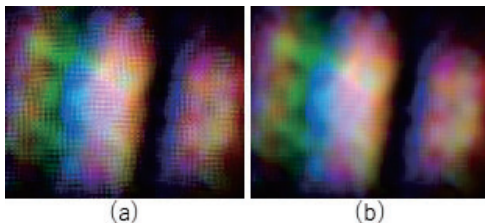


図 6 再生像の一部の拡大. (a)平均値フィルタ適用前, (b)適用後. 不要なパターンの重畳が除去された.

3×3 の平均値フィルタが再生像に与える影響を調べるために，参考文献[6]に示されているフィルタなしの結果と比較した．結果を図 5(c),(d)に示す．平均値フィルタをかけることにより，図 6 に示す通り，再生像表面の格子状のパターンが低減され，定量評価値も表 3 に示すように改善された．以上より，フィルタの導入による画質の向上を示した．

表 3 平均値フィルタ適用後の再生像の定量評価.

(a)左側のカラーコードに合焦, (b)右側のカラーコードに合焦.

| | PSNR [dB] | | SSIM | |
|-------------|-----------|------|-------|-------|
| | (a) | (b) | (a) | (b) |
| λ_1 | 24.6 | 24.2 | 0.892 | 0.875 |
| λ_2 | 25.3 | 25.6 | 0.916 | 0.921 |
| λ_3 | 25.3 | 23.9 | 0.888 | 0.849 |

4. まとめと今後の展望

空間的にインコヒーレントな光源を用いて，機械駆動部なく，従来よりも少ない記録枚数でカラー再生像を取得する，波長多重位相シフトインコヒーレントマルチカラーデジタルホログラフィを提案した．複数の LED を光源として用い，実際に光学システムを構築して，透過物体と反射物体について三次元カラー再生像を取得できた．取得した再生像の画質評価を行い，従来手法と同程度の再生像が得られていることを定量的に確認できた．

今後の展望としては，機械駆動部が不要で機械的振動が発生しない利点を活かし，超高速駆動する位相変調素子を用い，白色光や太陽光などのより干渉性の低い光源での三次元カラー動画の取得を目指したい．

本研究の一部は JSPS 科学研究費(19H1097, 18H01456), JST さきがけ(JPMJPR16P8)の助成を受けて行なわれた．

文 献

- [1] J. Rosen and G. Brooker, “Digital spatially incoherent Fresnel holography”, *Opt. Lett.* **32**, 912–914 (2007).
- [2] J. Rosen and G. Brooker, “Fluorescence incoherent color holography”, *Opt. Express* **15**, 2244–2250 (2007).
- [3] Y. Wan, T. Man, and D. Wang, “Incoherent off-axis Fourier triangular color holography”, *Opt. Express* **22**, 8565–8573 (2014).
- [4] K. Yoshimori, “Interferometric spectral imaging for three-dimensional objects illuminated by a natural light source”, *J. Opt. Soc. Am. A* **18**, 765–770 (2001).
- [5] D. N. Naik, G. Pedrini, M. Takeda, and W. Osten, “Spectrally resolved incoherent holography: 3D spatial and spectral imaging using a mach-zehnder radial-shearing interferometer”, *Opt. Lett.* **39**, 1857–1860 (2014).
- [6] T. Hara, T. Tahara, Y. Ichihashi, R. Oi, and T. Ito,

“Multiwavelength-multiplexed phase-shifting incoherent color digital holography”, Opt. Express **28**, 10078-10089 (2020).

- [7] 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).

Gradient Descent Based Optimization of Phase-Only

Computer-Generated Holograms to Generate Dual Reconstructed Images at Different Depth Positions

Shujian Liu[†] Yasuhiro Takaki[†]

[†] Institute 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

Abstract Hologram can provide high-quality images. Many former researches focused on the Fourier transform which provides holograms of 2D images. There are also researches focused on Fresnel transform which provides holograms of 3D images, of which size is as small as the size of the SLMs. For the Fourier-transform holograms, holograms are calculated by the overlay of all information of all pixels on the images after the Fourier lens. For the Fresnel-transform holograms, holograms are calculated by the overlay of information of all the pixels on the image in near field. This research merges the Fourier-transform and the Fresnel-transform holograms, which records the 3D information of all the pixel of the image after the Fourier lens. The optimization method is based on the gradient descent algorithm which was developed in our previous work. This research explores a phase-only hologram generation method based on the merged Fourier and Fresnel transforms.

Keyword Holograms, phase-only holograms, Fourier transform, Fresnel transform

1. Introduction

For the image reconstruction of holograms, there are two mainstream methods, i.e., Fourier and Fresnel transforms. When the image is reconstructed by a Fourier transform lens, the reconstructed image is the Fourier transform of the hologram. When the image is reconstructed in a near field area, the reconstructed image is the Fresnel transform of the hologram.

When the Fourier transform is used, the reconstructed image is on the Fourier plane, which can only reconstruct the image at a single depth position. When the Fresnel transform is used, the reconstructed image is in the near field area of the hologram. In practice, however, because the pixel pitch of the spatial light modulator (SLM) is too large, the near field area is too far from the SLM. In order to reconstruct images near to the SLM at several depth positions, we propose a new calculation technique which merges the Fourier and Fresnel transforms for holograms using a Fourier transform lens.

2. Theory

2.1. Proposal of another transform

Either for the Fourier or Fresnel transforms, the fundamental principle of the hologram calculation is the overlay of wavefront emitted from all pixels of the target images. For the Fourier transform, the hologram is calculated by the plane wave generated by each pixel on the target image as shown in Fig. 1(a). In the case

of the Fresnel transform, the hologram is calculated by the overlay of spherical wave generated by each pixel on the target image as shown in Fig. 1(b).

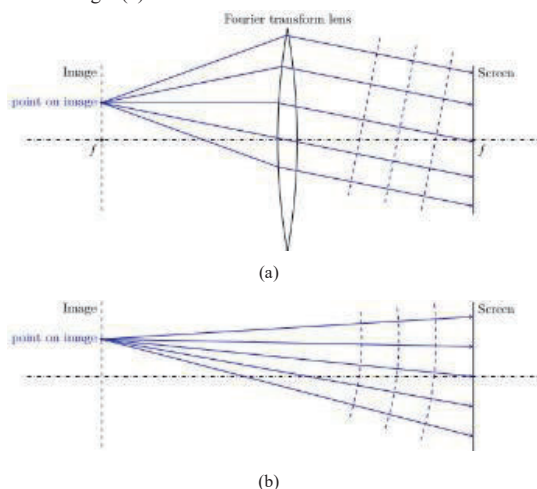


Fig. 1 Fourier and Fresnel Transform: (a) Fourier transform, and (b) Fourier transform.

Under the status of the image away from the Fourier plane, the wave of each pixel on the image is shown as Fig. 2. The function of the phase is shown as function (1).

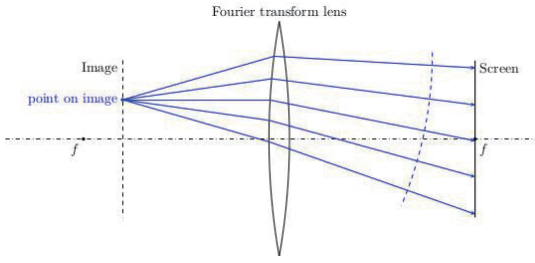


Fig. 2 Status of Proposed transform

$$A_{pq}e^{i\theta_{pq}} = \sum_m \sum_n A_{mn} e^{i\left[\theta_{mn} - 2\pi\left(\frac{mp}{M} + \frac{nq}{N}\right) - z_{mn}(p^2 + q^2)\right]} \quad (1)$$

where m and n are the pixel coordinate on the image, p and q are the pixel coordinate on the hologram. A stand for the amplitude of image and hologram, respectively. θ stand for the phase of the image and hologram, respectively. Z_{mn} determined by the depth position of the image. Note that the depth position is not constant and depends on the pixel position (m, n).

This transform is similar to the Fourier transform overlaid with a phase of a lens divided by the depth. The inverse transform is shown as (2).

$$A_{mn}e^{i\theta_{mn}} = \frac{1}{PQ} \sum_p \sum_q A_{pq} e^{i\left[\theta_{pq} + 2\pi\left(\frac{mp}{P} + \frac{nq}{Q}\right) + z_{mn}(p^2 + q^2)\right]} \quad (2)$$

Here, we verify the reversibility of the transform theoretically. The 1D integration function of the transform is shown as (3) and (4). Whether the image be reconstructed after the transform and an inverse transform as function (5).

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j[\omega t + z(t)\omega^2]} dt \quad (3)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j[\omega t + z(t)\omega^2]} d\omega \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\pi} \int_{\omega=-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j[\omega t + z(t)\omega^2]} d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{\omega=-\infty}^{\infty} \left(\int_{\tau=-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-j[\omega \tau + z(\tau)\omega^2]} d\tau \right) e^{j[\omega t + z(t)\omega^2]} d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{\omega=-\infty}^{\infty} \int_{\tau=-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-j\{\omega(\tau-t) + \omega^2[z(\tau)-z(t)]\}} d\tau d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{\tau=-\infty}^{\infty} f(\tau) \left(\int_{\omega=-\infty}^{\infty} e^{-j\omega(\tau-t)} e^{-j\omega^2[z(\tau)-z(t)]} d\omega \right) d\tau \\ &= \int_{\tau=-\infty}^{\infty} f(\tau) \delta(\tau-t) d\tau + \int_{\tau=-\infty}^{\infty} f(\tau) \epsilon[z(\tau)-z(t)] d\tau \\ &= f(t) + \epsilon' \end{aligned} \quad (5)$$

The result shows that the image is not rebuilt perfectly with a noise, similar to the status of Fresnel transform, caused by the interaction of different depth positions.

We designed an optimization algorithm in order to calculate phase only holograms based on gradient descent method. We evaluate the error using the flatness of the intensity of the holograms, the error evaluation function is shown as function (6).

$$E = \frac{1}{PQ} (\hat{I}_{pq} - \bar{I}_{pq})^2 \quad (6)$$

The gradient of the error can be calculated using Equation (7).

$$\frac{\partial E}{\partial \theta_{mn}} = \frac{4}{PQ} \ln A_{mn} e^{-j\theta_{mn}} \sum_p \sum_q (\hat{I}_{pq} - \bar{I}_{pq}) \hat{A}_{pq} e^{j\theta_{pq} + k(mp+nq) + z_{mn}(p^2+q^2)} \quad (7)$$

The phase of the target image changes in the opposite direction of the gradient through an optimized error reduction rate [1]. The error will become smaller each iteration.

3. Simulation

3.1. Correctness of proposed transform

We verify the proposed theory using computer simulations. We used an “LR image” (Fig. 3) with resolution of 300X300 as the test image. The “R” is in the Fourier plane and the “L” is away from the Fourier plane, which the distance is 60 mm. Figure 4 shows the phase of the hologram using the proposed technique.



Fig. 3 Test image

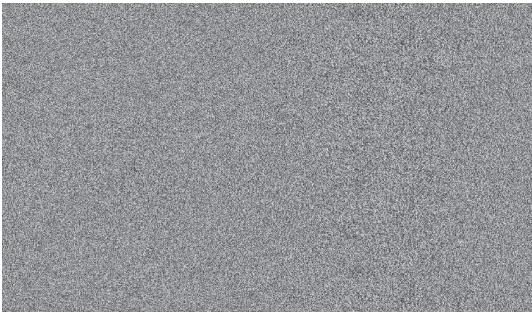


Fig. 4 Phase of the hologram

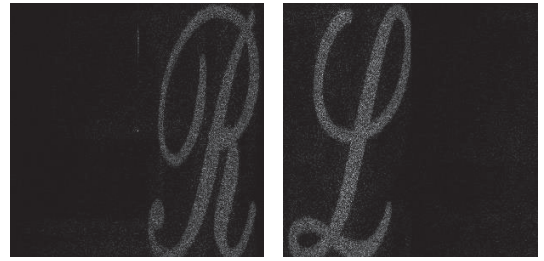


Fig. 7a Fourier plane

Fig. 7b 6cm plane

The results show effectiveness of the proposed optimization technique. The optimized phase-only holograms show a lower noise in simulation.

4. Conclusion

We proposed a new phase-only hologram calculation technique for showing images at different depth positions using a Fourier transform lens and an optimization algorithm based on the gradient descent method. This algorithm might be used to calculate holograms for 3D object models in our future researches.

Reference

- [1] S. Liu and Y. Takaki, "Optimization of Phase-Only Computer-Generated Holograms Based on the Gradient Descent Method," *Appl. Sci.*, vol. 10 no. 12, 4283 (2020).

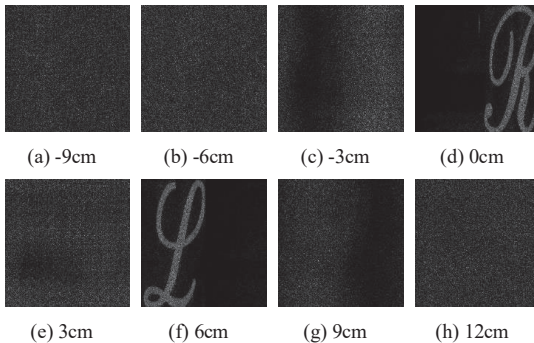


Fig. 5 images reconstructed in different position

Figure 5 shows the reconstructed images at different depth positions. From these results, the algorithm can reconstruct the images in the near area of the Fourier plane. From Fig. 5, the proposed technique does not produce any conjugation image.

3.2. Effectiveness of optimization algorithm

The optimization algorithm for phase-only holograms is verified by simulations. We designed the algorithm for the Equation (5). The optimized error reduction rate is calculated using the technique proposed in our previous research [1]. The results of the phase-only holograms without optimization are shown as Figs. 6. The reconstructed images of phase-only holograms after optimization of 100 iterations are shown as Figs. 7.

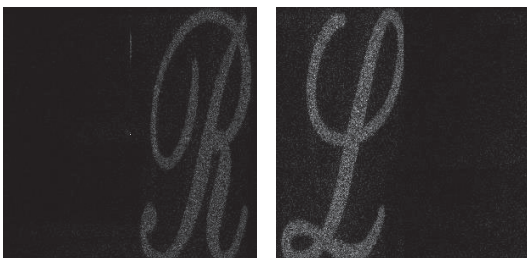


Fig. 6a Fourier plane

Fig. 6b 6cm plane

令和 2 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： 2020 年 9 月 25 日(金) 13:30～16:30

■場 所： Zoom によるオンライン開催

■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) Xilinx Alveo U250 を用いた振幅・位相変調型ホログラフィ向け専用計算機の開発

山本洋太, 下馬場朋禄, 角江崇(千葉大), 増田信之(東京理科大), 伊藤 智義(千葉大)

(2) 位相型ホログラフィックプロジェクタにおける画質改善アルゴリズム

山口由美(千葉大), 長浜佑樹(東京農工大),

山本洋太, 角江崇, 伊藤智義, 下馬場朋禄(千葉大)

(3) 波長多重位相シフトインコヒーレントマルチカラーディジタルホログラフィ

原貴之(千葉大), 田原樹, 市橋保之, 大井隆太郎(NICT), 伊藤智義(千葉大)

(4) Gradient Descent Based Optimization of Phase-Only Computer-Generated

Holograms to Generate Dual Reconstructed Images at Different Depth Positions

Shujian Liu, Yasuhiro Takaki (Tokyo Univ. of Agri. and Tech.)

■参加費： 会員, 非会員, とともに無料

■問合せ先

・研究会について: e-mail meeting@hodic.org

・その他全般: HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川 浩 宛

TEL/FAX 047-469-5391

e-mail office@hodic.org

令和 2 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： 2020 年 12 月 4 日 (金) 13:00 からを予定

■場 所： Zoom によるオンライン開催

■テーマ： ホログラム記録材料の最新動向 (仮)

■プログラム： 未定

■研究会参加申込 事前申込

■参加費： 会員，非会員，ともに無料

■問合せ先

・研究会について: e-mail meeting@hodic.org

・その他全般: HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川 浩 宛

TEL/FAX 047-469-5391

e-mail office@hodic.org

HODIC の WEB ページとメールリストのご案内

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

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

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

メールリストサービスは、特定のアドレスにメールを送ると加入者にメールが転送されるものです。HODIC からのお知らせと会員間の自由な意見交換や情報交換のために利用しています。加入も脱退も自由で、費用もかかりません。自分から情報発信したり、分からないことを質問したりすることも可能です。インターネットへの電子メールの送受信が可能ならどなたでも参加できます。加入の申し込みは、登録したいメールアドレスから maillist-req@hodic.org 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（東京都立大学） | 企画委員長 | 角江 崇（千葉大学） |
| 会計幹事 | 山内 豪（大日本印刷） | 事務局長 | 岸本 康（凸版印刷） |
| 編集長 | 吉川 浩（日本大学） | | |

幹 事（５０音順）

| | | |
|--------------|-----------------|------------------|
| 石井勢津子（美術家） | 石川 洵（石川光学造形研究所） | 岩田 藤郎 |
| 植田 健治（大日本印刷） | 太田 和哉（トリマティス） | 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） | 白木 厚司（千葉大学） | 白倉 明（アーティエンス・ラボ） |
| 高木 康博（農工大） | 高橋 進（凸版印刷） | 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） |
| 山口 健（日本大学） | 山口 雅浩（東京工業大学） | 渡邊恵理子（電気通信大学） |

相 談 役（５０音順）

| | | |
|---------------------|-------------------|---------------------|
| 上田 裕昭（コカミルタプラネタリウム） | 小野 雄三（立命館大学） | 勝間ひでとし（湘南 LRT 研究 G） |
| 桑山 哲郎 | 久保田敏弘（久保田ホログラム工房） | 酒井 朋子（千葉大学） |
| 永田 忠昭（arts-unis） | 三田村峻右 | 堀内 道夫（光と風の研究所） |
| 本田 捷夫（本田ひかり技研） | | |

編集部よりのお知らせ

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

なお、次号会報に掲載するためには研究会開催日の１ヶ月前が締切となります。

HODIC Circular, Vol. 40, No. 3 (Sep. 2020)

2020 年 9 月 25 日発行

編 集 日本光学会 ホログラフィック・ディスプレイ研究グループ

編 集 長 吉川 浩(日本大学)

HODIC 事務局 (入会・連絡先変更・各種問合せ等)

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付 (担当: 吉川 浩)
〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

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

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

ご連絡はなるべく電子メールまたは FAX にてお願いいたします。

For foreign members, any corresponding to

Hiroshi Yoshikawa, Dept. Computer Engineering, Nihon University

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

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

HODIC