

ズームレンズを用いないズーム可能な
カラーホログラフィックプロジェクション
Zoomable color holographic projection without using zoom lens

下馬場朋禄* 角江崇* 増田信之* 伊藤智義*
Tomoyoshi Shimobaba Takashi Kakue Nobuyuki Masuda Tomoyoshi Ito

1. まえがき

ホログラフィックプロジェクション [1, 2] はレーザーディスプレイの一種で、ホログラフィの波面制御特性を利用するため無収差、高コントラスト、一枚のホログラム表示素子でカラー再生が可能などの特徴を持つ。筆者らは既にズームレンズを用いないホログラフィックプロジェクションを提案しているが [3], これはモノクロ画像しか再生できなかった。本研究では、更にカラー再生が可能な方法を提案し数値シミュレーションによる検討を行う。

2. ズームレンズを用いないズーム可能なホログラフィックプロジェクション

ホログラフィックプロジェクションの概略図を図 1 に示す。初めに投影したい画像（元画像）からホログラム画像を計算する。これには、元画像から発する光がある距離 z だけ離れた位置にあるホログラム上での光波分布を回折計算を用いて計算する。光波分布は複素振幅場であるため、そのままでは LCD パネルなどの空間光変調器 (SLM : Spatial Light Modulator) に表示できない。そこで実数値に変換する必要がある。実数値に変換するには、元画像の光ともう一つの光（参照光）を干渉させ振幅型ホログラムにするか、もしくは投影したい画像の光の複素振幅場の偏角を取ることによって位相型ホログラム（キノフォームとも呼ばれる）にする。振幅型ホログラムの場合は振幅型 SLM を、キノフォームの場合は位相変調型 SLM を用いる。

計算したホログラム画像を SLM に表示し波長 λ の再生光を SLM に照射することで、ホログラム画像に記録された元画像が距離 z の位置で投影される。ホログラム自身が持つ結像特性のため、結像レンズがなくても画像を投影することができる。その構成は非常にシンプルであり、仮に SLM の画素数が $1,024 \times 1,024$ 、画素ピッチが $1\mu\text{m}$ であるとすると、SLM のサイズは $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 程度となる。これにレーザー光源を組み合わせた超小型モジュールを作れば (SLM が小型なためレーザー光源を拡大する光学系も不要)、携帯端末に搭載できるピコプロジェクタ [4, 5] へも応用が可能となる。

プロジェクタには投影画像のズーム機能が必須であるが、ズーム機能は一般的にズームレンズを搭載することで実現する。ホログラフィックプロジェクションもズームを行うためにはズームレンズが必要であるがコストやサイズ面でデメリットとなる。筆者らはズームレンズを用いないズーム可能なホログラフィックプロジェクションを提案している [3]。ホログラフィはホロ

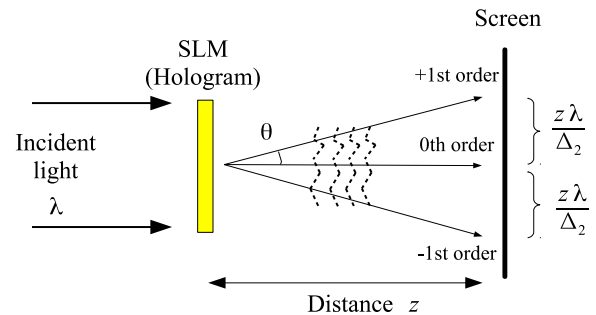


図 1: ホログラフィックプロジェクションの概略図

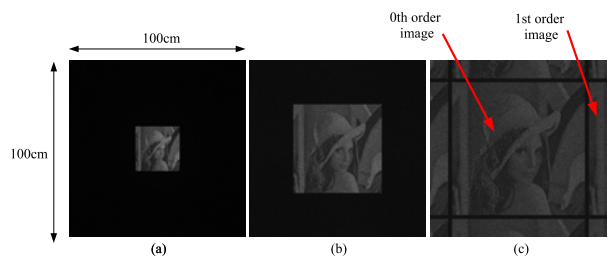


図 2: ホログラフィックプロジェクションからのズーム投影画像

グラムサイズを超えた元画像を記録することができる。そのためズームレンズを用いなくても元画像を画像処理で拡大した後にホログラム画像を計算すれば容易にズームが可能であるが、その計算量とメモリ量は元画像サイズに比例して増大する。そこで、[3] では元画像の画素数を増やさずに元画像のサンプリング間隔 Δ_1 を変化させることで、計算量とメモリ量を増やさずにズーム機能を実現している。当該分野でよく使用されているフレネル回折は、元画像とホログラムのサンプリング間隔を同一にする必要があるため、このような計算には使うことができない。[3] では、フレネル回折の代わりにシフトフレネル回折 [6] を用いた。シフトフレネル回折は、元画像とホログラムのサンプリング間隔が異なっても FFT を用いた高速計算ができる。

図 2 にこの手法による投影画像の数値計算結果を示す。(a)~(c) は元画像のサンプリング間隔 Δ_1 をそれぞれ $300\mu\text{m}$, $600\mu\text{m}$, $900\mu\text{m}$ とした場合の結果となっている。投影画像は 0 次光と +1 次光 (もしくは -1 次光) を超えて描くことはできないので、投影画像の最大サイズ S は z , λ とホログラムのサンプリング間隔 (SLM の画素ピッチ) Δ_2 に依存し、 $S \approx z\lambda/\Delta_2$ で決

*千葉大学大学院, Chiba University

まる. この数値計算結果は, $z = 2m$, $\lambda = 470nm$, $\Delta_2 = 1\mu m$ と仮定した場合で, 投影画像の最大サイズはおよそ $1m \times 1m$ となる.

3. ズームレンズを用いないズーム可能なカラーホログラフィックプロジェクション

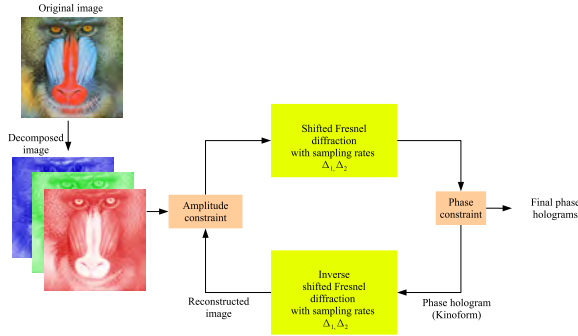


図 3: GS アルゴリズムによるズーム可能なカラー投影画像のスペックルノイズの低減

図 2 は単色のみであり, また, 投影画像のスペックルノイズが目立ったものとなっている. そこで本研究では, スペックルノイズを低減したズーム可能なカラー投影画像を得ることを試みる. 図 3 に Gerchberg-Saxton (GS) アルゴリズム [7] によるズーム可能なカラー投影画像のスペックルノイズの低減方法を示す.

GS アルゴリズムは元画像とその元画像から得られた回折計算結果に制約条件を課し反復計算することで, ホログラムの最適化を行う手法である. ここでは, まず元画像を各色成分に分解し, 各色成分ごとに GS アルゴリズムでホログラムの最適化を行う. 赤成分 (波長 $\lambda = 633nm$ と設定) の元画像にランダム位相を与え, ズームを行う場合は Δ_1 に適切な値を設定してからシフトフレネル回折計算で元画像からホログラム面上での回折計算結果 (複素振幅場) を得る. この複素振幅場の偏角を計算しキノフォームとする (図 3 の Phase constraint). 次にこのキノフォームから逆シフトフレネル回折を計算し再生像 (投影画像) を得る. この再生像の振幅成分を元画像に置き換え (図 3 の Amplitude constraint), 同様の反復処理を行うことで徐々に最適化されたホログラム (ここではキノフォーム) を得ることができる. 緑, 青成分もそれぞれ異なるランダム位相を与え $\lambda = 532nm$, $\lambda = 470nm$ として同様の方法でホログラムを最適化する.

各色に対応した 3 枚のホログラムを得られるが, これらのホログラムからカラー投影画像を得るために本研究では時分割法によるカラー再生 [8, 9, 10, 11] を使用する. これには高速な切り替えが可能な SLM が必要であるが, [8, 9] で 360Hz のリフレッシュレートを持つ LCD を使用した例がある. ここでもこの程度のリフレッシュレートを持つ LCD を想定する. 時分割法では赤の情報が記録されたホログラムが LCD に表示されている時, 赤のレーザー光源のみを点灯させ赤色の投影画像を再生する. 他の色についても同様の処理を行

い, 360Hz の速度で表示と光源の同期制御を行うことでカラー投影画像を観察することができる. カラー投影画像のリフレッシュレートは 120Hz となる.

図 4 に GS アルゴリズムを使用しなかった場合のズーム可能なカラー投影画像の結果を示す. 上から $\Delta_1 = 300\mu m, 600\mu m, 900\mu m$ の場合の結果となっている. GS アルゴリズムを使用しない場合は, スペックルノイズが目立ち投影画像も暗くなる. このカラー投影画像のホログラム 3 枚を得るのに, Intel 社の CPU (Intel Core i7) の 1 スレッドを使用した場合, 約 30 秒を要する.

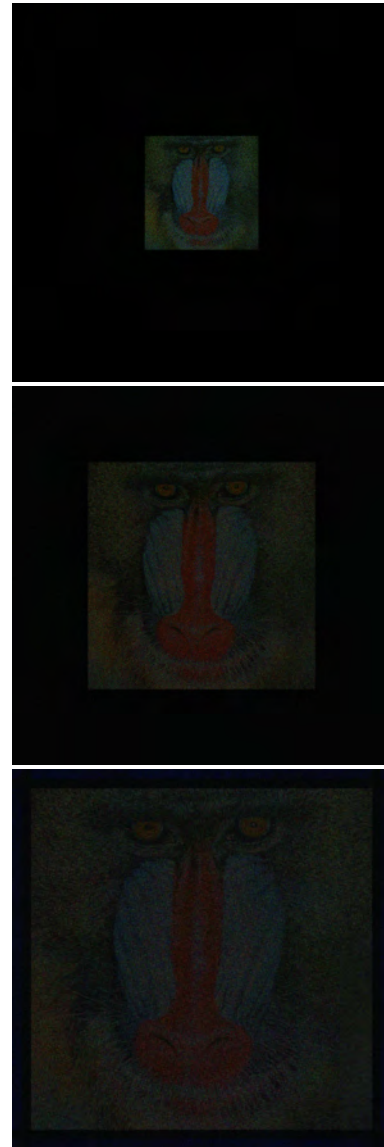


図 4: GS アルゴリズムを使用しないズーム可能なカラー投影画像

図 5 に GS アルゴリズム (4 反復計算) を使用した場合のズーム可能なカラー投影画像の結果を示す. 上から $\Delta_1 = 300\mu m, 600\mu m, 900\mu m$ の場合の結果となっている. 図 4 に比較するとスペックルノイズと画像の明度が若干改善していることがわかる. このカラー投

影画像のホログラム 3 枚を得るのに約 70 秒を要する。

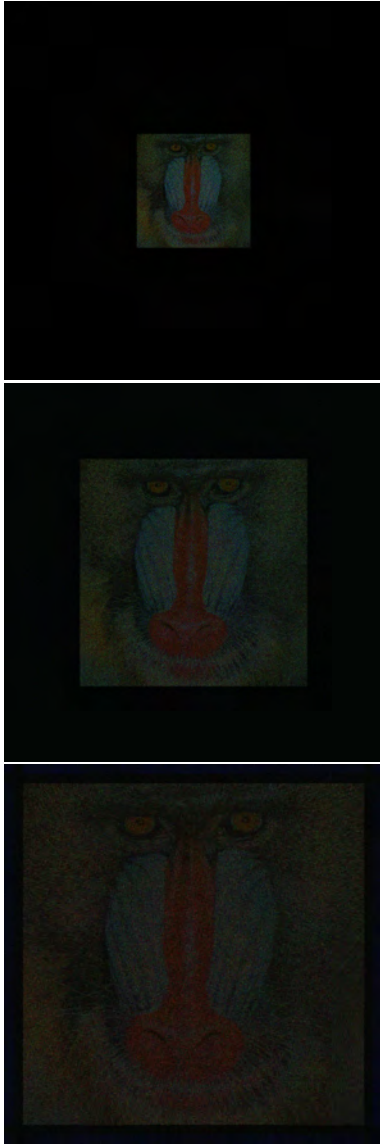


図 5: GS アルゴリズムを使用したズーム可能なカラー投影画像。反復回数は 4 回。

GS アルゴリズムは反復回数を増やせば徐々に再生像の画質を改善できるが、ある反復回数を超えると最適化の効果が頭打ちとなることが知られている。

そこで本研究では、Makowski により提案されたマルチランダム位相による GS アルゴリズム [12, 13] を用いる。この手法は例えば赤色成分であれば、赤色成分を図 3 の方法でホログラムを計算する。次に、初めのものとは異なる分布を持つランダム位相を赤色成分に与え、異なるホログラムを得る。複数の異なるランダム位相ごとに赤色成分のホログラムを複数枚計算し、この複数枚のホログラムから再生像を時分割法で再生することで異なるスペックルノイズを持つ投影画像が時間的に重畳されスペックルノイズが低減される。他の色成分も同様の方法で複数枚のホログラムを生成する。

図 6 にこの方法による投影画像を示す。図 5 に比べ、画質が向上していることがわかる。各色成分ごとに反復回数を 4 回、ランダム位相を 4 枚使用して 4 枚のホログラムを生成した。3 成分全体でホログラムは 12 枚となり、この 12 枚のホログラムを時分割表示するため 360Hz の速度で表示切替を行う SLM を使用した場合、カラー投影画像のリフレッシュレートは 30Hz となる。このカラー投影画像のホログラム 12 枚を得るのに約 270 秒を要する。

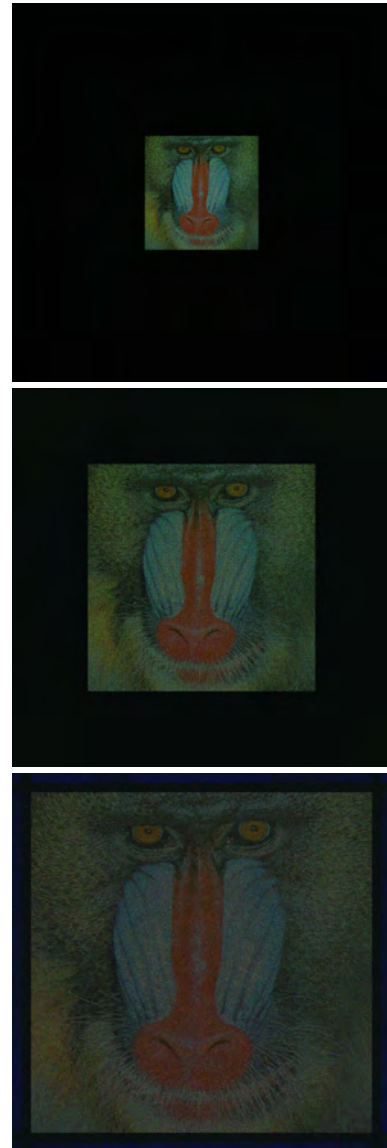


図 6: マルチランダム位相 GS アルゴリズムによるズーム可能なカラー投影画像。各色成分ごとに反復回数を 4 回、ランダム位相を 4 枚使用する。

図 7 左に図 5 の細部を、図 7 右に図 6 の細部の再生結果を示す。この結果は $\Delta_1 = 900\mu\text{m}$ で再生像のサンプリング間隔を $450\mu\text{m}$ で観察している。図 7 右はマルチランダム位相 GS アルゴリズムによる結果であるが、この結果のほうが単純に GS アルゴリズムを繰り返し

た結果 (図7左) よりも良好であることが確認できる。



図7: 投影画像の細部. 左は図5, 右は図6に対応する.

4. まとめ

本研究はズームレンズを用いないズーム可能なカラーホログラフィックプロジェクションの提案を行った. 本方式はレンズレスでシンプルなシステム構成となるため, 携帯端末などに搭載可能なピコプロジェクタに応用できる. マルチランダム位相GSアルゴリズムを適用することで投影画像のスペックルノイズ低減と画質改善を行うことができたが, その反面, 高リフレッシュレートのSLMが必要であり, また複数のホログラムを生成する必要があるため計算時間も増大する. 今後は, さらなるスペックルノイズの低減, 時分割法によらないカラー再生手法の適用 (例えば[14]), 計算高速化などを行う予定である.

本研究は, 総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)(課題番号09150542)及び文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)(課題番号23700103), 中島記念国際交流財団による補助のもとで行われました. 深く感謝の意を表します.

参考文献

- [1] E. Buckley, "Holographic Laser Projection," *J. Display Technol.* **99**, 1–6 (2010).
- [2] E. Buckley, "Holographic projector using one lens," *Opt. Lett.* **35**, 3399–3401 (2010).
- [3] T. Shimobaba, A. Gotchev, N. Masuda and T. Ito, "Proposal of zoomable holographic projection without zoom lens," *The 18th International Display Workshop (IDW'11)*, **PRJ3** (2011).
- [4] W. O. Davis, R. Sprague, J. Miller, "MEMS-based pico projector display," *Optical MEMs and Nanophotonics, 2008 IEEE/LEOS International Conference*, 31–32 (2008).
- [5] M. Freeman, M. Champion, and S. Madhavan, "Scanned Laser Pico-Projectors: Seeing the Big Picture (with a Small Device)," *Optics & Photonics News* **20(5)**, 28–34 (2009).
- [6] R. P. Muffoletto, J. M. Tyler, and J. E. Tohline, "Shifted Fresnel diffraction for computational holography," *Opt. Express* **15**, 5631–5640 (2007).
- [7] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, "A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures," *Optik* **35**, 237–246 (1972).
- [8] T. Shimobaba and T. Ito, "A Color Holographic Reconstruction System by Time Division Multiplexing Method with Reference Lights of Laser," *Opt. Rev.* **10**, 339–341 (2003).
- [9] T. Shimobaba, A. Shiraki, N. Masuda and T. Ito, "Electroholographic display unit for three-dimensional display by use of special-purpose computational chip for holography and reflective LCD panel," *Opt. Express* **13**, 4196–4201 (2005).
- [10] T. Shimobaba, A. Shiraki, N. Masuda and T. Ito, "An electroholographic colour reconstruction by time division switching of reference lights," *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.* **9**, 757–760 (2007).
- [11] M. Oikawa, T. Shimobaba, T. Yoda, H. Nakayama, A. Shiraki, N. Masuda and T. Ito, "Time-division color electroholography using one-chip RGB LED and synchronizing controller," *Opt. Express* **19**, 12008–12013 (2011).
- [12] M. Makowski, M. Sypek, I. Ducin, A. Fajst, A. Siemion, J. Suszek, and A. Kolodziejczyk, "Experimental evaluation of a full-color compact lensless holographic display," *Opt. Express* **17**, 20840–20846 (2009).
- [13] M. Makowski, I. Ducin, K. Kakarenko, A. Kolodziejczyk, A. Siemion, A. Siemion, J. Suszek, M. Sypek, and D. Wojnowski, "Efficient image projection by Fourier electroholography," *Opt. Lett.* **36**, 3018–3020 (2011).
- [14] T. Shimobaba, T. Takahashi, N. Masuda and T. Ito, "Numerical study of color holographic projection using space-division method," *Opt. Express* **19**, 10287–10292 (2011).