

凹面鏡を用いた時分割カラー電子ホログラフィによる 3 次元動画像の空中投影
 Aerial projection of three-dimensional motion pictures
 by time-division color electro-holography with parabolic mirrors

角江 崇[†] 上村 篤輝[†] 西辻 崇[†] 下馬場 朋禄[†] 伊藤 智義[†]
 Takashi Kakue Atsuki Uemura Takashi Nishitsuji Tomoyoshi Shimobaba Tomoyoshi Ito

1. はじめに

電子ホログラフィ[1]は、光の波動的性質を利用して 3 次元映像を空中投影できる技術である。電子ホログラフィでは、物体の 3 次元情報を、2 次元画像（ホログラム）として記録する。再生時には、空間光変調器へとホログラムパターンを出力する。この空間光変調器へ再生光を照射することによって、3 次元像を再生できる。電子ホログラフィでは、ホログラム 1 枚を計算機上で生成する際の計算負荷が非常に大きいため、ホログラムのリアルタイム生成を実現するには、専用計算機[2]などのハードウェアの利用が不可欠であった。

そこで、物体をホログラム面近傍に配置してホログラムを生成する手法（イメージホログラム）[3]に着目した。ホログラム生成時の計算量は、物体とホログラム面との距離の二乗に比例するため、物体をホログラム面に近づけることで計算量を大幅に削減可能である。しかしイメージホログラムでは、物体がホログラム面近傍に再生されてしまうため、3 次元映像を空中投影可能であるという電子ホログラフィの特長が失われる。著者らはこの問題を、凹面鏡を用いた光学系によって解決し、3 次元空中投影像のリアルタイム再生に成功した[4]。

本発表では、従来は単色の再生像しか得られていなかった本手法に時分割方式のカラー再生光学系[5]を導入することで、カラーの 3 次元空中投影像を再生することを目指す。

2. 凹面鏡を用いた電子ホログラフィ

2.1 ホログラムの計算

図 1 に、ホログラム計算時の仮想光学系を示す。本研究では、物体が多数の点光源で構成されている場合を考える。物体を構成する点光源の数を M_0 とし、そのうちの任意の点 $O_m(x_m, y_m, z_m)$ から発せられる光が、ホログラム面上の任意の点 $P_n(x_n, y_n, 0)$ に形成する複素振幅場 $U_m(x_n, y_n, 0)$ は、次式で与えられる。

$$U_m(x_n, y_n, 0) = A_m \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2 + z_m^2}\right) \quad (1)$$

ここで、 A_m は点 O_m から発せられる光の振幅、 i は虚数単位、 λ は光の波長を表す。したがって、 M_0 個の点光源で構成される物体がホログラム面上の点 P_n に形成する複素振幅場 $U_{total}(x_n, y_n, 0)$ は、

$$U_{total}(x_n, y_n, 0) = \sum_{m=1}^{M_0} U_m(x_n, y_n, 0) \quad (2)$$

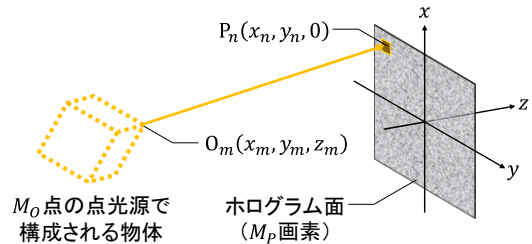


図 1 ホログラム計算時の仮想光学系。

で与えられる。 $U_{total}(x_n, y_n, 0)$ からホログラム $H(x_n, y_n, 0)$ を計算できる。本研究では位相変調型の空間光変調器を用いるため、次式により計算する。

$$H(x_n, y_n, 0) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[U_{total}(x_n, y_n, 0)]}{\text{Re}[U_{total}(x_n, y_n, 0)]} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\text{Re}[\blacksquare]$ および $\text{Im}[\blacksquare]$ の演算子は、任意の複素振幅の実部および虚部をそれぞれ表す。ホログラムを生成するには、ホログラムを構成するすべての点（画素）に対して (3) 式を計算すればよい。以上より、 M_0 点で構成される物体から M_p 画素のホログラムを生成するためには、 $M_0 \times M_p$ 回の計算が必要である。すなわち、物体点の数およびホログラムの画素数に比例して計算量が增大する。

2.2 計算量の削減

(1)-(3) 式の計算を実行する必要がある領域は、実際にはホログラム面における画素ピッチ p と光の波長 λ 、物体とホログラム面との距離 z_m によって制限される。計算領域の半径 R は次式で与えられる。

$$R = z_m \tan \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2p} \right) \right\} \quad (4)$$

z_m が十分大きい場合には、すべての O_m 、すべての P_n に対して (4) 式が満たされる。一方、 z_m が小さくなるほど (4) 式によって計算領域が制限され、計算量が削減される。つまり、イメージホログラム[3]の場合 ($z_m \approx 0$) には計算量を大幅に削減可能である。

3. 実験

3.1 構築した光学系

図 2(a) に提案手法の概略を、図 2(b) に構築した光学系を示す。中心部に穴の開いた 2 枚の凹面鏡を向かい合わせに配置する。各凹面鏡の外径、穴の内径、高さ、焦点距離はそれぞれ 288 mm, 80 mm, 55 mm, 100 mm であった。一方 (図に向かって左側) の凹面鏡の穴近傍に反射型の位相変調型空間光変調器 (1,920×1,080 画素、画素ピッチ 8 μm 、リフレッシュレート 60 Hz) を配置し、前章で示した計算

[†] 千葉大学大学院工学研究科,

Graduate School of Engineering, Chiba University

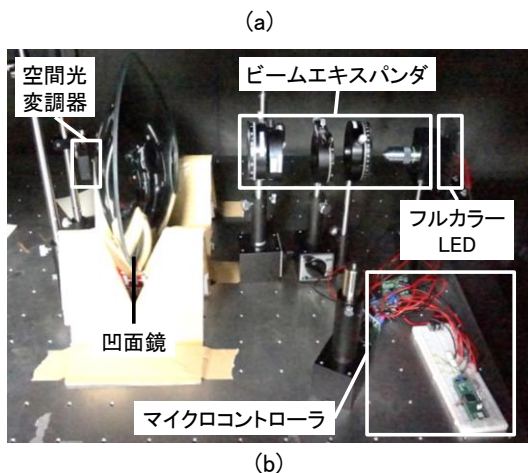
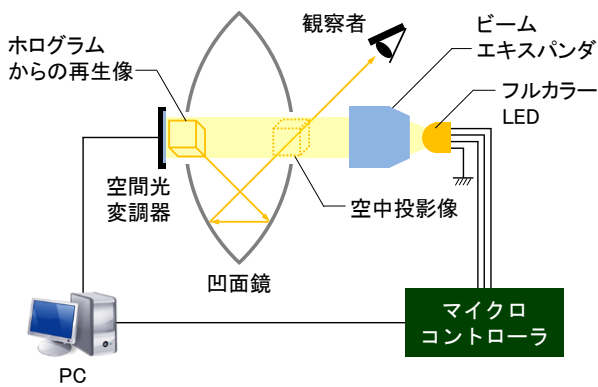


図 2 凹面鏡を用いた時分割カラー電子ホログラフィ。
(a) 概略, (b) 構築した光学系。

によって得られたホログラムを空間光変調器へと出力する。図に向かって右方向から、光源のフルカラーLED（赤色 624 nm, 緑色 525 nm, 青色 460 nm）からの再生光をビームエキスパンダで拡大して照射すると、空間光変調器面の近傍に物体の 3 次元像が再生される。この 3 次元像が、凹面鏡 2 枚によって、図に向かって右側の凹面鏡の穴近傍に空中結像される。

提案手法における光学系では、スペースの都合上、複数台の空間光変調器を実装することが困難であった。そこで本研究では、1 台の空間光変調器のみでカラー再生を実現可能な、時分割方式のカラー電子ホログラフィ[5]を採用した。この方式では眼の残像効果を利用して、各色の再生像を高速に切り替えることでカラー再生を実現する。(1)式からも分かるように、ホログラムのパターンは光の波長に依存する。したがって時分割方式においては、空間光変調器へのホログラム出力と、再生光(LED)の点灯タイミングとを同期させる必要がある。本研究では、マイクロコントローラ(PIC)を用いてLEDの点灯を制御し、ホログラム出力と同期させた。今回用いた空間光変調器のリフレッシュレートが 60 Hz であったため、1 フレームあたり 20 Hz (20 fps) の速度でカラー再生像を投影可能である。

3.2 実験結果

図 3(a)に示すような、284 点の点光源で構成される立方体を物体として用意した。この立方体を、ホログラム面か

ら 2 mm 離れた距離に配置し、立方体が回転する様子のホログラムを生成した。図 3(b)-(f)に、図 2(b)の光学系で得られた再生像の一例を示す。レーザ光源を利用し、空間フィルタリングも適用していた先行研究[4]の結果と比較すると、今回得られた結果はやや不鮮明であった。これは、今回用いたフルカラーLEDを構成する赤、緑、青の各色のLEDの位置がわずかにずれており、空間フィルタリングの適用が困難であったこと、および各LEDの位置ずれによって再生像が形成される位置もわずかにずれてしまったことが原因である。この問題は、ホログラム生成時の計算にオフセットをかけ、再生光学系にあわせて最適なホログラムを生成することで解決できるため、今後の課題としたい。

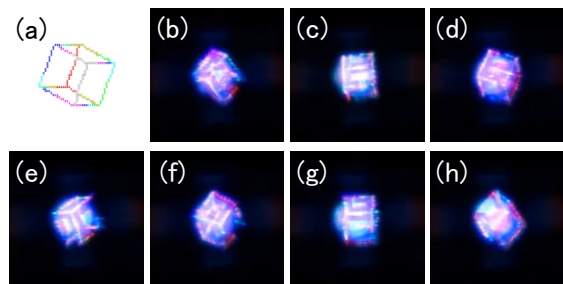


図 3 実験結果。
(a) 物体データ, (b)-(f) 得られた再生像。

4. おわりに

凹面鏡と電子ホログラフィとを用いた 3 次元映像の空中投影システムに、時分割方式のカラー電子ホログラフィを導入することで、カラーの 3 次元空中投影像の再生に成功した。フルカラーLEDの点灯を制御するマイクロコントローラを設計、開発し、20 fps でのカラー 3 次元映像の空中投影を実現した。今後は、インタラクティブ操作が可能な電子ホログラフィシステム[6]との融合を目指す。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 25240015 の助成により行われた。

参考文献

- [1] T. Ito, T. Shimobaba, H. Godo, and M. Horiuchi, "Holographic reconstruction with a 10- μ m pixel-pitch reflective liquid-crystal display by use of a light-emitting diode reference light," *Opt. Lett.*, Vol.27, No.16, pp.1406-1408 (2002).
- [2] Y. Ichihashi, H. Nakayama, T. Ito, N. Masuda, T. Shimobaba, A. Shiraki, and T. Sugie, "HORN-6 special-purpose clustered computing system for electroholography," *Opt. Express*, Vol.17, No.16, pp.13895-13903 (2009).
- [3] T. Yamaguchi and H. Yoshikawa, "Computer-generated image hologram," *Chin. Opt. Lett.*, Vol.9, No.12, 120006 (2011).
- [4] T. Kakue, T. Nishitsuji, T. Kawashima, K. Suzuki, T. Shimobaba, and T. Ito, "Aerial projection of three-dimensional motion-picture by electro-holography and parabolic mirrors," *Sci. Rep.*, Vol.5, 11750 (2015).
- [5] 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*, Vol.19, No.13, pp.12008-12013 (2011).
- [6] 角江 崇, 中島 武忍, 長谷川 鋭, 下馬場 朋禄, 伊藤 智義, "Kinect によるポーズ検出を利用したインタラクティブ操作可能な電子ホログラフィ再生システム," 3 次元画像コンフェレンス 2016 講演論文集, P-1 (2016).