

光源多重方式時分割電子ホログラフィ

Time-Division Electro-Holography by Light Source Multiplexing

松田篤史

寺口 功

松島恭治

Atsushi Matsuda

Isao Teraguchi

Kyoji Matsushima

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

ABSTRACT

The horizontal display resolution of electro-holography is enhanced by time-division method using light source multiplexing. In this technique, the horizontal resolution is enhanced only by switching multiple light sources. The main advantage of the proposed technique is the fact that it works in $2f$ setup without moving parts. Therefore, the constructed system is simple and compact. This technique also can be applied to expanding and coloring the reconstructed image, and furthermore, enlarging the viewing zone angle.

Keywords: 空間光変調器, 計算機合成ホログラム, 光源多重方式, 時分割再生, 解像度拡大

1. はじめに

反射型空間光変調器(Spatial Light Modulator, 以下 SLM)による電子ホログラフィでは, 高フレームレート SLM とガルバノミラーを用いた水平走査表示による水平視域拡大手法が報告されている[1]. しかし, この手法はガルバノミラーという可動部を有するため, その同期制御や安定性, 耐震性が問題になる. さらに, 通常のフレームレートの SLM を用いた解像度変換光学系による水平視域拡大手法が報告されている[2]. しかし, これらの手法は水平視域拡大は可能であるが, 一方垂直視域は狭くなるという問題がある. さらに, これらの手法を含めて, 現在まで報告されている電子ホログラフィのほとんどは $4f$ 光学系を前提としているため, システムが複雑で大型化する問題点がある. 一方, 著者らは共役像を抑制できる位相変調型 SLM において, $2f$ 光学系とキャリア信号を用いて非回折光を分離することにより表示有効域を拡大したコンパクトな電子ホログラフィを報告している[3].

そこで本研究では, 同様に位相型 SLM と $2f$ 光学系を用い, 複数の光源を時分割で切り替えることにより, ガルバノミラーのような可動部無しで水平走査型電子ホログラフィと同様の効果を得る手法を提案する. 提案手法は, 時分割再生により単一の再生像を得るので, 像の大型化, 視域拡大やカラー化にも向いた手法で

あると考えた. また, 本システムでは, ポリゴン法と波動光学的計算手法を全て GPU で実装することにより[4], 物体光波から位相コーディングまでの計算の高速化も試みた.

2. 光源多重方式時分割電子ホログラフィの原理

本研究では, レンズを用いたフーリエホログラムとして計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram, 以下 CGH)の再生を行っている. フーリエ型 CGH では再生したい物体光波の複素振幅分布を $g(x, y)$ で表すとき, その逆フーリエ変換

$$H(u, v) = F^{-1}[g(x, y)] \quad (1)$$

の位相分布を 8bit で量子化して SLM に表示する. 従って, その再生はフーリエ変換の種々の性質に依存する[3].

2.1 光源位置と再生位置

複数の光源を用いてホログラムを時分割再生し単一の再生像として得るためには, 時分割で再生される像を再生面上に正確に配置する必要がある. 光学系の構成を Fig.1 に示す. 点光源から出射する球面波を焦点距離 f_c のコリメータレンズで平行光にし, SLM に照明している. 従って, いま光源面上の空間座標を (x_i, y_i) で表し, 光軸から水平方向に Δx_i だけ離れた位置に点光源を配置した場合に SLM に照射される平行光の位相成分は

$$F\{\delta(x_i + \Delta x_i, y_i)\} = \exp[i2\pi\Delta x_i u_c] \quad (2)$$

となる. ここで (u_c, v_c) はフーリエ周波数であり空間座標とは

 松田篤史

matsuda@laser.ee.kansai-u.ac.jp

関西大学システム理工学部電気電子情報工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

TEL 06-6368-1121(内線 5722)

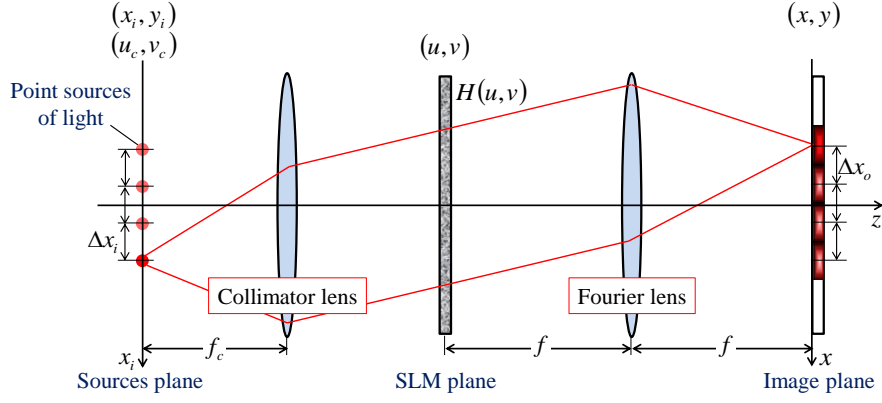


Fig.1 The principle of 2f setup of time-division electro-holography by using light source multiplexing.

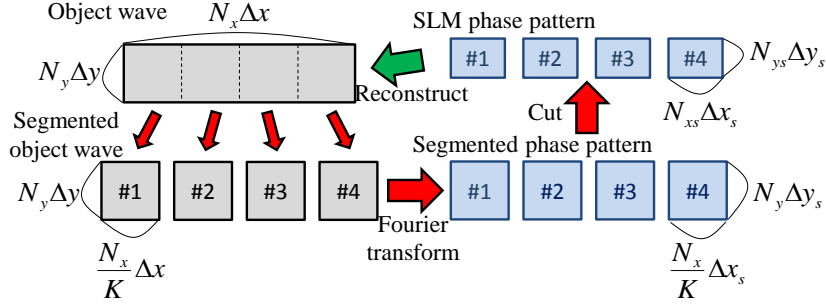


Fig.2 Procedure for displaying a CGH with enhance horizontal resolution (K=4).

$$x_i = \lambda f_c u_c, \quad y_i = \lambda f_c v_c \quad (3)$$

の関係がある。(2)式の位相成分をもつ平行光を SLM に入射し, SLM で $H(u, v)$ の変調を与えると, 変調光波は

$$G(u, v) = H(u, v) \exp[i2\pi \Delta x_i u_c] \quad (4)$$

となる。ここで, 焦点距離 f のフーリエレンズでフーリエ CGH を再生した場合, SLM 上に表示する位相パターンは

$$H(u, v) = h(\lambda f u, \lambda f v) = h(x_i, y_i) \quad (5)$$

となる。すなわち, SLM 面でのフーリエ周波数 (u, v) と空間座標の関係は

$$x_i = \lambda f u, \quad y_i = \lambda f v \quad (6)$$

となる。従って, (3)式と(6)式から

$$u_c = \frac{f}{f_c} u \quad (7)$$

となる。従って, (4)式は

$$G(u, v) = H(u, v) \exp\left[i2\pi \frac{f}{f_c} \Delta x_i u\right] \quad (8)$$

となることがわかる。

2f 光学系による再生では(1)式のとおり SLM 面と像面がフーリエ変換の関係になることから, 像面における複素振幅分布は

$$F\{G(u, v)\} = g\left(x - \frac{f}{f_c} \Delta x_i, y\right) = g(x - \Delta x_o, y) \quad (9)$$

となり, 光源位置に対する再生位置のシフトは

$$\Delta x_o = \frac{f}{f_c} \Delta x_i \quad (10)$$

となる。

このように, Fig.1 の光学系を用いると光源位置を光軸から Δx_i シフトすることにより, 再生像の位置を Δx_o シフトできる。

なお, 本研究では位相型 SLM を用いるため共役像は再生されないが非回折光は生じる。これについては文献[3]の手法により再生像の位置を y 方向にシフトすることにより, 再生像と非回折光を分離し遮蔽することができる。

2.2 再生像の水平方向解像度拡大

本手法によって再生像の解像度を拡大するには, 異なった点光源位置に対する再生像を再生面に隙間なく配置する必要がある。像面のサイズに応じて光源間隔を設定しなければならない。一つの再生像のサイズ $W_x \times W_y$ は, SLM のピクセルピッチ $\Delta x_s, \Delta y_s$ に依存し

$$W_x = N_x \Delta x = \frac{\lambda f}{\Delta x_s}, \quad W_y = N_y \Delta y = \frac{\lambda f}{\Delta y_s} \quad (11)$$

と表される。ここで, $N_x \times N_y$ はサンプリング数, $\Delta x, \Delta y$ は像面サンプリング間隔である。

いま, 像面で再生像を水平方向に隙間無く並べるためには,

$$\Delta x_o = W_x \quad (12)$$

となる必要がある。従って, 必要な光源位置の間隔は

(10)式から

$$\Delta x_i = \frac{f_c}{f} W_x = \frac{\lambda f_c}{\Delta x_s} \quad (13)$$

と表される。この結果より、フーリエレンズの焦点距離に無関係に、コリメータレンズの焦点距離のみから光源間隔が決定されることがわかる。

2.3 再生像の水平方向解像度または視域の拡大

水平方向解像度を K 倍に拡大する場合は、Fig.2 に示すように、物体光波を水平方向に K セグメント分割し、それぞれセグメントのフーリエ CGH を順次 SLM に表示し、それに同期して光源間隔 Δx_i の K 個の光源を順次点滅させる。これにより K セグメント分の再生像が空間的に隙間なく時分割で再生する。従って、表示解像度を SLM 本来の解像度の K 倍に拡大することが可能である。また、同様に垂直方向解像度を拡大することも可能である。さらに、シリンダカルレンズ等を用いて、水平方向に像面を縮小することにより、再生像の視域拡大も可能と考えられる。

3. ホログラムの計算

位相型 SLM と提案手法を用いてフーリエ CGH の再生を試みた。Fig.3 にホログラムの計算に用いた物体モデルを示す。この 3D シーンでは、ホログラム面から奥行き 50[mm] の位置に 3 次元物体を配置している。

物体光波の数値合成に用いたパラメータを Table 1 に示す。物体光波計算にはポリゴン法を用い、8K2K サイズの物体光波を取得後、水平方向に 4 セグメントに分割して得られる 2K2K サイズの物体光波を位相コーディングし、さらにキャリア信号で変調を行い、SLM のサイズにカットしている。なお、キャリア信号で変調し、各セグメントの再生像の周期の半分だけ上方に再生像のシフトを行うことで開口を用いて非回折光を遮蔽している。

また、ホログラムの計算を Table 2 に示すような性能の計算機を用いて行い、物体光波計算から位相コーディングまでの計算時間を測定した。CPU として Core i7 970 を用いて 12 スレッドで並列計算を行った場合は、計算時間は 9.90[sec] であった。一方、Table 3 に示すように、GPU として NVIDIA 社製 Tesla C2070 を用いて計算した場合には、その計算時間は 4.28[sec] であった。従って、GPU を用いた場合、約 2.3 倍の速度で演算が可能であることがわかった。

4. 光学再生

光学再生実験に用いた光学系を Fig.4 に示す。光源には波長 635[nm] の偏波面保持ファイバカップリング半導体レーザーを用い、ファイバ端面から出射する球

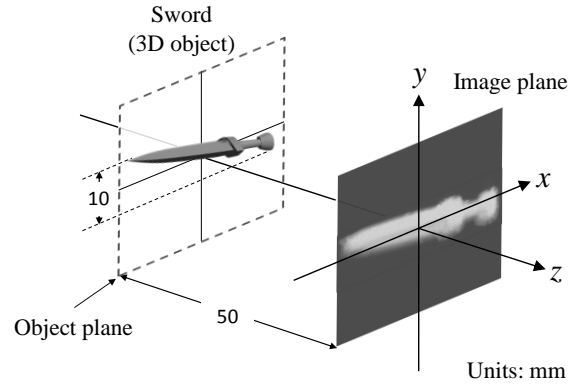


Fig.3 The 3D scene used in optical reconstruction.

Table 1 Parameters used for optical reconstruction.

Hologram	
No. of pixels ($N_x \times N_y$)	1920 × 1080
Pixel pitches	8 μ m × 8 μ m
Hologram dimensions	15.36mm × 8.64mm
Reconstruction wavelength	635nm
Focal distance of Fourier lens	200mm
Shift distance by carrier signal	8.0mm
Object wave	
No. of pixels ($N_x \times N_y$)	8192 × 2048
Sampling interval in image plane	7.75 μ m
Image plane dimensions	63.50mm × 15.88mm
3D object (Sword) and scene	
No. of polygons (front face only)	1217
Height of object	10mm

Table 2 PC specification.

CPU	Intel Core i7 970 (3.2Ghz)
Memory	PC3-12800 4GB × 6 (24GB)
GPU	NVIDIA Tesla C2070 (6GB)
OS	Windows7 professional x64
CUDA	Version 3.2

Table 3 Tesla C2070 specification.

CUDA cores	448
CUDA core frequency	1.15GHz
Memory	6GB GDDR5
Memory bandwidth	144GB/sec

面波を焦点距離 $f_c = 150$ [mm] のコリメータレンズで平行光にし、SLM に入射して焦点距離 $f = 200$ [mm] のフーリエレンズを用いて再生した。なお、ファイバの総開口数よりも大きな開口数を有するコリメータレンズを選定している。また位相変調型 SLM として、ピクセルピッチ 8.0[μ m] で解像度 1920 × 1080、フレームレート 60[Hz] の HOLOEYE 社製 PLUTO を用いた。従って、(3)式から求まる光源間隔は $x_0 = 11.9$ [mm] となるので、この間隔で水平方向に 4 個のファイバを左右対称に配置した。再生時には、Fig.4 に示すようにフーリエレンズの後焦点面に横 62.5[mm] × 縦 14.5[mm] の長方形の開口を置き、非回折光を遮蔽した。

提案手法を用いて、4 セグメントに分割したフーリエ CGH を SLM に表示し、4 個の光源と同期して 30[Hz] で切り替えて時分割再生することで得られる光学再生

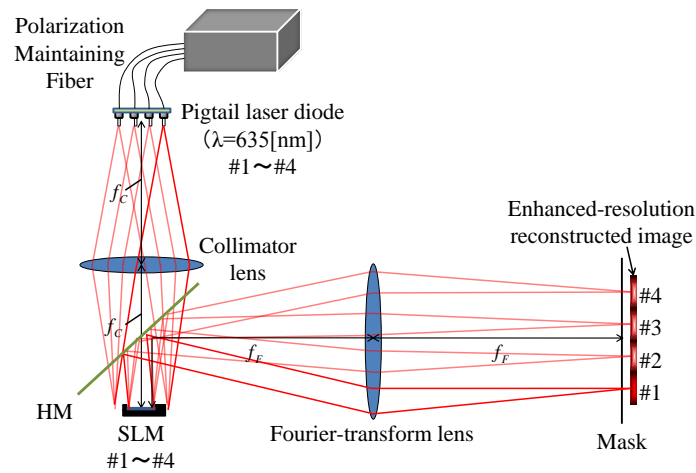


Fig.4 Experimental setup for time-division electro-holography by light source multiplexing.

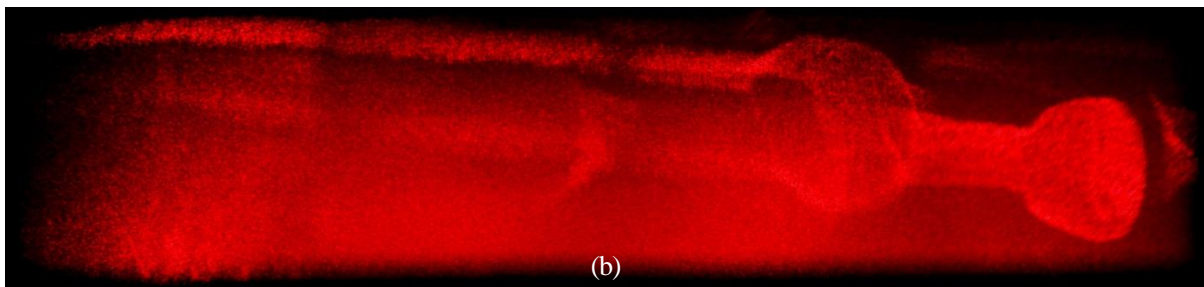
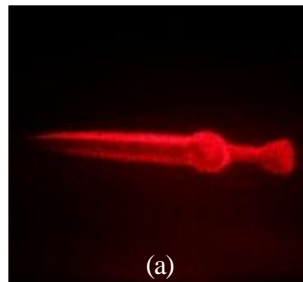


Fig.5 Optical reconstruction without (a) and with time-division multiplexing (b).

像を Fig.5(b)に示す. 再生フレームレートは 7.5[fps]である. また(a)は, 比較のため, 時分割を行わず再生した場合である. この結果より, (a)の再生像と比較して, (b)の光源多重時分割再生手法を用いた再生像は水平方向解像度が拡大し, 再生像の表示領域が水平方向に4倍拡大していることがわかる.

しかしながら, 試作段階のため光源位置決め精度が低く各セグメントの再生位置がずれて境界部分が見えてしまっていることがわかる.

5. まとめ

位相型フーリエ CGH による電子ホログラフィにおいて, コンパクトな $2f$ 光学系を用い, K 個の光源と1台の位相型 SLM を用いた光源多重方式による時分割再生手法を提案した. 提案手法を用いることにより, 再生像の解像度の増大が可能であることを示した. しかし, 現時点では同期制御の問題で SLM 本来のフレームレートを完全に活かしておらず, フリッカーが生じている.

今後は, 拡大した解像度を視域拡大に転換すること

や再生品質の向上を試みる.

謝辞

本研究は日本学術振興会の科研費(21500114)の助成を受けたものである.

The mesh data of The Sword object is provided courtesy of Matthias_Bein by the AIM@SHAPE Shape Repository.

参考文献

- [1] Y. Takaki, N. Okada: Appl. Opt. **48**, 3255-3260 (2009).
- [2] 種本, 林, 高木: 3D コンファレンス 2009 講演論文集, 37-40 (2009).
- [3] 松田, 細川, 松島: 3D コンファレンス 2010 講演論文集, 129-132 (2010).
- [4] 寺口, 松島: 3D コンファレンス 2010 講演論文集, 141-144 (2010).