

LD 光源のスイッチングにより視域角を拡大した 時分割電子ホログラフィ

松田 篤史 寺口 功 松島 恭治

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

E-mail: matsuda@laser.ee.kansai-u.ac.jp

あらまし 電子ホログラフィにおいて, LD 光源をスイッチングすることにより SLM 照明光源の時分割多重化を行い, 水平方向視域角を拡大する手法を提案している. 試作したシステムでは, 4 個の LD 光源で時分割再生を行うことにより複雑な光学系や可動部品を用いずに 1 台の位相型 SLM の水平方向視域角を 4 倍に拡大している. このディスプレイを用いてポリゴン法により計算した動画ホログラムを再生した結果, 両眼で良好な再生像を確認することができた.

キーワード SLM, CGH, 光源多重方式, 時分割方式, 視域角拡大

A Time-Division Electro-Holography with Enhanced Viewing-Angle by Switching LD Source

Atsushi MATSUDA Isao TERAGUCHI Kyoji MATSUSHIMA

Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka, 564-8680, Japan

E-mail: matsuda@laser.ee.kansai-u.ac.jp

Abstract A novel technique is proposed for expanding the horizontal viewing-angle by employing time-division method in electro-holography. In this technique, electrically switched multiple laser diodes (LD) produce multiple hologram images without any complex optics and moving parts. In the prototype system, the horizontal viewing-angle of the hologram reconstructed by a single SLM is expanded four times with 4 LD sources. It is verified that the optically reconstruction of a CGH movie, calculated by the polygon-based method, is clearly viewed with two naked eyes.

Keyword SLM, CGH, Source-multiplexing, Time-division method, Enhanced Viewing-Angle

1. はじめに

計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram, 以下 CGH) において広視域の再生像を得るためには, $1\mu\text{m}$ オーダーのピクセルピッチが必要である. 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においても同様であるが, この様な高解像度の SLM は, 現時点では実現が困難である. 従って, 現在の電子ホログラフィでは視域角が狭いことが大きな問題となる. そのため, 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, この手法ではガルバノミラーという可動部品を用いるため, 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, この手法では水平視域は拡大されるが, 反面垂直視域は狭くなるという問題がある. さ

ら, 複数台の SLM を用いて空間分割法や時分割法を組み合わせて再生像の水平方向視域拡大とカラー化を実現した手法が報告されている [3,4]. 空間分割手法を視域拡大に用いた場合, 再生像のフリッカーは生じないが複数台の SLM が必要なためコストが高く, さらにシステムが複雑で大型化する問題がある. 一方, 時分割手法を用いた場合, レーザー光源を複数光源に分離し液晶シャッターで切り替えて SLM へ照明するため, 再生面でのフレームレートは低くなるが, 1 台の SLM で実現可能であり, システムの小型化に向いている. しかしながら, シャッターと回折格子等により光源を時分割多重する機構が必要となる. 一方, 著者らは共役像を抑制できる位相変調型 SLM と $2f$ 光学系を用い, 複数のレーザーダイオード (以下, LD) 光源をスイッチングすることで再生面において水平方向の高解像度化を行い, さらにキャリア信号を用いて再生像と非回折光を分離する手法を報告している [5].

そこで本研究では, その手法を発展させ, 位相型 SLM と $4f$ 光学系を用い, フーリエ面において像を多重化して水平方向高解像度化を行い, 像面において水平方向ピクセルの高密度化を行った. これにより, ガルバノミラーのような可動部品やシャッターを用いずに水平方向視域角を4倍に拡大する手法を提案する. 本手法は複雑な光学系を要しないため, 高フレームレート SLM と組み合わせることで更なる多重化も可能であると考えている.

2. 水平方向視域角拡大の原理

光源多重方式時分割電子ホログラフィの光学系の構成を図1に示す. 本研究では, $4f$ 光学系による CGH の再生を行っている.

2.1 フーリエ面における水平方向高解像度化[6]

本研究では光源として複数のファイバ光源を用いる. 水平方向に間隔 Δx_i で並べた K 個の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て SLM に照明すると, 発光する光源の位置により異なった傾きの平行光が SLM に入射する. いま SLM により $H(u, v)$ の空間変調が生じるとすると, 発光する光源の位置によりキャリア周波数が変化し変調光波は

$$G(u, v) = H(u, v) \exp \left[i 2\pi \frac{f}{f_c} \Delta x_i u \right] \quad (1)$$

となる. ここで, f はフーリエレンズの焦点距離, また (u, v) は周波数表示した座標であり, SLM 面上の空間座標 (x, y) とは

$$u = \frac{x}{\lambda f}, \quad v = \frac{y}{\lambda f} \quad (2)$$

の関係がある.

SLM 面とフーリエ面はフーリエ変換の関係にあることから, フーリエ面における複素振幅分布は

$$F\{G(u, v)\} = g \left(x - \frac{f}{f_c} \Delta x_i, y \right) = g(x - \Delta x_o, y) \quad (3)$$

となり, 光源位置に対する再生位置のシフトは

$$\Delta x_o = \frac{f}{f_c} \Delta x_i \quad (4)$$

となる. また, 一つのフーリエ変換像の幅 w は,

$$w = \frac{\lambda f}{p} \quad (5)$$

と表される. ここで, p は SLM のピクセルピッチであ

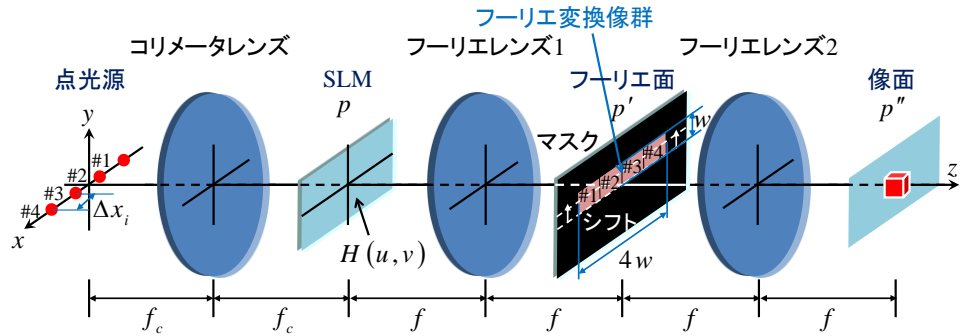


図1 光源多重方式時分割電子ホログラフィの構成($K=4$)

る. ホログラムを時分割再生し単一のフーリエ変換像として得るためには, 時分割で再生される像をフーリエ面上に隙間なく正確に配置する必要がある. そのためには,

$$\Delta x_o = w \quad (6)$$

となる必要がある. 従って, (4)式から光源間隔を

$$\Delta x_i = \frac{f_c}{f} w = \frac{\lambda f_c}{p} \quad (7)$$

とする必要があり, 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. これによりフーリエ面上に $Kw \times w$ サイズの切れ目のない単一のフーリエ変換像が得られ, 水平方向解像度が K 倍に拡大される.

2.2 像面における水平方向分解能の高密度化

SLM のピクセル数を $N_x \times N_y$ とすると, 1つの光源によるフーリエ変換像の水平方向と垂直方向のサンプリング間隔はそれぞれ

$$p'_x = \frac{\lambda f}{N_x p}, \quad p'_y = \frac{\lambda f}{N_y p} \quad (8)$$

と表される. 複数の光源によるフーリエ変換像を1つの像と見なすと, 水平方向と垂直方向の像面ピッチはそれぞれ

$$p''_x = \frac{\lambda f}{N'_x p'_x}, \quad p''_y = \frac{\lambda f}{N'_y p'_y} \quad (9)$$

と表される. ここで, $N'_x \times N'_y$ はフーリエ変換像の総サンプリング数である. いま, 水平方向に並んだ K 個のセグメントのフーリエ変換像を1つの像と考えているため, 水平方向サンプリング数は $N'_x = KN_x$, 垂直方向サンプリング数は $N'_y = N_y$ となる. 従って, 水平方向と垂直方向像面ピッチは(9)式からそれぞれ

$$p''_x = \frac{p}{K} \quad (10)$$

$$p''_y = p \quad (11)$$

となる.

このように, K 個の光源をスイッチングすることにより, 水平方向像面ピッチは $1/K$ 倍となり, 水平方向

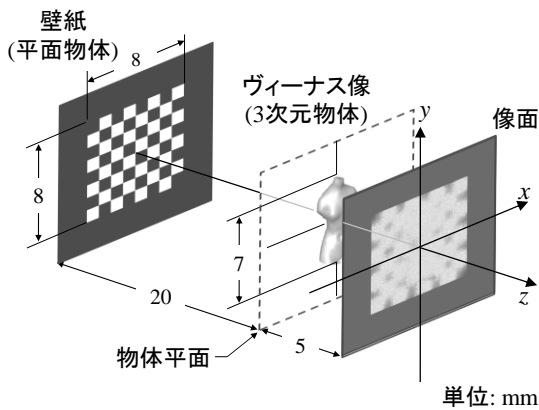


図 2 3D シーン

表 1 物体光波の数値合成に用いたパラメータ

ホログラム	
ピクセル数($N_x \times N_y$)	1920 × 1080
ピクセルピッチ p	8 μ m × 8 μ m
サイズ	15.36mm × 8.64mm
再生波長 λ	637nm
フーリエレンズ焦点距離 f	200mm
キャリア信号によるシフト量	8.0mm 上方
物体光波	
ピクセル数	8192 × 2048
像面ピッチ $p/K \times p$	2 μ m × 8 μ m
像面サイズ	15.36mm × 8.64mm
3次元物体とシーン	
the Venus のポリゴン数 (前面のみ)	718

視域角が拡大される。また、同様に垂直方向視域角を拡大することも可能である。光源数を増加させ高フレームレート SLM で高速同期切り替えを行うことで、更なる視域角拡大を実現できるが、それに伴いファイバ光源の総開口数を考慮して光源を緻密に配置する必要がある。

3. ホログラムの計算

提案手法を用いて CGH の再生を試みた。図 2 にホログラムの計算に用いた物体モデルを示す。3D シーンは超高解像度 CGH の The Venus と同様の構成とし[7]、ホログラム面から奥行き 20[mm]の位置にチェック柄の壁紙を配置し、5[mm]の位置にミロのヴィーナスを模した 3次元物体を配置している。物体光波計算にはポリゴン法を用い、ファントムイメージとなることを防ぐためシルエット法[8]を用いている。

物体光波の数値合成に用いたパラメータを表 1 に示す。光源数 4 個で水平方向視域角を 4 倍に拡大する場合は、図 3 に示すように物体光波の水平方向サンプリングピッチを垂直方向の 1/4 倍、サンプリング数を

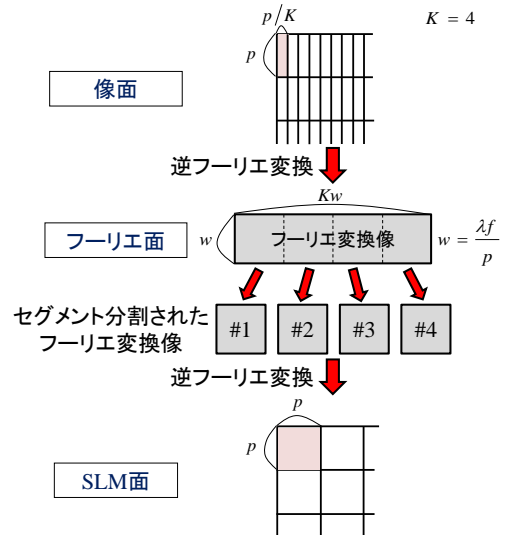


図 3 SLM に表示する CGH の計算手順

4 倍にして計算する。取得した 8K2K サイズの物体光波を逆フーリエ変換するとフーリエ変換像を得る。これを水平方向に 4 セグメントに分割し、各セグメントをさらに逆フーリエ変換し、位相コーディングする。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[6]を行い、フーリエ面で開口を用いて非回折光の遮蔽を可能にしている。

次に、球体が壁紙の前でパウンドする様子を取めた 73 フレームの動画ホログラムを計算した。パラメータは表 1 と同様で壁紙のサイズは 20[mm]四方で、球体のサイズは直径 3[mm]である。動画ホログラムの計算時間は、リアルタイム計算用のチューニングは特に行っていない状態で、Core i7-2600K を用いて、10 分程度であった。得られた動画ホログラムを再生フレームレート 15[fps]で再生した場合、再生時間は約 5 秒間である。

4. 光学再生

光学再生実験に用いた光学系を図 4 に示す。ファイバ光源は、波長 637[nm]の偏波保持ファイバカップリング LD である。(7)式より光源間隔 $\Delta x_i = 11.9$ [mm] で配置した 4 個のファイバ光源の出力を焦点距離 $f_c = 150$ [mm] のコリメータレンズで平行光とし、焦点距離 $f = 200$ [mm] のレンズで 4f 光学系を構成した。SLM には、ピクセルピッチ $p = 8$ [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。

時分割再生を行うためには、SLM と光源を同期して 60[Hz]で切り替えて制御を行う必要がある。そのため、MS Windows の DirectX を用いてグラフィックボードを直接制御し、SLM への映像信号出力と同時に垂直同期信号を取得し、それを主タイミング信号としてファ

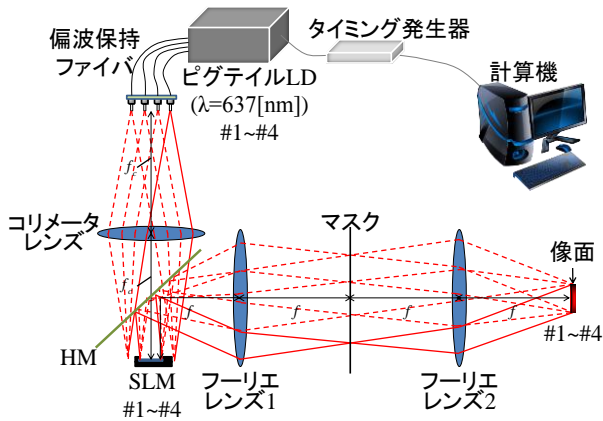


図 4 光学再生実験に用いた光学系

イバ光源の点滅を制御した。また、フーリエ面上に多重化されたフーリエ変換像を横 62.5[mm]×縦 14.5[mm]サイズの長方形の開口を設置し非回折光を遮蔽した。3次元物体にピントを合わせて左右に 9° の範囲に視点を移して撮影した再生結果を図 5 に示す。壁紙の模様注目すると 3次元物体との重なり具合が視点を移動させることで変化を観察することができた。従って、再生像の水平方向視域角は実測で約 18°であることがわかった。また、動画ホログラムの再生像の例を図 6 に示す。

この結果より、提案手法を用いた再生像は水平方向視域角が従来の再生方法と比較して約 4 倍に拡大していることを確認した。

5. まとめ

本研究では、LD 光源をスイッチングすることにより光源多重化と時分割再生を行い水平方向視域角を拡大する手法を提案し有効性を確認した。また、ポリゴン法により計算した動画ホログラムを提案手法で再生した結果、両眼で良好な再生像を観測することができた。しかし、動画としては再生フレームレートが低いことため多少フリッカーが生じていることを確認した。

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 Venus object is provided courtesy

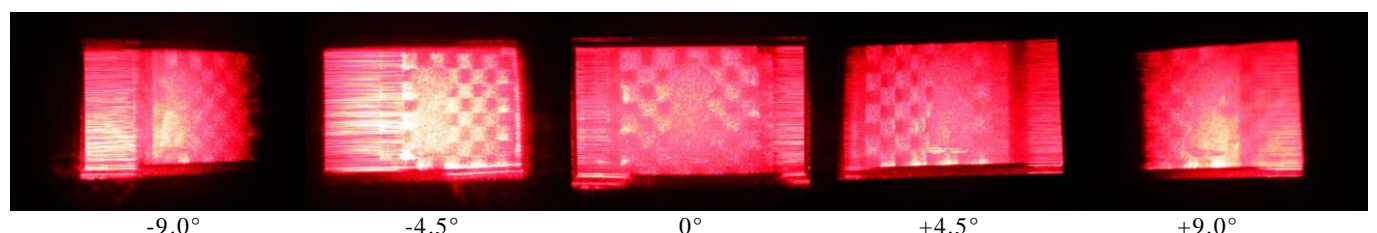


図 5 光源多重方式時分割再生手法を用いた光学再生結果

of INRIA by the AIM@SHAPE Shape Repository.

文献

- [1] Y. Takaki, N. Okada: "Hologram generation by horizontal scanning of a high-speed spatial light modulator", Appl. Opt. **48**, 3255-3260(2009).
- [2] Y. Takaki, Y. Tanemoto: "Modified resolution redistribution system for frameless hologram display module", Opt. Express **18**, 10294-10300(2010).
- [3] T. Senoh, T. Mishina, K. Yamamoto, R. Oi, Y. Ichihashi, T. Kurita: "Full-Color Wide Viewing-Zone-Angle Electronic Holography System", OSA Topical Meeting on Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2011, DTuA3(2011).
- [4] T. Senoh, T. Mishina, K. Yamamoto, R. Oi, and T. Kurita: "Wide viewing-zone-angle full-color electronic holography system using very high resolution liquid crystal display panels", SPIE Proc. **#7957**, 795709(2011).
- [5] 松田篤史, 寺口功, 松島恭治: "光源多重方式時分割電子ホログラフィ", 3D コンファレンス 2011 講演論文集, 114-117(2011).
- [6] 松田篤史, 細川俊彰, 松島恭治: "キノフォームタイプ電子ホログラフィにおけるキャリア信号の導入と sinc 補正", 3D コンファレンス 2010 講演論文集, 129-132(2010).
- [7] K. Matsushima, S. Nakahara: "Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method", Appl. Opt. **48**, H55-H60(2009).
- [8] 近藤, 松島: "シルエット近似を用いた全方向視差 CGH の隠面消去", 電子情報通信学会論文誌 J87-D-II, 1487-1494(2004).

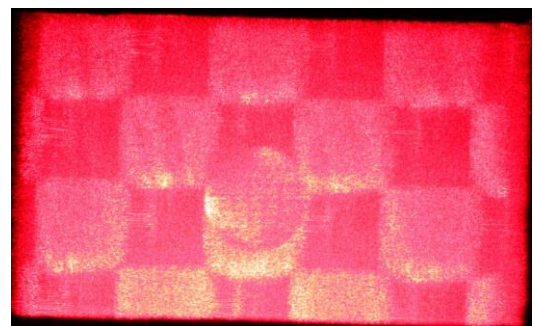


図 6 動画ホログラムの再生像の例