

# 高フレームレート SLM を用いた 光源スイッチング方式時分割電子ホログラフィ Time-Division Electro-Holography by Light-Source Switching Using a High Frame Rate SLM

東野好伸 上月拓弥 松島恭治  
Yoshinobu Higashino Takuya Kozuki 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

Time-division electro-holography that expands the horizontal viewing angle by light source switching features no complex optical system and moving parts. However, intense flicker occurred in the conventional system, because the refresh rate of old system, that uses LCOS SLM, was limited only to 15 fps. In this study, we attempt to introduce a high frame rate SLM, i.e. DMD, into the time-division holographic display. Furthermore, a high-speed liquid crystal shutter is also installed to the system in order to prevent higher order diffraction images from degrading the reconstructed image. As a result, flickerless 3D images are reconstructed with horizontal viewing angle of 12°.

**Keywords:** 空間光変調器, 計算機合成ホログラム, 時分割再生, フリッカー

## 1. はじめに

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, 一般にSLMの解像度が低いこと十分な空間バンド積が得られない問題がある. 空間バンド積は概ねスクリーンサイズと視域角の積に相当し, この積はSLMのピクセル数にほぼ比例する. つまり, 視域角とスクリーンサイズはトレードオフの関係にあり, 単一のSLMを用いて広視域で大きな再生像を得るのは困難である. この問題を解決するためには空間分割多重あるいは時分割多重が必要である. 空間分割多重は多数のSLMが必要であり, SLMの額縁の処理も必要である[1]. このような問題が少ない時分割多重の手法の一つとしては, 例えばMEMS型SLMとガルバノミラーを用いた視域走査型ホログラフィックディスプレイが提案されている[2]. しかし, この手法ではガルバノミラーという可動部を有する問題がある. そこで, 我々はこの様な可動部を

有しない手法として複数のレーザーダイオード(以下, LD)光源を高速で順次点滅させ, 再生像を時分割多重化する手法を提案している[3-5]. この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られる. しかし, 従来のシステムで用いていたLCOS型SLMの最大表示フレームレートが60 fpsで, 多重化数が4であったため再生フレームレートは15 fpsまで減少し, 激しいフリッカーが発生していた.

そこで本研究では, 最大表示フレームレートが10752fpsであるMEMS型SLMのDMD(Digital Micro-mirror Device)を導入し, フリッカーの軽減を試みた. さらに, 隣接する光源による高次回折像が再生像を劣化させるため, 光源毎に高速液晶シャッターを配置し, 光源の切り替えと同期させることで, 高次回折像の除去を試みた.

## 2. 光源スイッチング方式時分割の原理

### 2.1 フーリエ面における水平方向解像度

本システムではFig.1に示す光学系を用い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. ここでは多重化数 $K=4$ の場合を示す. なお, このシステムでは光源数が多重化数となる. ピッグテール型LD光源から放出された球面波をコリメータ

---

東野好伸

<higashino@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)

レンズで平行化してSLMに入射している。従って、点灯するLDの位置によって入射光のキャリア周波数が変化する。そのため、SLM変調光を4f光学系によって再生すると、フーリエ面上では光源ごとに異なった位置にフーリエ変換像が生じる。光軸から水平方向に $\Delta x_i$ だけシフトした点光源から放出される球面波を焦点距離 $f_c$ のコリメータレンズで平行光とし、焦点距離 $f$ のフーリエレンズを用いた場合、フーリエ面上では水平方向に

$$\Delta x_o = \frac{f}{f_c} \Delta x_i \quad (1)$$

だけシフトして表示される[4]。また、水平方向ピクセルピッチ $p_x$ のSLMから再生される1つのフーリエ変換像の幅は、

$$w = \frac{\lambda f}{p_x} \quad (2)$$

となることから、フーリエ面で再生像を水平方向に隙間無く並べるためには、 $\Delta x_o = w$ とすれば良い。従って、必要な光源位置の間隔は(1)式と(2)式から

$$\Delta x_i = \frac{\lambda f_c}{p_x} \quad (3)$$

となり、適切な光源間隔はコリメータレンズの焦点距離とピクセルピッチで決定されることがわかる。これにより、 $K$ 個の点光源を高速に切り替えて順次点灯するとフー

リエ面上に $Kw \times w$ サイズの切れ目のない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

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

$$p'_x = \frac{\lambda f}{N_x p_x}, \quad p'_y = \frac{\lambda f}{N_y p_y} \quad (4)$$

と表される。ここで $p_y$ はSLMの垂直方向ピクセルピッチである。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サンプリング間隔はそれぞれ

$$p''_x = \frac{\lambda f}{KN_x p'_x} = \frac{p_x}{K}, \quad p''_y = \frac{\lambda f}{N_y p'_y} = p_y \quad (5)$$

となる。

このように、水平方向に $K$ 個の光源をスイッチングすることにより、水平方向像面サンプリング間隔は $1/K$ 倍となり、水平方向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。

## 3. ホログラム干渉縞の計算

Fig.2にホログラムの計算に用いた物体モデルと3Dシーンを示す。(a)はワイヤーフレームモデルの“Cube”，(b)はサーフェスマodelの“Venus”である。(b)の3Dシーン

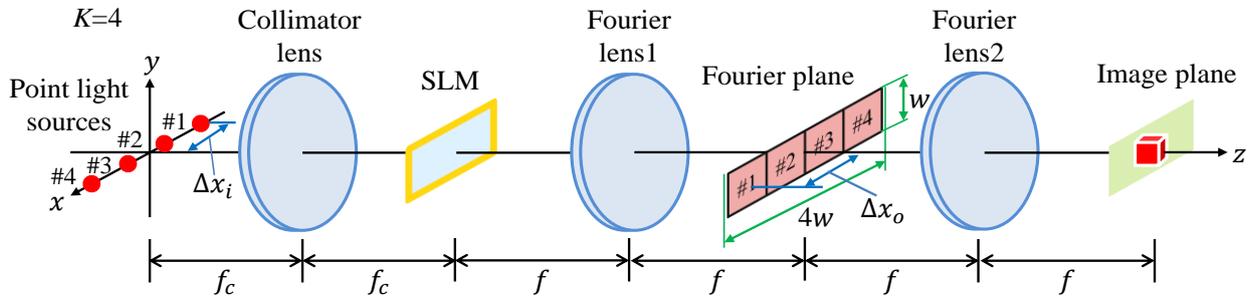


Fig.1 The schematic structure of time-division electro-holography using light-source switching ( $K=4$ ).

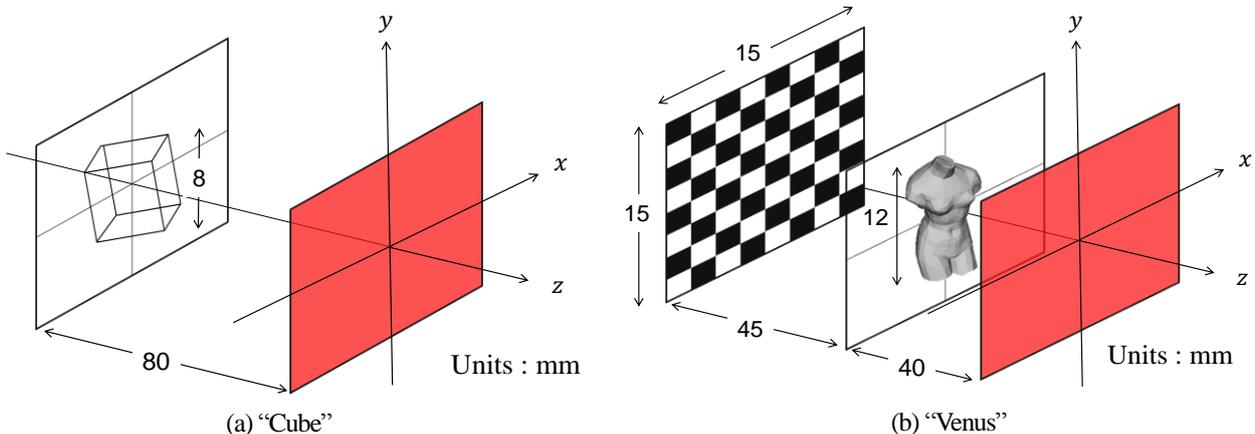


Fig.2 The 3D scenes used for optical reconstruction.

では、ホログラム面から奥行き85 mmの位置にチェック柄の壁紙を配置し、40 mmの位置にミロのビーナスを模した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。光源数4個で水平方向視域角を4倍に拡大する場合は、Fig.3に示すように物体光波の水平サンプリング間隔を垂直方向の1/4倍、サンプリング数を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、エルミート性のある複素振幅像に変換する。各セグメントをさらに逆フーリエ変換した後、2値化し、SLMのピクセル数で切り出している。

#### 4. 光学再生

光学再生実験に用いた光学系をFig.4に示す。LD光源に

は波長637 nmの偏波保持ファイバカップリング半導体レーザーを用いている。(3)式より光源間隔 $\Delta x_i=11.8\text{mm}$ で配置した4個のファイバ光源の出力を焦点距離 $f_c=200\text{mm}$ のコリメータレンズで平行光としてSLMに入射した。本研究では、MEMS型SLMとしてピクセルピッチ $10.8\ \mu\text{m}$ で解像度 $1920\times 1080$ 、最大表示フレームレート $10752\ \text{Hz}$ のTexas Instruments社製DLP® Discovery™ 4100を用いた。SLMによる変調光は焦点距離 $f=200\text{mm}$ の4f光学系に入射した。この時、フーリエ面に横 $47.2\ \text{mm}\times$ 縦 $5.9\ \text{mm}$ の長方形形状の開口を置き、非回折光と共役光を遮蔽している。

さらに隣接する光源による高次回折像を遮断するため、各光源のフーリエ変換像がある位置に最大フレームレートが540 fpsである液晶シャッターを配置し、光源の切り

Table 1 Parameters used for optical reconstruction.

Hologram	
No. of pixels	1920×1080
Pixel pitches	10.8 μm×10.8 μm
Hologram dimensions	20.736×11.664 mm <sup>2</sup>
Reconstruction wavelength	637 nm
Focal distance of collimator lens	200 mm
Focal distance of Fourier lens	200 mm
Object wave	
No. of pixels	8192×2048
Sampling interval in image plane	2.7 μm×10.8 μm
Image plane dimensions	20.736×11.664 mm <sup>2</sup>
3D scene (Cube)	
No. of Point sources of light	960
Height of object	8 mm
3D scene (Venus)	
No. of polygons	702
Height of object	12 mm

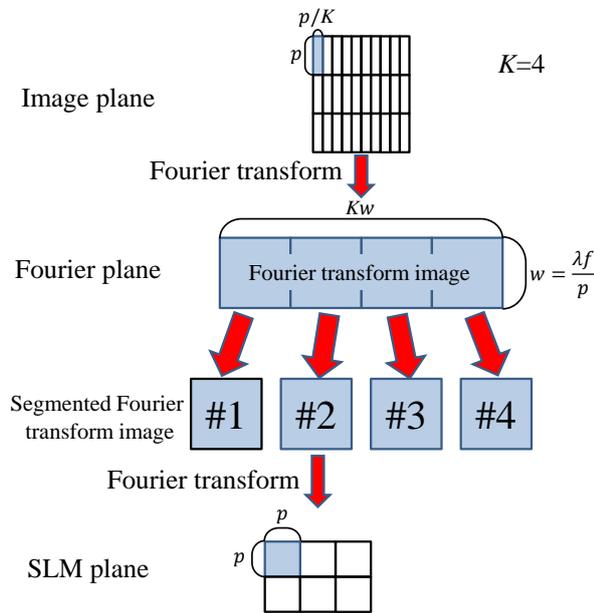


Fig.3 Procedure for generating synthetic fringe pattern that is displayed on the SLM ( $K=4$ ).

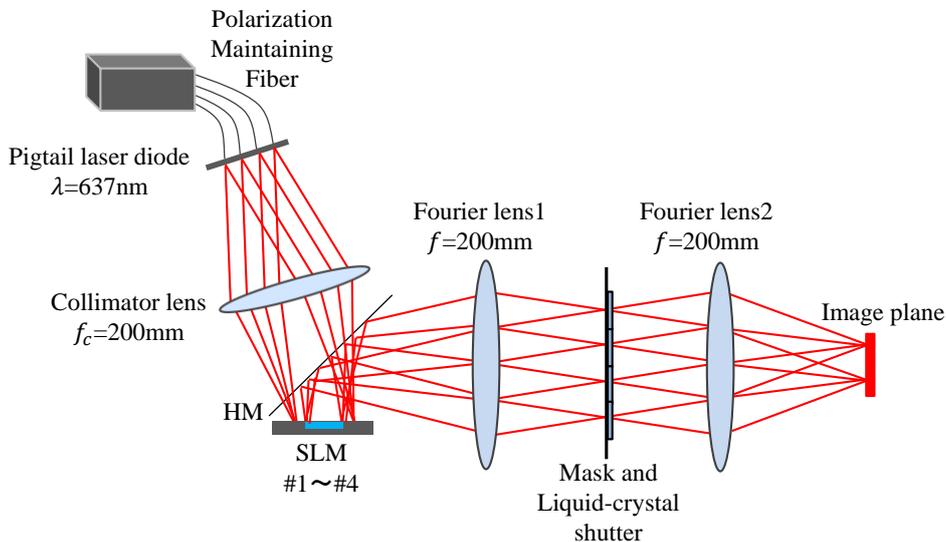


Fig.4 Experimental set up for time-division electro-holographic display using light-source switching.

替えと同期して開閉させている。

時分割再生を行うためには、SLMとLD光源を同期して制御を行う必要がある。本研究では、SLMのドライバから出力される垂直同期信号を取得し、それを主タイミング信号としてLD光源の点滅と液晶シャッターを制御した。この時、いずれのシーンの光学再生においても、再生像のフレームレートが60 fpsとなるようSLMのフレームレートを240 Hzに設定している。

3次元物体にピントを合わせて左右に視点を移動して再生像を撮影した結果をFig.5に示す。(d)–(f)では視点を移動させることで、背景とビーナスの重なり具合が変化していることが確認できる。同様に(a)–(c)のワイヤーフレームの物体でも視差がはっきり示されている。またこの時、再生像が見える限界まで視点を移動しており、その時のカメラの位置から、再生像の水平方向視域角は約12°であることがわかった。また、従来の問題点であったフリッカーはほとんど感知されないレベルになっていることが確認できた。さらに、液晶シャッターにより高次回折像による再生像の劣化が軽減されている。しかし、観察時にシャッターの額縁が目立つ問題が新たに発生した。

## 5. まとめ

光源スイッチング方式時分割電子ホログラフィに高フレームレートSLMであるDMDを導入し、フリッカーのない再生像を得ることができた。また、液晶シャッターを用いることで、再生像を劣化させる高次回折像を軽減さ

せることができた。今後は、液晶シャッターの額縁を除去することや、光源数を増やし視域角を拡大することを試みる。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会の科研費(15K00512)、および文部科学省私立大学戦略基盤研究形成支援事業(平成25年～平成29年)の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] T. Senoh, K. Wakunami, Y. Ichihashi, H. Sasaki, R. Oi, K. Yamamoto: “Viewing-zone-angle expansion of tiled color electronic holography reconstruction system”, SPIE Proc. **9006**, 90060Z (2014).
- [2] 藤井啓介, 高木康博: “MEMS空間光変調器を用いた視域走査型ホログラフィックディスプレイ”, 3次元画像コンファレンス2014, 2-3(2014).
- [3] 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による水平視域角の拡大”, OPJ2011, P16(2011).
- [4] 松田篤史, 松島恭治: “LD光源スイッチング方式時分割ホログラフィックディスプレイ”, 電子情報通信学会論文誌D, **J96-D**, 381-388(2013).
- [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).

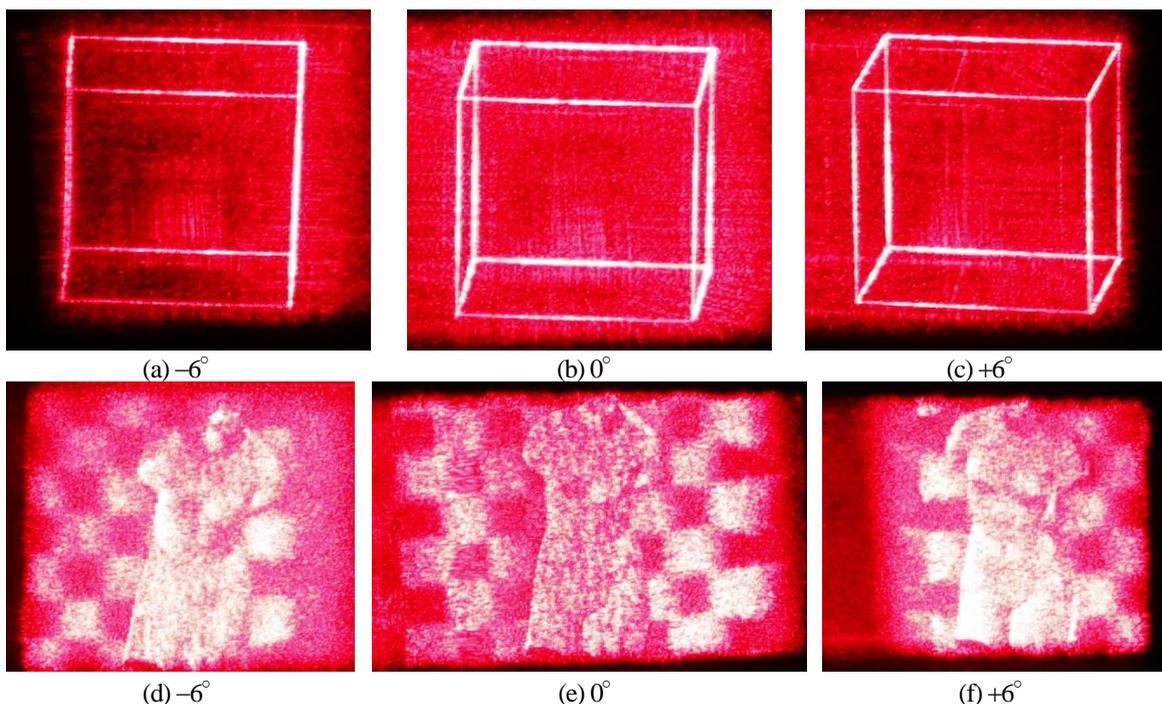


Fig.5 Reconstructed images for (a)–(c) Cube and (d)–(f) Venus.