

# フルカラーデジタイズドホログラフィと 自由視点画像のための高解像度光波の取得 Capture of High-Definition Wave Field for Full-Color Digitized Holography and Free Viewpoint Images

園部徳晃 土山泰裕 松島恭治

Noriaki Sonobe Yasuhiro Tsuchiyama 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

Synthetic aperture digital holography (DH) makes it possible to acquire object wave in a large area and high-density. The captured field can be reconstructed as 2D free-viewpoint images or 3D holographic images by using high-definition computer-generated hologram (CGH). We call the latter technique digitized holography, because the whole process of traditional holography is digitized. However, conventional synthetic aperture DH cannot reconstruct any full-color image, because the object field is recorded only with single wavelength. In this paper, synthetic aperture DH with RGB three wavelengths for RGB colors is reported for full-color 2D/3D reconstruction of the captured field. Numerical reconstruction is demonstrated to verify the technique.

**Keyword:** CGH, デジタイズドホログラフィ, 結像再生シミュレーション, フルカラー再生

## 1. はじめに

コンピュータホログラフィの発達により“*The Venus*” [1]や“*Brothers*”といった奥行き感のある美しい立体映像が再生できるようになってきている。また、近年ではダイクロミックミラー方式[2]やカラーフィルタ方式[3]による単一白色LED光源を用いた高解像度の計算機合成ホログラム(CGH)のフルカラー再生法も報告されている。コンピュータホログラフィでは、計算機上で作成された仮想物体を再生するだけでなく、実在物体からの光波を記録して3Dシーンに取り込むことにより、高解像度CGHによる実在物体での再生も可能となっている。記録・再生ともにデジタル化しているという意味で、これを特にデジタイズドホログラフィ(Digitized Holography)と呼んでいる[4,5]。デジタイズドホログラフィでは、デジタルホログラフィ(以下, DH)によって実在物体光波を記録し、それをCGHによって再生する。この技術では物体光波をデジタルデータとして扱うため、古典的なホログラフィとは異なり、

物体光波記録後に物体の多重化や拡大縮小など、3Dシーンのデジタル編集が可能である。

しかし、従来は単一波長でしか記録を行っていなかったため、数値再生像はモノクロ画像となり、またデジタイズドホログラフィにおいても、単色光による光学再生となっていた。そこで、本研究では光の三原色に相当する3つの波長を用いて物体光波を記録し、フルカラー自由視点画像の作成や、ダイクロミックミラー方式やカラーフィルタ方式によるフルカラーデジタイズドホログラフィ実現のための記録手法の開発を行った。

## 2. 合成開口DHによる実在物体光波の記録

実在物体光波の取得には、大面積の光波を高密度で記録するためレンズレスフーリエ型合成開口法を用いる[6]。この手法によって得られる物体光波のサンプリング間隔は以下の式に従う。

$$\Delta_x = \frac{\lambda d_R}{N_x \delta_x}, \Delta_y = \frac{\lambda d_R}{N_y \delta_y} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$ は $x$ 方向,  $y$ 方向のサンプリング間隔,  $\lambda$ は波長,  $d_R$ は参照点光源とイメージセンサ間の距離,  $N_x$ ,  $N_y$ はそれぞれ $x$ ,  $y$ 方向のサンプリング数,  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ はセンサピッチで

---

園部徳晃

sonobe@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

ある。

Fig.1 に本研究に用いた記録光学系を示す。用いたイメージセンサの解像度は  $3000 \times 2200$  pixel, センサピッチは  $3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$  である。このイメージセンサは合成開口を行うために精密ステージ上に設置している。また、図中のミラーM6 にはピエゾ素子を取り付けており、位相シフト法によって非回折光と共役像を取り除いた物体光波を取得している。光源には  $488 \text{ nm}$ ,  $532 \text{ nm}$ ,  $633 \text{ nm}$  のレーザを用い、合成開口法により縦横共に約  $11.4 \times 11.4 \text{ cm}^2$  の範囲の複素振幅分布を記録した。本研究で光波記録に用いたパラメータを Table 1 にまとめる。

### 3. 3波長による物体光波の記録手順

Fig.2に記録手順を示す。本研究では3つのレーザを用いて物体光波を記録するが、3つのレーザを同時に用いて記録するわけではなく、使用しない波長の光はシャッターで遮断している。これは、ピエゾ素子による位相シフト量が波長に依存しているため、同時に記録することができないためである。

また、3つのレーザで光波の記録位置にずれが生じないように、合成開口法による光波全体の記録を波長毎に行うのではなく、Fig.2に示したとおりの一つのステージ位置で3波長分の記録を行ってからステージを移動させる手順とした。なお、これらの精密ステージや電磁シャッター、イメージセンサによる干渉縞の記録は全て計算機制御によって自動

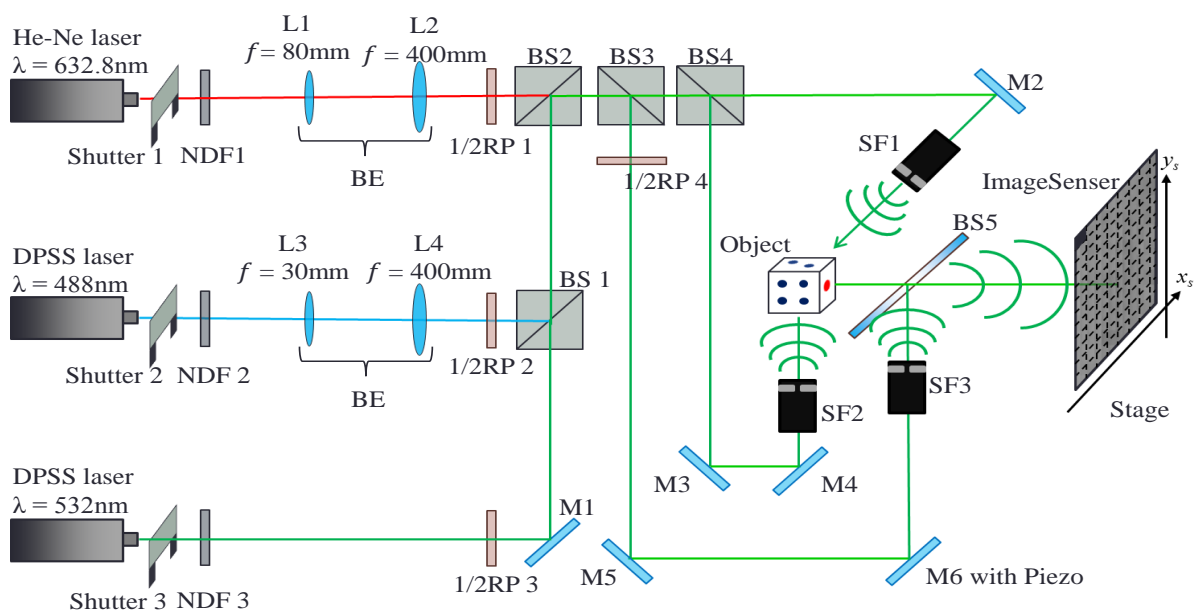


Fig.1 The experimental setup for capturing large-scaled wave-fields with three wavelengths by using lensless-Fourier synthetic aperture DH.

Table 1 Parameters used for capturing object fields

Wavelengths [nm]	488, 532, 633
Number of samplings used for numerical calculation	$32,768 \times 32,768$
Sensor pitches [ $\mu\text{m}$ ]	$3.5 \times 3.5$
Number of segments	$12 \times 16$
Distance between reference point source and sensor [mm]	250

化されている。

### 4. 物体光波の補正

本研究で用いた撮影物体をFig.3に示す。撮影物体にはホワイトバランスの調整に必要な白が基調となった陶器製のポットを選んだ。また、よりカラフルなシーンとするため、緑色のカップをポット手前に配置した。

各波長で記録した複素振幅分布の振幅像をFig.4(a)に、それをフーリエ変換して得られた物体光波の振幅像をFig.4(b)に示す。(b)からわかるとおり、物体光波の記録範囲(視野)が波長ごとに異なっている。これは、(1)式に示されている通り、フーリエ変換後のサンプリング間隔が波長に依存しているためである。そこで、視野が最も小さくなる青色光波(波長 $488 \text{ nm}$ )に合わせて、緑色( $532 \text{ nm}$ )と赤色( $633 \text{ nm}$ )の物体光波を切り取り、バイキュービック補間法を用いて再サンプリングし、サンプリング間隔を一致させている。

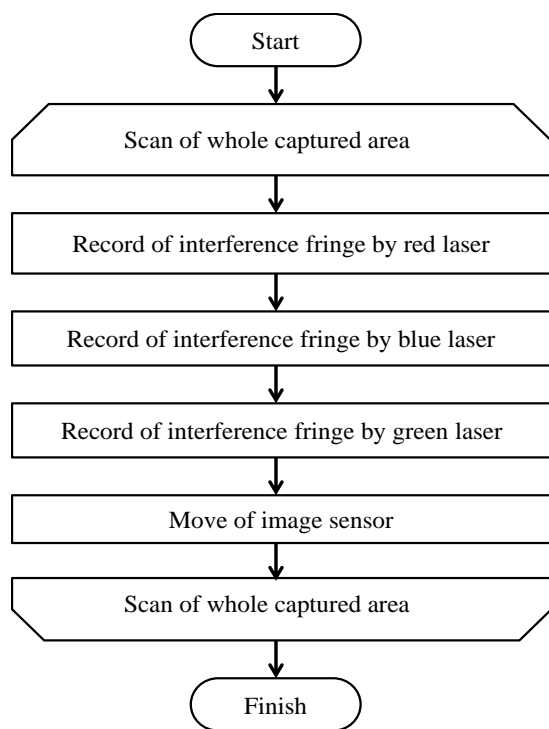


Fig.2 Flow-chart of procedure for recording object field with three wavelengths.

記録した物体光波の振幅値は、用いた光源レーザーの出力やビームスプリッタ等の光学素子での減衰量、あるいはイメージセンサの感度の差などにより、記録波長ごとに異なる。そのため、正しい色彩が得られるように振幅値を補正する必要がある。そこで、次節で述べる単色数値再生法において、記録物体の色が白である部分から、1辺500ピクセルの正方形の範囲を指定し、その範囲内で各波長の物体光波の振幅平均値  $\bar{I}_R$ ,  $\bar{I}_G$ ,  $\bar{I}_B$  を求めた。これらのうち中央値となる値でそれぞれの平均値を割ることで、各振幅平均値の比をとる。例えば、中央値が  $\bar{I}_B$  であった場合、補正係数を

$$C_R = \frac{\bar{I}_R}{\bar{I}_B}, C_G = \frac{\bar{I}_G}{\bar{I}_B}, C_B = 1 \quad (2)$$



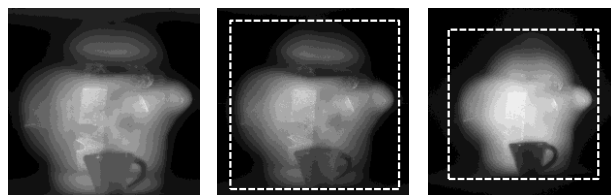
Fig.3 Captured 3D scene

とした。これを用いて、正方形範囲の振幅平均値が同一になるように物体光波の補正を行った。すなわち、記録した各波長の物体光波を



$\lambda=488\text{nm}$        $\lambda=532\text{nm}$        $\lambda=633\text{nm}$

(a) Captured complex amplitudes (amplitude image)



$\lambda=488\text{nm}$        $\lambda=532\text{nm}$        $\lambda=633\text{nm}$

(b) Fourier-transformed images (amplitude image)

Fig.4 Results of recording object fields with three wavelengths.

$u_R(x, y)$ ,  $u_G(x, y)$ ,  $u_B(x, y)$ としたとき、

$$u'_R(x, y) = \frac{u_R(x, y)}{C_R} \quad (3)$$

$$u'_G(x, y) = \frac{u_G(x, y)}{C_G} \quad (4)$$

$$u'_B(x, y) = \frac{u_B(x, y)}{C_B} \quad (5)$$

として補正を行った。またこの時、5か所の異なる位置で正方形範囲を選び、次節で述べるフルカラー数値再生を行い、物体全体を見たときに最も良好な白色を再現できた補正係数を用いた。

### 5. 取得した物体光波のフルカラー数値再生像

前節の振幅補正を行った各波長の物体光波に対して、結像再生シミュレーションを行い[7]、2次元の単色数値再生像を得た。この単色数値再生像を  $I_R(m, n)$ ,  $I_G(m, n)$ ,  $I_B(m, n)$ としたとき、

$$R = \text{round} \left( \frac{I_R(m, n)}{I_0} \right) \times 255 \quad (6)$$

$$G = \text{round} \left( \frac{I_G(m, n)}{I_0} \right) \times 255 \quad (7)$$

$$B = \text{round} \left( \frac{I_B(m, n)}{I_0} \right) \times 255 \quad (8)$$

としてRGB値を求めた。ここで、 $I_0$  は画像の明るさを調整する係数、また $\text{round}(y)$ は255を超えるyを255に丸める処理を表す。

こうして得られたフルカラー数値再生像をFig.5に示す。また、結像再生シミュレーションに用いたパラメータをTable 2に示す。Fig.5の数値再生像をFig.3と比較すると、おおよそ正しい色合いになっていることがわかる。しかし、連続的に視点を移動して自由視点画像を見ると、部分的に特定の色が強く出る場合や、特定の視点位置では色合いが大きく崩れてしまっていることがあった。これは、空間フィルタによって作り出した球面波参照光の波面が波長ごとにやや異なったためであると考えられる。レンズレスフーリエ型で記録しているため、センサーで直接記録されるのは空間スペクトルであり、波長によってセンサー面の参照光強度分布に差が生じてしまった場合、記録される空間スペクトルの強度が変化する。そのため、観察する視点位置によって色合いが異なった数値再生像になったと考えられる。

## 6. まとめ

本研究ではフルカラーデジタイズドホログラフィの実現を最終目標として、光の三原色に相当する3つの波長を用いて物体光波の記録を試みた。その結果、3波長での物体光波の記録に成功した。しかし、記録した光波を用いて自由視点画像の作成を試みたところ、視点位置によって色彩が変化することがわかった。今後はより精度の高い記録が求められる結果となった。

## 謝辞

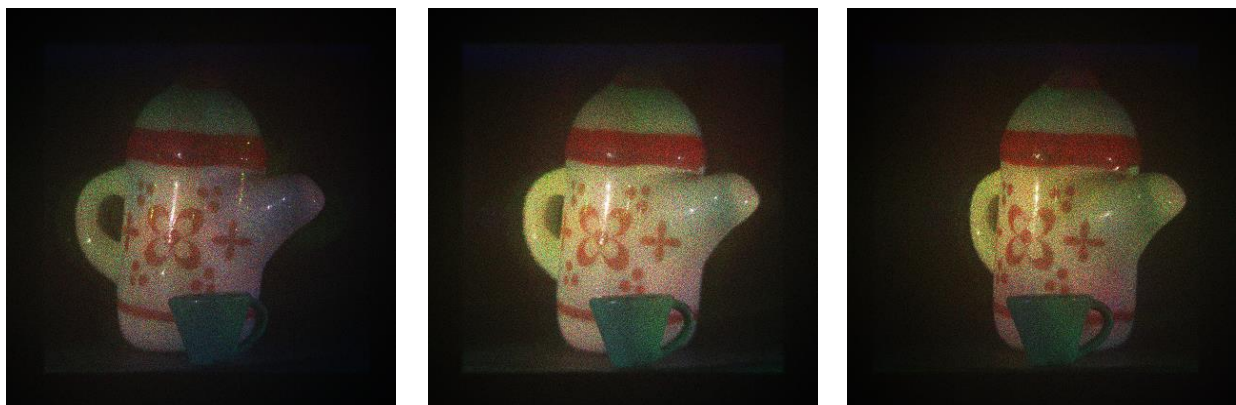
本研究は、日本学術振興会の科研費(15K00512)、および文部科学省私立大学戦略基盤研究形成支援事業(平成25年～平成29年)の助成を受けたものである。

Table 2 Parameters used for numerical image formation

Diameter of pupil [mm]	4
Distance between lens and screen [mm]	24
Number of pixels of reconstructed image	4096 × 4096
Pixel pitches of reconstructed image [μm]	1.0 × 1.0

## 文 献

- [1] K. Matsushima, S. Nakahara: "Extremely High-Definition Full-Parallax Computer-Generated Hologram Created by the Polygon-Based Method", *Appl. Opt.* **48**, H54-H63 (2009).
- [2] T. Miyaoka, K. Matsushima, S. Nakahara: "Optimization of design-wavelength for unobtrusive chromatic aberration in high-definition color computer holography", *SPIE Proc.* **9386**, 93860N(2015).
- [3] 土山, 松島, 中原, 坂本: "カラーフィルタ方式によるフルカラー高解像度計算機合成ホログラムの作成", 3次元画像コンファレンス 2015(発表予定).
- [4] K. Matsushima, Y. Arima, S. Nakahara: "Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects", *Appl. Opt.* **50**, H278-H284 (2011).
- [5] 有馬, 松島, 中原: "デジタル化ホログラフィによる実在物体と仮想物体の混合 3次元再生", 3次元画像コンファレンス 2011 講演論文集, 182-185(2011).
- [6] T. Nakatsuji and K. Matsushima: "Free-viewpoint images captured using phase-shifting synthetic aperture digital holography", *Appl. Opt.* **47**, D136-D143 (2008).
- [7] 村上, 松島: "数値的レンズ結像を用いた全方向視差計算機合成ホログラムの波動光学的再生シミュレーション", *映情学誌* **65**, 1793-1800 (2011).



Left

Center

Right

Fig.5 Full-color numerical reconstructions of the captured object field. The viewpoint moves left and right.