

フルカラーデジタイズドホログラフィとその光学再生像 Full-Color Digitized Holography and its Optical Reconstruction

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

One of techniques to create computer-generated hologram (CGH) for real-existing physical object is to record the wave field emitted from the physical object by employing synthetic aperture digital holography (DH). Then, the captured object field is optically reconstructed by high-definition CGHs. This technique is called digitized holography, because the whole process of traditional holography is digitized in this technique. Recently, full-color reconstruction of high-definition CGHs for virtual objects has been realized by several techniques. However, to reconstruct full-color 3D images in digitized holography, the object field must be recorded with three wavelengths corresponding to RGB primary colors. In this paper, the technique of synthetic aperture DH with RGB three wavelengths is reported. Furthermore, attempt at full-color optical reconstruction of the captured object fields is presented for realizing full-color digitized holography.

Keyword: CGH, DH, デジタイズドホログラフィ, フルカラー再生

1. はじめに

我々は、従来より”The Venus” [1]や”Brothers”といった高解像度計算機合成ホログラム(以下, CGH)の作製を報告している。これらの高解像度CGHの再生は、これまで単色に限られていたが、近年、ダイクロミックミラー方式[2]やカラーフィルタ方式[3]により、単一白色LED光源を用いた高解像度CGHのフルカラー再生が可能になってきている。

コンピュータホログラフィでは、CGと同様の数値モデルの物体を再生するだけでなく、実在物体の再生も可能である。後者では、デジタルホログラフィ(以下, DH)によって記録した実在物体の光波を3Dシーンに取り込み、高解像度CGHによって再生する手法がある。記録から再生までの全ての過程を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]。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、古典的な光学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、CGモデルとの混在など、3Dシーンのデジタル編集が可能である。

しかし、これまでは単一波長DHでのみ記録を行っていたため、光学再生も単色光によるものとなっていた。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、小型で展示性に優れたカラーフィルタ方式によるフルカラー光学再生を行い、フルカラーデジタイズドホログラフィの実現を目指した。

2. 実在物体光波の記録手法

デジタイズドホログラフィ実現のためには、大面積かつ高密度の物体光波を取得する必要がある。そこで、本研究ではレンズレスフーリエ型合成開口法を用いている[5]。この手法では取得光波のフーリエ変換によって物体光波が得られ、そ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、 Δ_x , Δ_y はx方向, y方向のサンプリング間隔, λ 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, δ_x , δ_y はセンサピッチである。

Fig.1 に本研究で用いた記録光学系を示す。用いたイメージセンサはモノクロタイプで、解像度は 3000×2200 pixel、センサピッチは $3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$ である。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

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

Table 1 Parameters used for capturing object fields

Wavelengths [nm]	488, 532, 640
Number of samplings used for creating the full-color CGH	32,768 × 32,768
Sensor pitches [μm]	3.5 × 3.5
Number of segments	12 × 16
Distance between reference point source and sensor [mm]	250

た、図中のミラーM6 はピエゾ素子に取り付けており、非回折光と共役像を除去した物体光波を取得するために、位相シフト法を用いている。光源には波長 488 nm, 532 nm, 640nm の3種類のレーザを用い、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。実験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

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のではなく、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、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。本研究で用いた精密ステージでは、移動の度にセンサピッチ以上の誤差が生じる可能性があるため、波長532nmで得られた干渉縞において、相関関数を用いて干渉縞のつなぎ合わせ位置の検出を行い、3波長とも同じ位置でつなぎ合わせを行っている。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

動化している。

4. 物体光波の補間

本研究で用いた撮影物体をFig.2に示す。各波長で記録した複素振幅分布の振幅像をFig.3(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.3(b)に示す。(b)からわかるとおり、物体光波の記録範囲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、フーリエ変換によって得られる物体光波のサンプリング間隔が波長に依存しているためである。しかし、高解像度CGHによるフルカラー再生では、干渉縞の描画ピッチを等しくしなければならず、ここではそれを $1\mu\text{m}$ とした。そこで、全ての波長において物体光波のサンプリング間隔が $1\mu\text{m}$ になるように、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。

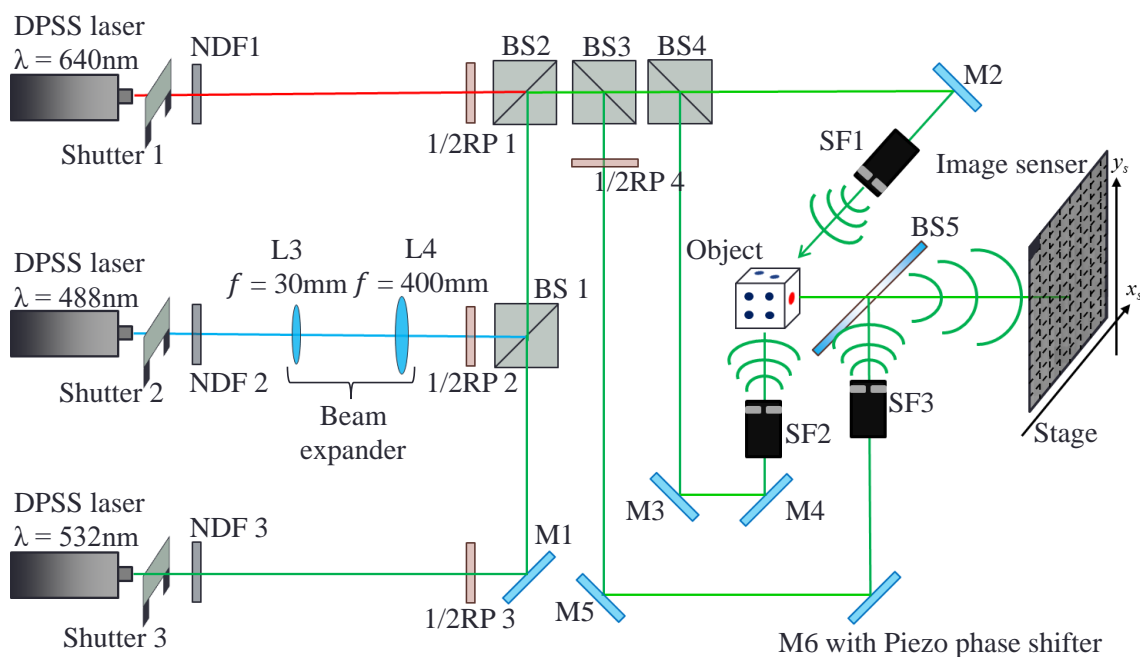


Fig.1 The experimental setup for capturing large-scaled wave-fields with three wavelengths by using lensless-Fourier synthetic aperture DH.



Fig.2 A photograph of the captured Object.

5. フルカラーCGHの作製

本研究ではカラーフィルタ方式を用いてフルカラー再生をおこなう。この手法では、1枚のCGHに3波長分の干渉縞をブロック単位で描画し、ブロックに対応した色のカラーフィルタを貼り合わせる。これに白色光を照明することで、各色のカラーフィルタを透過した照明光が、対応する干渉縞を照明し、フルカラー像が再生される。用いるカラーフィルタ、および再生照明光源として用いる白色LEDのスペクトルをFig.4に示す。

白色LEDにはマルチチップタイプのLEDを用いている。このタイプのLEDはRGBの光源が独立しており、それぞれの明るさを調整することができる。また、各色のピーク波長が記録時のレーザ波長と近く、蛍光体タイプの白色LEDに比べて、各色の単色性が著しく良好である。なお、光学再生像の色再現性は、カラーフィルタ、およびLEDの特性に強く影響されるため、再生時にはRGB光源毎にLED駆動電流を変え、各色の明るさを調整している。

作製したCGHのパラメータをTable2に、3DシーンをFig.5に示す。物体はホログラムから100mm離れた位置に配置している。マルチチップタイプLEDでは各色の光源位置がわずかに異なるため、数値干渉時の参照光源位置も使用予定のLEDに合わせて各色でわずかに変えている。

6. 光学再生像

Fig.6に得られたフルカラー光学再生像を示す。Fig.6からわかるように、記録した実在物体のフルカラー再生像が確認できる。

しかし、再生像では物体の顔付近で赤色が強くなっており、被写体の本来の色を再現できていないことがわかる。これを補正するため再生照明用白色LEDのRの駆動電流値

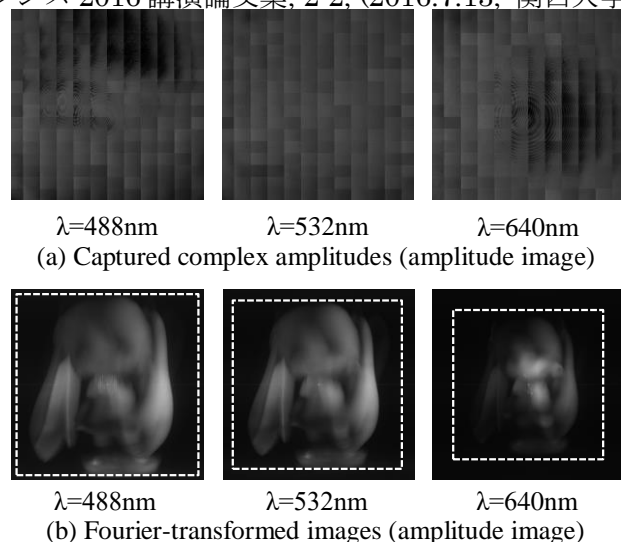


Fig.3 Results of recording object fields with three Wavelengths.

を調整して赤色を弱め、顔の中央付近で色バランスを調整しても、それ以外の部分の色バランスが崩れてしまう問題が生じた。これは、次のような理由によるものと考えられる。

本実験で選択した被写体は、その体色が主に緑色と青色に偏っており、赤色の成分が全体的に非常に少なく、赤色記録時にセンサに入射する物体光波が弱い。そのため、干渉縞が明るくなるようにシャッター速度などを調整している。しかし、肌色の顔付近には赤色成分が集中しているため、記録時に物体光波が部分的に強くなる領域があった可能性がある。そのため、赤色の干渉縞の記録時にイメージセンサが部分的に飽和して、いわゆるハレーションをおこした状態になったと考えられる。ハレーションを起こした干渉縞は、位相シフト処理の過程で振幅値が極めて小さくなるため、物体光波が正確に記録されておらず、本来の色が再現できなかったと考えられる。

また、視点位置を変えると色が変わる場合が見受けられた。これは、用いたイメージセンサの感度が不均一で、セ

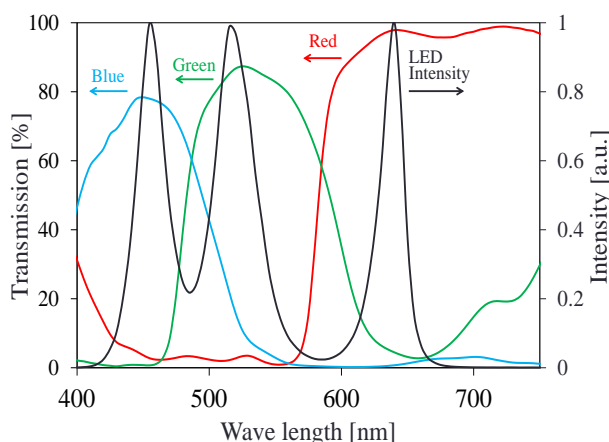


Fig.4 Spectra of RGB color filters and white light LED. The intensities are normalize to unity.

Table 2 Parameters used for creating the full-color CGH

Number of pixels	32,768 × 32,768
Pixel pitches [μm]	1.0 × 1.0
Size of a CGH [mm]	32.7 × 32.7
Wavelength [nm]	488, 532, 640

ンサ位置によって変化するためと考えられる. Fig.3(a)に示したフーリエ変換前の複素振幅分布では, セグメントの境界線を確認することができる. これは, イメージセンサの感度特性にセンサ位置に対する勾配があり, セグメントの境界で振幅値が不連続となってしまうためである. フーリエ変換前のFig.3(a)は光波のスペクトルに対応するため, その振幅の変化は観察方向による明るさの変化となる. そのため, 視点位置によっては色合いが変化する結果となってしまうと考えられる.

7. まとめ

本研究ではフルカラーデジタルホログラフィの実現のため, 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行い, カラーフィルタ方式によるフルカラーCGHの作製を試みた. その結果, 実在物体のフルカラー光学再生に成功した.

しかし, 被写体の色合いを正確に再現できず, また, 視点位置の移動に伴って色合いが変化する問題があった. これは, 記録色によっては部分的にイメージセンサが飽和してハレーションしたこと, またセンサの感度特性自体に勾配等の不均一性があり, 記録したスペクトルの振幅値が不連続になったことが原因だと考えられる. 干渉縞のどの位置に置いてもハレーションさせず, 干渉縞をつなぎ合わせた時に滑らかに明るさに変化するよう記録できれば, これらの問題は軽減できると考えられる.

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.

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: "フルカラー高解像度CGH用カラーフィルタの設計とその光学再生像," 3次元画像コンファレンス 2016(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] T. Nakatsuji and K. Matsushima: "Free-viewpoint images captured using phase-shifting synthetic aperture digital holography," *Appl. Opt.* **47**, D136-D143 (2008).

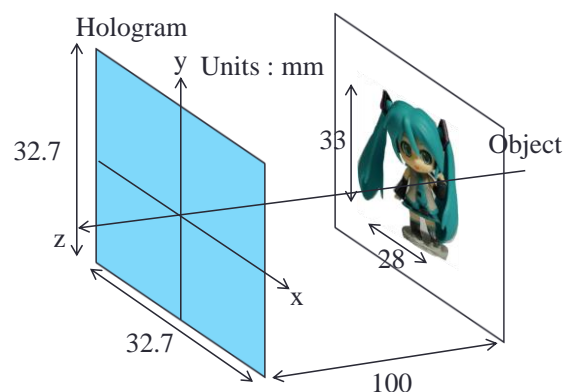


Fig.5 3D scene of the full-color high-definition CGH.

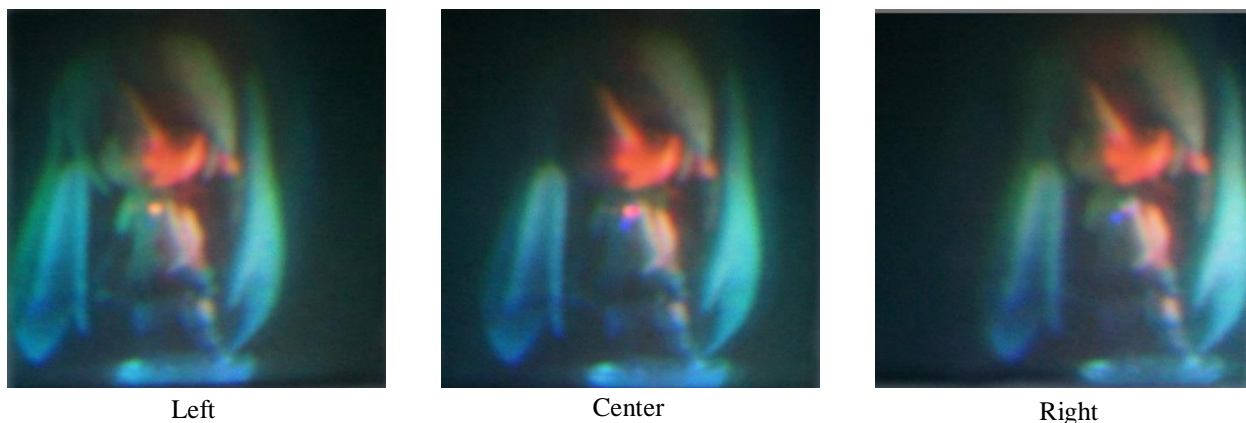


Fig.6 Optical reconstruction of the full-color CGH. Photographs are taken from different viewpoints.