

デジタル化ホログラフィにおける実物体像の拡大・縮小編集

Resizing captured objects in digitized holography

藤田大知¹ 有馬恭旭¹ 松島恭治¹ 中原住雄²
Fujita Daichi, Yasuaki Arima, Kyoji Matsushima, Sumio Nakahara

¹関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

¹Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

²関西大学 システム理工学部 機械工学科

²Department of Mechanical Engineering, Kansai University

ABSTRACT

Digitized holography is a modern technique in holography and makes it possible to digitally edit the 3D scene after recording object fields as well as digitally archive and transmit the hologram. However, the digital editing of the 3D scene in digitized holography has some restrictions. The captured object fields, for example, cannot be resized unlike conventional digital images, because the fields include phase information. To get over this restriction, we tried to digitally resize the image of the real objects in digitized holography by employing numerical image formation of the captured field. A high-definition CGH, whose 3D scene is composed of the resized objects, is demonstrated for verifying the proposed technique.

Keyword: CGH, デジタイズドホログラフィ, 数値的結像シミュレーション, 光波デジタル信号処理

1. はじめに

近年, 計算機合成ホログラム(CGH)の発達により “The Venus”[1]や“Shion”[2,3]といった奥行き感のある美しい立体像が再生できるようになって来ている。これらは数値モデルで表された仮想物体を再生するだけであったが, 最近さらに, 実物体を CGH として 3D シーンに取り込むデジタイズドホログラフィ (Digitized Holography, デジタル化ホログラフィ)と呼ぶ技術が開発されている[4,5]。デジタイズドホログラフィでは, イメージセンサを用いたデジタルホログラフィ(以下, DH)によって実在物体光波をデジタル的に記録し, それを 3D シーン内に埋め込んで CGH として再生する。そのため, 古典的なホログラフィと同様, 記録した光波を完全に再生できるため 輻輳調節矛盾などが一切起きない。一方, 古典的な

ホログラフィと異なり, 物体光波やホログラムをデジタルデータとして扱うため, ホログラム撮影後に 3D シーンをデジタル編集することができる。

しかし, 従来のデジタイズドホログラフィは, 記録した実在物体をシーン中に配置してそのまま再生するのみであり, 実際には 3D シーンの編集にはまだまだ制約が多かった。これは, 写真のような光強度のみを記録したデジタル画像とは異なり, DH で得られた実在物体光波は位相情報を含んでいるため, デジタル画像のように簡単に拡大/縮小することができないことが原因である。

そこで本研究では DH で得られた実在物体光波を計算機上で数値的に結像することによって, その像の拡大/縮小を試みた。さらに, 拡大/縮小を行った実在物体光波を用いて 3D シーンの作成を試みた。

2. DH による実在物体光波の記録

実在物体光波の取得には, レンズレスフーリエ合成開口法を用いる[4,5]。これによって得られる実在物体光波のサンプリング間隔は

藤田大知

fujita@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

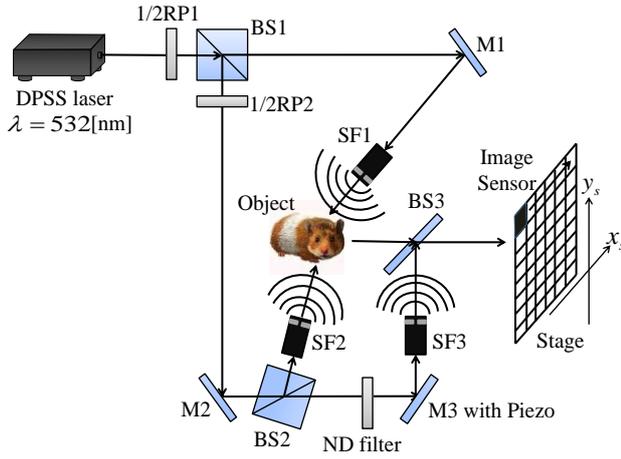


Fig. 1. The experimental setup for capturing large-scaled wave-fields by lensless-Fourier synthetic aperture DH.

$$\Delta x = \frac{\lambda d_R}{N_x \delta_x}, \quad \Delta y = \frac{\lambda d_R}{N_y \delta_y} \quad (1)$$

となる. ここで, λ は波長であり, d_R は参照点光源-イメージセンサ間距離, 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 3000×2200 pixel, センサピッチは $3.5 \times 3.5 \mu\text{m}$ である. また, M3 をピエゾ素子に取り付け, 位相シフト法を行うことによって直接像のみの物体光波を取得している.

本研究では, 合成開口法により縦横共に約 11.4 cm 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. また, 取得した複素振幅画像を Fig.2(a) に示し, これをフーリエ変換して得られた物体光波の振幅像を (b) に示す.

3. 数値レンズ結像を用いた物体光波の拡大と縮小

3.1. 拡大と縮小の原理

Fig.3 に数値的レンズ結像における座標系と配置を示す. ここで, 本研究では座標系の原点をレンズ面

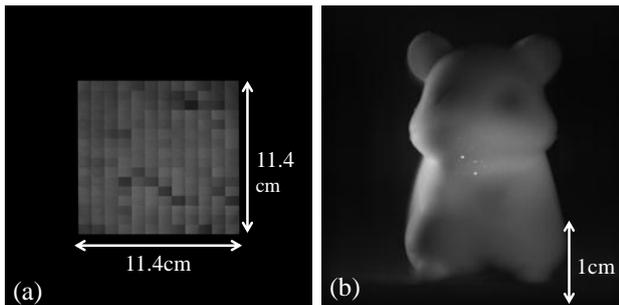


Fig. 2. Captured complex amplitudes (amplitude image) (a) and its Fourier-transform (amplitude image) (b).

Table 1 Parameters used for capturing object fields.

Wavelength	532 nm
Total number of samplings of captured field	$34,439 \times 32,995$
Number of samplings used for numerical calculation	$32,768 \times 32,768$
Sensor pitches	$3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$
Number of capturing	12×16
Overlap of captured area	0.5 mm
Distance of reference point source (D_R)	215 mm

の中心であるとし, 前節で記録した実在物体光波がレンズ面から距離 a 離れた入力面 S にあるとする.

また, レンズ面から後方に距離 b 離れた位置を結像面とする. したがって, レンズの焦点距離を f とするとレンズの公式から

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

の関係がある. また, 像の倍率 M は

$$M = \frac{b}{a} \quad (3)$$

となる.

これらの関係から結像面における物体光波を求めるためには, S 上の物体光波 $g_s(x, y, -a)$ をレンズ面まで数値的に伝搬し

$$u^-(x, y, 0) = P_a \{ g_s(x, y, -a) \} \quad (4)$$

を得る. ここで $P_a\{\}$ はシフトド角スペクトル法[6]によって光波を距離 a 伝搬する演算を表している.

レンズ透過後の光波は

$$u^+(x, y, 0) = u^-(x, y, 0) t(x, y, 0) \quad (5)$$

となる. ここで $t(x, y)$ はレンズ位相関数であり,

$$t(x, y, 0) = \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda f} (x^2 + y^2) \right] p(x, y) \quad (6)$$

で与えられる. 本研究では瞳関数 $p(x, y)$ を半径 R の円形開口関数とした. 結像面における物体光波は, 距離 b の伝搬計算により

$$g_G(x, y, b) = P_b \{ u^+(x, y, 0) \} \quad (7)$$

となる.

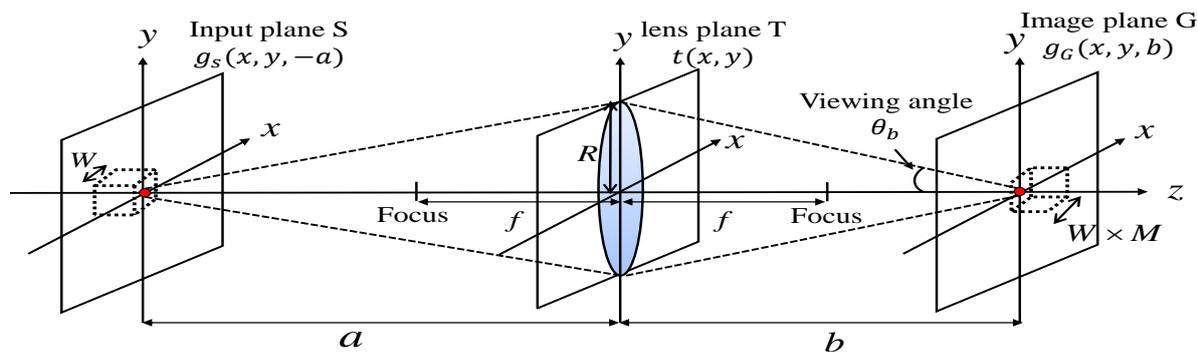


Fig.3. Coordinates system and geometry used for numerical image formation.

3.2. 結像パラメータの条件

倍率 M の数値的レンズ結像を行うには、式(2)と式(3)の関係を満たす a, b, f を設定すればよい。しかしながら、それ以外にも以下の条件を満たす必要がある。

離散化されたレンズ位相がエイリアジング誤差を生じないためには、式(6)のレンズ位相を

$$t(x, y) = \exp[-i\phi(x, y)] \quad (8)$$

と書き換え、位相分布の局所的な信号周波数

$$v_x = \left| \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} \right| = \left| \frac{x}{\lambda f} \right|, \quad (9)$$

$$v_y = \left| \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial y} \right| = \left| \frac{y}{\lambda f} \right|$$

の両方がナイキストの定理を満たさなければならない。したがって、

$$2v_x < \Delta x_l^{-1}, \quad 2v_y < \Delta y_l^{-1} \quad (10)$$

を満たす必要がある。ここで $\Delta x_l, \Delta y_l$ はレンズのサンプリング間隔である。したがって、半径 R の瞳関数では

$$\frac{\lambda f}{2\Delta x_l} > R, \quad \frac{\lambda f}{2\Delta y_l} > R \quad (11)$$

を満たさなければならない。すなわち、数値的レンズ結像でエイリアジング誤差が発生しないためには、レンズの F 値が、

$$F = \frac{f}{2R} > \frac{\Delta x_l}{\lambda} \quad \text{and} \quad \frac{\Delta y_l}{\lambda} \quad (12)$$

Table 2 Parameters of numerical lens.

Number of samplings	131,072×131,072
Sampling intervals	1.0 μm × 1.0 μm
Radius	6.55 cm
Focal length	25.0 cm

を満たすようにしなければならない。このような条件を満たす F 値であればどのような値でも良いことになるが、実際は物体の大きさや最大回折角度により光の広がり制限されるため、小さなレンズではそのすべてを結像できない。そこで本研究では、計算機のメモリが許す範囲で大きいレンズ径を設定し、次に式(12)を満たすように f を設定した。Table 2 に用いた数値レンズのパラメータを示す。また、これらの条件を満たしたうえで物体の拡大/縮小を行なった結果を Fig.4 に示す。(a)は $M=0.25$ 倍、(b)は $M=1.5$ 倍した拡大/縮小した結果である。

3.3. 結像後の見かけの視域角

本研究ではレンズのサンプリング間隔を物体光波のサンプリング間隔と等しくしている。この場合、式(11)を満たすレンズでは、半径 R よりもレンズ面までに広がる物体光波のほうが大きくなる。よって、レンズのカットオフ周波数のほうが低くなり、物体光波が劣化する。この時、Fig.3 に示した角度 θ_b は

$$\theta_b = \tan^{-1} \frac{R}{b} = \tan^{-1} \frac{1}{2(M+1)F} \quad (13)$$

となり、結像後の視域角は拡大率により変化するが、CGH 自体の最大回折角度を超えることはできない。しかし、オーバーサンプリングを行ない、レンズ位

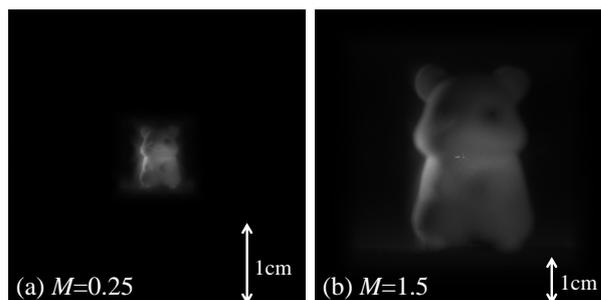


Fig. 4. Amplitude images of the resized object fields.

Table 3 Parameters used for creating “Hamsters”.

Number of pixels	65,536 × 65,536 pixels
Pixel pitches	1.0 μm × 1.0 μm
Wavelength in calculation	532 nm
Position of reference light	(0, -40.8, -280) mm
Reconstruction wavelength	632 nm

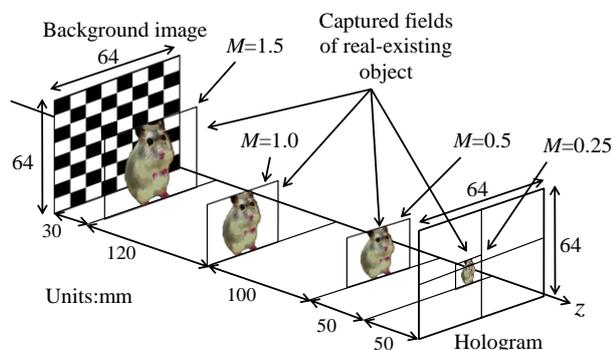


Fig. 5. 3D scene of the CGH “Hamsters” composed of numerically resized object fields.

相関数と CGH のサンプリング間隔を記録物体光波のそれより小さくした場合には、見かけの視域角を記録光波の視域角より拡大することができる。

4. 拡大/縮小編集を用いた実在物体光波の CGH

Fig.5 に拡大/縮小編集を行なった実在物体光波を用いて構成した 3D シーンの配置を示す。また、“Hamsters”と名付けたこの CGH のパラメータを Table 3 に示す。この CGH の光学再生像を左右にアングルを変えて撮影をおこなった結果を Fig.6 に示す。この結果からわかるように物体像は計算通りに拡大/縮小が行われており、提案手法が有効であることが確認できる。

5. まとめ

本研究では、DH で取得した実在物体光波に対し

て、数値的レンズ結像を用いて像の拡大/縮小を試みた。その結果、実在物体光波の位相情報を失うことなく拡大/縮小編集が可能であることを示した。また、拡大/縮小編集を行なった実在物体光波を用いて 3D シーンの作成を行なった。これによりデジタイズドホログラフィにおけるデジタル編集の自由度が広がったと考える。

謝辞

本研究は、日本学術振興会の科研費(24500133)、および平成 24 年度関西大学学術研究助成金(共同研究)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] H. Nishi, K. Matsushima, S. Nakahara: “Rendering of specular surfaces in polygon-based computer-generated holograms”, *Appl. Opt.* **50**, H245-H252 (2011).
- [3] K. Matsushima, H. Nishi, S. Nakahara: “Simple wave-field rendering for photorealistic reconstruction in polygon-based high-definition computer holography”, *J. Electron. Imaging* **21**, 023002(2012).
- [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] K. Matsushima: “Shifted angular spectrum method for off-axis numerical propagation”, *Opt. Express* **18**, 18453-18463 (2010).

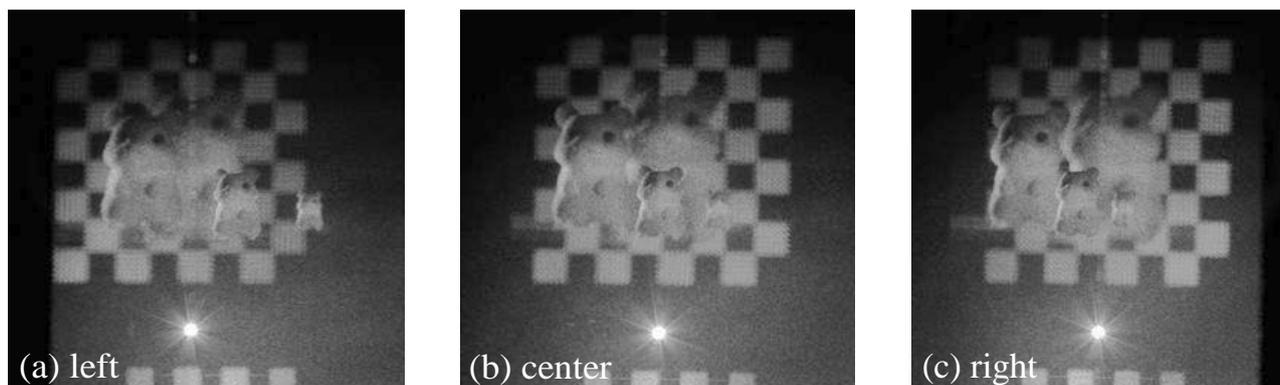


Fig. 6. Optical reconstruction of the fabricated CGH “Hamsters”. Photographs (a)-(c) are taken from different viewpoints.