

物体光波のデジタル拡大/縮小編集を用いた 高解像度 CGH の作成

藤田 大知[†] 有馬 恭旭[†] 松島 恭治[†] 中原 住雄[‡]

[†]関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

[‡]関西大学 システム理工学部 機械工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: fujita@laser.ee.kansai-u.ac.jp, matsu@kansai-u.ac.jp

あらまし 近年開発されたデジタルホログラフィではイメージセンサを用いて記録した実在物体の光波と仮想物体の光波をデジタル編集してCGHを作成する。しかし、従来のデジタルホログラフィでは3Dシーンの編集にはまだまだ制約が多い。その一つは、光波データが位相情報を含むため、単なる画像とは異なり簡単に拡大/縮小ができないことである。そこで、本研究ではデジタル的に記録し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実物体像の拡大/縮小編集を試み、それによって高解像度CGHを作成した。

キーワード CGH, デジタルホログラフィ, 数値的結像シミュレーション, 光波デジタル信号処理

Creation of a high-definition CGH using digitally resized object fields in digitized holography

Daichi FUJITA[†] Yasuaki ARIMA[†] Kyoji MATSUSHIMA[†] Sumio NAKAHARA[‡]

[†]Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

[‡]Department of Mechanical Engineering, Kansai University

E-mail: fujita@laser.ee.kansai-u.ac.jp, matsu@kansai-u.ac.jp

Abstract Recently, a technique of digitized holography is developed for holographic 3D imaging of real and virtual objects. In this technique, real-existing field are captured using an image sensor, and the field is incorporated into a virtual 3D scene. Therefore, the 3D scene is digitally editable unlike classical holography. However, in digitized holography, editing of the 3D scene has many restrictions. For example, the captured object fields are unable to be digitally resized unlike conventional digital images, because the captured object fields contain phase information. To get over the restriction, we tried to digitally resize the image of the real-existing objects appearing in the CGH by employing numerical image formation of the captured field. A high-definition CGH using the resized objects field is created for verifying the technique.

Keyword CGH, digitized holography, numerical image formation, digital signal processing of light

1. はじめに

CGHの研究として従来、数値モデルの仮想物体からの光波の回折と干渉を計算機上でシミュレートし、ホログラムの干渉縞パターンを生成する研究が主に行われてきた。その結果、近年では“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きている。一方、実物体をCGHとして3Dシーンに取り込む研究としては、多視点画像を用いた手法が広く研究されている[4]。しかしながら、多視点画像を用いた手法では、再生される画像から奥行き情報の多くが失われてしまうという問題がある。そこで、我々はデジタルホログラフィ

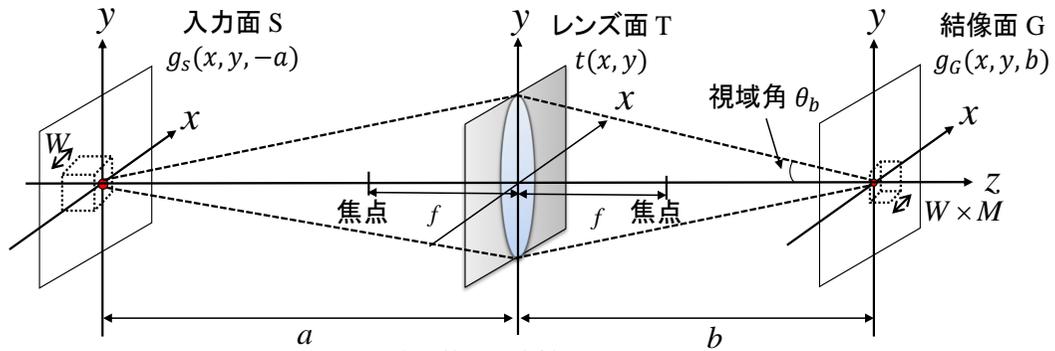


Fig. 3. 数値的レンズ結像における配置

像のみの物体光波を取得している。本研究では高解像度CGHに適合したサンプリング間隔 $1.0\ \mu\text{m}$ の光波を取得するために参照点光源-イメージセンサ間距離を $21.5\ \text{cm}$ に合わせ、取得する物体光波サンプリング数が縦横ともに $32768\ \text{pixel}$ 以上になるように横に12枚、縦に16枚の合計192枚の複素振幅像を記録した。ここで1枚当たりの移動量は横に $10.0\ \text{mm}$ 、縦に $7.2\ \text{mm}$ であり、重ね合わせ領域は $0.5\ \text{mm}$ に設定している。そのため、得られる複素振幅画像の大きさは縦横ともに約 $11.4\ \text{cm}$ となる。これらのパラメータをTable 1にまとめ、複素振幅画像をFig.2(a)に、また、そのフーリエ変換によって得られた物体光波の振幅像を(b)に示す。

3. 数値的レンズ結像を用いた物体光波の拡大と縮小

3.1. 拡大/縮小の原理

数値的レンズ結像で想定する配置をFig.3に示す。いま座標系の原点はレンズ面の中心であるとし、合成開口DHで取得した光波はレンズから距離 a 離れた位置にある入力面Sにある。また結像面Gはレンズ面から距離 b 離れたレンズ後方の位置にあるとする。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

Table 1. 合成開口DHで用いたパラメータ

波長	532 nm
複素振幅画像ピクセル数	$34,439 \times 32,995\ \text{pixel}$
全画像ピクセル数	$65,536 \times 65,536\ \text{pixel}$
センサピッチ	$3.5\ \mu\text{m} \times 3.5\ \mu\text{m}$
合成枚数	12×16 枚
重ね合わせ領域	0.5 mm
参照光-センサ間距離	215 mm

ら、

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \tag{2}$$

の関係がある。また、像の倍率 M は、

$$M = \frac{b}{a} \tag{3}$$

となる。

S上の物体光波を $g_s(x, y, -a)$ とするとレンズ透過前の複素振幅分布は

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

となる。ここで $P_a\{\}$ は光波をシフトed角スペクトル法[7]によって距離 a 伝搬する演算を表している。レンズ透過後の複素振幅分布は

$$u^+(x, y, 0) = u^-(x, y, 0) t(x, y, 0) \tag{5}$$

となる。ここで $t(x, y)$ はレンズ位相関数であり、以下のように定義される。

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

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

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

となる。

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(3)を満たす適当な結像パラメータ a, b, f を設定すればよ

Table 2. 数値レンズのパラメータ

サンプリング数	131,072×131,072 pixel
サンプリング間隔	1.0 μm ×1.0 μm
レンズの半径	6.55 cm
焦点距離	25.0 cm

い。しかしながら、これらのパラメータは、以下に示す条件を満たす必要がある。

レンズの半径が大きくなった場合でも、離散化されたレンズ位相がエイリアシングを起こさないためには、式(6)のレンズ位相を

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

と書きなおして求める位相分布の局所的な信号周波数

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

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

の両方がナイキストの条件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 Δx_l と Δy_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、

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

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

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

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、実際には物体に大きさがああり、最大回折角により光の広がりが制限されるため、小さな口径の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、まず使用する計算機のメモリが許す限り大きなレンズ口径 $2R$ を設定し、次に(12)式を満たすように 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。

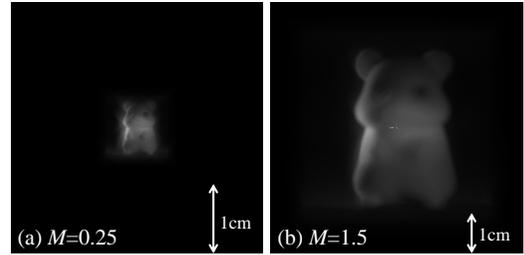


Fig 4. 拡大縮小した物体光波の振幅像

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たため、(12)式から求まるF値の最小値は1.88となる。そこで $F=1.91$ のレンズを用いることにした。

これらの条件を満たしたうえで物体の拡大/縮小を行った結果を Fig 4 に示す。(a)は $M=0.25$ 倍、(b)は $M=1.5$ 倍として拡大/縮小した結果である。

3.3. 結像後の見かけの視域角

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た場合、(11)式を満たすレンズでは、その半径 R よりも、物体光波のレンズ面上での広がりの方が大きくなるのが理論的に示される。つまり、物体光波の帯域よりもレンズのカットオフ周波数の方が低くなり、物体光波が劣化する。またこの場合、Fig 3 に示した角度 θ_b によって見かけの視域角が決定される。いま

$$b = f(M+1) \quad (13)$$

の関係があるので

$$\theta_b = \tan^{-1} \frac{R}{b} = \tan^{-1} \frac{1}{2(M+1)F} \quad (14)$$

となり、結像した物体の見かけの視域角は拡大率により変化する。なお、この式で求まる θ_b は大きな値になり得るが、当然、実際には CGH 自体の最大回折角を超えることはできない。

オーバーサンプリングを行ない、レンズ位相関数と CGH のサンプリング間隔を記録した物体光波より小さくした場合には、視域角 $2\theta_b$ を記録物体光波の視域角より引き延ばすことができると考えられる。

Table 3. CGH パラメータ

ピクセル数	65,536×65,536 pixel
ピクセルピッチ	1.0μm×1.0 μm
ホログラムサイズ	6.55×6.55 cm ²
参照光波長	532 nm
参照光位置	(0, -40.8, -280) mm
再生照明光波長	632 nm
再生照明光位置	(0, -40.8, -280) mm

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、そのパラメータを Table 3 に示す。CGH の計算では後方物体が前方物体に透けて見えるファントムイメージとなるのを防ぐためにシルエットマスクの作成を行い、光波遮蔽を行っている[5]。そのため、一番後ろにある物体か

ら順に伝搬計算を行い、各物体のマスクを乗算し、これをホログラム面まで伝搬計算を行なっている。このホログラム面の光波と球面波参照光を数値的に干渉し、2 値の振幅コーディングを行って干渉縞パターンを生成した。再生像シミュレーション[8]の結果を Fig.6 に示す。なお、このシミュレーションでは注視点は 0.5 倍した実在物体光波に合わせている。Fig.6 の各視点位置のシミュレーション結果から実際に実在物体の拡大縮小が行われていることを確認することができる。

5. まとめ

DH で取得される実在物体光波には位相情報が含まれているため、2次元のデジタル画像のように拡大縮小を行うことは困難であった。そこで、本研究では計算機上で数値的レンズ結像を行うことによって、位相情報を失うことなく実在物体光波の拡大縮小編集が

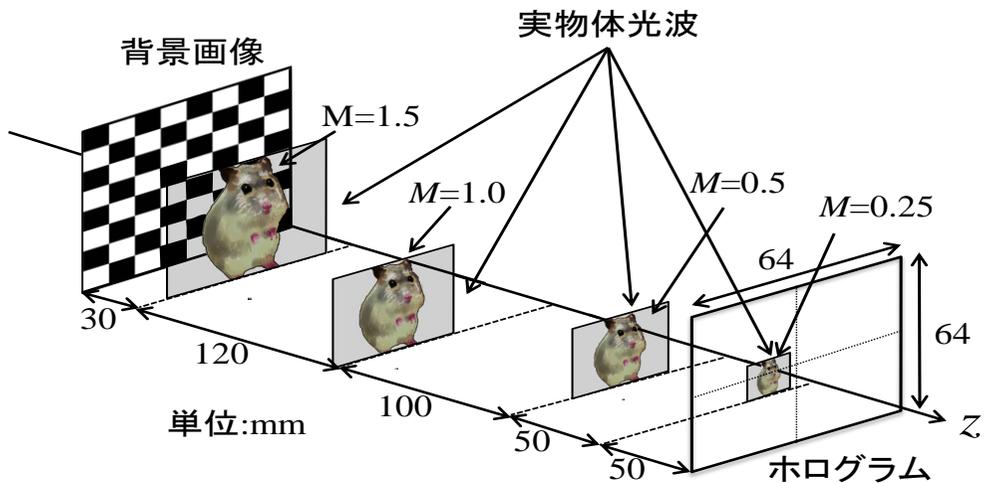


Fig. 5. 3D シーンの配置

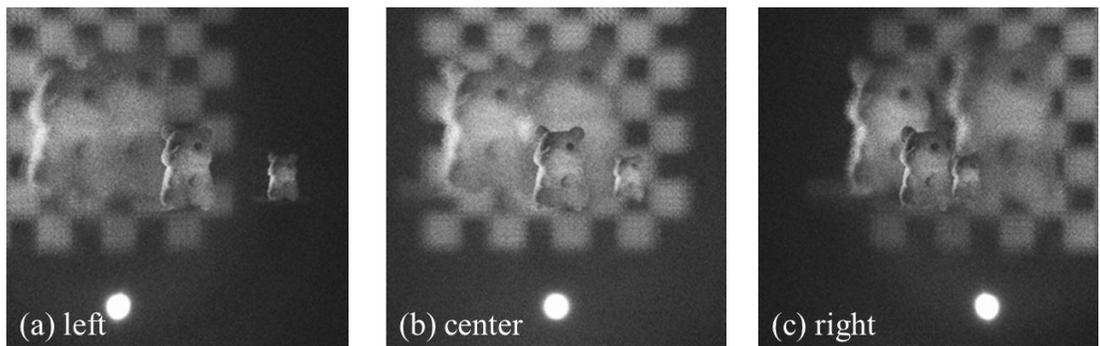


Fig. 6. 計算した CGH のシミュレーション再生像

可能であることを示した。これにより、デジタイズドホログラフィにおける 3D シーンデザインの自由度を広げることができる。

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基金(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] 松島, 中原: “ポリゴン法による 100 億画素規模の超高解像度コンピュータホログラムの作成”, *レーザー研究* **40**, 18-27 (2012).
- [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] N. T. Shaked, B. Katz, J. Rosen, “Review of three-dimensional holographic imaging by multiple-viewpoint-projection based methods,” *Appl. Opt.* **48**, H120–H136 (2009).
- [5] K. Matsushima, Y. Arima, S. Nakahara: “Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects”, *Appl. Opt.* **50**, H278-H284 (2011).
- [6] 有馬, 松島, 中原: 合成開口デジタルホログラフィで記録した実物体の CGH, *HODIC Circular* **29**, No. 3, 5-8(2010).
- [7] K. Matsushima: “Shifted angular spectrum method for off-axis numerical propagation”, *Opt. Express* **18**, 18453-18463 (2010).
- [8] 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).