



## 拡大記録デジタルホログラムとその再生像

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-12-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 重井, 宣行, 菊田, 久雄, 岩田, 耕一 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24729/00007679">https://doi.org/10.24729/00007679</a>

# 拡大記録デジタルホログラムとその再生像

重井宣行\*, 菊田久雄\*\*, 岩田耕一\*\*

Magnified Digital Hologram Recording and its Reconstructed Image

Nobuyuki SHIGEI\*, Hisao KIKUTA\*\*, Koichi IWATA\*\*

## ABSTRACT

Holography has recording and reconstruction process. Digital holography uses an image sensor in the recording process, and records interference pattern digitally. Reconstruction is made numerically by a computer, and the reconstructed image is shown on the computer display. Generally, spatial resolution of the hologram is limited by the pixel size of the sensor. The low resolution limits the recordable object size for a Fresnel hologram. In this paper, we propose an optical system which records the hologram after magnifying it; effective pixel size on the hologram plane becomes smaller and the recordable object size becomes larger. However, the object size is limited also by the NA of the magnifying lens in the recording process. The object size in the magnified digital hologram recording is analysed quantitatively and confirmed by experiments.

**Key Words:** Fresnel holography, digital holography, off-axis hologram, magnified hologram recording

### 1. はじめに

ホログラフィは、1948年にD.Gaborによって提案された<sup>1)</sup>。この技術では、レンズを利用することなく、被写体から散乱された光波の波面が記録でき、立体像が再生できる。

Gabor<sup>1)</sup>のホログラフィには記録段階と再生段階があり、記録段階では物体光波と参照光波との干渉縞を感光材料に記録する。記録した乾板をホログラムという。再生段階では、ホログラムに記録時と同一の参照光波を照射することにより立体像を再現している(in-line ホログラム)。しかし、再生時における立体像が2つ重なって得られる等の問題点があった。

Gaborの方法の問題点は、1962年にE.N.LeithとJ.Upatnieksによって解決された<sup>2)</sup>。Leithらは、ホログラム作成時における参照光波と物体光波の照射方向を変えることによって2つの再生像を分離した(off-axis ホログラム)。

その後、A.W.LohmannとD.P.Parisは、実在しない物体から散乱された光波をコンピュータで計算してホログラムを作成し、そのホログラムへ参照光波を照射して再生させる方法を提案した<sup>3)</sup>。この方法は計算機ホログラフィに分類される<sup>3)</sup>。撮像素子の分解能向上に伴い、ホログラム作成時の乾板を撮像素子に置き換えて記録することも可能になってきた。この場合は、記録段階には光学系

を用い、再生段階にコンピュータを利用する。この方法はデジタルホログラフィという。一方、ホログラフィには、被写体と撮像素子との位置関係により、フレネルホログラフィ、フラウンホーファホログラフィ、イメージホログラフィなどがある<sup>4)</sup>。

この論文では、被写体からホログラムまでの距離が有限なフレネルホログラフィへの off-axis デジタルホログラフィの適用について考える。

フレネルデジタルホログラフィにおける撮影可能サイズは撮像素子の画素サイズに依存し、被写体再生時における画質は撮像素子の受光面積に関係する。off-axis 型のフレネルデジタルホログラフィでは、in-line ホログラムに比べて、細かい干渉縞を記録する必要があるため、その制限はより厳しい。撮像素子の分解能が十分でない現状では、被写体サイズを広げる工夫が必要となる。本間ら<sup>5)</sup>はその手法として、被写体を縮小光学系で数十ミリ程度のサイズにしてホログラムを作成するデジタルホログラフィを提案した。

本報では、ホログラムを拡大してから撮像素子で記録する方法について検討する。

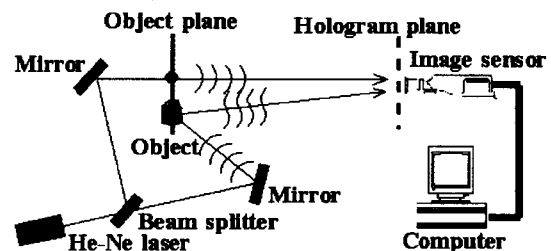


Fig.1 Principle of digital holography

2002年4月10日受理

\* 電子情報工学科 (Dept. of Electrical Eng. and Computer Science)

\*\* 大阪府立大学大学院工学研究科 (Grad. School of Eng., Osaka Pref. Univ.)

## 2. デジタルホログラフィの定式化

### 2.1. ホログラムの記録

フレネルデジタルホログラフィは, Fig.1 にあるように, 被写体と撮像素子とを有限距離に配置させて干渉光波をデジタル記録し, 再生にはコンピュータを用いる<sup>9)</sup>. off-axis ホログラフィでは, 物体光波とは異なる方向からホログラムに参照光波を照射し, 物体光波と干渉させる. 参照光波のホログラム面上での複素振幅分布を  $O_R$  とし, ホログラム面上の物体光波の複素振幅を  $O_o$  とすると, ホログラム面上の強度分布は,

$$I_h = |O_o|^2 + |O_R|^2 + O_o^* \cdot O_R + O_o \cdot O_R^* \quad \dots\dots(1)$$

となる. ただし, \* は共役複素数を表す.

### 2.2. ホログラムの再生

再生はデジタル的に行う. 記録された強度分布に参照光波と同じ光波を照射すると, 再生時のホログラム面上での複素振幅は,

$$O_h = I_h \cdot O_R = \left\{ |O_o|^2 + |O_R|^2 \right\} \cdot O_R + O_o^* \cdot O_R^2 + O_o \cdot |O_R|^2 \quad \dots\dots(2)$$

となる.

参照光波の強度分布がホログラム面で一様とすれば, (2)式の第4項は, ホログラム面上の物体波  $O_o$  を再生する.

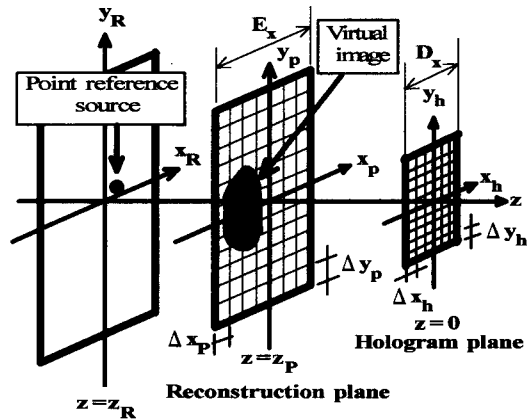


Fig.2 Image formation by hologram

その光波が再生面でどのようになるのかを計算すればよい. ここでは, 参照光波を  $(x_R, y_R, z_R)$  にある点光源から発した振幅  $A$  の球面波とする. このとき, 参照光波は,

$$O_R = A \cdot \exp \left[ -jk \left\{ \frac{(x_h - x_R)^2 + (y_h - y_R)^2}{2z_R} + z_R \right\} \right] \quad \dots\dots(3)$$

となる. ただし,  $j$  は虚数単位,  $k$  は  $2\pi/\lambda$  とし, 球面波

の広がり  $(x_h - x_R), (y_h - y_R)$  は点光源の距離  $z_R$  に比べて小さいものとして近似した.

参照点光源の位置と再生面, ホログラムの関係を Fig.2 に示す. このような座標をとるとき, ホログラム面上の強度分布を用いて,  $z=z_p$  における再生面上の再生波  $O$  を表す式は, 次のフレネル積分で表せる.

$$O(x_p, y_p) = K \iint I_h(x_h, y_h) \cdot \exp \left[ j \frac{k}{2} \left( \frac{1}{z_p} - \frac{1}{z_R} \right) (x_h^2 + y_h^2) \right] \cdot \exp \left[ -jkx_h \left( \frac{x_p}{z_p} - \frac{x_R}{z_R} \right) \right] \cdot \exp \left[ -jky_h \left( \frac{y_p}{z_p} - \frac{y_R}{z_R} \right) \right] dx_h dy_h \quad \dots\dots(4)$$

ただし,

$$K = \frac{A}{j\lambda z_p} \cdot \exp[jk(z_p - z_R)] \cdot \exp \left[ j \frac{k}{2z_p} (x_p^2 + y_p^2) \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{k}{2z_R} (x_R^2 + y_R^2) \right] \quad \dots\dots(5)$$

とし,  $(x_h - x_p), (y_h - y_p)$  は再生距離  $z_p$  に比べて十分に小さいものとして近似した.

ホログラムからの再生像は, 強度分布であるから,

$$I = |O|^2 \quad \dots\dots(6)$$

を計算する.

### 2.3. 再生の計算

(4)式を離散的にするため, 再生面およびホログラム面を Fig.2 のようにメッシュ状に区切り, 各面のサンプル数を同数にして, 横方向を  $N_x$ , 縦方向を  $N_y$  とおく. ホログラム面では, サンプリング間隔を  $\Delta x_h, \Delta y_h$ , サンプル番号を  $n_x, n_y$ , 再生面では, サンプリング間隔を  $\Delta x_p, \Delta y_p$ , サンプル番号を  $m_x, m_y$  とする. このとき, ホログラム面でデータが記録される大きさは,

$$D_x = N_x \Delta x_h, \quad D_y = N_y \Delta y_h \quad \dots\dots(7)$$

であり, 再生面の大きさは,

$$E_x = N_x \Delta x_p, \quad E_y = N_y \Delta y_p \quad \dots\dots(8)$$

となる. 再生面のサンプリング間隔を

$$\Delta x_p = \frac{\lambda z_p}{D_x}, \quad \Delta y_p = \frac{\lambda z_p}{D_y} \quad \dots\dots(9)$$

とおき、参照点光源の位置を整数値  $Q_x, Q_y$  として、次のように表す。

$$x_R = Q_x \frac{z_R}{z_p} \Delta x_p, \quad y_R = Q_y \frac{z_R}{z_p} \Delta y_p \quad \dots\dots(10)$$

このとき再生面における振幅分布  $O$  は、離散化した結果得られる、次の離散フーリエ変換式から求めることができる。

$$\begin{aligned} & O(m_x \Delta x_p, m_y \Delta y_p) \\ &= K \sum_{n_x = -\frac{N_x}{2}}^{\frac{N_x}{2}-1} \sum_{n_y = -\frac{N_y}{2}}^{\frac{N_y}{2}-1} F(n_x \Delta x_h, n_y \Delta y_h) \\ & \cdot \exp \left[ -j2\pi \left\{ \frac{n_x}{N_x} (m_x - Q_x) \right\} \right] \quad \dots\dots(11) \\ & \cdot \exp \left[ -j2\pi \left\{ \frac{n_y}{N_y} (m_y - Q_y) \right\} \right] \Delta x_h \Delta y_h \\ & \left( \begin{array}{l} m_x = -\frac{N_x}{2}, -\frac{N_x}{2} + 1, \dots, 0, \dots, \frac{N_x}{2} - 1, \\ m_y = -\frac{N_y}{2}, -\frac{N_y}{2} + 1, \dots, 0, \dots, \frac{N_y}{2} - 1 \end{array} \right) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} & F(n_x \Delta x_h, n_y \Delta y_h) \\ &= I_h(n_x \Delta x_h, n_y \Delta y_h) \\ & \cdot \exp \left[ j \frac{k}{2} \left( \frac{1}{z_p} - \frac{1}{z_R} \right) \{ (n_x \Delta x_h)^2 + (n_y \Delta y_h)^2 \} \right] \quad \dots\dots(12) \end{aligned}$$

とする。なお、 $K$  は  $|K|^2 = const.$  となり、強度の計算には影響しないので詳細は省略する。最後に、

$$I(m_x \Delta x_p, m_y \Delta y_p) = |O(m_x \Delta x_p, m_y \Delta y_p)|^2 \quad \dots\dots(13)$$

を計算して、再生像を得る。

参照光波と物体光波が重ならない範囲では、(2)式の各項の位置を分離することができるので、第4項のみを取り出すことができる。

### 3.画像センサと再生計算

ホログラム面から再生面を見たときの視野角は、

$$\theta_x = \frac{E_x}{z_p} = \frac{\lambda}{\Delta x_h}, \quad \theta_y = \frac{E_y}{z_p} = \frac{\lambda}{\Delta y_h} \quad \dots\dots(14)$$

と表せる。この視野角  $\theta_x, \theta_y$  によって、再生面サイズが決まる。

視野を広げるためには、サンプリング間隔をできるだ

け小さくする必要がある。サンプリング間隔の最小値は撮像素子の画素サイズであるので、それによって再生像の視野が決定される。そこで、視野角を広げるには、(14)式より、実効的な画素サイズを小さくすればよい。この方法として、本論文では、Fig.3にあるようにホログラムを拡大して撮像素子へ記録することを提案する。M倍の拡大光学系を用いると、実効画素サイズは  $1/M$  倍になり、視野角はほぼ M 倍になる。例えば、画素サイズ  $\Delta x_h = 4 \mu m$ 、光源の波長  $\lambda = 632.8nm$  の場合、(14)式で決まる視野角は  $\theta_x = 9^\circ$  程度となる。そこで、M=5 倍の対物レンズを用いると、実効画素サイズは  $\Delta x_h = 0.8 \mu m$  程度になる。このときの視野角は  $\theta_x = 45^\circ$  程度まで広がり、35mm判カメラの標準撮影範囲と同程度になる。

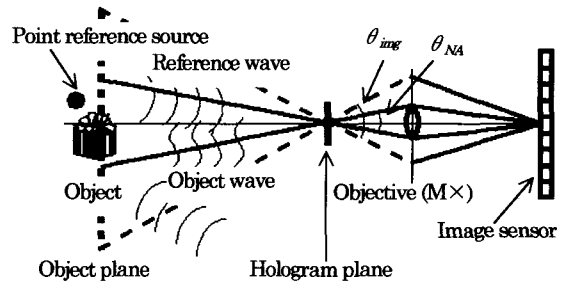


Fig.3 Magnified hologram recording system

しかし、M倍にするために対物レンズを用いると、このレンズの NA のために視野が限られる。その様子を Fig.3 に示す。図中の  $\theta_{img}$  は  $\theta_x, \theta_y$  に相当し、 $\theta_{img}$  はサンプリング間隔で決まる視野角である。しかし、NA により限られる角度は、

$$\theta_{NA} = 2 \sin^{-1}(NA) \quad \dots\dots(15)$$

であり、現在の顕微鏡の光学系では、

$$\theta_{NA} < \theta_{img} \quad \dots\dots(16)$$

となる。この場合、NA により制限された角度とサンプリングで決まる角度との比は、 $\theta_{NA} / \theta_{img}$  となる。例えば、5 倍の対物レンズで  $NA = 0.13, \theta_{NA} = 15^\circ$  のものがあるので、 $\theta_{img} = \theta_x = 45^\circ$  のとき、角度の割合は 33% となり、大きな制限となる。

ここで述べたのは、再生像の視野角である。位相シフト法を用いた in-line ホログラム<sup>7)</sup> の場合は、(14)式に示した視野角がそのまま再生像の大きさになる。そのため、NA で規定される視野角が大きく影響する。

一方、off-axis ホログラムの場合は、0 次と -1 次の再生像と +1 次の再生像とを分離する必要がある。これらを含んだものが、再生像全体の大きさになる必要がある。そのため、記録段階では、物体の大きさを再生像の視野角の半分以下にする必要があり、NA による制限がなくても視野角が限られている。

これは、記録段階における参照光波と物体光波による干渉縞の間隔を、撮像素子が分解できる条件と一致する。いま、角度  $\theta$  で入射した 2 つの干渉縞の間隔  $\Delta_w$  は、

$$\Delta_w = \frac{\lambda}{\theta} \quad \dots\dots(17)$$

となる。この干渉縞を分解できる撮像素子のサンプリング間隔  $\Delta_R$  は、サンプリング定理によると、

$$\Delta_R \leq \frac{\Delta_w}{2} \quad \dots\dots(18)$$

の関係を満足させる必要がある。サンプリング間隔  $\Delta x_n$  が  $\Delta_R$  に等しいものとするれば、参照光波と物体光波との最大角度は、

$$\theta \leq \frac{\lambda}{2\Delta x_n} \quad \dots\dots(19)$$

となる。この値は、(14)式の半分である。

記録段階では対物レンズの NA で決まる角度内に参照光波と物体光波が入るように配置し、再生段階では記録されたホログラムについてデジタル再生を行うようにすれば、この条件を有効に利用したことになる。このとき、NA による制限は、NA による制限がない場合に比べて、角度の割合が、 $2\theta_{NA}/\theta_{mg}$  となる。具体的に、5 倍の対物レンズの場合、この値は 66% になる。このことから、off-axis ホログラムの場合は、それほど大きな制限にならない。

(11)式の再生計算を行うためには、FFT(Fast Fourier Transform)を使うが、そのサンプリング数  $S_x, S_y$  は、ふつう、2 の整数倍乗に規定されている。そのため、撮像素子の記録画素数  $N_x, N_y$  とは一致しない。

そこで、記録されたホログラムの外側にデータを付け加える。そのため、

$$N_x \leq S_x, \quad N_y \leq S_y \quad \dots\dots(20)$$

となる。本研究では、撮影時の撮像素子で得られたデータ全体から平均濃度を計算し、その計算結果をホログラムの周囲に与えた。

4. 実験装置の説明と実験結果

上記考察の妥当性を示すため、記録・再生の実験を行った。再生面サイズは、ホログラム面の実効的サンプリング間隔で決まるため、5×、20×のレンズでホログラムを拡大してこのことを確かめた。

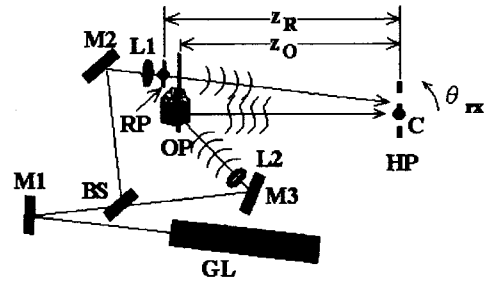
4.1. ホログラムの記録と再生

記録段階の光学系を Fig.4 に示す。光源 GL には、He-Ne レーザ(日本電気社製 GLG5600)を使用した。このレーザの波長は  $\lambda=632.8\text{nm}$  である。光源からの出射光はミラーM1で反射され、ビームスプリッタ BS で参照光波と物体光波に分けられる。

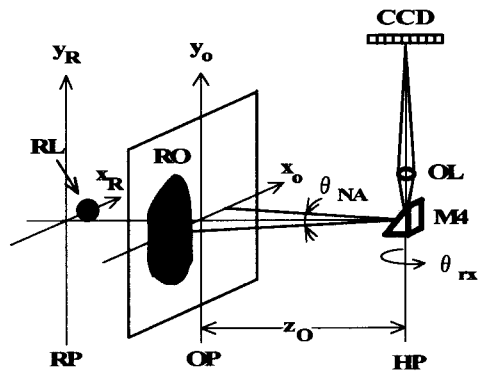
物体光波はビームスプリッタを透過してミラーM3に照射され、対物レンズ L2 によって発散球面波にしたあと、被写体に照射される。物体面 OP に置かれた被写体 RO からの散乱波は、物体面から距離  $z_0=505\text{mm}$  のホログラム面 HP へ照射される。

参照光波は BS で反射してミラーM2に照射され、対物

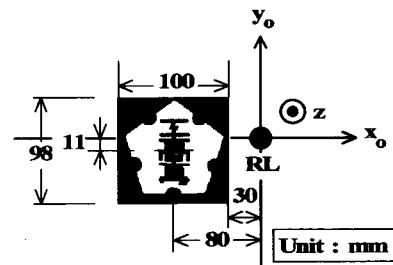
レンズ L1 により参照光源面 RP で参照点光源 RL をつくる。参照点光源からの発散球面波は参照光源面から距離  $z_R=530\text{mm}$  のホログラム面 HP へ照射される。



(a) Optical arrangement



(b) Optical arrangement for magnified hologram recording



(c) Object plane

Fig.4 Recording process

ホログラム面 HP では、物体光波と参照光波によって、干渉縞が形成される。これらの光波は Fig.4(b)にあるように、立ち上げミラーM4を用いて、顕微鏡対物レンズ OL へ入射させた。立ち上げミラーは、再生像の位置を調整するために、X-Z 面内で回転できるようにした。図(b)のホログラム面から対物レンズ OL の両端が張る角度は対物レンズで決まる視野角  $\theta_{NA}$  である。この立ち上げミラーM4の回転角度をうまく調整すれば、ホログラムによる視野の範囲と NA による視野の範囲を調節することができる。

拡大ホログラムの撮影にはデジタルカメラ(Nikon社製 COOLPIX950)を使用した。このカメラは顕微鏡直筒アダプタを用いて顕微鏡上部に取り付けられた。記録

画素数は  $1600 \times 1200$  pixel, 画素サイズは  $4 \mu\text{m}$  程度であり, 非圧縮 Tiff 形式での保存機能を持っている。そこで, これらの機能を使って拡大ホログラムを保存した。

X-Y 平面上の物体を Fig.4(c)に示す。被写体には本校校章( $100 \times 98\text{mm}$ )を使用した。

再生段階ではコンピュータ(Windows2000,Pentium III,1GHz)を使用した。計算手順を Fig.5 に示す。(20)式

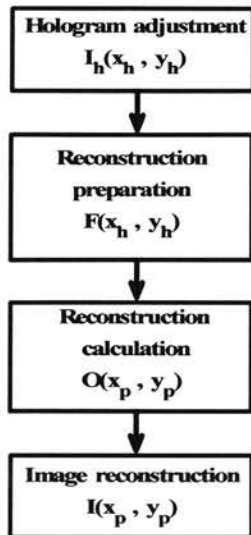


Fig.5 Reconstruction process

のホログラム画素数調整では, ホログラムのサンプリング数を  $2048 \times 2048$  にした。このことにより, (7)式のホログラムサイズは,  $S_x/N_x, S_y/N_y$  となる。今の場合, 縦 1.28 倍, 横 1.71 倍である。記録段階でのデータがないホログラムの周囲には撮像素子で得られたデータ全体の平均濃度を与えた。

再生計算では, (12)式を(11)式に代入して, FFT を使って計算した。像表示には, (13)式を計算後, グラフィックソフト(サイバネット社製 MATLAB)を用いた。再生段階の計算時間は, 1 枚のホログラムにつき, 5 分だった。

4.2.実験結果

[a]対物レンズ(5倍)

ここでは, 拡大ホログラムの記録と再生, 立ち上げミラーの調整による再生結果を示す。

Fig.4(b)の対物レンズOLに  $M=5, NA=0.13$  のものを取り付けた。このとき, 撮像素子に記録可能な大きさは, ホログラム面上で  $950 \times 730 \mu\text{m}$  であった。Fig.4 の記録光学系から得られた拡大ホログラムの一部分を Fig.6 に示す。このホログラムは(1)式に対応し, デジタル記録されている。そこで, Fig.6 のようなホログラムをコンピュータに取り込み, 再生距離  $z_p=505\text{mm}$  を与えて再生像を出力した。

再生結果を Fig.7 に示す。Figure 7(a)は, 記録時に立ち上げミラーの角度を調整していない場合であり, 再生像が NA によりケラレている。(b)は立ち上げミラーを回転させて, NA で決まる角度内に物体が入るように調整して記録したあと, 再生を行ったときの結果である。NA

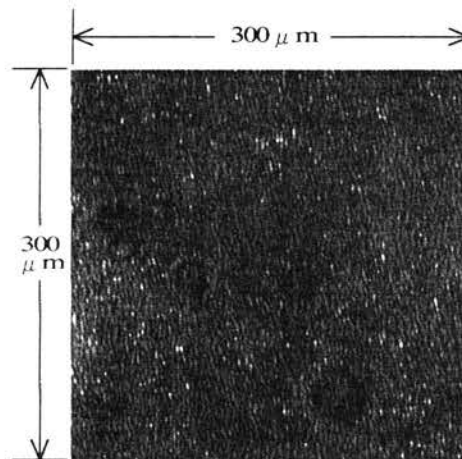
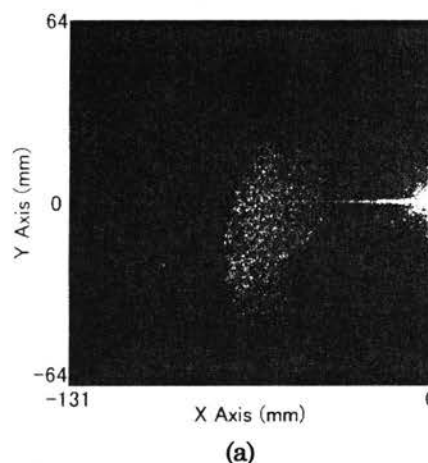
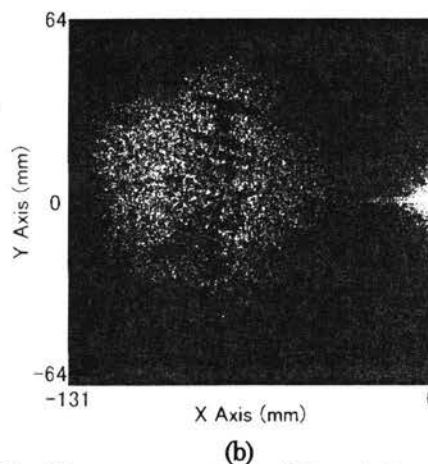


Fig.6 Example of hologram (5 ×)



(a)



(b)

Fig.7 Image reconstructed from holograms with an objective lens (5 ×)  
(a)Unadjusted record; (b)Adjusted record

で決まる視野角  $\theta_{NA}$  は, (15)式より  $\theta_{NA}=15^\circ$  となる。この角度で決まる物体サイズは, 距離  $z_0=505\text{mm}$  の物体面上において, 直径  $135\text{mm}$  の円内のものとなる。記録時の物体面上には, Fig.4(c)のように被写体が配置されており, 参照光源から被写体の遠方端までは  $130\text{mm}$  であった。また, 再生距離  $z_R$  は, 記録段階の距離  $z_0$  と同じ距離で行ったので, NA で決まる被写体全体が再生できた。

### [b]対物レンズ(20倍)

ここでは, 高倍率にすることによって, 再生面サイズが広がることを示す。

Fig.4(b)の対物レンズ OL に  $M=20, NA=0.40$  のものを取り付けた。このとき, 撮像素子に記録可能な大きさは, ホログラム面上で  $235 \times 180 \mu\text{m}$  であった。NA による視野角  $\theta_{NA}$  は(15)式より  $47^\circ$  になるので, 再生面サイズは 5 倍の対物レンズに対して 3 倍程度広がる。

記録時の物体面上には, Fig.4(c)の校章の左横に直径  $80\text{mm}$  の円形物体を置いた。このことにより, 参照光源

から被写体の遠方端までは  $210\text{mm}$  となった。以上の条件からホログラムを作成して, 再生を行った。

再生距離を  $z_p=505\text{mm}$  としたときの再生結果を Fig.8(a)に示す。Figure 8(b)は, 図(a)の表示サイズと同等になるように, 5 倍対物レンズから得られた再生図の大きさを調節して再掲した。図(a)の A には円形物体の一部, B には校章が再生されている。この結果から  $130\text{mm}$  以上の物体が再生できており, 5 倍の対物レンズよりも再生サイズが広がった。しかし, 画質は 5 倍の対物レンズのものよりも悪くなった。このことは, 図(b)では校章が識別可能だが, 図(a)では中心部の「工高専」文字が読めない点, 文字周囲の絵画部分も識別しにくい点から判断できる。

## 5.考察

### 5.1.再生像の画質

再生像の画質は記録時のスペックルサイズとホログラムサイズに関係し, 記録時のホログラムサイズが大きいほど良くなる。

ホログラム面とスペックルサイズの関係を図.9 に示

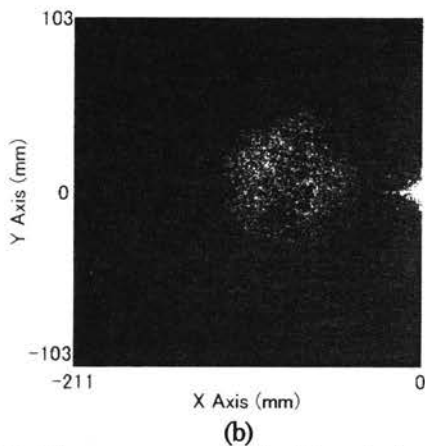
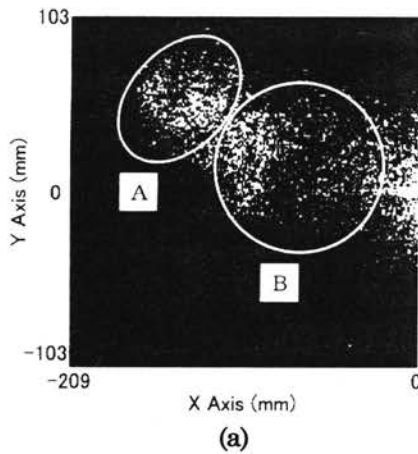


Fig.8 Images reconstructed from holograms recorded through objectives with different magnification.

(a)  $20\times, NA=0.40, \theta_{rx}=22^\circ$   
(b)  $5\times, NA=0.13, \theta_{rx}=7^\circ$

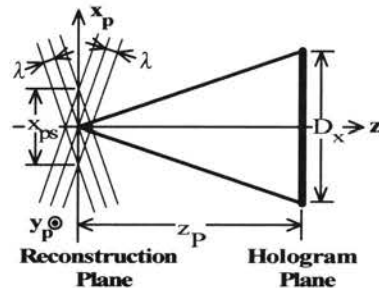


Fig.9 Principle of speckle formation

す。ホログラム面を開口面として考えれば, 開口面から再生面への光波は回折現象として捉えることができ, 0 次回折光強度分布の幅が最小分解能となる。したがって, スペックルの平均サイズ  $x_{ps} \times y_{ps}$  は, 記録時のホログラムの大きさを  $D_x \times D_y$ , ホログラム面から再生面までの距離を  $z_p$  とすれば,

$$x_{ps} = 2 \frac{\lambda z_p}{D_x}, \quad y_{ps} = 2 \frac{\lambda z_p}{D_y} \quad \dots\dots(21)$$

から求めることができる。ここでのホログラムサイズは実際に物体波が記録されている部分の大きさであり, 画素数  $N_x N_y$  で決まる。(21)式より, スペックルサイズは記録時のホログラムサイズに逆比例し, ホログラム面から再生面までの距離に比例している。(21)式を使って再生像のスペックルサイズを求めると, Table 1 のようになった。

実物体上の文字の太さは Fig.10 のようになっていた。

「工高専」の「専」の中心部が最も細かくなっており、白の部分が0.5mm程度しかない。最も太い部分は「工」であり、黒の部分が3mm程度であった。

Table1 Comparison for speckle size

Objective lens Spec.	NA	0.13	0.40
	Magnification	5×	20×
Hologram Size [mm]		0.950×0.730	0.235×0.180
Speckle Size [mm]		0.673×0.876	2.72 ×3.55

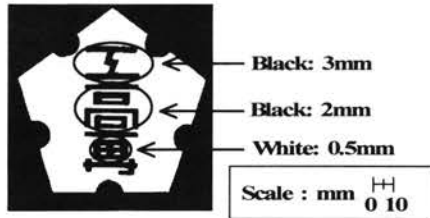


Fig.10 Thickness of letter lines of the object

実物体上の文字の太さとスペックルサイズの関係と比較すれば、「専」は何れの対物レンズを使ってもはっきりした像にはならない。実際に、Fig.7(b)の再生結果からも像がはっきりしていないことが分かる。

20倍の対物レンズではTable1よりスペックルサイズが3mm以上となっているので、文字部分は明確に再現されない。Figure 8にあるように、図(a)における画質劣化はスペックルサイズにある。これは、図(b)との相違点から記録時のホログラムサイズに原因があり、5倍の対物レンズと比較して、ホログラムサイズが1/4に縮小している。

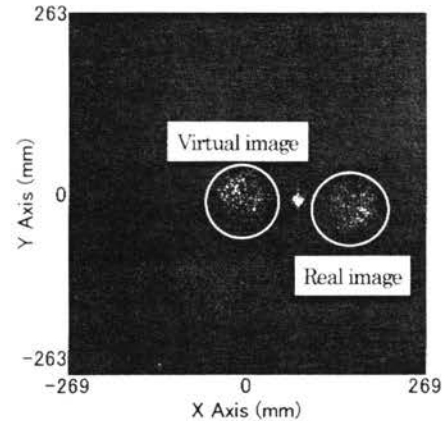
以上のことから、ホログラムサイズとスペックルサイズは逆比例の関係にあり、ホログラムサイズが大きいほど、より細かい部分まで再生できる。

5.2.参照点光源の位置

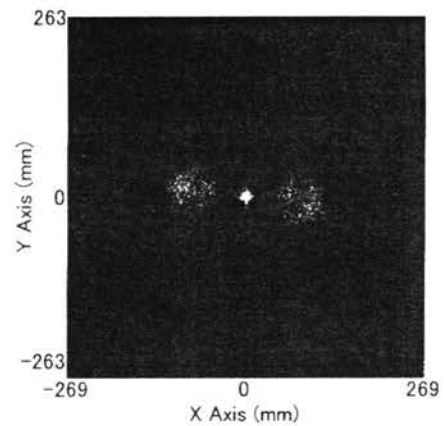
ここでは、再生時の参照点光源の位置について、記録時のそれとは異なる位置で再生したときの結果を示す。再生面上の振幅分布は、(11)式から求められる。この式において、物体の再生に関係する項は $m_x, m_y$ の係数を乗じている部分であり、 $Q_x, Q_y$ の係数が掛かる項は(10)式で表されるように再生波の空間的な位置変化をもたらす。

Figure 11は、参照点光源の位置を変更して再生計算を行い、再生像の位置の変化を示した。再生面には直接像と共役像、0次回折光が得られている。図(a)は参照点光源の位置を変更して再生計算を行った結果であり、(b)は記録時と同じ参照点光源の位置で再生計算を行った。(a)では再生面中央に直接像が得られているが、 $Q_x, Q_y$ の値を変化させれば、再生像の位置が、0次回折光の位置と共に

上下左右に移動していることが分かる。



(a)



(b)

Fig.11 Reconstructed images for point reference source positions ( $Q_x, Q_y$ ) (a)Altered positions; (b)Unaltered positions

6.むすび

本論文では、ホログラムを拡大してから撮像素子で記録する方法を提案し、このことを実験で確かめた。フレネルデジタルホログラフィにおける撮影可能サイズは撮像素子の画素サイズに依存するため、現存の撮像素子ではホログラム面から再生面を見たときの視野角で9°程度になる。Off-axis ホログラムの場合は再生面を半分以下にする必要があるため、実際に再生可能な視野角は4.5°に限られる。このような問題に対して、対物レンズを使ってホログラム面を拡大記録した。このことにより、再生可能な視野角は15°に広がった。

しかし、対物レンズ NA の制限により、再生面は有効に利用することができなかった。Off-axis ホログラムの場合に、有効に利用できる条件は、対物レンズの NA で決まる視野角が画像センサで決まる視野角の半分になる



ことである。使用した画像センサで、5倍の対物レンズを用いた場合には $5\times, 0.19\text{NA}$ のものを利用すればよい。つまり、NAを高めることで再生面を有効に利用することができる。また、高倍率の対物レンズを使用したときは、ホログラムサイズが縮小されるので、再生時の画質に大きく影響する。したがって、低倍率高NAレンズの開発が望まれる。

### 謝辞

本論文は、平成13年度本校奨励研究費による研究成果をまとめたものである。研究の遂行上でお世話になった大阪府立大学機械システム工学科計測工学研究室の皆様へ感謝致します。また、奨励研究費の手続き等でお世話になった本校の関係教職員に対して、この場をお借りして御礼申し上げます。最後に、本研究を進めるにあたって、研究活動に携わった辻本隆司君(平成13年度卒業)に対して、お礼の言葉を申し上げます。

### 参考文献

- 1) J.W.Goodman : *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed. (McGraw-Hill, New York, 1996) pp.295-309.
- 2) A.W.Lohmann, D.P.Paris : "Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer", *Appl. Opt.*, **6** (1967) 1739-1748.
- 3) M.Francon : *Holography*, (Academic Press, New York, 1974) pp.100-102.
- 4) 村田和美 : ホログラフィー入門, (朝倉書店, 東京, 1976) pp.92-100.
- 5) 本間秀明, 武田光夫ほか : "限られた CCD 分解能で記録可能な物体サイズを拡大するためのデジタルホログラフィー光学系", *Optics Japan 2000 in 北見 講演予稿集*, (応用物理学会分科会 日本光学会, 2000) pp.201-202.
- 6) U.Schnars, W.Juptner : "Direct recording of the holograms by a CCD target and numerical reconstruction", *Appl. Opt.*, **33** (1994) 179-181.
- 7) I.Yamaguchi, T.Zhang : "Phase-shifting digital holography", *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1268-1270.