

位相シフトデジタルホログラフィーにおけるプラスチック光ファイバーイメージガイドを用いたホログラム伝送の検討

横田 正幸・河尻 直幸

島根大学総合理工学部電子制御システム工学科 〒690-8504 松江市西川津町 1060

Study of Transmission of Holograms Using a Plastic Optical Fiber Image Guide in Phase-Shifting Digital Holography

Masayuki YOKOTA and Naoyuki KAWASHIRI

Department of Electronic and Control Systems Engineering, Faculty of Science and Engineering, Shimane University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue 690-8504

A plastic optical fiber (POF) image guide is used to transmit holograms in phase-shifting digital holography. To evaluate the resolution of reconstructed images in the system, the modulation transfer function (MTF) of the reconstructed images is investigated using a USAF test target as an object. The transmission of holograms is simulated prior to the experimental investigation and then the calculated results are compared with the experimental one. The calculated results well explain the variation of MTF against spatial frequency of the patterns in the USAF test target. The possibility of a hologram transmission with a POF image guide is discussed by comparing the both results.

Key words: plastic optical fiber (POF) image guide, phase shifting digital holography

1. はじめに

デジタルホログラフィーでは、物体からの透過または反射光と別に設けた参照光との干渉縞（ホログラム）を CCD (charge coupled device) カメラ等により撮影し、記録したホログラムを計算機で処理することにより、物体光の複素振幅分布を数値的に再生することができる¹⁻³⁾。このような光波の記録・再生技術を利用して、得られた数値的な複素振幅を用いることにより、二波長法による形状計測⁴⁻⁷⁾や位相の変化を利用した変形計測⁸⁻¹⁰⁾などの研究が行われており、非接触で高精度な計測が可能である。デジタルホログラフィーを用いた計測では、物体光を記録したホログラムが必要不可欠である。しかし、ホログラムを記録するカメラを挿入できないような物体内部の測定では、カメラの死角が多く存在し、これにより測定範囲が限定される¹¹⁾。

デジタルホログラフィー応用計測において、上記の制限を克服し、特に狭い場所等での形状計測等のために、エンドプローブ型のセンサーヘッドを用いる方法がいくつか

提案されている¹¹⁻¹⁷⁾。しかし、小型の CCD を搭載したセンサーヘッドを物体内部に挿入してホログラムを記録する方法^{11,12)}では、センサーヘッドの大きさは使用する CCD の寸法に依存し、必要な光学系を含めることを考えると、ヘッド自体の柔軟性がある程度制限されてしまう。これ以外では、ホログラムやレーザー光により照らされた物体表面の像を石英イメージガイド¹⁸⁾により伝送する手法も提案されている¹³⁻¹⁷⁾。これらの方法では、石英イメージガイドの一端をセンサーヘッドとして物体内部に挿入し、イメージガイド出射端からのホログラムや物体像を CCD で受光するため、CCD から死角にある物体等の測定を行うことができる。石英イメージガイドは、一般的に数万本以上のコアファイバーから構成されるため高解像度であり、また低損失という大きな利点を有している。しかし、柔軟性に乏しいため¹⁸⁾、狭い場所や曲管等での使用には対応が難しくなる。

そこで、比較的柔軟なエンドプローブを開発することを目的として、取り扱いが容易な POF (plastic optical fiber)

E-mail: yokota@ecs.shimane-u.ac.jp

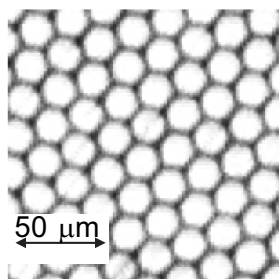


Fig. 1 Microscopic image of cross-section of a plastic optical fiber (POF) image guide. A magnification factor of the microscope is ~ 700 .

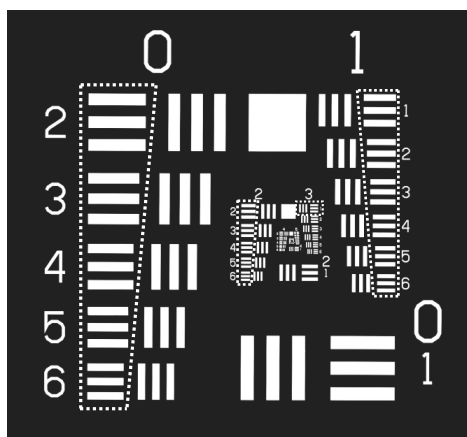


Fig. 2 The pattern of the USAF Test Target used in the experiment. The line pairs ($f_s = 1.12\text{--}8.00$ lp/mm) in the dotted lines are analyzed.

イメージガイドによる位相シフトホログラム伝送を試みた²⁾。POFイメージガイドは石英製に比べて柔軟性が高いが、Fig. 1に示す顕微鏡によるPOF端面の拡大写真からもわかるように、コアファイバーのコア径が大きくコア密度も劣るため、空間周波数が高い成分を含むホログラムの伝送は難しくなる。位相シフトデジタルホログラフィーではホログラムの同軸記録が可能であり、干渉縞を荒くしてその空間周波数を低くすることができるため、コア径が $10\ \mu\text{m}$ 以上と大きくコア密度が低いPOFイメージガイドに適していると考えられる。

本研究では、最初にPOFイメージガイドの開口径やコア径が再生像に与える影響を調べるために、POFイメージガイドを正方形の微小開口からなる円形開口として近似した簡単なモデルを使い、ホログラム伝送をシミュレーションした。この数値計算では、記録対象にFig. 2に示すUSAFテストターゲット（1951 United States Air Force Resolution Test Target）のネガパターンを使用し、平行光で照明した際の透過光を物体光としてこれを記録した

場合を想定した。これより、USAFテストターゲット中のGroup 0 Element 2（以後はG0E2と略して表記する）からGroup 3 Element 1（同様にG3E1と略す）までの各パターンに対する再生強度画像のMTF（modulation transfer function）を計算することで、再生像の分解能などを評価した。

次に、USAFテストターゲットのパターンからの透過光を物体光とし、上記のシミュレーションに近い条件でPOFイメージガイドによるホログラム伝送の実験を行い、伝送されたホログラムからの再生像の画質を上記と同様にMTFを計算して評価した。USAFテストターゲット中のG0E2からG3E1までパターンの位置を変えながら、再生された強度画像のMTFを求めることにより、各パターンに対する再生像の画質を調べた。最後に、シミュレーション結果と実験結果を比較し、位相シフトデジタルホログラフィーにおいて、POFイメージガイドによるホログラム伝送の計測等への適用可能性について検討を行った。

2. ホログラム記録と像再生

レーザーからの出射光を、物体照明光として物体に照射し物体表面で反射する光（物体光）と、ピエゾ鏡を介してCCDに入射する光（参照光）に分ける。半透鏡を介して物体光と参照光をほぼ同じ方向からCCDに入射させ、干渉により生成されるホログラムが記録される。このときのCCD面におけるホログラム強度 $I(x, y; \delta)$ は次のようになる¹⁾。

$$\begin{aligned} I(x, y; \delta) &= |U_0(x, y) + U_R(x, y) \exp(j\delta)|^2 \\ &= |U_0|^2 + |U_R|^2 + U_0 U_R^* \exp(-j\delta) \\ &\quad + U_0^* U_R \exp(j\delta) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $U_0(x, y)$ 、 $U_R(x, y) \exp(j\delta)$ は物体光と参照光の複素振幅分布、 δ はPZT（piezoelectric transducer）鏡等により与えられる参照光の位相シフト量であり、 (x, y) はCCD面上の座標である。 $\delta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ に対する4枚のホログラムから、CCD面上における物体光の複素振幅分布は次式から得られる²⁾。

$$\begin{aligned} U_0(x, y) &= \frac{1}{4U_R^*(x, y)} [I(x, y; 0) - I(x, y; \pi) \\ &\quad + j\{I(x, y; \pi/2) - I(x, y; 3\pi/2)\}] \end{aligned} \quad (2)$$

式（2）から得られた物体光の複素振幅を使って、そのフレネル回折積分を計算することにより、CCD面からZの距離にある平面上における再生像の複素振幅分布が求められる。フレネル回折積分の計算には、次式のフーリエ変換を用いた方法（1-FFT法）

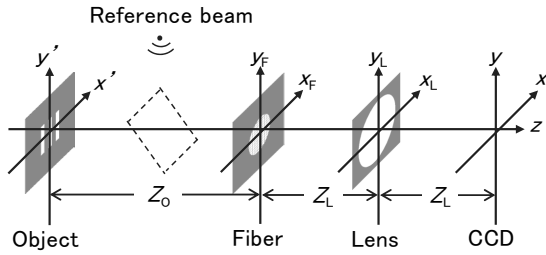


Fig. 3 Coordinate system for the simulation.

$$U_I(X, Y, Z) = A \exp\left\{\frac{j\pi}{\lambda Z}(X^2 + Y^2)\right\} \iint U_0(x, y) \exp\left\{\frac{j\pi}{\lambda Z}(x^2 + y^2)\right\} \exp\left\{-\frac{j2\pi}{\lambda Z}(xX + yY)\right\} dx dy \quad (3)$$

や、コンボリューションを用いた方法¹⁶⁾(2-FFT法)がよく利用される。ここで、 λ は波長、 $A = \exp(j2\pi Z/\lambda)$ である。また、1-FFT法を用いた場合は、計算前の画素数を $N \times N$ 、横および縦方向の画素ピッチを P_x, P_y とすると、計算後のサンプル間隔は $(\lambda Z/NP_x, \lambda Z/NP_y)$ となる。さらにこれらの計算方法は伝搬距離 Z により使い分けの必要がある。 Z が大きいときは1-FFT法、小さいときは2-FFT法が適しており、その境界は $P_x = P_y = P$ とすると、次のようになる^{19, 20)}。

$$Z_c = \frac{NP^2}{\lambda} \quad (4)$$

また、フレネル近似を適用できないほど Z が小さい場合は、光波の伝搬を平面波の伝搬に分解して角スペクトル法を用いて計算することが可能である²¹⁾。後で述べるシミュレーションでは、光波の伝搬を計算する場合に、伝搬距離によりサンプル間隔が不変である2-FFT法と角スペクトル法を用いた。この2つの方法は、計算する際の伝搬距離 Z の大きさに応じて使い分けた。

3. 簡単なモデルを用いた数値計算によるホログラム伝送

実験の前に、POFイメージガイドによるホログラム伝送が再生像に与える影響を調べるため、POFイメージガイドを正方形の微小開口からなる円形開口として近似した簡単なモデルを用いて数値計算を行った。また、この計算においては各コアファイバーの開口による影響のみを考慮し、コアファイバー導波中における伝搬モードや隣接するコアファイバー間のクロストーク²²⁾などは考慮していない。数値計算における座標系をFig. 3に示す。後で行う実

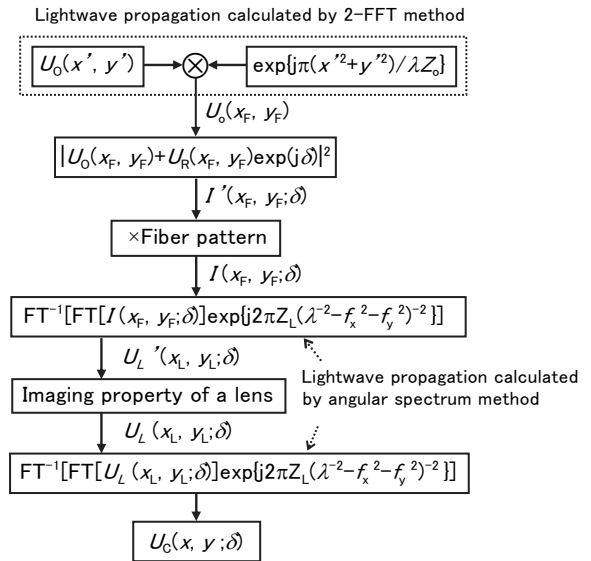


Fig. 4 Calculation procedure for the simulation. \otimes , convolution; FT, Fourier transform; FT^{-1} , inverse Fourier transform.

験条件と合わせるために、物体から入射面までの距離 $Z_0 = 150$ mm、物体面からレンズ、およびレンズから像面までの距離 $Z_L = 2f = 60$ mmとした。また、光源の波長 $\lambda = 632.8$ nmとし、物体照明光と参照光とともに平面波とした。

数値計算の手順をFig. 4に示す。Fig. 3の物体面(テストターゲット)における透過率分布 $U_0(x', y')$ からの回折光と参照光との干渉縞を計算し、イメージガイド入射面でのホログラム強度分布 $I'(x_F, y_F; \delta)$ を求める。ホログラム強度分布を求める際に、伝搬計算によりサンプル間隔が不変な2-FFT法を用いて $U_0(x', y')$ からの回折光の複素振幅分布を計算した。 $U_0(x', y')$ はテストターゲットのパターンを模してFig. 5(a)のような開口を想定し、大きさ 1000×1000 画素、1画素の大きさ $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 、スリット開口部分の透過率を1、他の部分の透過率を0とした。この場合、スリットは幅 w 、縦 $5w$ 、スリット間隔は w である。実効倍率が約700倍の顕微鏡を用いて観察したPOFイメージガイド端面の画像(Fig. 1)から、実験で使用したコアファイバーの直径(コア直径)は約 $20 \mu\text{m}$ であることがわかった。Fig. 1にみられるようなイメージガイド内に配置されたコアファイバーのパターンを再現するのは難しいため、コアファイバーの直径が $20 \mu\text{m}$ であることを考慮してこれを一辺 $20 \mu\text{m}$ の正方形(2×2 画素)で置き換えた。すなわち $I'(x_F, y_F; \delta)$ において、隣接した4画素(一辺 $20 \mu\text{m}$)の強度の平均値が1つのコアファイバーで伝送されると想定した。最後に、Fig. 5(b)に示すようなPOFイメージガイド端面の大きさを考慮した透過率分布を掛ける

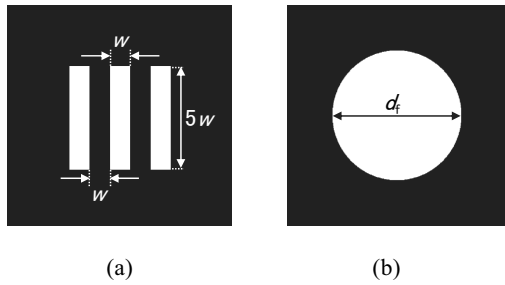


Fig. 5 Distribution of transmittance of (a) aperture on object plane and (b) input surface of the image guide.

ことで、イメージガイドで伝送されるホログラム強度分布 $I(x_F, y_F; \delta)$ を得る。Fig. 5 (b) の透過率分布は、直径 d_f の円内が透過率 1、円外の部分が透過率 0 である。

また、Fig. 4 に示す計算過程のうち、レンズによる結像特性部分では、イメージガイド出射端面からの回折光の複素振幅分布 $U_L'(x_L, y_L; \delta)$ に対して、以下の式で表される位相変換関数²³⁾ $\Psi(x_L, y_L)$ と窓関数 $W(x_L, y_L)$ を掛ける。

$$\Psi(x_L, y_L) = \exp\left(-jk \frac{x_L^2 + y_L^2}{2f_L}\right) \quad (7)$$

$$W(x_L, y_L) = \begin{cases} 1 & x_L^2 + y_L^2 \leq r^2 \\ 0 & x_L^2 + y_L^2 > r^2 \end{cases} \quad (8)$$

計算された複素振幅分布 $U_L'(x_L, y_L; \delta)$ の CCD 面への伝搬を計算し、レンズにより CCD 面上に結像された複素振幅分布 $U_C(x, y; \delta)$ を求めた。ここで、レンズの焦点距離 $f = 30$ mm、有効口径 $r = 30$ mm とした。レンズ前後における回折計算の場合、伝搬距離が 60 mm と短いため、角スペクトル法を用いて計算を行った。そして、最終的に得られる $U_C(x, y; \delta)$ の強度分布のうち、中心部分の 512×512 画素を CCD により記録されるホログラム強度 $I(x, y; \delta)$ として、このホログラム強度から、実験で使用する再生法と同じ 1-FFT 法を用いて再生像を得た。

4. POF イメージガイドによるホログラム伝送の実験

POF イメージガイドにより伝送されたホログラムの再生像の画質を調べるため、数値計算の場合と同様に、記録対象にネガパターンの USAF テストターゲットを用いた。実験で使用した POF イメージガイド (旭化成イーマテリアルズ (株), MCI-2000-24) は、画像伝送部分の開口径 (ガイド直径) 2.0 mm、コアファイバー数 7,400、NA 0.5、長さ 499 mm であった。Fig. 6 に実験光学系を示す。光源に波長 $\lambda = 632.8$ nm、出力 5 mW の He-Ne レーザーを用い、ホログラム記録にはモノクロ CCD カメラ (NDTC TI-400A)、画素数 512×512 、1 画素の大きさ $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ 、階調度 8 bit のものを用いた。POF イメージガイドで

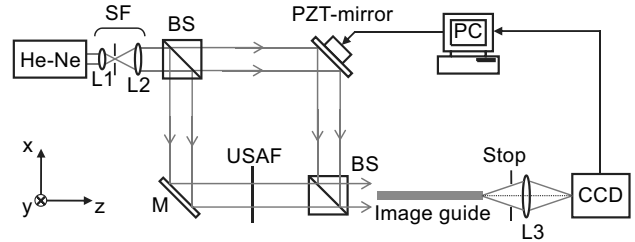


Fig. 6 Experimental setup. SF, spatial filter; BS, beam splitter; M, mirror; PC, personal computer; L, lens.

Table 1 Specification of simulated plastic optical fiber (POF) image guides.

	IF 2.0	IF 1.5
Diameter of fiber (mm)	2.0	1.5
Diameter of core (μm)	20	20

伝送したホログラムの再生像の画質を調べるために、Fig. 2 に示す USAF テストターゲットを平行光で照明し、各パターンからの透過回折光を物体光とした。PZT 鏡 (Physik Instrumente P-753.12C) により位相シフトされた参照光とターゲットからの物体光を同一方向より POF イメージガイド端面に入射させ、入射面に生成される干渉縞パターンを伝送した。このとき、ファイバーガイド入射面から USAF ターゲットまでの距離 (記録距離) は 150 mm とした。また、CCD 素子の前にはカバーガラスがありイメージガイド出射端を CCD 素子直前に配置できないため、伝送されたホログラムを焦点距離 $f = 30$ mm の凸レンズ (L3) を用いて CCD 撮像面に等倍結像して記録した。1 回の測定で $\pi/2$ ラジアンずつ 3 回位相シフトされた 4 枚の位相シフトホログラムを記録した。USAF テストターゲット面は、POF イメージガイド入射面に平行になるように調整し、その記録位置がイメージガイド入射面の正面に位置するように配置した。測定では、Fig. 2 のパターンのうち、破線で囲った Group 0 Element 2 (G0E2) から Group 3 Element 0 (G3E0) (空間周波数 $f_s = 1.12 \sim 8.00$ lp/mm) までの部分の透過光を物体光として記録した。

5. 結果と考察

5.1 シミュレーションによる計算結果

数値計算では Table 1 に示す 2 種類の POF イメージガイドを想定し、実験と同様に G0E2 から G3E6 までのパターンを記録対象とした。実験と比較するために、コアファイバーを一辺 $20 \mu\text{m}$ の正方形として、イメージガイドの直径を実験と同じ 2.0 mm とした場合を IF 2.0 とし、それより小さい直径 1.5 mm とした場合を IF 1.5 とし、この 2 つ

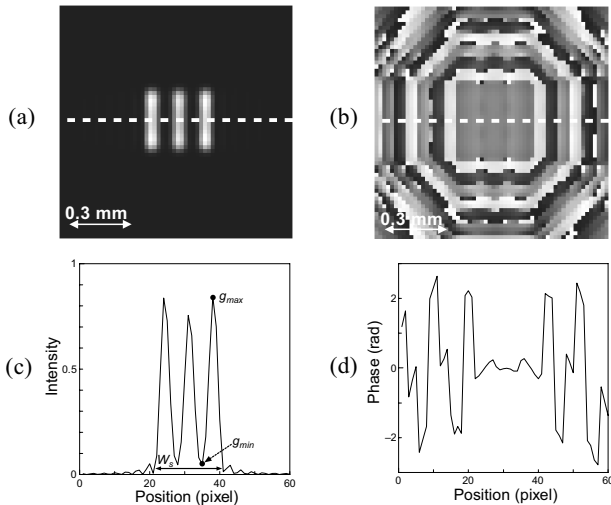


Fig. 7 Reconstructed images of holograms transmitted by IF 2.0: (a) intensity and (b) phase images (60×60 pixels), (c) and (d) are the intensity distribution along the dashed line in (a) and (b), respectively.

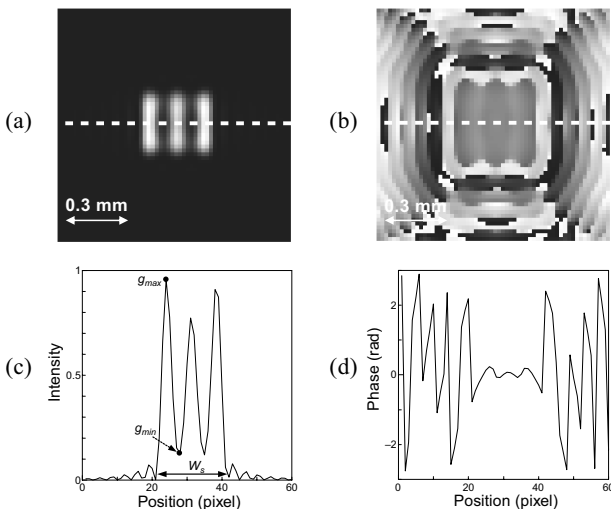


Fig. 8 Reconstructed images of holograms transmitted by IF 1.5. (a) intensity and (b) phase images (60×60 pixels), (c) and (d) are the intensity distribution along the dashed line in (a) and (b), respectively.

の条件について計算した。数値計算ではコアファイバーの開口を円形ではなく正方形で表現しているため、等価的なコアファイバー数は、IF 2.0の場合でおよそ7800本、IF 1.5の場合で4400本程度と見積られる。設定したIF 2.0、IF 1.5の各条件において、記録対象にG3E1のパターンを想定して計算した場合の再生像をFig. 7, Fig. 8に示す。この場合のホログラム記録および再生距離を150 mmとしている。

数値計算では、物体面における1画素を $10 \mu\text{m}$ として構成しているため、G3E0のパターンを想定した開口の空間

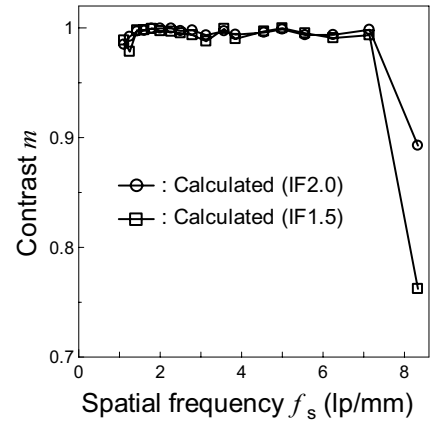


Fig. 9 Modulation transfer function (MTF) curves for calculated results using plastic optical fiber (POF) models of IF 1.5 and IF 2.0.

周波数は $f_s = 8.33 \text{ lp/mm}$ ($w = 60 \mu\text{m}$)である。Fig. 7とFig. 8の結果を比較すると、ともに再生像はぼけているが、Fig. 7すなわちIF 2.0のほうが鮮明である。これらを定量的に比較するため、次式から強度画像のコントラスト(変調伝達関数 MTF) m を計算した²³⁾。

$$m = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{g_{\max} + g_{\min}} \quad (9)$$

式(9)を用いて、IF 2.0、IF 1.5の各条件に対して $f_s = 1.11 \sim 8.33 \text{ lp/mm}$ の開口パターンを想定した各計算結果から m を求めた。結果をFig. 9に示す。

Fig. 9においてIF 2.0とIF 1.5の結果を比べると、 $f_s = 8.33 \text{ lp/mm}$ における m 値はIF 2.0が0.89、IF 1.5が0.76となっており、それ以下の空間周波数では有意な差はみられない。Fig. 7(c)、Fig. 8(c)における再生像強度の断面より得られたスリット全体の幅 $w_s = 5w$ は、IF 2.0が $389 \mu\text{m}$ 、IF 1.5が $408 \mu\text{m}$ であった。このときの記録対象のスリット全体の幅 $5w$ は $310 \mu\text{m}$ であることを考慮すると、それぞれ約1.25倍、約1.32倍程度に広がっており、IF 1.5のほうが大きい。条件IF 2.0およびIF 1.5におけるホログラムの大きさ(開口)を考えた場合、再生面におけるエアリーディスクの半径は、ホログラム(開口)の直径を D として $1.22\lambda Z_0/D$ で与えられる²⁴⁻²⁶⁾。この逆数が再生像の分解能を決めるとすると、 D の値、すなわちホログラムが大きいほうが再生像の分解能が高い。IF 2.0の場合では $D = 2.0 \text{ mm}$ なので、エアリーディスクの半径の逆数は $17.3 (\text{mm}^{-1})$ 程度、IF 1.5では $D = 1.5 \text{ mm}$ であるので $13.0 (\text{mm}^{-1})$ 程度と計算できる。しかし、実際にはホログラムの大きさだけでなく、各コアファイバーの開口数による出射光の広がりやコアファイバー間のクロストーク、マルチモード伝搬によるノイズ等²⁷⁾も含まれるため、実際の分

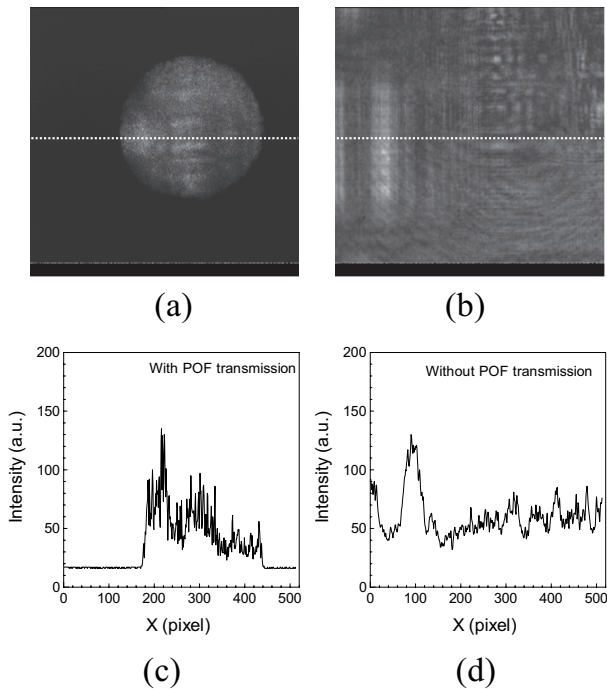


Fig. 10 Holograms obtained (a) with and (b) without plastic optical fiber (POF) transmission. (c) and (d) are the intensity distribution along the dashed line in (a) and (b), respectively.

解能は上記よりも小さくなる。

今回想定したモデルでは、開口数とコアファイバー数、重畳されるノイズ等の条件を考慮した計算ができないため、今後はより自由度の高いモデルを検討する必要があると思われる。しかし、計算結果では $IF\ 2.0$, $IF\ 1.5$ のどちらの場合も $f_s = 7.0\ \text{lp/mm}$ 程度までは再生像が良好なコントラストを保っているため、実際に POF によるホログラム伝送を実現できる可能性を示唆していると考えられる。

5.2 POF イメージガイドによるホログラム伝送の実験結果

数値計算において、POF によるホログラム伝送が可能であることがわかったため、実際に POF を用いてホログラム伝送の実験を行った。各記録対象に対して得られた4枚のホログラムから式(2)により CCD 面上での物体光複素振幅を求めた。ホログラムの再生距離としては、テストターゲットからイメージガイド入力面までの距離であるホログラム記録距離と等しい長さ 150 mm とした。このとき、再生距離は式(4)から得られる境界 Z_c より大きいため、1-FFT 法を用いて計算した。

最初に、POF を用いてホログラムを伝送した場合と CCD でホログラムを直接記録した場合を比較するために、G2E2 付近を対象としてレーザー光を照射してホログラム記録を行った。記録したホログラムとその断面を

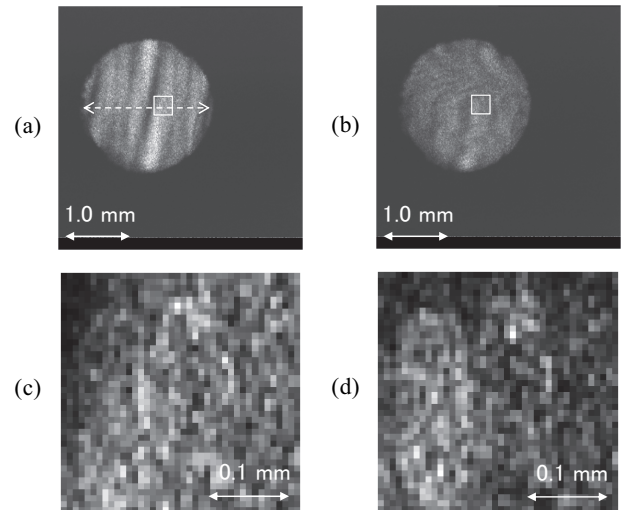


Fig. 11 Holograms of (a) Group 0 Element 2 and (b) Group 3 Element 1 transmitted by the plastic optical fiber (POF) image guide with 7400 fiber elements whose diameter is $20\ \mu\text{m}$ and a total diameter of 2.0 mm. (c) and (d) are magnified images of the square in (a) and (b), respectively.

Fig. 10 に示す。Fig. 10 の (a) と (b) を比較すると、POF の開口の大きさによりホログラムが切り取られていることが確認できる。また、破線におけるそれぞれの断面を Fig. 10 (c), (d) に示す。この断面を比べると、POF で伝送したホログラムである Fig. 10 (c) はノイズが多いことがわかる。この原因として、コアファイバー径が $20\ \mu\text{m}$ であるため、各コアファイバー内で伝送光がマルチモード伝搬することにより生じるスペckルノイズやコアファイバー間のクロストーク等が考えられる²⁷⁾。数値計算のモデルではこのようなノイズを考慮していないため、実験により得られる MTF 曲線は数値計算よりも劣化することが予想できる。

代表的な実験結果として、USAF ターゲットのうち、G0E2 ($f_s = 1.12\ \text{lp/mm}$) と G3E1 ($f_s = 8.00\ \text{lp/mm}$) それぞれに対してイメージガイド伝送後に CCD 面に結像されたホログラム画像を Fig. 11 に示す。また、記録された4枚の位相シフトホログラムから計算した再生像を Fig. 12 および Fig. 13 に示す。

Fig. 11 (a) 中に矢印で示されたホログラムの直径は、POF イメージガイドの直径と等しい 2.0 mm となっており、伝送されたホログラムがレンズで等倍結像されていることが確認できる。また Fig. 11 (a), (b) の四角で囲まれた部分について、それぞれの拡大図 Fig. 11 (c), (d) をみると、Fig. 10 (c) と同様にどちらもスペckル状のノイズがみられる。

再生像である Fig. 12 および Fig. 13 をみると、それぞれ

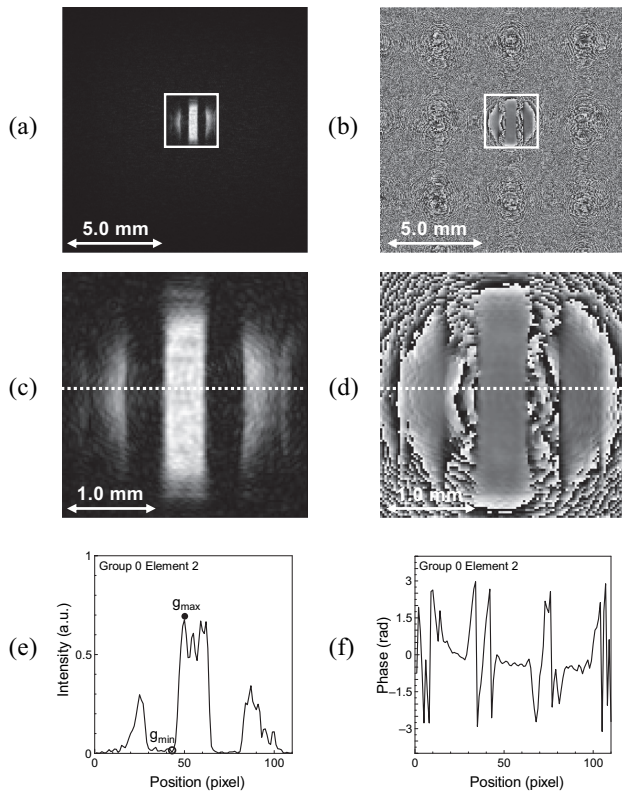


Fig. 12 Reconstructed images of holograms of Group 0 Element 2: (a) intensity and (b) phase images (512×512 pixels). (c) and (d) are magnified images of the square in (a) and (b), respectively. (e) and (f) are the intensity distribution along the dashed line in (c) and (d), respectively.

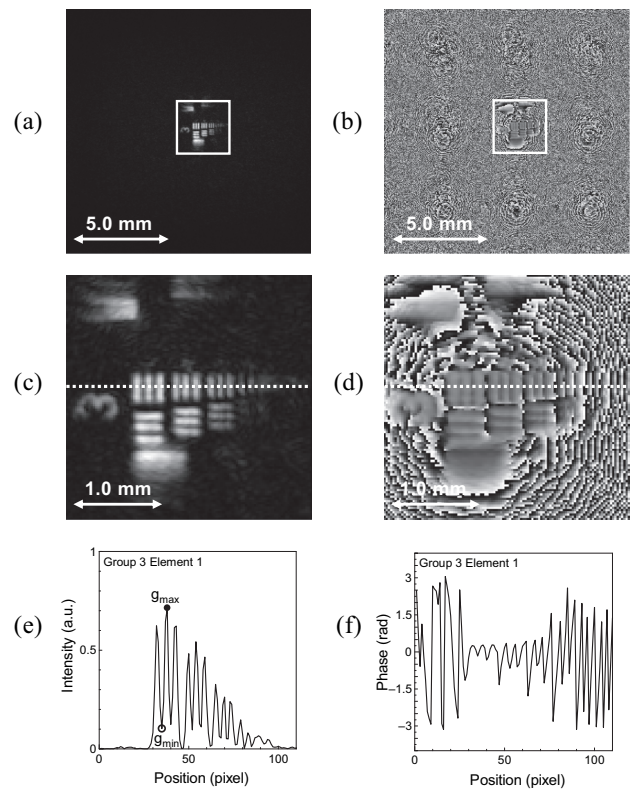


Fig. 13 Reconstructed images of holograms of Group 3 Element 1: (a) intensity and (b) phase images (512×512 pixels). (c) and (d) are magnified images of the square in (a) and (b), respectively. (e) and (f) are the intensity distribution along the dashed line in (c) and (d), respectively.

G0E2, G3E1のパターンが再生されていることがわかる。G0E2はパターン開口部の大きさがイメージガイド直径よりも大きいため、パターンの両端が切れている。また、G3E1は空間周波数が高いパターンであるために、前者に比べて再生像がぼけている。POFイメージガイドはコアファイバー径が20 μmと大きく、コア数が7400本と少ないが、それぞれのパターンを十分認識できる程度の再生像が得られている。これは、物体入射光が平行光による照明であることや、同軸配置で生成された空間周波数が比較的低いホログラムを伝送していることによると考えられる。これらの再生像の画質を定量的に評価するために、Fig. 12 (c), (d)における破線位置の断面をFig. 12 (e), (f)に示す。同様の処理をFig. 13についても行い、破線位置の断面をそれぞれFig. 13 (e), (f)に示す。これらの2つの強度分布を比較すると、記録対象の強度画像の最大値 g_{\max} とそれに隣接する最小値 g_{\min} の差はFig. 13 (e)のほうが小さくなっており、Fig. 13 (c)におけるパターンの境界が不鮮明であることがわかる。

各パターンの空間周波数に対して、それぞれの再生像よ

り得られた m の値の変化(MTF曲線)を数値計算の結果とともにFig. 14に示す。Fig. 14において、 $f_s \geq 5.04$ lp/mmで m 値が減少しており、再生像の分解能が低下している。テストパターンの空間周波数が5.04~8.00 lp/mmのとき、POFイメージガイド入射面にできる最小の干渉縞間隔²⁷⁾ d_h は、次式から76.1~82.1 μmと計算できる。

$$d_h = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha/2)} \quad (10)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\phi + 5w}{2Z}\right) \quad (11)$$

ここで、 ϕ はPOFイメージガイドの画像伝送部の直径である。Fig. 14で $f_s \geq 5.04$ lp/mmの範囲において、イメージガイド入射面にできる干渉縞間隔は計算から76.1~82.1 μmとなり、これはコアファイバー直径20 μmの4倍程度であるため、干渉縞に対するサンプリング定理は満足すると考えられる。しかし実際のホログラム伝送では、Fig. 10でも確認できるように、ホログラムにはノイズが重畳する。これには、コアファイバー間のクロストーク、各コアファイバーでのマルチモード伝送によるスペクルノイズ

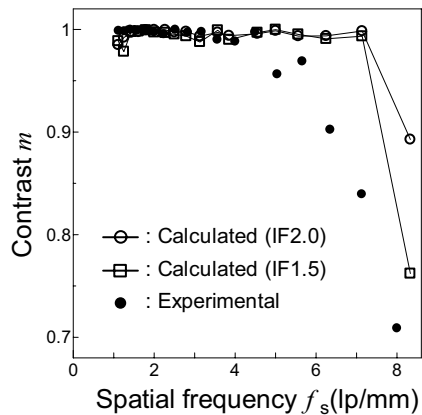


Fig. 14 Modulation transfer function (MTF) curves for calculated and experimental results.

等が考えられる。また、最終的にはPOFイメージガイドの開口径によって再生像の分解能は制限されるため、干渉縞に対するサンプリング定理のみでは再生像の分解能を考えることはできない。

数値計算との比較では、実験に使用したPOFイメージガイドと計算で用いたIF 2.0の条件は、コア数、コアファイバー径やガイド直径においてほぼ同じである。Fig. 14をみると、実験と数値計算の結果は同様な傾向を示すが、IF 2.0の計算結果に比べて、実験結果では m 値が減少し始める空間周波数の値が低くなっている。Fig. 11 (c), (d)の自己相関関数の半値全幅を求めて平均スペックル径を調べた結果、伝送されたホログラムにコアファイバー径の1.0~1.4倍程度のスペックル状ノイズが発生していることがわかった。このノイズによりホログラムが劣化し、再生像の画質が低下したものと考えられる。

6. ま と め

POFイメージガイドを用いたホログラム伝送のシミュレーションと実験を行った。記録対象にUSAFテストターゲットを用いて、その透過光を物体光としてイメージガイドの入射面にホログラムを生成し、その伝送について検討を行った。初めにコアファイバーの開口を正方形で近似して、コアファイバー間のクロストーク等を考慮しない簡単なPOFモデルを用いた数値計算によりPOFイメージガイドによるホログラム伝送特性を調べたところ、7.0 lp/mm程度のパターンまでは良好な再生像が得られることが示唆された。また、開口径等の条件を変えた数値計算結果との比較から、POFイメージガイドのホログラム伝送では、イメージガイドの開口径（ホログラムの大きさ）が像再生に大きな影響を与えることが推測された。

次に、実験によりPOFイメージガイドをほぼ直線的に配置して伝送されたホログラムから像再生が可能であることを確認した。USAFテストターゲットを用いて再生像のMTFを評価したところ、6.0 lp/mm程度のパターンまではコントラスト m が0.9以上の像が得られることがわかった。記録する物体が小さい場合は、同軸配置で記録されるホログラムの空間周波数分布が狭く、コアファイバー径の大きなPOFイメージガイドでもホログラム伝送に適用が可能であることがわかった。

今後は、合成開口法やPOFイメージガイドの多重化を試み、等価的に開口径を大きくすることによる再生像の画質向上について検討が必要であろう。また、イメージガイドを曲げた場合の再生像の評価や、物体からの反射光から生成されるホログラム伝送が課題として考えられる。さらに、応用としては、二波長法等を使った形状計測についても検討を加えることが今後の課題として挙げられる。

文 献

- 1) U. Schnars and W. Juptner: "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 179-181.
- 2) I. Yamaguchi and T. Zhang: "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1268-1270.
- 3) S. Grilli, P. Ferraro, S. Nicola, A. Finizio and G. Pierattini: "Whole optical wavefields reconstruction by digital holography," *Opt. Express*, **9** (2001) 294-302.
- 4) Y.-Y. Cheng and J. C. Wyant: "Two-wavelength phase shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 4539-4543.
- 5) C. Wagner, W. Osten and S. Seebacher: "Direct shape measurement by digital wavefront reconstruction and multiwavelength contouring," *Opt. Eng.*, **39** (2000) 79-85.
- 6) J. Gass, A. Dakoff and M. K. Kim: "Phase imaging without 2π ambiguity by multiwavelength digital holography," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 1141-1143.
- 7) I. Yamaguchi, T. Ida and M. Yokota: "Measurement of surface shape and position by phase-shifting digital holography," *Strain*, **44** (2008) 349-356.
- 8) S. Schedin, G. Pedrini, H. Tiziani and F. Santoyo: "Simultaneous three-dimensional dynamic deformation measurements with pulsed digital holography," *Appl. Opt.*, **38** (1999) 7056-7062.
- 9) Y. Morimoto, T. Nomura, M. Fujigaki, S. Yoneyama and I. Takahashi: "Deformation measurement by phase-shifting digital holography," *Exp. Mechanics*, **45** (2005) 65-70.
- 10) T. Kreis: *Handbook of Holographic Interferometry* (Wiley-VCH, 2005) pp. 364-365.
- 11) E. Kolenovic, W. Osten, R. Klattenhoff, S. Lai, C. V. Kopylow and W. Jüptner: "Miniaturized digital holography sensor for distal three-dimensional endoscopy," *App. Opt.*, **42** (2003) 5167-5172.
- 12) A. Michalkiewicz, M. Kujawinska and K. Stasiewicz: "Digital holographic cameras and data processing for remote monitoring and measurements of mechanical parts," *Opto-Electron. Rev.*, **16** (2008) 68-75.
- 13) O. Coquoz, R. Conde, F. Taleblou and C. Depeursinge: "Performances of endoscopic holography with a multicore optical fiber," *App. Opt.*, **34** (1995) 7186-7193.
- 14) T. D. Dudderar and J. A. Boehnlein: "Achieving stability in

- remote holography using flexible multimode image bundles,” *App. Opt.*, **22** (1983) 1000–1005.
- 15) R. Sato and K. Murata: “Multiplex holography using image fiber,” *Opt. Exp.*, **25** (1986) 480.
 - 16) S. Schedin, G. Pedrini, H. J. Tiziani and F. M. Santoyo: “All-fiber pulsed digital holography,” *Opt. Comm.*, **165** (1999) 183–185.
 - 17) S. Schedin, G. Pedrini, H. J. Tiziani and A. K. Aggawal: “Comparative study of various endoscopes for pulsed digital holographic interferometry,” *App. Opt.*, **40** (2001) 2692–2697.
 - 18) 藤本登喜男: “画像伝送用石英イメージファイバ”, *テレビジョン学会技術報告*, **10** (1986) 51–54.
 - 19) M. Sypek: “Light propagation in the Fresnel region. New numerical approach,” *Opt. Comm.*, **116** (1995) 43–48.
 - 20) 高橋 毅: “FFT法を用いるフレネル回折計算—サンプリング定理による考察—”, *光学*, **39** (2010) 209–201.
 - 21) J. W. Googman: *Introduction to Fourier Optics*, 3rd ed. (Roberts & Company, Colorado, 2004) pp. 55–61.
 - 22) X. Chen, K. L. Reichenbach and C. Xu: “Experimental and theoretical analysis of core-to-core coupling on fiber bundle imaging,” *Opt. Express*, **16** (2008) 21598–21607.
 - 23) 河合 滋: *光学設計のための基礎知識* (オプトロニクス社, 2006) pp. 157–168.
 - 24) U. Schnars and W. Juptner: *Digital Holography* (Springer, Berlin, 2005) p. 48.
 - 25) 谷田貝豊彦: *光とフーリエ変換* (朝倉書店, 1992) pp. 106–107.
 - 26) T. M. Kreis: “Frequency analysis of digital holography,” *Opt. Eng.*, **41** (2002) 771–778.
 - 27) Y. Jeong and B. Lee: “Effect of a random pattern through a multimode-fiber bundle on angular and spatial selectivity in volume holograms: Experiments and theory,” *Appl. Opt.*, **41** (2002) 4085–4091.