



島根大学学術情報リポジトリ

**S W A N**

Shimane University Web Archives of kNnowledge

Title

光学系を改善したデジタルホログラフィーによる偏光解析と数値計算によるシステムの評価

Author(s)

横田正幸

Journal

光学 37 ( 8 ), 484 - 491 , 2008-08

Published

2008

URL

<https://annex.jsap.or.jp/photonics/kogaku/public/37-08-kenkyuronbun2.pdf>

この論文は出版社版ではありません。  
引用の際には出版社版をご確認のうえご利用ください。

光学系を改善したデジタルホログラフィーによる偏光解析と数値計算によるシステムの評価

横田正幸

島根大学総合理工学部電子制御システム工学科

〒690-8504 島根県松江市西川津町1060

Newly constructed digital holographic system for polarization analysis and evaluation of the system with a numerical calculation

Masayuki Yokota

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Shimane University

1060 Nishikawatsu-cho, Matsue, Shimane 690-8504, Japan

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

**synopsis**

New digital holographic system for a polarization analysis is constructed. A Faraday rotator for a polarization switching of the reference wave is set out of an interferometer. Therefore, a heat generated by a modulation current for the Faraday rotator does not affect the phase of interference fringe at a CCD. By virtue of the new optical system, an improvement of the polarization determination has been experimentally confirmed by using a quarter wave plate. The polarization analysis by the digital holography is also numerically calculated and the effect of a finite value of extinction ratio and modulation error for reference wave is investigated.

**Key words:** Digital holography, polarization analysis, numerical calculation.

## 和文要旨

直交した直線偏光の参照光を利用したデジタルホログラフィーによる複屈折物体の透過光の偏光状態解析を行った。直線偏光の参照光の方位をFaraday変調器により切り替えてホログラムを記録した。1/4波長板を物体として用いて、その方位を変化させた時の透過光の偏光状態を解析した。デジタルホログラフィーによる偏光解析をシミュレーションにより解析し、消光比の大きさや変調方位誤差の影響を調べた。

## 1. はじめに

現在までに様々な偏光解析法が提案されており<sup>1-4)</sup>、物体内部の異方性の検出や応力分布の解析に応用されている。我々は Faraday 変調器を利用したデジタルホログラフィーによる偏光解析法について提案し、偏光解析及び光弾性解析による応力測定について報告してきた。従来の方法では、参照光路中に鉛ガラスファイバーを利用した Faraday 変調器を導入し、直線偏光の方位を変調して直交した偏光方位による物体光の記録を行っていた。この方式では直交する直線偏光は同一の参照光路を通るため、レンズの収差などの影響が等しくなり、解析における位置合わせが不要で光学系も簡単になる。従来光学系では、変調器に合わせて光ファイバー化することによる光学系の柔軟性などの利点を有していたが、偏光方位変調の際に印加する変調電流により変調コイルが発熱し、連続的な測定の際にはこの熱により干渉縞が大きく変動する問題が生じた。また、光学系の小型化や高効率変調のために2つの Faraday 変調器を直列に接続していたため、結合部分の調整が難しいなどの欠点を有していた。

そこで今回はこれらの欠点を改良するために光学系の改善に加えて、変調器の単一化を行った。初めに、変調器の発熱による干渉縞への影響を避けるため、Faraday 変調器を干渉計部分から外して配置する新しい光学系を構築した。また、変調器も接続部分の調整の複雑さを解消するために、大口径化によりファイバー長を2倍にした Faraday 変調器を作成し、単一の構成とした。

実験では、新たに構築した光学系、変調器による効果を調べるために、物体として1/4波長板を使用し、その透過光の偏光測定結果をジョーンズ行列により計算される理論値と比較して、測定の精度を検討した。加えて、ホログラフィーによる偏光解析を数値計算により行い、測定精度に影響すると考えられる参照光の方位の変調誤差や、消光比の効果を調べた。これにより測定の高精度化に必要な条件を検討するとともに、新しい光学系による測定システムの評価を行ったので、これについて報告する。

## 2. 測定原理

デジタルホログラフィーでは、参照光  $U_R$  と物体光  $U$  の干渉により生成されるホログラムが CCD により記録される。その時の CCD 面上におけるホログラムの強度  $I(x,y)$  は、

$$I(x,y) = |U_R(x,y)|^2 + |U(x,y)|^2 + U_R(x,y) \cdot U^*(x,y) + U_R^*(x,y) \cdot U(x,y) \quad (1)$$

で与えられる。(x,y)は CCD 面上の座標を表す。CCD 面上における物体光の偏光はジョーンズベクトルを用いて表すと<sup>7)</sup>

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} U_h(x,y) \\ U_v(x,y) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_h(x,y) \exp\{i\phi_h(x,y)\} \\ A_v(x,y) \exp\{i\phi_v(x,y)\} \end{bmatrix} \exp i\phi_0(x,y), \quad (2)$$

となる。ここで、 $\phi_0(x,y)$ は物体光の位相、 $A_h(x,y)$ 、 $A_v(x,y)$ はそれぞれ偏光の直交成分（水平及び垂直方位）の振幅、 $\phi_h(x,y)$ 、 $\phi_v(x,y)$ はその位相を表す。直交する直線偏光の参照光に対してそれぞれホログラムを記録すると、軸外し記録では、参照光が水平方向の角度 $\theta_{Rh}$ で CCD 面に入射する場合、水平方向の偏光を持つ参照光は、その振幅、位相を  $A_{Rh}(x,y)$ 、 $\phi_{Rh}(x,y)$ とすれば、次式で与えられる<sup>5,8)</sup>

$$U_{Rh}(x,y) = \begin{bmatrix} A_{Rh}(x,y) \exp\left[i\{\phi_{Rh}(x,y) + kx \sin \theta_{Rh}\}\right] \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

ここで、 $k = 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$ は波長) である。同様に垂直方向の偏光を持つ参照光は、

$$U_{Rv}(x, y) = \begin{bmatrix} 0 \\ A_{Rv}(x, y) \exp[i\{\phi_{Rv}(x, y) + kx \sin \theta_{Rh}\}] \end{bmatrix}, \quad (4)$$

となる。 $A_{Rv}(x, y)$ は振幅、 $\phi_{Rv}(x, y)$ は位相を表す。ホログラム強度は(2)、(3)、(4)式を(1)式に代入して与えられ

$$I_{\beta}(x, y) = A_o(x, y)^2 + A_{R\beta}(x, y)^2 + A_{\beta}(x, y) \exp\{i\phi_{\beta}(x, y)\} A_{R\beta} \exp\{-i(\phi_{R\beta} + kx \sin \theta_{Rh})\} \\ + A_{\beta}(x, y) \exp\{-i\phi_{\beta}(x, y)\} A_{R\beta} \exp\{i(\phi_{R\beta} + kx \sin \theta_{Rh})\}, \quad (5)$$

ただし、 $A_o(x, y)^2 = A_h(x, y)^2 + A_v(x, y)^2$ 、 $\beta$ は偏光方位をあらわし、水平方向では  $h$ 、垂直方向では  $v$  となる。ホログラムの再生は(5)式のフレネル変換を計算することにより行われ<sup>7)</sup>、再生面における複素振幅分布  $U_1(X, Y, Z)$ は、次式で与えられる

$$U_1(X, Y, Z) = A \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda Z}(X^2 + Y^2)\right] \iint I_{\beta}(x, y) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda Z}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[-\frac{i2\pi}{\lambda Z}(xX + yY)\right] dx dy. \quad (6)$$

ただし、 $Z$ は再生距離、 $A = \exp(i2\pi Z/\lambda)/(i\lambda Z)$ である。直交した直線偏光の参照光に対して記録されたホログラム(5)式をそれぞれ(6)式に代入することで再生像が得られる。

CCDの解像度によっても制限を受けるが、軸外し角度 $\theta_{Rh}$ を十分大きく取れば0次光と共役像が横方向に分離して再生され、中央が0次光でその両側に真の像と共役像が再生される。

ホログラムの再生及び偏光解析は次のような手順で行なった。まず初めに、ホログラム強度をフーリエ変換し、周波数面において真の像の成分だけを通すマスクを掛けて逆フーリエ変換を行うことにより再生像には真の像のみを残す。続けてホログラムにパソコン内で数値的に作成した参照光  $R_D(x, y) = \exp(ikx \sin \theta_{Rh})$ を掛けることにより、参照光の傾きを調整して再生像を中央に移動し、位相分布から傾きの成分を除去した<sup>5,8)</sup>。

最後に、再生像中に現れる CCD の縁からの回折の影響を除去するために、数値的な参照光を掛けた後で、Fig. 1 に示すような透過率が 3 次元スプラインからなる強度マスクを掛ける<sup>11)</sup>。この処理により再生像中に生じる格子状の回折像の影響を除去する。

最終的に得られたホログラムのフレネル変換を計算すると、再生面における複素振幅分布  $U_I(X,Y,Z)$  は、次式で与えられる

$$U_{\text{I}}(X,Y,Z) = A \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda Z}(X^2 + Y^2)\right] \iint R_D(x,y) I_{\beta}(x,y) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda Z}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[-\frac{i2\pi}{\lambda Z}(xX + yY)\right] dx dy. \quad (7)$$

この時の複素振幅は(5)、(7)式より与えられ、

$$U_{\text{oh}}(X,Y,-z_0) = A_{\text{Rh}}(X,Y) A_{\text{h}}(X,Y) \exp[i\varphi_{\text{h}}(X,Y)] \quad (8)$$

および

$$U_{\text{ov}}(X,Y,-z_0) = A_{\text{Rv}}(X,Y) A_{\text{v}}(X,Y) \exp[i\varphi_{\text{v}}(X,Y)] \quad (9)$$

となる。もし、参照光の振幅が等しければ  $|A_{\text{Rv}}| = |A_{\text{Rh}}|$  となり、物体光の振幅比は次式のよ  
うに求められる

$$\tan \alpha = A_{\text{v}} / A_{\text{h}} = |U_{\text{ov}}| / |U_{\text{oh}}|. \quad (10)$$

再生像より得られた位相を用いて位相差を計算すると、

$$\Delta\phi = \varphi_{\text{v}}(X,Y) - \varphi_{\text{h}}(X,Y) - \Delta\phi_{\text{R}} \quad (11)$$



となる。ただし、 $\Delta\phi_r = \phi_{rv}(x,y) - \phi_{rh}(x,y)$ は参照光の偏光変調の際や、外乱によって導入される二回のホログラム記録の間に生ずる位相ドリフトである。この影響を取り除くために、物体光領域の一部に偏光子を挿入して、これを参照部分とした。直線偏光の直交成分間の位相差は $0^\circ$ または $\pm 180^\circ$ であるはずである。よってこの部分で検出される位相差と本来の位相差との差を誤差として測定領域の位相差から差引くことにより、位相ドリフトの補正を行った<sup>8)</sup>。

Fig. 1

### 3. 偏光測定システム

実験系を Fig. 2 に示す。光源は波長 785 nm の半導体レーザー(LD)で、出射光をレンズ(L1)でコリメート後に光アイソレータ(OI)と偏光子(Pol1)を透過させて、対物レンズ(OL)により鉛ガラスファイバーFaraday 変調器(FFR)に入射させる。今回新たに作成した FFR は  $36.5^\circ/\text{A}$  の変調効率と出射光の消光比 36 dB (5000:1) を達成している。これにより、2.466 A の直流電流  $I_m$  を変調コイルに印加することで導波光の偏光方位を  $90^\circ$  回転できる。FFR の出射光をレンズでコリメート後に 1/2 波長板(HWP)を挿入し、その方位を調整することにより出射光の初期の偏光方位を光学除振台面に対して水平方向 (h)  $0^\circ$  とした。今回の光学系では従来と異なり、FFR を干渉計外に配置することで連続使用時の変調用コイル発熱の影響を避けている<sup>12)</sup>。

Fig. 2

FFR の出射光を無偏光ビームスプリッタ(BS1)により参照光と物体光に分けた。物体光路には、偏光子(Pol2)を挿入し、物体に対する入射偏光方位を  $45^\circ$  とした。実験では、物体として 1/4 波長板(QWP)を用いた。

参照光は物体光に対して僅かに傾けて無偏光ビームスプリッタ(BS2)により物体光と干渉させて、CCD 上にホログラムを形成させる。CCD (IMPERX IPX-VGA120) は 8 ビット階調の  $512 \times 512$  画素で最高 110 Hz のフレームレートである。1 ピクセルの大きさは  $7.4 \times 7.4 \mu\text{m}^2$  である。Pol1~Pol3 の偏光子はグラン-トムソンプリズムで消光比は 50 dB である。

Fig. 3

なお、参照光と物体光の間の軸外し角度 $\theta_{Rh}$ は $1.0^\circ$ とした。直交した偏光方位の参照光それぞれについて1枚ずつホログラムを記録した。ホログラムのフレネル変換を計算し、物体光の複素振幅の再生を行った。ホログラム記録時の位相ドリフトはFig. 3に示す配置により物体光領域に直線偏光からなる参照領域を導入して補正し、補正後の位相差を $\Delta\phi_c$ とした。得られた直交した偏光成分間の振幅比と位相差を求めて偏光解析を行った。

#### 4. 実験

まず初めに、新しい光学配置による変調器の発熱の影響を調べた。変調器の変調コイルに1.0Aの直流電流を一定時間加えた時のCCD面における干涉縞の位相変化を求めて、旧光学系で同じ実験を行った場合と比較した。測定は0.16秒間隔で干涉縞をCCDで撮影し、フーリエ変換によりその位相を求めた。電流の印加時間は、測定開始20秒後から120秒後までとし、その後は電流の印加を止めて、コイル発熱の影響を調べた。結果をFig. 4に示す。結果から明らかなように、新しい光学系の場合は変調器FFRが干涉計外にあるためコイル発熱の影響は見られないが、旧光学系の場合は、発熱により干涉縞が大きく移動している。このことから、新しい光学系の場合では連続した偏光変調を行った場合でも、コイルの発熱が測定結果に影響しないことが確認された。

Fig. 4

次に、1/4波長板(QWP)を物体として実験を行った。Fig. 5に直交する偏光方位に対する振幅、位相の再生像を示す。これはホログラムの再生像中から実像部分を抽出して示したものである。この時のCCD面からQWPまでの物体距離Zは160 mmで、QWPの遅軸方位は $0^\circ$ である。QWPに対する入射光は方位 $45^\circ$ の直線偏光であるため、出射光は円偏光となっている。再生前にホログラムに強度マスクを掛けているため、従来に見られた縁からの回折像はほぼ消えている<sup>7)</sup>。

Fig. 5

図中の点線で示された領域AはFig. 3の偏光子Pol3により導入された参照領域で、領域BはQWPのみを透過した円偏光からなる部分である。領域A内の位相差の平均値と理論値の差を位相ドリフトとし、領域B内で得られる位相差を補正した。領域B内の振幅比、位相差

Fig. 6

の平均値を測定値とした。測定では、QWPの遅軸の方位を $0^\circ \sim 180^\circ$ まで $5^\circ$ 刻みで回転した場合について、同一方位に対して3回ずつ測定した結果をFig. 6に示す。グラフの位相差は位相ドリフト補正後の値 $\Delta\phi_c$ を示す。黒丸が実験値を示し、実線はジョーンズ行列から計算される振幅比角 $\alpha$ と位相差 $\Delta\phi$ の理論値である。グラフから実験値は理論値と良く一致していることが分かる。測定誤差を評価するために、回転した方位全体に対して計算した実験値と理論値との差の標準偏差を求め、その結果を誤差 $\varepsilon$ としてTable 1に示す。結果から $\alpha$ と $\Delta\phi_c$ 共に $1.0^\circ$ 以内の差になっている。

従来の光学系により得られた結果では振幅比角 $\alpha$ 、位相差 $\Delta\phi_c$ に対して誤差がそれぞれ $1.5^\circ$ 、 $3.0^\circ$ であったので、誤差を1/3以下にしている<sup>8)</sup>。主な要因としては、ホログラムに強度マスクを掛けて縁からの回折の影響を小さくしている点に加えて、今回のFFRは単一の構成で、出射光の消光比が従来型<sup>7,8,12)</sup>より5倍以上であり、ホログラム記録時に参照光の偏光方位の切り替えが1回で済むため、変調誤差の起こる回数も半分になること等が挙げられる。

## 5. 数値計算による解析

実験結果を解析するため偏光解析のシミュレーションを行い、偏光解析結果に対する参照光の消光比と変調誤差の影響を調べた。計算では物体光と参照光は平面波とした。実験で試料として用いたQWPを透過して偏光が決定される物体光 $U_T$ のジョーンズベクトルは次式で与えられる

$$U_T = \begin{pmatrix} U_{th}(x,y) \\ U_{tv}(x,y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \exp\left(i\frac{\pi}{4}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-i\frac{\pi}{4}\right) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

参照光は、変調誤差 $\Delta\theta_m$ と消光比 $\eta$ を考慮してジョーンズ行列を用いて表す。水平方向に偏

光した消光比  $\eta$  の直線偏光である参照光  $\mathbf{U}'_{Rh}$  は、軸外し角を実験と同じ  $\theta_{Rh}$  とすると

$$\mathbf{U}'_{Rh} = \begin{bmatrix} U'_{Rh_x}(x, y) \\ U'_{Rh_y}(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ i/\eta \end{bmatrix} \exp(ikx \sin \theta_{Rh}) \quad (13)$$

で与えられる。垂直方向に偏光した参照光  $\mathbf{U}'_{Rv}$  に対しては、この偏光方位を変調器で  $90^\circ$  回転して生成されるので、変調誤差  $\Delta\theta_m$  を考慮すれば次式で与えられる

$$\begin{aligned} \mathbf{U}'_{Rv} &= M(90^\circ + \Delta\theta_m) \cdot \mathbf{U}'_{Rh} = \begin{bmatrix} U'_{Rv_x}(x, y) \\ U'_{Rv_y}(x, y) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(90^\circ + \Delta\theta_m) & \sin(90^\circ + \Delta\theta_m) \\ -\sin(90^\circ + \Delta\theta_m) & \cos(90^\circ + \Delta\theta_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(ikx \sin \theta_{Rh}) \\ i/\eta \exp(ikx \sin \theta_{Rh}) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

ホログラム強度は(13)式と(14)式を(1)式に代入して求められる。水平方向の偏光方位に対するホログラム強度  $I'_h(x, y)$  は

$$\begin{aligned} I'_h(x, y) &= |U'_{Rh_x}(x, y)|^2 + |U_{Th}(x, y)|^2 + |U_{Tv}(x, y)|^2 + U_{Rh_x}^*(x, y) \cdot U_{Th}(x, y) + U_{Rh_x}(x, y) \cdot U_{Th}^*(x, y) \\ &\quad + \underline{|U'_{Rh_y}(x, y)|^2 + U_{Rh_y}^*(x, y) \cdot U_{Tv}(x, y) + U_{Rh_y}(x, y) \cdot U_{Tv}^*(x, y)} \end{aligned} \quad (15)$$

となる。参照光の消光比  $\eta$  が有限の大きさであるため、(15)式の下線部に見られるように本来の偏光方位と直交する成分での干渉の影響が生じることが分かる。垂直方向成分のホログラム強度  $I'_v(x, y)$  も同様な方法で得られる。得られたホログラム強度には、実験で行った再生前の計算処理と同様の処理を施し、偏光解析方法は参照領域を設けないこと以外は実験と同じ手順で行った。

シミュレーションによるホログラムの再生像をFig. 7に示す。シミュレーションの計算で用いた光源の波長や物体距離、CCDの画素数等の条件は全て実験と同じとし、QWPの方位

Fig. 7

0°～180°に対して1°毎に計算した。シミュレーションの計算精度を検討するために、理想的な場合を考えて参照光の消光比は十分大きくし ( $\eta=10^{11}$ )、変調誤差は $\Delta\theta_m = 0^\circ$ とした。実験と同様に強度マスクを掛けていることにより、再生像に回折パターンが見られないことが分かる。図中の点線で囲んだ領域を解析し、この領域中の振幅比、位相差を計算して平均値を理論値と比較した。結果をFig. 6に示す。また、理論値との差の平均値を計算した結果もTable 1に示す。Fig. 6の結果共に理論値にほぼ一致している。Table 1の結果でも、誤差は $1.0 \times 10^{-3}$ 未満であり、このシミュレーションによって測定精度を検証できることが確認できた。シミュレーションの誤差要因としては、ホログラム再生などで生じる計算誤差や強度マスク処理でも除けない縁からの回折の影響などが考えられる。

次に消光比と変調誤差を別々に考慮した計算を行い、それぞれの影響について調べた。初めに消光比の影響を調べるために変調誤差 $\Delta\theta_m = 0^\circ$ とし、消光比 $\eta$ が200:1～5000:1の場合について計算した。結果をFig. 8とTable 2に示す。消光比が小さくなるにつれて誤差が増大している。Fig. 8に示す方位に対する誤差依存性では、振幅比、位相差ともに方位が45°、135°の場合に誤差が0°となる。この方位では、入射する直線偏光の方位がQWPの速軸又は遅軸と一致するため、出射光が入射光と同じ45°の方位を持つ直線偏光となる。これにより(15)式で見られた本来の方位と直交した成分間で生じる干渉の影響が、水平、垂直方向の参照光で同じになることで相殺されるからであると考えられる。振幅比は出射光が円偏光になる波長板の方位0°、90°、180°の時に最大となっている。

Fig.8

消光比の影響だけを考えれば、Table 2 から消光比が 500:1 程度であれば振幅比、位相差ともに理論値との誤差は 0.1°未満になる。実験による偏光解析では、消光比や変調誤差以外にも光学部品等の表面からの反射光による干渉、付着したゴミからの回折の影響や、光学系の偏光特性、振動などの外乱などの影響を受けるため、消光比が 500:1 以上でもシミュレーション結果よりは誤差が大きくなることは Table 1 との比較からも明らかである。しかし、シミュレーション結果では、実験で得られている消光比 5000:1 であれば、誤差が 0.01°未満に留まる。

Table2

次に変調誤差の影響を調べた。この場合は消光比を十分大きくして ( $\eta=10^{11}$ )、変調誤差の大きさを $+0.1^{\circ}\sim+2.0^{\circ}$ とした。結果を Fig. 9 と Table 3 に示す。位相差に関しては、消光比の場合と同様に  $45^{\circ}$ 、 $135^{\circ}$  の場合に誤差がほぼ  $0^{\circ}$  となっている。現実的な誤差を考えた場合、消光比よりも変調誤差の方が測定結果に与える影響が大きいことが Table 3 から Fig. 9 分かる。仮に変調電流  $I_m$  に 1.0 % の誤差が生じた場合、変調誤差は  $0.9^{\circ}$  になる。Table 3 から、この時の誤差は位相差に関しては  $0.7^{\circ}$  程度になり、消光比に比べ測定結果に与える影響は遥かに大きくなる。これらの結果から、測定結果に含まれる誤差要因としては変調誤差の方が大きいことが分かった。今後、測定精度の向上には変調精度を上げることが重要であることが分かった。 Table3

## 6. まとめ

従来の光学系の欠点である変調器の発熱の影響による干渉縞変動について、新たに変調器を干渉計部分から外した光学系によりその影響を除去した。これにより連続測定に対して十分な再現性を持つことが可能になった。また、新たに作成した大口径型の鉛ガラスファイバー-Faraday 変調器により、1 つの変調器で十分な変調効率を達成した。また、単一の変調器構成により、2 つの変調器の接続に関する問題を解決した。また、大口径化と単一構成により従来型よりも高い消光比を達成することができた。偏光測定の実験では  $1/4$  波長板を物体として用い、速軸の各方位に対し透過光の偏光測定を行ったところ、理論値との測定誤差を従来の  $1/3$  以下に抑えて測定が可能になった。

次に光学系の改良点やシステムを評価するために、数値計算により偏光解析の評価を行ったところ、参照光の変調誤差が測定に与える影響が大きいことが分かった。今後、偏光解析の更なる精度向上のためには変調誤差をできる限り小さくすることが望まれる。変調誤差を軽減する手段としては、変調器に新たに帰還用コイルを設けて、これに目標方位からの誤差信号をフィードバックする方法などが考えられる。測定的高速化なども含めて検

討する必要があると考えられる。

## 参考文献

1. K. Oka and T. Kaneko: "Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms," *Opt. Express*, **11** (2003) 1510-1519 (<http://www.opticsexpress.org>).
2. J.F.de Boer, T.E.Milner, M.J.C.van Gemert, and J.S.Nelson: "Two-dimensional birefringence imaging in biological tissue by polarization-sensitive optical coherence tomography," *Opt.Lett.*, **22** (1997) 934-936.
3. J. Moreau, V. Lorient, and A.-C. Boccara: "Full-field birefringence imaging by thermal-light polarization-sensitive optical coherence tomography. 2. Instrument and results," *Appl. Opt.*, **42** (2003) 3811-3817.
4. Y. Ohtsuka and K. Oka: "Contour mapping of the spatiotemporal state of polarization of light," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 2633-2636.
5. T. Colomb, P. Dahlgren, D. Beghuin, E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge: "Polarization imaging by use of digital holography," *Appl. Opt.*, **41** (2002) 27-37.
6. T. Colomb, E. Cuche, F. Montfort, P. Marquet, Ch. Depeursinge: "Jones vector imaging by use of digital holography: simulation and experimentation," *Opt. Commun*, **231** (2004) 137-147.
7. M. Yokota, Y. Terui, and I. Yamaguchi: "Analysis of polarization state by digital holography with polarization modulation," *Opt. Rev.*, **13** (2006) 405-409.
8. M. Yokota, Y. Terui, and I. Yamaguchi: "Polarization analysis with digital holography by use of polarization modulation for single reference beam," *Opt. Eng.*, **46** (2007) 055801-1-055801-7.
9. U. Schnars and W. Juptner: "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical

- reconstruction,” *Appl. Opt.*, **33** (1994) 179-180.
10. I. Yamaguchi and T. Zhang: “Phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1268-1270.
  11. E. Cuche, P. Marquet and C. Depeursinge: “Aperture apodization using cubic spline interpolation: application in digital holographic microscopy,” *Opt. Commun.*, **182** (2000) 59-69.
  12. M. Yokota, Y. Terui, and I. Yamaguchi: “Whole-field analysis of polarization state by digital holography with a fiber Faraday rotator,” *Proc. SPIE on CD-ROM*, **6027** (2005) 0408\_088.
  13. 横田正幸, 米山誠秀, 山口一郎, 芳野俊彦: “鉛ガラスファイバーファラデー変調器を用いた旋光計”, *光学*, **34**(2005)97-102.



半幅

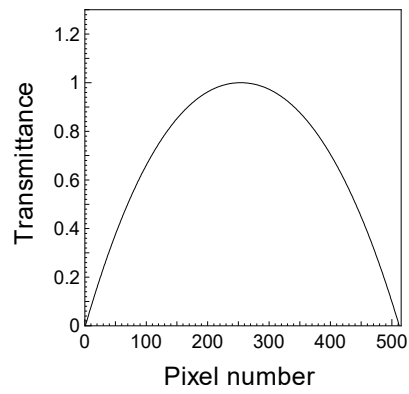


Fig. 1 Transmission property of the intensity mask for the hologram.

横田正幸

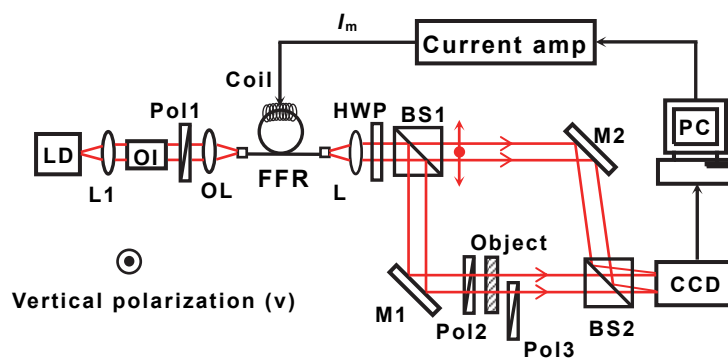


Fig. 2 Experimental setup: LD, laser diode; OI, optical isolator; FFR, flint glass fiber Faraday rotator; Ms, mirrors; HWP, half-wave plate; BSs, beam splitters, Ls, lenses; Poles, polarizers; CCD, charge coupled device; PC, personal computer.

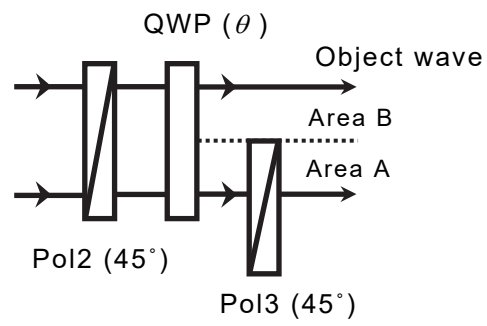


Fig. 3 Configuration of object wave between Pol2 and Pol3 in Fig. 2.

半幅

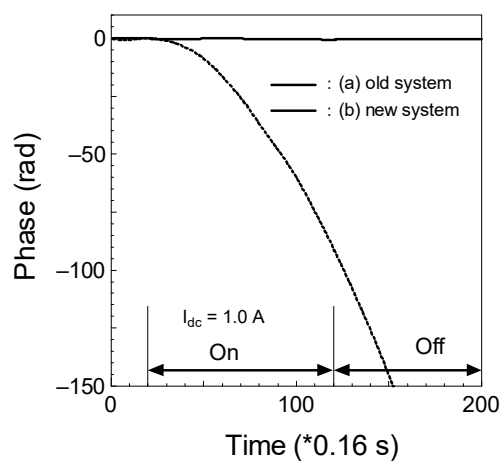


Fig. 4 Phase change of an interference fringe at a CCD surface when a direct modulation current of 1.0 A is applied to the FFR; (a) old system, (b) new system.

横田正幸

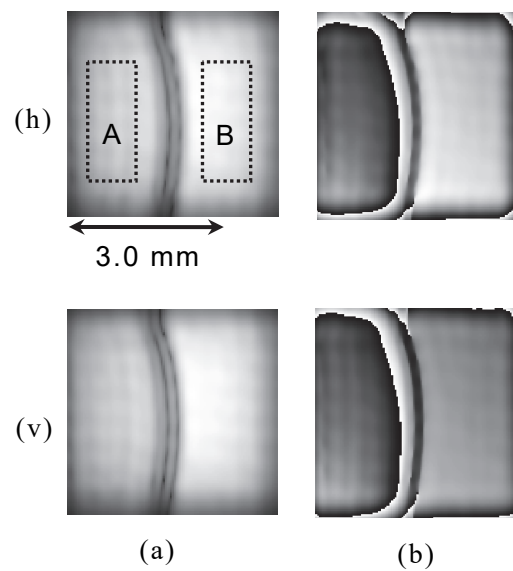
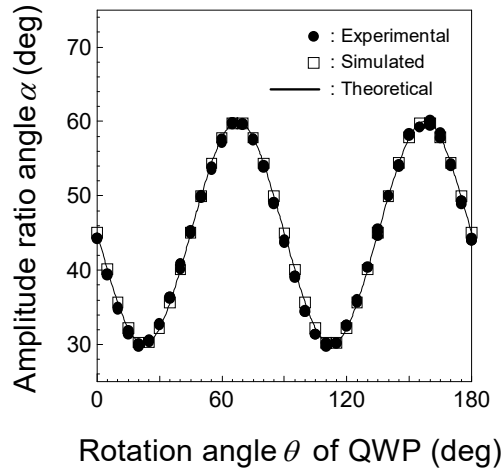
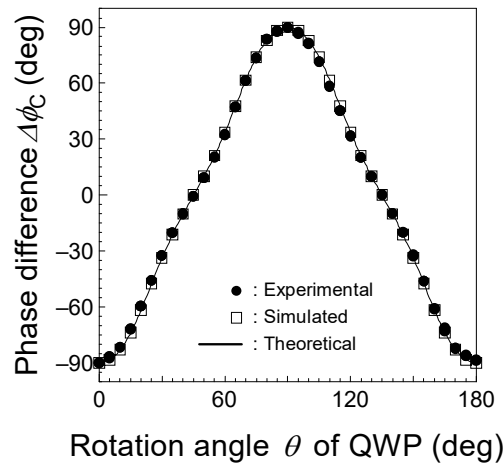


Fig. 5 Reconstructed (a) amplitude and (b) phase of virtual image of the quarter wave plate with the orientation of  $\theta = 0^\circ$  for the horizontal (h) and vertical polarizations (v), respectively. The area A is for the reference (Pol3) and the area B is for analysis (QWP).



(a) Amplitude ratio angle  $\alpha$



(b) Phase difference  $\Delta\phi_c$

Fig. 6 Amplitude ratio angle  $\alpha$  and phase difference  $\Delta\phi$  for QWP with various orientations between  $0^\circ$  and  $180^\circ$ .

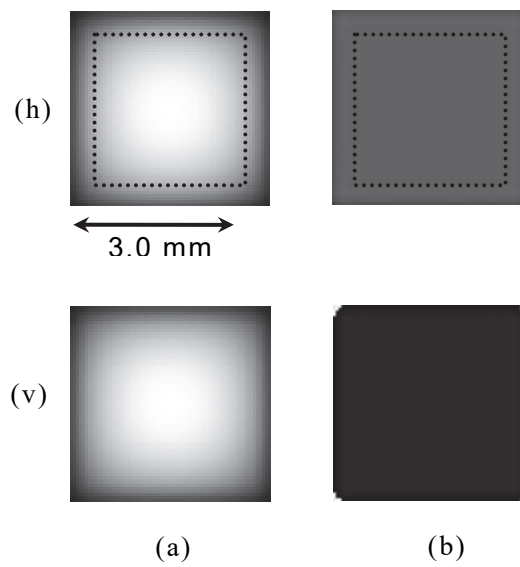
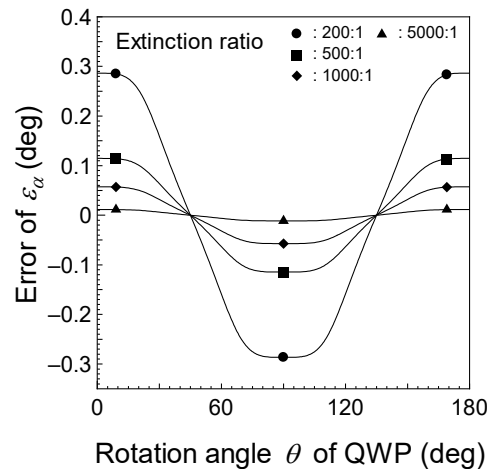
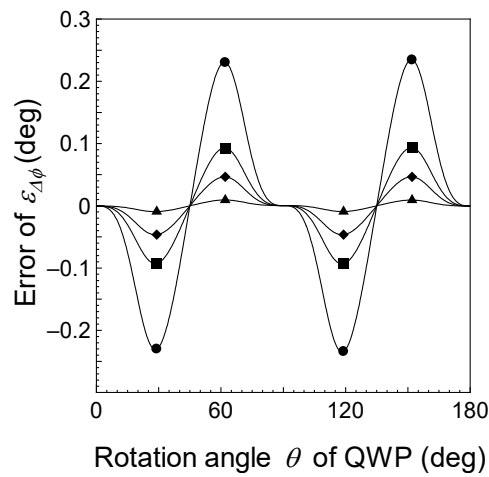


Fig. 7 Reconstructed (a) amplitude and (b) phase images of simulated holograms for a quarter wave plate with the orientation of  $\theta = 0^\circ$  for the horizontal (h) and vertical polarizations (v), respectively:  $\eta = \infty$  and  $\Delta\theta_m = 0^\circ$ . The area within dotted square is analyzed.



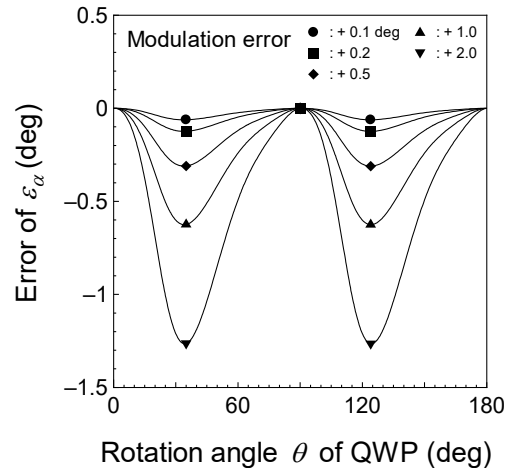
(a) Error of  $\alpha$



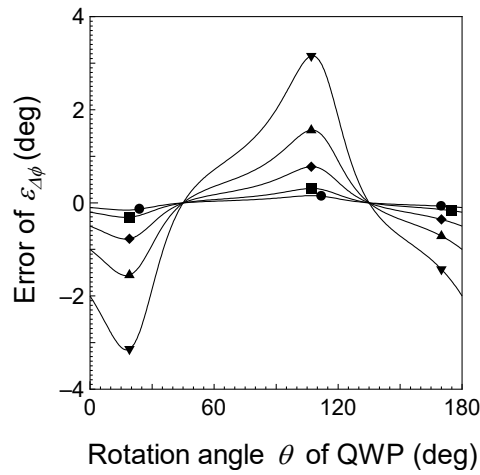
(b) Error of  $\Delta\phi$

Fig. 8 Dependence of error on the value of extinction ratio of reference wave: (a) amplitude ratio  $\alpha$  and (b) phase difference  $\Delta\phi$ .





(a) Error of  $\alpha$



(b) Error of  $\Delta\phi$

Fig. 9 Dependence of error on the magnitude of modulation error for reference wave: (a) amplitude ratio  $\alpha$  and (b) phase difference  $\Delta\phi$ .

Table 1 Error  $\varepsilon$  of  $\alpha$  and  $\Delta\phi$  for QWP.

Error (deg)		
Experimental	$\varepsilon(\alpha)$	0.34
	$\varepsilon(\Delta\phi)$	0.79
Simulated	$\varepsilon(\alpha)$	$6.3 \times 10^{-5}$
	$\varepsilon(\Delta\phi)$	$1.8 \times 10^{-4}$

半幅

Table 2 Dependence of error  $\varepsilon$  on the value of extinction ratio  $\eta$ .

$\eta$	Error (deg)			
	200	500	1000	5000
$\varepsilon(\alpha)$	0.197	0.079	0.039	$7.9 \times 10^{-3}$
$\varepsilon(\Delta\phi)$	0.110	0.044	0.022	$4.4 \times 10^{-3}$

横田正幸

Table 3 Dependence of error  $\varepsilon$  on the modulation error for reference wave.

	Error (deg)				
$\Delta\theta_m$	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
$\varepsilon(\alpha)$	0.027	0.053	0.134	0.270	0.544
$\varepsilon(\Delta\phi)$	0.075	0.149	0.374	0.750	1.51