

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 松江市西川津町 1060

Newly Constructed Digital Holography System for Polarization Analysis and an Evaluation of the System with a Numerical Calculation

Masayuki YOKOTA

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

New digital holographic system for a polarization analysis is constructed. A Faraday rotator for a polarization switching of the reference wave is placed out of an interferometer. Therefore, a heat generated by a modulation current for the Faraday rotator does not affect a phase of interference fringe at a CCD. By virtue of the new optical system, an accurate polarization determination has been achieved by testing a quarter wave plate. The polarization analysis is also simulated 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

1. はじめに

現在までにさまざまな偏光解析法が提案されており¹⁻⁶⁾, 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。われわれはファラデー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, 偏光解析および光弾性解析による応力測定について報告してきた^{7,8)}。提案した方法では, 参照光路中に鉛ガラスファイバーを利用したファラデー変調器を導入し, 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, 解析における再生像の位置合わせが不要で光学系も簡単になる。これに加えて変調器に合わせて光学系を光ファイバー化することによる小型化や, 柔軟性などの利点を有していた。

しかし, 連続的な測定の際には, 偏光方位変調時に印加する変調電流により変調コイルが発熱して参照光路長が変化するため, 干渉縞が大きく変動する問題が生じた⁷⁾。また, 光学系の小型化や高効率変調のために2つのファラデー

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問題があった。

そこで, これらの問題を解決して偏光解析の再現性や精度を向上するために, 変調器の配置を変えた全く新しい光学系を構築し, 実験および数値計算によりその評価を行うことを目的として研究を行った。具体的な変更点としては, 変調コイルの発熱による光路長変化の影響を避けるために, ファラデー変調器を干渉計部分から外して配置し, これに合わせて従来使用していた光ファイバーカップラーなどの光ファイバー部分を削除した。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, リング径の大型化により鉛ガラスファイバー長を2倍にしたファラデー変調器を作製し, 単一の構成とすることで単純化した。

実験では, 新たに構築した光学系や変調器構成の改良による効果を調べるために, 従来と同様に物体として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, 測定精度を検討した。加えて, 従来からの改善効果をより詳細に調べるために, ホログラフィーによる偏光解析を数値計算によりシミ

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

レーションし、測定精度に影響すると考えられる参照光の偏光方位の変調誤差や消光比の効果を計算により調べた。これにより従来の光学系からの変更点の検証を行うと同時に、測定のさらなる高精度化に必要な条件について検討を加えたので報告する。

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。そのときの CCD 面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^{6,8)}、

$$U = \begin{pmatrix} U_h(x, y) \\ U_v(x, y) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_h(x, y) \exp\{i\varphi_h(x, y)\} \\ A_v(x, y) \exp\{i\varphi_v(x, y)\} \end{bmatrix} \exp i\varphi_0(x, y) \quad (2)$$

となる。ここで、 $\varphi_0(x, y)$ 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（水平および垂直方位）の振幅、 $\varphi_h(x, y)$ 、 $\varphi_v(x, y)$ 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 θ_{Rh} で CCD 面に入射する場合、水平方向の偏光をもつ参照光は、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⁸⁾。

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

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

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

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

$$I_\beta(x, y) = A_0(x, y)^2 + A_{R\beta}(x, y)^2 + A_\beta(x, y) \exp\{i\phi_\beta(x, y)\} A_{R\beta} \exp\{-i(\phi_{R\beta} + kx \sin \theta_{Rh})\} + A_\beta(x, y) \exp\{-i\phi_\beta(x, y)\} A_{R\beta} \exp\{i(\phi_{R\beta} + kx \sin \theta_{Rh})\} \quad (5)$$

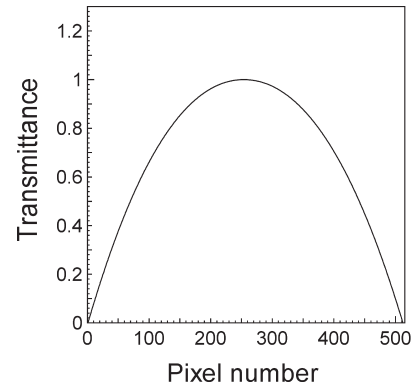


Fig. 1 Transmission property of the intensity mask for the hologram.

ただし、 $A_0(x, y)^2 = A_h(x, y)^2 + A_v(x, y)^2$ 、 β は偏光方位を表し、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式 (5) のフレネル変換を計算することにより行われ^{9,10)}、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。

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

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、式 (5) をそれぞれ式 (6) 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 θ_{Rh} を十分大きくとれば 0 次光と共役像が横方向に分離して再生され、0 次光の両側に真の像と共役像が再生される。

ホログラム再生からの偏光解析においては、はじ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った。続けてホログラムにコンピューター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^{6,8)}。

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三次元スプラインからなる強度マスクを掛ける¹¹⁾。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⁹⁾。

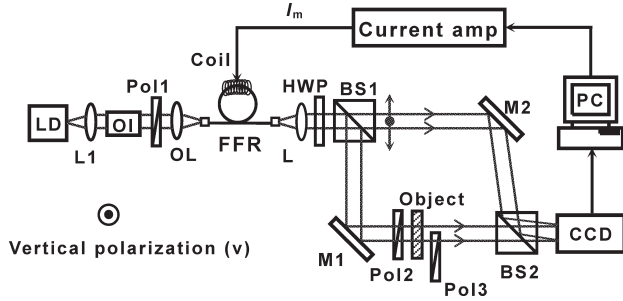


Fig. 2 Experimental setup. LD: laser diode, OI: optical isolator, FFR: flint glass fiber Faraday rotator, Ms: mirrors, HWP: half-wave plate, BSs: beam splitters, Ls: lenses, Pols: polarizers, CCD: charge coupled device, PC: personal computer.

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

このときの複素振幅は式 (5), (7) より与えられ

$$U_{O\beta}(X, Y, -z_0) = A_{R\beta}(X, Y) A_\beta(X, Y) \exp[i\varphi_\beta(X, Y)] \quad (8)$$

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

$$\tan \alpha = A_v/A_h = |U_{Ov}|/|U_{Oh}| \quad (9)$$

再生像より得られた位相を用いて位相差 $\Delta\phi$ を計算すると

$$\Delta\phi = \varphi_v(X, Y) - \varphi_h(X, Y) - \Delta\phi_R \quad (10)$$

となる。ただし、 $\Delta\phi_R = \varphi_{Rv}(x, y) - \varphi_{Rh}(x, y)$ は参照光の偏光変調の際や、外乱によって導入される 2 回のホログラム記録の間に生じ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° 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し引くことにより位相ドリフトの補正を行った⁵⁾。

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ー (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・ファラデー変調器 (FFR) に入射させる。今回新たに作製した FFR は、従来型 (直径 70 mm) よりも大きな直径 100 mm のアクリル製リングを使用し、その外周部に設けた深さ 5 mm の溝に長さ 6.8 m の鉛ガラスファイバー (HOYA LBF-85)

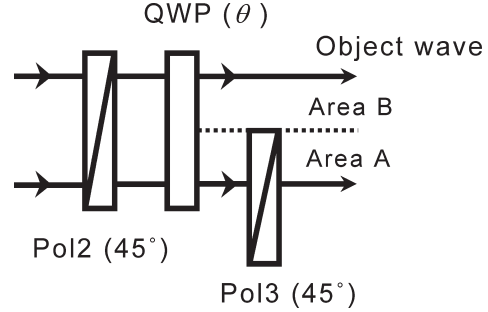


Fig. 3 Configuration of object wave between Pol2 and Pol3 in Fig. 2.

を 23 回巻いた構造である。このコアの外周部に変調用コイルとして直径 0.8 mm のエナメル銅線を 1500 回巻いている。従来型よりも鉛ガラスファイバーの曲げ半径を大きくし、ファイバー長やコイル巻数を増やした結果、単一の変調器で $36.5^\circ/\text{A}$ の変調効率と出射光の消光比 37 dB (5000 : 1) を達成した。

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° 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° とした。今回の光学系は、従来使用していた光ファイバーカップラーなどの光ファイバー部分を排除し、バルク光学素子で構成している。さらに、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¹²⁾。

FFR の出射光を、無偏光ビームスプリッター (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° 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 1.0° 傾け、無偏光ビームスプリッター (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-VGA 120) は、8 ビット階調の 512×512 画素で最高 110 Hz のフレームレートである。1 画素の大きさは $7.4 \times 7.4 \mu\text{m}^2$ 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。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を解析した。

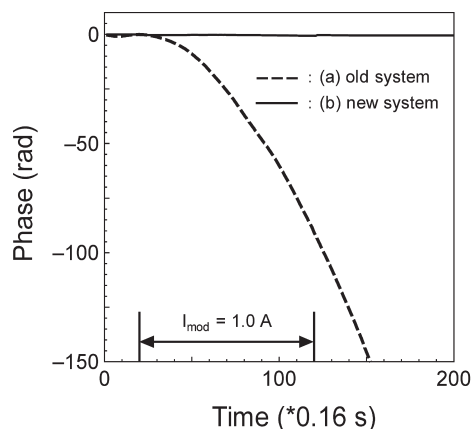


Fig. 4 Phase change of an interference fringe at a CCD surface when a direct modulation current of 1.0 A is applied to the FFR. (a) Old optical system, (b) new optical system.

4. 実 験

まずはじめに、新しい光学配置で変調器の発熱の影響を調べた。変調器のコイルに1.0 Aの直流電流を一定時間加え、そのときのCCD面における干渉縞の移動を求め、旧光学系で同じ実験を行った場合の結果と比較した。干渉縞の移動の検出は、0.16秒間隔で干渉縞をCCDで撮影し、それぞれの縞画像をフーリエ変換してその位相を求めて行った。干渉縞の記録開始後3秒から16秒間コイルに電流を印加して発熱の影響を調べた。結果をFig. 4に示す。グラフから明らかなように、FFRが干渉計外にある新光学系ではコイル発熱による干渉縞の位相変化はみられないが、旧光学系ではFFRが参照光路中にあるため、コイル発熱により参照光を導波する鉛ガラスファイバーに熱が伝わるため光路長が変化し、干渉縞が大きく移動している。この結果から、新光学系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。

つづいて、1/4波長板(QWP)を物体として使用した偏光解析の実験を行った。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たものである。このときの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° である。QWPに対する入射光は方位 45° の直線偏光であるため、出射光は円偏光である。再生前にホログラムに強度マスクを掛けているため、従来にみられたCCDの縁からの回折像はほぼ消えている⁷⁾。

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

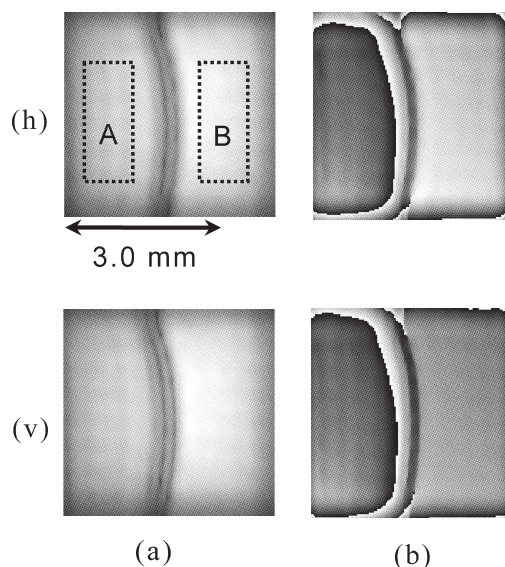
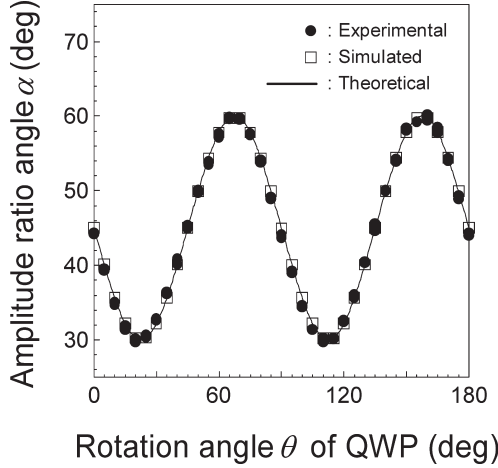


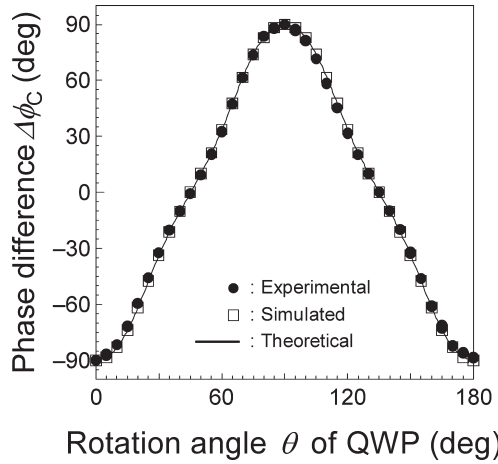
Fig. 5 Reconstructed (a) amplitude and (b) phase of virtual image of the quarter wave plate with the orientation of $\theta=0^\circ$ for (h) horizontal and (v) vertical polarizations, respectively. The area A is for the reference (Pol3) and the area B is for analysis (QWP).

平均値と理論値の差を位相ドリフト成分とし、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 $0^\circ\sim 180^\circ$ の間で 5° 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。Fig. 6 (b)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 α と位相差 $\Delta\phi$ の理論値である⁷⁾。グラフから実験値は理論値とよく一致していることがわかる。測定誤差の評価のために、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、結果を誤差 ϵ としてTable 1に示す。結果から ϵ は α と $\Delta\phi_c$ 両方ともに 1.0° 以下であった。

従来の光学系で同じ1/4波長板を用いて行った測定では、 α 、 $\Delta\phi_c$ に対して得られた誤差がそれぞれ 1.5° 、 3.0° であった。これらの結果を比較すると、今回の光学系では誤差が従来に比べて3分の1以下になる⁸⁾。この要因としては、光学系の改良によるFFRの発熱の影響を避けたことによる再現性の向上が見込まれる点に加えて、FFR自体の性能向上や変調回数の減少⁸⁾、ホログラム再生における強度マスク処理による回折の影響の減少、などが考えられる。実験によりこれらの要因を1つずつ検証するのは困難であるため、数値計算を用いて偏光解析をシミュレーションし、特に性能向上に寄与すると考えられる変調誤差や参照光の消光比に焦点を当て、その影響を調べる。



(a)



(b)

Fig. 6 Amplitude ratio angle α (a) and phase difference $\Delta\phi_c$ (b) for QWP with various orientations between 0° and 180° .

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。

$$U_T = \begin{pmatrix} U_{Th}(x, y) \\ U_{Tv}(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \exp\left(i\frac{\pi}{4}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-i\frac{\pi}{4}\right) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

参照光は、変調誤差 $\Delta\theta_m$ と消光比 η 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 η の直

Table 1 Error ε of α and $\Delta\phi$ for QWP.

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

線偏光である参照光 U'_{Rh} は、軸外し角を実験と同じ θ_{Rh} とすると、

$$U'_{Rh} = \begin{bmatrix} U'_{Rhx}(x, y) \\ U'_{Rhy}(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ i/\eta \end{bmatrix} \exp(ikx \sin \theta_{Rh}) \quad (12)$$

で与えられる。垂直方向に偏光した参照光 U'_{Rv} に対しては、この偏光方位を変調器で 90° 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。

$$U'_{Rv} = M(90^\circ + \Delta\theta_m) \cdot U'_{Rh} = \begin{bmatrix} U'_{Rvx}(x, y) \\ U'_{Rvy}(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ + \Delta\theta_m) & \sin(90^\circ + \Delta\theta_m) \\ -\sin(90^\circ + \Delta\theta_m) & \cos(90^\circ + \Delta\theta_m) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \exp(ikx \sin \theta_{Rh}) \\ i/\eta \exp(ikx \sin \theta_{Rh}) \end{pmatrix} \quad (13)$$

ホログラム強度は、式 (12) と式 (13) を式 (1) 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

$$I'_h(x, y) = |U'_{Rhx}(x, y)|^2 + |U_{Th}(x, y)|^2 + |U_{Tv}(x, y)|^2 + U_{Rhx}^*(x, y) \cdot U_{Th}(x, y) + U_{Rhx}(x, y) \cdot U_{Th}^*(x, y) + |U'_{Rhy}(x, y)|^2 + U_{Rhy}^*(x, y) \cdot U_{Tv}(x, y) + U_{Rhy}(x, y) \cdot U_{Tv}^*(x, y) \quad (14)$$

となる。参照光の消光比 η が有限の大きさであるため、式 (14) の下線部にみられるように、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わかる。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、偏光解析で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。

数値計算によるホログラムの再生像を Fig. 7 に示す。この場合のQWPの方位は 0° である。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すべて実験と同じとし、QWPの方位 $0^\circ \sim 180^\circ$ に対して 1° ごとに振幅比と位相差を計算した。数値計算の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。実験と同様にホログラムに強度マスク処理をすることにより、再生像に回折パターンがみられないことがわかる。図中の点線で囲ん

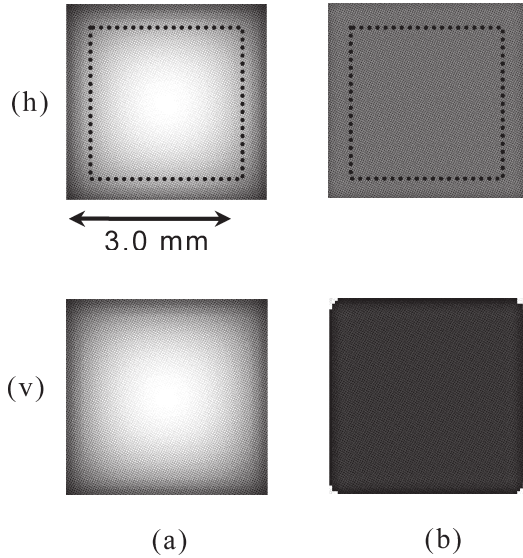


Fig. 7 Reconstructed (a) amplitude and (b) phase images of simulated holograms for a quarter wave plate with the orientation of $\theta=0^\circ$ for (h) horizontal and (v) vertical polarizations, respectively: $\eta=10^{11}$ and $\Delta\theta_m=0^\circ$. The area within dotted square is analyzed.

だ領域中の振幅比，位相差を計算し，その平均値を理論値と比較した．結果を実験値に合わせて 5° ごとに Fig. 6 に示す．また，理論値との差の平均値も Table 1 に示す．数値計算の結果は理論値にほぼ一致している．Table 1 から，誤差はそれぞれ 1.0×10^{-3} 未満であり，この数値計算により測定精度を検証できることが確認できた．計算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，結果に与える影響について調べた．はじ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 η 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．グラフでは計算結果をフィッティングした曲線で示した．参照光の消光比が小さくなるにつれて誤差が増加している．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° になる．この方位では，入射する直線偏光の方位がQWPの速軸または遅軸と一致するため，出射光が入射光と同じ 45° の方位をもつ直線偏光となる．これにより式(14)でみ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° のときに最大となっている．

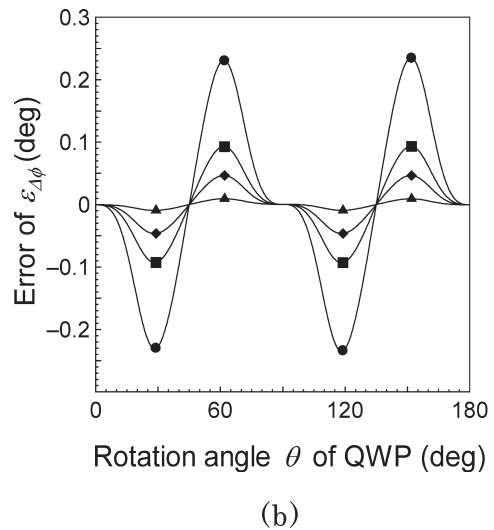
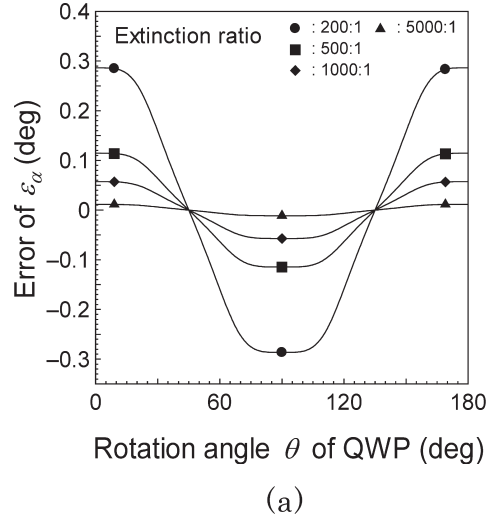
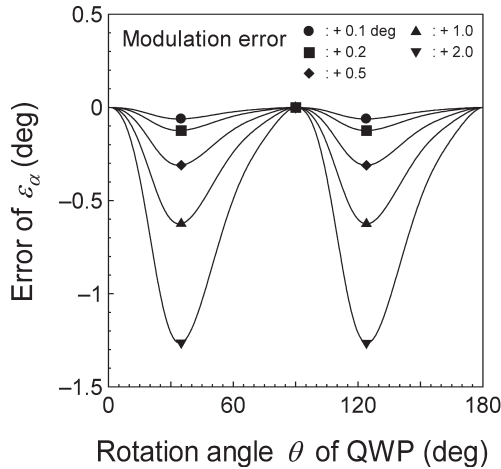


Fig. 8 Dependence of error on the value of extinction ratio of reference wave. (a) Error of α , (b) error of $\Delta\phi$.

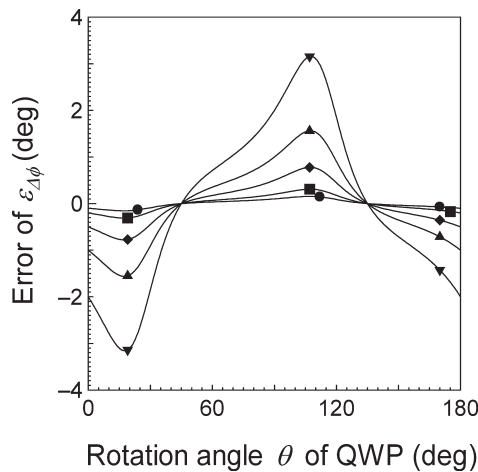
Table 2 Dependence of error ε on the value of extinction ratio η .

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

消光比の影響のみを考えれば，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，光学部品表面に付着した埃等からの回折や，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，数値計算結果よりも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，数値計算の結果から，実験



(a)



(b)

Fig. 9 Dependence of error on the magnitude of modulation error for reference wave. (a) Error of α , (b) error of $\Delta\phi$.

で得られた消光比 5000 : 1 に対しては誤差が 0.01° 未満にとどまる。この結果から、測定誤差に寄与する消光比の影響は小さいと考えられる。

次に変調誤差の影響を調べた。この場合は十分大きな消光比 ($\eta=10^{11}$) に対して、変調誤差を $+0.1^\circ \sim +2.0^\circ$ とし計算した。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° , 135° の場合に誤差がほぼ 0° 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ほうが測定結果に与える影響が大きいことが Table 3 からわかる。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° になる。Table 3 から、このときの誤差は位相差に関しては 0.7° 程度になり、消光比に比べ測定結果に与える影響ははるかに大きくなる。これらの結果から、測定結果に含まれる誤差として

Table 3 Dependence of error ε on the modulation error for reference wave.

$\Delta\theta_m$	Error (deg)				
	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

は変調誤差のほうが大きいことがわかった。以上から、測定精度の向上に対しては変調精度が重要であることがわかった。

変調精度の向上には、具体的には変調器に変調用とは別の帰還用コイルを設けて、偏光子などで検出した変調誤差信号をこの帰還用コイルにフィードバックして誤差を軽減する方法などが考えられる¹³⁾。測定の高速度化は難しくなるが、測定の大きな誤差要因となる変調誤差の軽減には効果があると考えられる。

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もつことが可能になった。これに加え、変調器の単一化により従来では問題となっていた変調器間の調整の難しさも解消された。1/4 波長板を物体として用いた偏光測定においては、それぞれ振幅比、位相差に対して、理論値との測定誤差 0.34° , 0.79° を得た。これは従来の光学系において得られた誤差の 3 分の 1 以下であった。変調器の構成を含めた光学系の大幅な改善が、再現性の向上や高精度化に寄与したと考えられる。

次に高精度測定に寄与した条件を検討しシステムの評価を行うために、数値計算により偏光解析をシミュレーションし、参照光の消光比や変調誤差について測定結果に与える影響を調べた。その結果、参照光の変調誤差が測定に与える影響が大きいことがわかった。

今後、偏光解析のさら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。測定の高速度化なども含めて検討する必要があると考えられる。

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 and C. 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.