

自己アライメント光学系を用いた位相コントラストフィルタリングによるレーザー画像表示

豊田 晴義*・イエスパー グルックスター**・吉田 成浩*・原 勉**

*浜松ホトニクス(株)中央研究所 〒434-8601 浜北市平口 5000

**デンマーク RISO 国立研究所 PO BOX 49, DK-4000 Roskilde, Denmark

A Laser Projection System by a Phase Contrast Filtering Employing a Self-Alignment Optical Arrangement

Haruyoshi TOYODA*, Jesper GLÜCKSTAD**, Narihiro YOSHIDA* and Tsutomu HARA*

*Hamamatsu Photonics K.K., Central Research Laboratory, 5000 Hirakuchi, Hamakita 434-8601

**Riso National Laboratory, PO BOX 49, DK-4000 Roskilde, Denmark

A laser projection system by a phase contrast filter (PCF) technique is demonstrated and discussed. The PCF technique is well known as a Zernike phase contrast microscope to visualize phase distribution. We have previously demonstrated an extension of the Zernike technique named the generalized PCF method. In this paper, we propose and demonstrate a robust generalized PCF system on the two tasks on the optical alignment and an adaptive image display capability. Our proposed system consists of two modules such as a phase image display module and a PCF module. We have used liquid crystal spatial light modulators named PAL-SLM as key devices for the both modules. The optical setup employs a self-alignment optical arrangement. We have experimentally confirmed that our proposed system has given a desired intensity image with adequate contrast and energy efficiency, and robustness on PCF alignment.

Key words: laser projection, spatial light modulator, phase contrast filter, self-alignment, phase modulation

1. はじめに

レーザー加工やマーキング・光化学反応制御など、高品質なレーザー応用において、レーザーの損失を最小限に抑えた画像プロジェクション技法は、不可欠な要素技術となる。この技術は、任意のレーザー強度画像の表示を100%の光利用効率で実現すること、といい換えられる。

筆者らは、こうした高効率な画像表示方法として、コンモンパス干渉計 (common-path interferometry) を用いた位相コントラストフィルター (phase contrast filter: PCF) 技術に着目した。この PCF 技術の例としては、位相物体をコントラストよく計測する目的のため、Zernike により発案された位相差法¹⁾が位相差顕微鏡などに幅広く利用されている。また、位相差が可変可能な液晶セルを位相コントラストフィルター (PCF) として用いた計測シ

ステムへの応用が報告されている²⁾。一方で、レーザー画像表示への応用を目指して、Glückstadらは、Zernike の位相差法を [0, 2π] の位相入力範囲に拡張し、入力像として位相コーディング画像を用いることで、光を損失することなく、出力面に強度画像が投影できるシステムを提案し³⁾、その有効性を実証した⁴⁾。本論文では、従来のシステムで課題となっていた、① PCF の変調度を適応制御する機構と、② PCF 光学系におけるマイクロメートル単位の位置合わせ機構、の 2 つの問題を克服する新しい光学系を提案し、実験的確認を行った。提案したシステムは、反射型の 4f 光学系を基本に構成され、キーデバイスとして光アドレス型空間光変調器 (PAL-SLM^{5,6)}) を位相表示ユニットと PCF ユニットの 2 つのユニットに用いた。構築した実験システムにより、本手法が高い光利用効率と光学

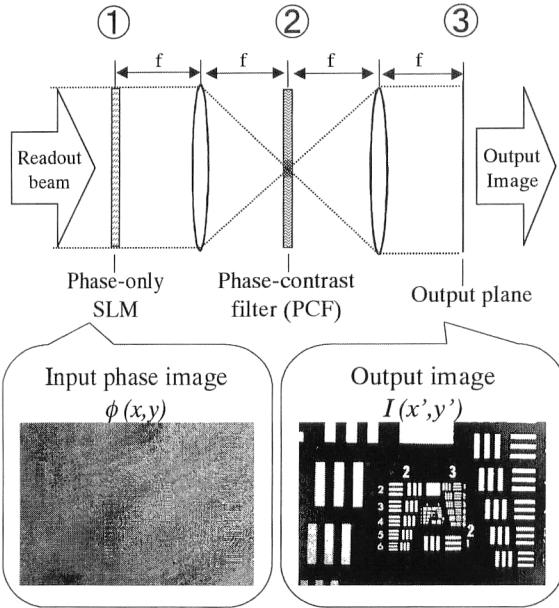


Fig. 1 Fundamental setup of phase contrast filtering system.

系の簡便なアライメント性能をもつことを確認した。

本論文の構成は、第2章で原理説明と新しいシステム光学系の提案を行い、第3章では、実験光学系の構成、キー・コンポーネントとなる位相変調型空間光変調器（PAL-SLM）の基本特性、およびPAL-SLMを用いた2つの構成ユニットの機能について説明する。第4章にて、2値画像を用いた実験結果を示し、提案システムの有効性を明らかにする。第5章では光利用効率に関する考察を行い、第6章にまとめを記す。

2. 原理とシステム光学系

2.1 原 理

本手法は、Fig. 1に示すように、4f光学系を基本としたフーリエフィルタリング光学系であり、①入力像として位相コーディング画像 $\phi(x, y)$ を用い、②フーリエ面において0次光に位相シフトを与えることで、③出力面に所望の強度画像 $I(x', y')$ を表示することができる。この光学系では、入力されたレーザー光は、位相画像としてコーディングされ、4f光学系のフーリエ面において0次光に位相シフトが与えられ、出力面に結像される。つまり、結像系の光路中における光の損失がないため、原理的に、入力されたレーザー光のエネルギーはすべて出力面に到達する系が実現できる。Table 1に、本手法と、従来のレーザー表示方法（強度画像の結像、ホログラム、キノフォーム）との比較をまとめた。最も一般的な手法である強度画像の結像の場合、読み出し光は入力像表示部（フィルムや液晶パネルなど）において強度変調がなされ、レンズで出

Table 1 Comparison of our proposed method and others.

	Intensity imaging	Our method (PCF)	Hologram	Kinoform
Energy efficiency	×	○	○	○
Desired device resolution	○	○	×	○
Calculation time	○	○	×	×
Diffraction noise	○	△	×	×

力面に結像される。入力像表示部で光をカットすることで、明暗の画像を出力面に形成する。つまり、入力像表示部でカットされた読み出し光は損失となる。一方、DOE (diffractive optical element) や HOE (holographic optical element) などのホログラム技術は、原理的に任意の波面整形が可能であり、高い効率で位相画像を強度画像に変換できる能力をもつ。しかし、実際のシステム化には、0次光分離用の搬送周波数を重畳するための高い解像度を必要とするため、表示デバイスの解像度や階調の制約から、任意の画像を高い効率で表示できるシステムは実現されていない。また、位相型ホログラムであるキノフォームを用いた場合でも、所望の強度分布を得るためににはフィードバック型の演算に膨大な時間を必要とするなどの課題をもつ。それに比較して、筆者らの注目したPCF法は、結像系を基本とするため入力像表示デバイスの解像度が出力面での解像度に対応する。これにより、現状のSLMのもつ解像度で、実用的なシステムが構築できる可能性をもつ。また、従来の強度画像の結像方式に比較した場合、本手法は位相画像表示と位相フィルタリングの組み合わせを基本構成とするため、原理的に100%の光利用効率が実現できることになる。

このPCFを用いた画像表示については、Glückstadらによって、位相振幅画像と位相振幅フィルターの組み合せシステムについての理論的な解析がなされている^{7,8)}。このとき、入力面またはフーリエフィルター面で振幅変調を行った場合には、光の損失が生じることになる。本論文では、高光利用効率なレーザー表示に焦点を当て、入力およびPCFとして位相変調デバイスのみを用いたシステム化を行った。つまり、光利用効率100%のレーザー表示システムを念頭において実験的検証を行うことを目的とした。

以下に、出力面に所望の強度画像を得るために必要な、入力像の位相コーディング法と位相シフト量の設定方法について示す。

入力像 $\alpha(x, y)$ は、位相変調画像であり、式(1)に示される。

$$\alpha(x, y) = \exp[i\phi(x, y)] \text{circ}(r/\Delta r) \quad (1)$$

ここで、 $\alpha(x, y)$ は入力位相画像を示す。また、 Δr は入力の位相変調 SLM の有効領域 ($r=(x^2+y^2)^{1/2} \leq \Delta r$) を示す。フーリエ面 (f_x, f_y) において、位相コントラストフィルターの位相シフトを

$$T(f_r) = 1 + (\exp(i\theta) - 1) \text{circ}(f_r/\Delta f_r) \quad (2)$$

と表す。ここで、 θ は位相シフト量、 Δf_r は位相シフト領域の半径 ($f_r = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \leq \Delta f_r$) を示す。式(1)および式(2)から出力面での強度分布を求めるとき、

$$I(x', y') \cong |\exp(i\tilde{\phi}(x', y')) + K|\bar{\alpha}|(\exp(i\theta) - 1)|^2 \quad (3)$$

となる。ここで、 $\bar{\alpha}$ 、 $\tilde{\phi}(x', y')$ 、 K は式(4)～(6)に示されるように、入力位相画像の複素平均値、入力位相画像の位相分布、PCF フィルターの形状に関する係数、をそれぞれ表す。

$$\bar{\alpha} = [\pi(\Delta r)^2]^{-1} \iint_{\Delta r} \exp[i\phi(x, y)] dx dy \quad (4)$$

$$\tilde{\phi} = \phi - \phi_{\bar{\alpha}} \quad (5)$$

$$K = 1 - J_0(2\pi\Delta r \Delta f_r) \quad (6)$$

ここで、 J_0 は 0 次のベッセル関数を示す。

さらに、式(3)は、下記のように書き表される。

$$I(x', y') \cong 1 + 4k|\bar{\alpha}| \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[k|\bar{\alpha}| \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \sin\left(\tilde{\phi}(x', y') + \frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (7)$$

ここで、得られる強度画像 $I(x', y')$ において、所望の強度画像を得るために、暗くなるべき部分 $(x'_0, y'_0) \in \mathfrak{R}'_0$ について $I(x'_0, y'_0) \equiv 0$ を満たすように、表示条件 $(\phi(x, y), \theta)$ を調整する。

つまり、式(3)によって示される入力位相画像と出力強度画像の関係は、右辺の第 1 項はフーリエ面における高次項（信号光成分）、第 2 項は 0 次項（参照光成分）を意味しており、この 2 つの波面の干渉によって入力位相画像は出力強度画像に変換されることになる。ここで、 $\phi(x, y)$ （入力像の位相分布）および θ （PCF の位相変調度）を、所望の強度出力がコントラストよく得られるように調整することによって、位相画像-強度画像変換が実現される。この関係は、Glückstad らによってチャートによる解析手法が提案されている⁷⁾。また、実験では、入力像として 2 値位相画像を用いているため、上記の $\phi(x, y)$ は、

$$\phi(x, y) = \begin{cases} 0 & \dots (I(x', y') \equiv 0) \\ \phi & \dots (I(x', y') \equiv 1) \end{cases} \quad (8)$$

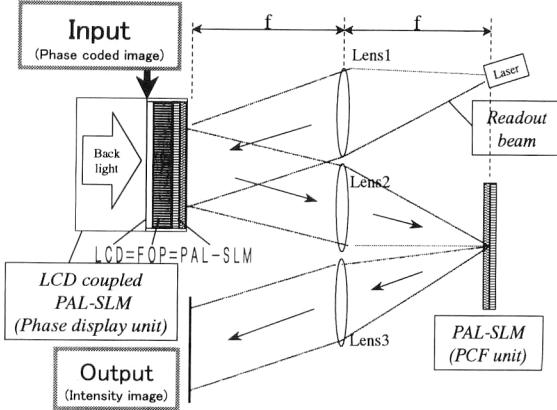


Fig. 2 Our proposed optical setup utilizing self-alignment.

と書きかえられる。つまり、出力像において明るく表示させたい領域を位相 ϕ 、暗く表示させたい領域を位相ゼロとして入力像に表示する。入力像は位相画像として表示するため、PCF で位相差を与えない場合には、Fig. 1 左下図のようなコントラストのない出力像が現れる。PCF で 0 次光部分に位相差 θ を与えることで、右下図のようなコントラストのよい強度画像を得ることができる。

このように、本システムでは、 (ϕ, θ) の 2 つの位相変調パラメーターを適正に調整することで所望のコントラスト画像が得られることになる。

2.2 提案システム光学系

上記の手法を光学的に実現するための基本ユニットは、入力位相コーディング画像を表示するための位相画像表示ユニットとフーリエ面において位相シフトを与えるための位相コントラストフィルターである。筆者らは、位相画像表示ユニットおよび位相コントラストフィルターの両ユニットに位相変調型空間光変調器 PAL-SLM^{5,6)} を用いたシステムを提案する。筆者らの提案するレーザー表示システムを Fig. 2 に示す。本システムは、原理的に光利用効率を 100%にするために、PAL-SLM を 2 つ用いて反射型の PCF 光学系を構成する。PCF 光学系は、位相画像表示ユニット (phase display unit) と PCF ユニット (PCF unit) の 2 つのユニットを、4f 光学系の入力面とフーリエ面にそれぞれ配置した。位相画像表示ユニットは、PAL-SLM を基本素子として任意の位相画像を表示する機能をもつ。コンピューターからの制御を行うために、液晶パネル (LCD) と PAL-SLM を光ファイバープレート (FOP) で直接カップリングした電気アドレス型空間光変調器⁹⁾ を用いた。一方、PCF ユニットは、PAL-SLM を自己アドレス型として利用した。この自己アドレス型光学系は、SLM の読み出し側からの入力光で書き込みを行う光学系である。PCF がフーリエ面上に配置され、読み出

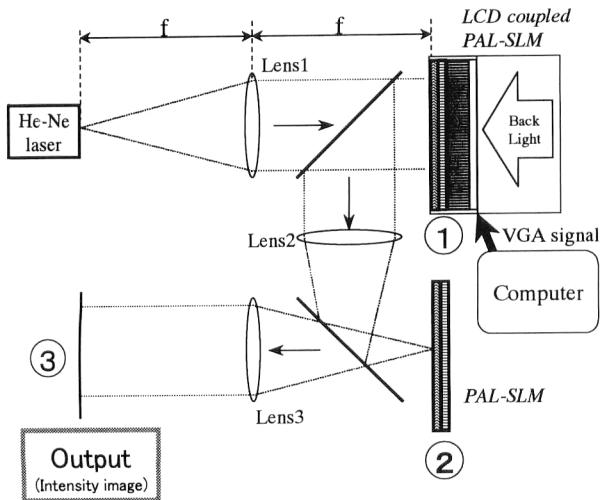


Fig. 3 Experimental setup.

し光の0次光部には強い光が集まるため、SLMの反射面における漏れ光をPAL-SLMへの書き込み光として用いることにより、0次光のみに位相シフトを与える機能を実現する。この自己アドレス方式の採用によって、これまでの固定位相マスクではマイクロメートル単位のアライメント精度が3軸すべてに必要であったのに対して、光軸方向の焦点位置の調整だけでよくなるため、大幅なアライメントの効率化が実現できることになる。また、PAL-SLMを用いることで、表示画像の位相変調度 ϕ およびPCFの位相変調度 θ を、駆動電圧の調整やSLMへの書き込み光強度調整によって任意に変化させることが可能となり、表示する画像の白/黒面積比に応じて最適化が必要となる、 (ϕ, θ) のパラメーター調整が容易に行えるシステム構成が達成できる。

実験システム構成、およびキーデバイスであるPAL-SLMの基本特性と、位相画像表示ユニットおよびPCFユニットとして用いた場合の機能について次章で説明する。

3. 実験

3.1 実験システム構成

今回の実験では、斜入射の影響を排除して、自己アドレス型PCF光学系の基本特性を評価するために、Fig. 3に示すような、ハーフミラーを用いた垂直読み出し光学系を採用した。読み出しレーザーとしてHe-Neレーザー(10 mW, $\lambda=633$ nm)を用い、Lens1によりコリメートした。Lens2はフーリエ変換レンズ($f=400$ mm), Lens3は逆フーリエ変換レンズ($f=150$ mm)である。コンピューターからの画像信号はLCDを通してPAL-SLMに書き込まれ、読み出しレーザーが位相画像として変調され

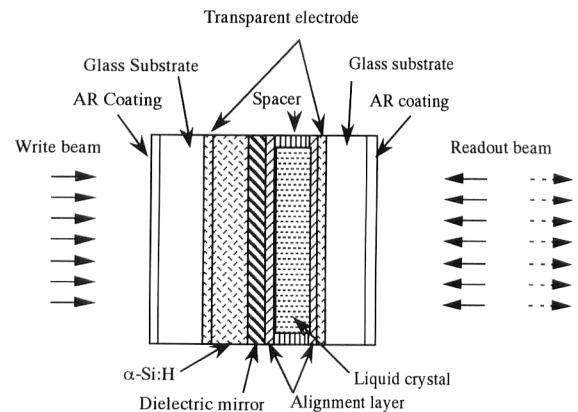


Fig. 4 Structure of PAL-SLM.

る。Lens2によってフーリエ変換された信号光は、フーリエ面に配置されたPCF用PAL-SLMによって0次光部分が変調される。その読み出し画像をLens3により、もう一度フーリエ変換することで、出力面に強度画像が得られる。出力面では干渉の影響を避けるため、ファイバー窓付CCDカメラを用いて強度分布を観測した。

3.2 キーデバイス(PAL-SLM)の特性

本システムでキーデバイスとして用いるPAL-SLMの構成をFig. 4に示す。光アドレス材料として水素化アモルファスシリコン(α -Si:H), 光変調材料としてネマティック液晶を用い、透明導電膜付ガラス基板に挟持された構成をもつ。中央の誘電体多層膜ミラー(反射率>99.8% ($\lambda=633$ nm))と遮光層(吸収率>99%)により、入力面と出力面が分離されている。液晶が平行配向されており、純粋な位相変調を実現している。駆動電圧として±1~5 V程度の矩形波を印加する。入力面に光が入射されると、その光強度に応じて α -Siの抵抗率が変化し、液晶層にかかる電界が変わることで、読み出し光の位相が変調される。このとき、液晶層は屈折率分布をもつことになるが、各層は無反射条件を満たすように膜厚設計されているため、位相変調レベルの違いによる反射率の不均一性は1%以下に抑えられている。PAL-SLMは画素構造をもたず開口率が100%になるため、読み出しレーザーを、光の損失なく利用できる。一般的なPAL-SLMの位相変調特性をFig. 5に示す。駆動電圧は±3 V, 1 kHzの矩形波を用いた。位相変調特性は、入力光強度の対数にほぼ比例しており、入射光量が $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ のとき、位相変調の大きさが π となっている。Table 2に一般的なPAL-SLMの特性をまとめた。 2π の位相変調、30 msの応答速度、20 lp/mm程度の解像度をもつ。構造の改良により1 ms(上昇時間)の高速応答も報告されている¹⁰⁾。

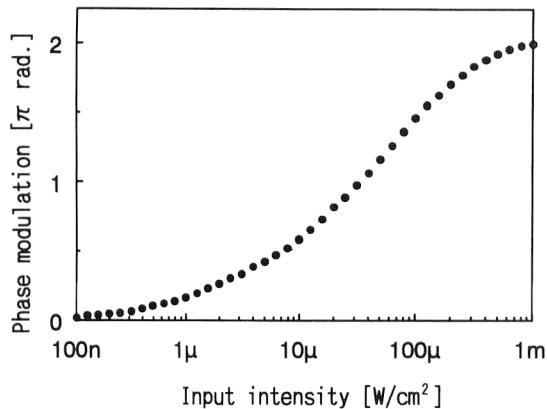


Fig. 5 Phase modulation characteristic of PSL-SLM.

Table 2 Characteristics of PAL-SLM.

Area	$20 \times 20 \text{ mm}$
Phase modulation	2π (at 680 nm)
Sensitivity	$30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (π -modulation)
Resolution	20 lp/mm (50% MTF)
Response time (rise time)	30 ms (max. 1 ms)

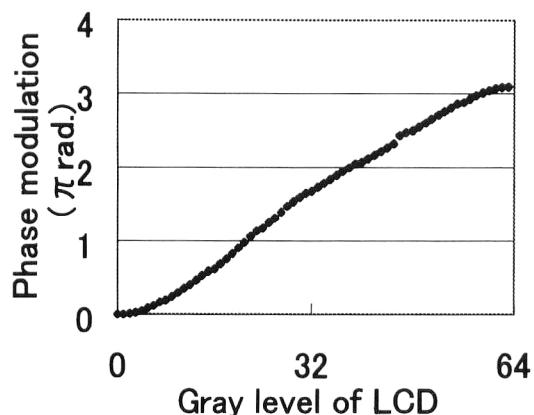


Fig. 6 Phase modulation characteristic of LCD coupled PAL-SLM.

3.3 位相画像表示ユニット

実験では、位相画像表示ユニットとして、液晶パネル(LCD)の画像をPAL-SLMに書き込むことで、コンピューターから任意の位相変調画像の表示を行った。表示する位相変調度は、LCDに与える画像信号(VGA信号)の輝度値を変更することで実現できる。Fig. 6にLCDへの画像信号の設定輝度値に対する位相変調度の関係を示した。SLMの入出力特性とLCDの入出力特性を整合させることで、コンピューターからのアナログ信号レベルに対して線形性のよい位相変調特性が得られた。また、本ユニットは、LCDを直接表示装置として用いる場合に比較して、純粋な位相変調が得られる点、およびLCDとSLMのカ

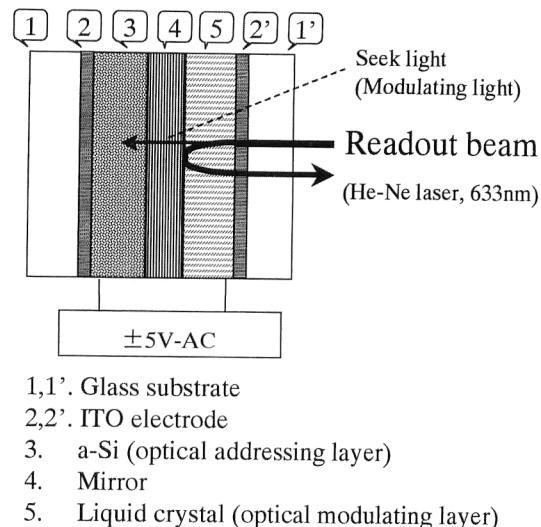


Fig. 7 Illustration of PCF by using of PAL-SLM.

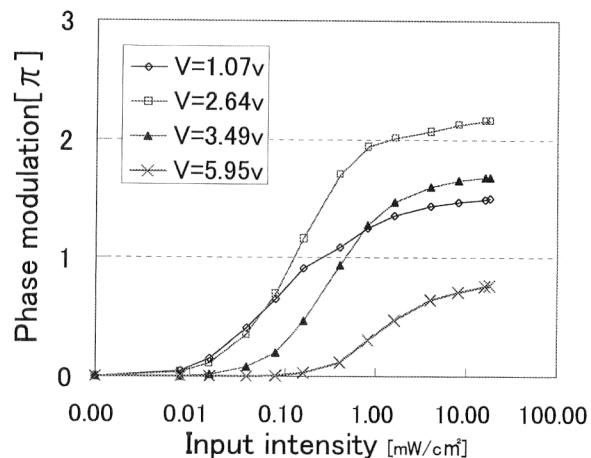


Fig. 8 Phase modulation characteristic of PSL-SLM as PCF filter.

ップリング光学特性を整合することでLCDのもつ画素構造に起因する光損失を最小限に抑えられる点の2つの利点をもつ^{9,11)}。

3.4 位相コントラストフィルター(PCF)

2章2節で示したように、本システムでは、PAL-SLMをPCFとして用いることで、PCFの位相シフト量 θ が可変であること、アライメント効率化のためのセルフアライメント光学系を提案した。Fig. 7に原理図を示す。PCFに用いたSLMは、漏れ光による書き込みを行うために遮光層を除いて作製した。この構成では、図中右側から入射されるSLMの読み出し光(信号光)のうちミラー(反射率99.5%以上)を漏れた光が書き込み光として自己アドレスされることになるため、光軸に垂直面内の0次光位置のアライメントが不要となる。Fig. 8に入射光量(横軸)に対する位相変調度(縦軸)を、駆動電圧をパラメー

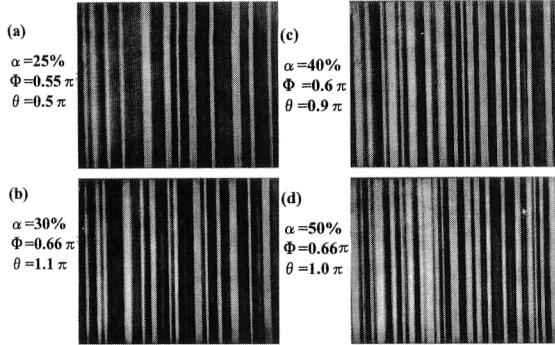


Fig. 9 Experimental result 1 (line pattern). Intensities of the images are normalized.

ターとして示した。ここでは、駆動波形として 10 kHz の矩形波を用いた。横軸は Fig. 5 と同様に入射光量の対数軸であり、入出力特性は対数特性を示す。飽和する位相変調レベルや変調特性が駆動電圧によって制御できることがわかる。たとえば、0 次光部分を π 変調させたい場合には、4.9 V 程度の矩形波を駆動波形としたときに、 π 変調（飽和レベル）が得られた。

4. 実験結果

実験では、2 つの位相変調パラメーター (ϕ, θ) (ϕ : 入力 2 値位相画像の変調度, θ : PCF の位相シフト量) を適応制御することにより、さまざまな白/黒面積比をもつ 2 値パターン（位相画像）が、コントラストのよい強度画像として表示可能であることを示す。ここでは、任意の画像に対応できることを示すために、対象画像として、縦縞パターンとランダムドットパターンの 2 種類を選んだ。結果を Fig. 9 および Fig. 10 に示す。表示させたいターゲット画像は、25~50% の白/黒面積比をもつ 2 値画像である。それぞれの画像において、出力像が最もコントラストのよい画像が得られるように、(ϕ, θ) を調整した。

Fig. 9 には縦縞パターンを対象にした場合の結果を示した。4 つの縦縞パターンは、ランダムな空間周波数をもつよう作製した。また、白/黒面積比として 25, 30, 40, 50% の値をもつため、それぞれのパターンごとに高いコントラストの得られる表示条件 (ϕ, θ) は異なる。実験では、目視により出力像のコントラストが最も大きくなるように (ϕ, θ) を調整し、いずれのパターンにおいても、良好なコントラストをもつ出力を得た。また Fig. 10 には、25~50% の白/黒面積比をもつランダムドットパターンに対する結果を示す。表示条件の最適調整を行った結果、同様に、高いコントラストをもつ強度画像表示が可能であることを確認した。

このように、縞パターン、ランダムドットパターンのい

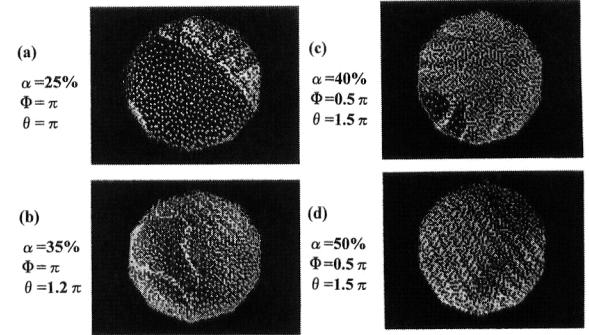


Fig. 10 Experimental result 2 (random dot pattern). Intensities of the images are normalized.

ずれを用いても、白/黒面積比が異なる画像において、(ϕ, θ) を最適調整することで、コントラストのよい画像が得られることを確認した。つまり、SLM のもつ位相変調機能を用いて、25~50% の任意の白/黒面積比をもつ画像の表示が可能となることを実験的に確認した。

また、これまでのシステム光学系では、フーリエ面上で 0 次光位置に数十 μm の PCF を位置合わせする必要があり、ビームの時間シフトや光学系の振動に影響を受けやすい光学系であった。本システムでは、自己アライメント機能により、光学系の位置合わせ問題を大幅に緩和とともに、ロバストな光学システム化が可能となった。

5. 考察

5.1 出力像の光利用効率およびコントラスト

前章の実験における、出力像の光利用効率 η およびコントラスト C について評価を行った。光利用効率 η については、式 (9) のように、まず、PCF の ON/OFF 時の光強度比 ($E_{\text{ON}}/E_{\text{OFF}}$) を算出した。

$$\begin{aligned} E &= E_{\text{ON}}/E_{\text{OFF}} \\ &= (\text{PCF-ON 時の出力像の白領域平均光強度}) \\ &\quad /(\text{PCF-OFF 時の出力像の平均光強度}) \end{aligned} \quad (9)$$

さらに、式 (9) で求められる実験値 E と、式 (10) で表される理論値 E_0 との比を η とし、式 (11) のように定義した。

$$E_0 = 1 / (\text{白/黒面積比}) \quad (10)$$

$$\eta = E/E_0 \quad (11)$$

また、白/黒コントラスト比 C は下記のように定義した。

$$\begin{aligned} C &= (\text{出力像白領域の光強度}) \\ &\quad /(\text{出力像黒領域の光強度}) \end{aligned} \quad (12)$$

この η および C の評価結果を Table 3 および Table 4 にまとめた。光利用効率の白領域の計算では、縦縞パターンに対しては全領域に対して白レベルの光量計算を行い、

Table 3 Efficiency on experimental result 1 (line pattern).

Line pattern	B/W ratio (%)	Theoretical efficiency (=1/ratio)	Efficiency η (%)	Contrast C
(a)	25	4.0	64	7.64
(b)	30	3.3	75	15.5
(c)	40	2.5	81	14.6
(d)	50	2.0	86	10.9

Table 4 Efficiency on experimental result 2 (random dot pattern).

Random dot pattern	B/W ratio (%)	Theoretical efficiency (=1/ratio)	Efficiency η (%)	Contrast C
(a)	25	4.0	76	10.5
(b)	35	2.9	81	8.6
(c)	40	2.5	85	8.6
(d)	50	2.0	89	10.3

ランダムドットパターンに対しては、中央・左右・上下の5つの領域について光量計算した平均値を用いた。光利用効率 η は、出力像の白レベルにどの程度の光量が配分できているかを示している。理論値は、原理的には白/黒面積比に応じて4倍（白/黒面積比=25%の場合）から2倍（白/黒面積比=50%の場合）の光量が得られることが期待される。表に示すように、実験結果は、縦縞パターンに対しては理論値の65~85%程度、ランダムドットパターンに対しては理論値のほぼ75~90%程度を達成していることがわかる。

また、コントラスト C は、出力像の中央・左右・上下の5領域において、白黒の両方を含む一定の領域を定め、その領域における白領域および黒領域のコントラスト比の平均値を示した。白/黒面積比の異なるパターンについて、いずれにおいても10程度のコントラスト値が得られている。

5.2 光損失の要因

実験結果では、異なる白/黒面積比のパターンに対してコントラストのよい画像が得られることを実験的に示したが、光利用効率 η が理論値の100%に達しなかった要因について整理する。光損失の要因と考えられるものを下記に示した。

- ① 入力位相画像の位相変調の均一性および精度
- ② PCF の位相シフト量の精度
- ③ PCF のサイズ・形状の精度
- ④ 読み出しレーザーの均一性
- ⑤ 結像レンズ系の歪み
- ⑥ その他光学系の吸収・散乱など

上記のように実験に用いた光デバイスおよび光学系に

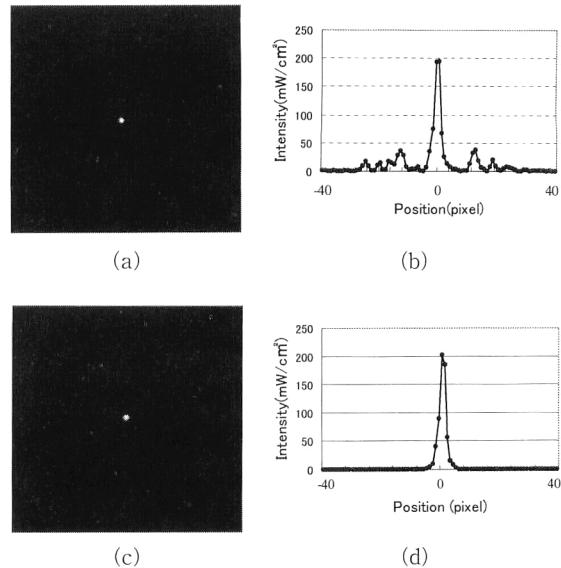


Fig. 11 (a) Intensity pattern on PCF-plane (line pattern). (b) Intensity profile at the horizontal line including 0th-order light position (line pattern). (c) Intensity on PCF-plane (random dot pattern). (d) Intensity profile at the horizontal line including 0th-order light position (random dot pattern).

は、さまざまな歪みの要因が顕在化する。今回の実験では、縦縞パターンの中央部と周辺部の光量差が、ランダムドットパターンの場合に比較して大きく現れている。これは、上記の②および③が主な要因と考えられる。縞画像の場合は、フーリエ面において0次光以外の部分に明るい輝点が現れる可能性があるため、その輝点によるPCF用SLMへの書き込みがあると、本来0次光のみに位相変調を行うべきところが、他の高次項にも位相変調が重畳するため理論値とは異なる特性が現れることになる。Fig. 11に比較的効率の低かった白/黒面積比25%のパターン((1)縦縞パターン, (2)ランダムドットパターン)におけるPCF面の光強度画像(フーリエ面における画角3mmの部分を拡大表示)と、0次光を含む水平線上の強度プロファイルを示した。縦縞パターンでは0次光以外の部分で光強度の強い部分が現れていることがわかる。一方、ランダムドットパターンでは、ガウシアン分布に近いフーリエパターンが現れており、その半値幅は約30 μmであった。

今回の実験では、こうしたさまざまなノイズ要素に対して、位相画像表示ユニットおよびPCFユニットの位相変調度を適応制御することで、出力像を最適化するようフィードバックできていることになる。また、自己アライメント光学系の採用によりPCFユニットの位置合わせが簡素化され、位置ずれによる光損失はほとんど影響ないシステムが構築できた。

6. まとめ

筆者らは、位相変調型空間光変調器 PAL-SLM を位相画像表示ユニットと PCF ユニットとして用い、反射型 4f 光学系を基本とした PCF 光学システムを提案した。さらに、実験システムを構築することによって、高い光利用効率で、レーザー画像プロジェクションが実現できることを確認した。本システムは、位相コーディング画像の表示に、LCD と PAL-SLM を FOP カップリングした電気アドレス型 SLM を用いることにより、コンピューターからの画像を光の損失なく 2 次元の位相変調画像として表示した。また、PCF にも、PAL-SLM を自己アドレス型として用いることで光軸に垂直な面内の位置合わせが不要となり、大幅なアライメントの効率化が実現できた。本論文では、位相変調素子と反射型光学系を組み合わせることで、原理的に 100% の光利用効率が達成可能な画像表示装置を構成し、その実験的実証に焦点を当てた。対象画像の白/黒面積比に応じて、表示位相画像の変調度と PCF の位相シフト量を整合させるため、本システムでは、液晶 SLM のもつ制御機能により、任意の位相変調を行うことが可能となった。実験では、25~50% の白/黒面積比をもつ 2 値ランダムドットパターンを用いて、本システムが、光利用効率 75~90%，コントラスト 10 程度でレーザー画像表示を実現できることを実験的に確認した。このように、本システムでは一様な読み出しビームから、高い光利用効率で、所望の強度画像を形成可能であることを示している。

最後に今後の課題について述べる。ここでの実験システムは、ハーフミラーを用いた垂直読み出し光学系を用いたため、ハーフミラーによる光の損失が存在する。今後は、Fig. 2 で提案した斜め読み出し系での実証を進めていく。さらに、ITO 膜の透過率向上や回折ノイズの軽減などに改良を加え、理論値である 100% の光利用効率に近づけることにより、レーザー加工機、光ピンセット¹²⁾、暗号化装置¹³⁾などの応用システムの実用化に結び付けていきたいと考えている。

本研究の機会を与えていただいた浜松ホトニクス 畫馬輝夫社長、鈴木義二中央研究所長に深謝する。また、日ごろ

より、熱心な討論をいただいた浜松ホトニクスの小林祐二氏、向坂直久氏、井上卓氏に感謝する。また、SLM 測定および実験において伊ヶ崎泰則氏、福智昇央氏に協力いただいたことを感謝する。

文 献

- 1) F. Zernike: "How I discovered phase contrast," *Science*, **121** (1955) 345-349.
- 2) H. Kadono, M. Ogasu and S. Toyooka: "Phase shifting common path interferometer using a liquid crystal phase modulator," *Opt. Commun.*, **110** (1994) 391-400.
- 3) J. Glückstad: "Phase contrast image synthesis," *Opt. Commun.*, **130** (1996) 225-230.
- 4) J. Glückstad, L. Lading, H. Toyoda and T. Hara: "Lossless light projection," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1373-1375.
- 5) N. Mukohzaka, N. Yoshida, H. Toyoda, Y. Kobayashi and T. Hara: "Diffraction efficiency analysis of a parallel aligned nematic-liquid-crystal spatial light modulator," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 2804-2811.
- 6) 豊田晴義, 吉田成浩, 向坂直久, 小林祐二, 原 勉: "位相変調型空間光変調器を用いた光関連システム", *光学*, **23** (1994) 315-320.
- 7) J. Glückstad and P. C. Mogensen: "Optimal phase contrast in common-path interferometry," *Appl. Opt.*, **40** (2001) 268-282.
- 8) J. Glückstad and P. C. Mogensen: "Reconfigurable ternary-phase array illuminator based on the generalised phase contrast method," *Opt. Commun.*, **173** (2000) 169-175.
- 9) Y. Kobayashi, Y. Igasaki, N. Yoshida, N. Fukuchi, H. Toyoda, T. Hara and M. H. Wu: "Compact high-efficiency electrically-addressable phase-only spatial light modulator," *Proc. SPIE*, **3951** (2001) 158-165.
- 10) Y. Igasaki, N. Yoshida, H. Toyoda, Y. Kobayashi, N. Mukohzaka and T. Hara: "High speed parallel aligned liquid crystal spatial light modulator operated at 180 Hz," *Opt. Rev.*, **4** (1997) 167-169.
- 11) Y. Igasaki, F. Li, N. Yoshida, H. Toyoda, T. Inoue, N. Mukohzaka, Y. Kobayashi and T. Hara: "High efficiency electrically-addressable phase-only spatial light modulator," *Opt. Rev.*, **6** (1999) 339-344.
- 12) P. C. Mogensen and J. Glückstad: "Dynamic array generation and pattern formation for optical tweezers," *Opt. Commun.*, **175** (2000) 75-81.
- 13) J. Glückstad: "Image decrypting common path interferometer," *Proc. SPIE*, **3715** (1999) 152-159.