

## 液晶ディスプレイと電子ホログラフィ ～映像メディアの進化の視点から～

東北大学 藤掛英夫

液晶は、数Vの低電圧で多様な光学特性を自在に制御できる機能性有機材料である。私は、多彩な液晶の分子配列（配向）現象のディープな世界を探求するのではなく、配向の自己組織化を制御してデバイスに役立てる応用屋である。私が、放送メディアの開拓をミッションとする NHK の技術研究所で液晶研究を立ち上げたのは 30 年前で、小型の TFT 駆動液晶パネルが実用化された頃である。まず私は、光並列演算に基づく光画像処理に、光書き込み式の液晶空間光変調素子（SLM）を応用する研究に着手した。その頃から、液晶の限界解像度はどのくらいなのかとよく聞かれた。そのため、薄くてしきい値特性のある強誘電性液晶の限界解像度をパターン電極で駆動して、その解像度が液晶配向欠陥や配向膜表面状態に依存することを明らかにした。

(1 ページにつづく)

### 目 次

1. 卷頭言：液晶ディスプレイと電子ホログラフィ ～映像メディアの進化の視点から～	藤掛英夫 表紙
2. 位相変調型液晶空間光変調器とその応用	瀧口 優 2
3. 1 μm ピッチの画素を有する電子ホログラフィックディスプレイ用 光変調素子の構造設計	磯前慶友, 他 8
4. ホログラフィックディスプレイ用位相変調素子の液晶層における 構造パラメータが再生像の画質に及ぼす影響	千田一馬, 他 15
5. ホログラフィックレーザー加工	長谷川智士, 他 21
6. 細胞のホログラフィック光刺激	的場 修 -
7. 光学スクリーンとして HOE を用いた電子ホログラフィシステムとその応用	市橋保之, 他 26
8. 次回研究会のお知らせ	巻末

その後、液晶研究は実用性の観点から、高分子分散液晶を用いたハイビジョン用高輝度プロジェクタに軸足が移った。さらにその後、高分子分散液晶の技術はスーパーハイビジョン用超大画面スクリーンディスプレイを実現するため、プラスチックフィルム基板を液晶中の高分子で貼り付けるフレキシブルディスプレイの研究に展開した。パソコン用モニターが実用化したばかりで、ディスプレイをフィルム化して丸めて持ち運ぶという発想がまったく無かった頃のため、20年前に丸められる小型液晶ディスプレイを試作した時には大きな反響があった。現在、活況を呈しているフレキシブル化の源流の1つになったと筆者は考えている。

7年前に研究の場を大学に移してからは、ディスプレイ開発の王道である実物感・高臨場感を目指して、大画面を持ち運べるフレキシブルディスプレイ研究を継続するだけでなく、液晶の超高解像度駆動の研究を再開した。8Kスーパーハイビジョン後の次世代メディアは、どうあるべきかと考えたためである。2次元表示の解像度と観視画角は視覚限界に達しつつあり、残るは奥行きの提示である。一方、位相をはじめ様々な光の属性を制御できる液晶にとって、干渉・回折現象を操ることはたやすい。また、液晶ディスプレイの製造技術が成熟する中で、電子ホログラフィ立体表示の分野であれば、自発光素子で位相を制御できない有機ELと市場を競う必要もなく、液晶の独壇場となるはずである。

学生の研究テーマに設定して研究を始めた頃に印象に残ったのは、液晶を用いた電子ホログラフィ研究は、信号処理と光学実験がメインで、液晶素子（LCOS：シリコン基板駆動反射型液晶素子）の配向挙動がほとんど議論されていないことであった。そこで、人の有効視野に相当して実用的な視域角の30度を得るために、通常の振幅変調用液晶ディスプレイの画素の厚みを、 $2\pi$ 位相変調用に2倍に設定して $1\mu\text{m}$ ピッチの液晶画素内の配向分布を計算した。その結果、隣接画素からの電界の漏れ出しや液晶弹性の伝搬により、独立駆動が困難になることが分かった（現在までに試作されているLCOSの最小ピッチは $3\mu\text{m}$ ）。隣接画素の電界や弹性を遮断するため、光ナノインプリント法により画素間に高分子の隔壁を形成したが、液晶の初期配向が、基板面より広い隔壁表面の規制力で不安定になるという問題が残った。そこで配向歪みを最小化するため、画素内に微細な高分子の間仕切りを形成して、液晶の形態を異方性化することで、均一な水平配向を実現した。これらにより、 $1\mu\text{m}$ ピッチの位相変調が原理的に可能になった。

今後、電子ホログラフィを実用化するためには、既存の2次元ディスプレイのように厳格な画質評価を行う必要がある。そのためには、レーザー使用で避けられないスペックルノイズの完全除去も課題となろう。高速計算アルゴリズムというソフト面、SLMの高解像度化というハード面、双方で技術課題は少なくないが、ディスプレイ周辺では数少ない夢のある研究であり、周期的な研究ブームに惑わされず、着実な進歩を期待したい。

# 位相変調型空間光変調器による動的点像分布関数制御

Dynamic point spread function engineering  
with phase-only spatial light modulator

瀧口 優

Yu Takiguchi

浜松ホトニクス株式会社 中央研究所

〒434-8601 静岡県浜松市浜北区平口 5000

Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K.K.

5000 Hirakuchi, Hamakita-ku, Hamamatsu, Shizuoka 434-8601, Japan

e-mail: [takiguchi-y@crl.hpk.co.jp](mailto:takiguchi-y@crl.hpk.co.jp)

## Abstract

In recent development of functional optical microscope and laser processing, active modulation of three-dimensional distribution of focused electromagnetic fields, the point spread functions (PSFs), under focusing objective lens has been playing an important role for high throughput, super resolution and/or multiple functions. This PSF is directly related to the complex pupil function, specified as a complex amplitude function of the position in the pupil of objective lenses, by its inverse Fourier transform. In this presentation, liquid crystal on silicon spatial light modulator was focused on behalf its high flexibility in wavefront modulation and proposed new concept “dynamic PSF engineering” by systemizing from theory, simulation, experiment to application.

## 1. はじめに

これまで我々は、光の持つ超並列性・超高速性を活かした新たな光情報処理システムの実現を目指し、その根幹となる光波面制御技術の成熟とそれを実現するためのデバイス技術を長年研究してきた。ここでいう光波面制御とは、光の波面（位相の空間分布）を自由に操る技術のことを指す。当初、光情報処理への適用を期待されていたこの技術は、現在では例ええば精密なレーザー加工やホログラフィック3次元加工、補償光学を利用した

眼底イメージング、光ピンセットのような微小物体のマニピュレーションや生体試料内部の3次元超解像顕微計測、パルス波形制御などの実現に不可欠の要素となってきている。そのため我々は、より高度な制御を行うために、高速・高精度なセンシング技術を研究し、両技術の融合により、新しい用途や知見を得ると考えており、独自技術である位相変調型空間光変調器（Liquid crystal on silicon - spatial light modulator; LCOS-SLM）をキーデバイスに、高度光波面制御技術のレーザー

加工応用や顕微観察応用などへの基礎研究を行っている[1]。本稿では、キーデバイスである LCOS-SLM について触れ、応用が期待されている点像分布関数 (Point spread function; PSF) の動的な制御例を報告する。

## 2. レーザー加工・光学顕微鏡と波面制御

一般的に取り扱われているレーザー加工機や光学顕微鏡は、レンズやフィルタなどの光学素子、それらを保持するための機構やステージなどで構成されており、これらを手動あるいは電動で制御することで観察ができるような仕組みになっている。最近の光学顕微鏡は、レーザーの輝点を電磁駆動の鏡などで走査して画像を作る共焦点顕微鏡やラスタースキャン加工、レンズ設計を工夫して手動で回転できる補正環を備えた収差補正対物レンズに高解像度化や材料内部加工など、より高機能化・複雑化する傾向にあり、空間的な位相分布の考慮も不可欠な要素となっている。

このように、空間的な位相分布である波面を高度に扱うためには、レンズ設計をはじめとした高精度な光技術と空間的な位相分布制御技術の双方が必要になるが、我々は、LCOS-SLM を主に照射側光学系に導入して波面制御を行うことで、光ビームの方向や光強度分布を自由に変えて、レーザー加工機や光学顕微鏡の光学特性をデジタル制御するための手法を検討している。中でも、光学系の点光源に対する応答特性を示す PSF の、理論計算および LCOS-SLM による動的な制御に注目して研究している。

## 3. 高精度空間位相変調器 LCOS-SLM

図 1 は LCOS-SLM の外観図であり、LCOS-SLM を駆動するコントローラ部と、LCOS チップ

が組み込まれたヘッド部で構成されている。LCOS チップの詳細な構造を図 2 に示す。シリコン基板上に形成された画素電極と、ガラス基板上に形成された透明電極の間にネマチック液晶層が配置されている。この液晶は分子の傾きに応じて屈折率が変化する複屈折材料であり、この液晶分子の傾きは電圧で制御できるため、印加電圧に応じた屈折率を生み出すことが可能となる。画素毎に電圧をそれぞれ制御した LCOS-SLM に光を入射させると、その屈折率分布に応じて位相が変化する。すなわち、入射する光の位相のみを空間的に制御することができるデバイスであることを示す。コントローラ部は DVI-D インターフェースで PC と接続されており、パソコン上の出力画像 (8bit) の信号は専用のコントローラ部で電圧値へと変換され、LCOS チップの各画素にアナログ電圧が印加されることで光の位相制御を実現する。

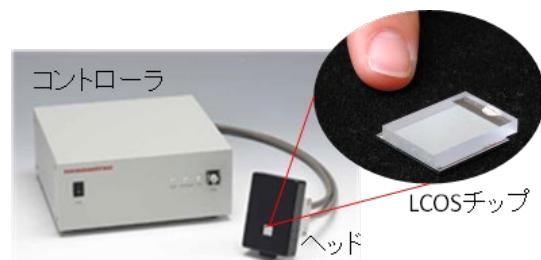


図 1 : LCOS-SLM の外観図  
(X10468/X13267/X13138, Hamamatsu)

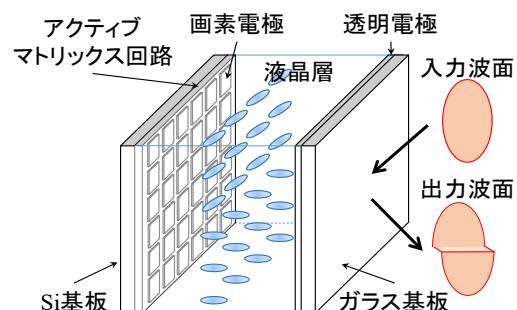


図 2 : LCOS チップの構成図

#### 4. 屈折率界面が PSF に与える影響

我々はこのようなデバイス技術開発を進め、さらに最適化した光学系に応用することで、これまでのレーザー加工や顕微鏡では得られなかつた多点・収差補正・多焦点・被写界深度拡張などの個別あるいは同時実現に成功した。特に屈折率界面で発生した球面収差を動的に補正することによって、これまで観察が難しかつた生体深部の鮮明な画像取得や、高精度かつ高スループットな加工も実現でき、製造業における生産性を質的に変革させるシステムの構築が期待されている。以下では、そのような収差補正技術を説明する。

レーザー内部集光加工や共焦点顕微鏡では、照射光を対物レンズで対象内部に集光させるとき、前者の場合は空気と加工対象物、後者は空気とカバーガラス、あるいはガラスカバーと生体組織や水などの界面が存在し、屈折率差によって波面収差が発生することが知られている。発生する収差の中で最も支配的な球面収差は、集光点の PSF 拡がりの要因であるため、共焦点顕微鏡で取得する画像の空間分解能劣化と蛍光強度低下の直接的な原因につながる。

空気などのように屈折率  $n_1$  が均一と見なせる雰囲気媒質中を光が伝搬する場合、対物レンズの瞳面に入射する平面波は、対物レンズの焦点距離  $f$  と等しい曲率半径の球面波に変換され、焦点  $O$  に集光される(図 3) [2]。このとき、焦点  $O$  から距離  $d$  ( $0 \leq d \leq f$ ) の位置に光透過性を有する屈折率  $n_2$  境界面が挿入されると、焦点  $O$  を距離  $\Delta d$  だけ変位させる波面収差  $\Delta s$  が発生する。この  $n_1$  と  $n_2$  の屈折率差を屈折率ミスマッチという。このような収差は通常、集光深さと集光レンズの開口数に依存するため、高開口数でサンプル深さを変化させながら集光する場合の影響は避けられない。

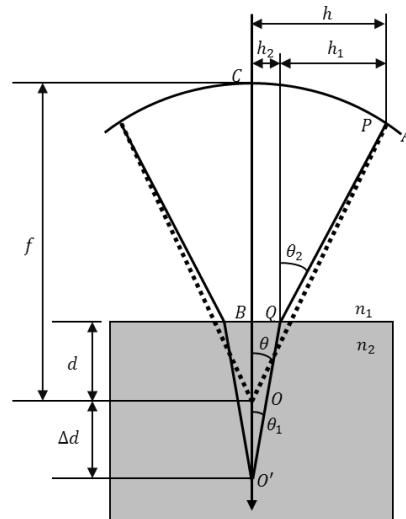


図 3: 屈折率界面が上部より入射したレーザー集光が光軸方向に伸長する(実線)。点線が空気中の集光位置を示す。

#### 5. LCOS-SLM による収差補正

このような収差を補正する技術は、静的な補正と動的な補正に大別できる。前者については、近年の高開口数の対物レンズには補正環と呼ばれる機構が備えられており、対物レンズにつけられたリング状の金物を回すことによって、その中のレンズ群の一部が光軸方向に移動して、収差を補正することができる。しかし、補正範囲が限定されることなどの課題も多く、とりわけ集光深さを高頻度で変更するようなアプリケーションには向きである。

一方、動的な手法として代表的なものに補償光学があるが、収差の変化が比較的遅い顕微鏡観察対象やバルク材料加工では、動的な波面補償を要求されることが少ないため、計測装置の長大化が避けられない補償光学の適用は必ずしも適切ではない。そこで我々はこのような動的な制御をすることなく、光学系のパラメータから理論計算で屈

折率ミスマッチを補正する位相値を求める手法を提案し、LCOS-SLM で補正を実施した[3]。

その収差補正の効果を検証した例を示す。まず顕微観察へ適用例だが、共焦点レーザー走査蛍光顕微鏡（Olympus, X81）をベースとし、接続光学系によって xy 軸ガルバノミラーを介して、顕微鏡の瞳面に対して共役となるように LCOS-SLM を配置した顕微鏡を構築した。LCOS-SLM に球面収差補正パターンを表示しつつ、ガルバノミラーで集光点を走査することで、理想的な励起光条件で共焦点のスキャンができる。乾燥対物レンズとして Uapo/340 (Olympus, NA=0.9) を用いて共焦点顕微観察を行った。

ゼブラフィッシュ生体中約 100  $\mu\text{m}$  深さの血管内皮細胞 (GFP 発現) を撮像した結果を図 4 と図 5 に示す[4, 5]。図 4 は屈折率ミスマッチによる球面収差補正を与えていない場合の画像、図 5 は LCOS-SLM に収差補正パターンを表示して得られた共焦点顕微鏡画像である。収差補正することにより、コントラストが 10 倍程度に向上し、かつ収差補正適用前では確認することができなかつた微細な構造も描出されることを確認することができた。

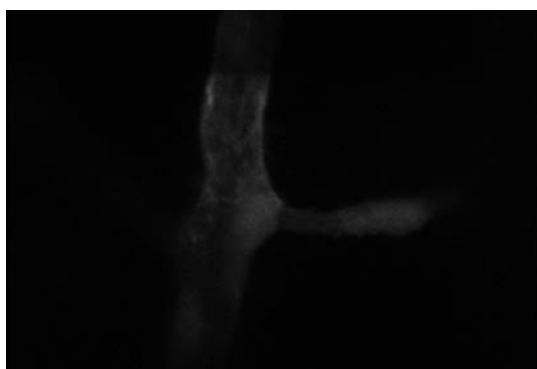


図 4: 収差補正適用前のゼブラフィッシュ血管内皮細胞の共焦点蛍光画像。

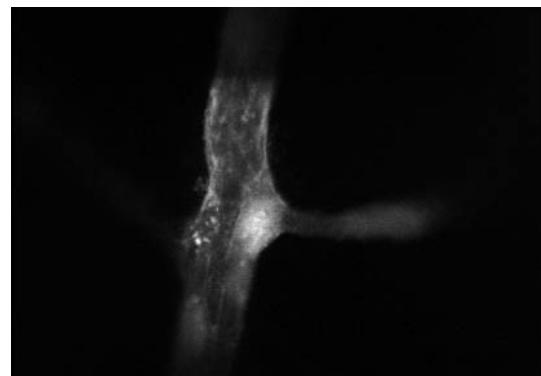


図 5: LCOS-SLM を用いた収差補正適用後のゼブラフィッシュ血管内皮細胞の共焦点蛍光画像。

一方のレーザー加工例として、パルスレーザーを用いて、半導体ウエハ内部に加工を施すことでき品質に分割するダイシング方法である、ステルスダイシング[6-8]への適用を試みた。半導体製造において、ウエハはサイズ的には大型化をたどる一方で、その厚さは非常に薄型となってきており、このような 1 枚のウエハからいかにロスなく多くのデバイスを切り出せるか、あるいは高機能を有した集積回路をいかに傷付けずに切り出せるか、ダイシング工程は最終製品が小型・高性能になればなるほど過酷な条件を課せられる。この技術は、ウエハ内の 1 点にレーザー光を高精度に集光させることができが、集光途中の屈折率界面にする球面収差でレーザー集光特性が劣化する。そのため LCOS-SLM を搭載することで、球面収差を補正させることができるようになり、さらにウエハ材料が変わっても同様の補正が実現できる[9]。

図 6 はサファイヤウエハへステルスダイシングを適用した際の割断面を示す。この手法は集光点から発生したクラックをウエハ上面と下面に進展

させることで割断しているため、クラック長の制御が重要になる。ここでは収差補正適用前（図6左）と後（図7右）で、クラック長が一定になるように入射レーザー光強度を調整した。収差補正適用前後で、レーザーの集光領域を示すSD層が狭くなっていることが見て取れる。これにより、収差補正後では光の利用効率が改善されていることになり、事実、入射光量は60%にまで低減することができた。IC面へ到達する光も減衰するためダメージ抑制にもつながる。

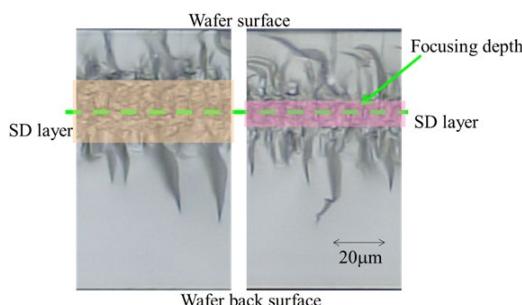


図6:ステルスダイシングにより割断後のサファイヤ基板(100μm厚)収差補正適用前(左)と後(右)の断面を示す。

## 6. ホログラフィックレーザー加工

上述のような収差補正技術のみならず、位相を空間的に制御することで、光の回折や干渉現象を制御できるようになり、高い光の利用効率をもって任意の光強度分布を形成することができます。このような任意の光強度分布をLCOS-SLMで生成するための位相分布を、計算機生成ホログラム(Computer Generated Hologram; CGH)として算出できる。CGHを用いたホログラフィックビーム成型技術は光の干渉効果を巧みに利用する技法であるため、光をロスすることなく高効率でビーム

成型することができるため、特に入射光強度の強いレーザー加工において効果を發揮する。レンズなどで集光した光を複数ビームに分割することができるため、高精度かつ高スループットな加工も実現できる[10]。シンプルな例として、ダイシング方向に多点分岐してステルスダイシングを実施した(図7)[9]。ステルスダイシングはパルスレーザー光を利用しているため、その最大スループットはパルスレーザーの繰り返しと、パルス加工点の間隔によって律速される。光源が十分な輝度を発生することができる場合、LCOS-SLMで複数点同時集光させることで、1点加工に比べて分岐点数分だけ疑似的に繰り返し速度を速めることができます。ここではさらに、CGHで各点の光強度を最適化しており、効率的にダイシングできるよう工夫されている。実際のダイシングシステムでは3点に分岐しており、従来比で3倍程度の高速化に成功した。

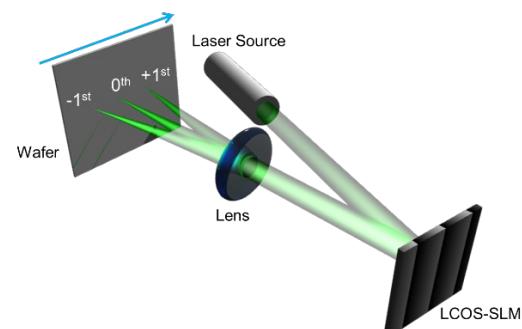


図7:多点分岐型ステルスダイシングのコンセプト図。ダイシング方向にレーザー光を3点に分岐している。

## 7. 今後の予定

LCOS-SLMを用いた動的なPSF制御は、上記で示した高機能化や高スループット化以外にも、超解像顕微鏡である誘導放出抑制顕微鏡法

(Stimulated emission depletion microscopy) や構造化照明法（Structured illumination microscopy）でも積極的に利用されており、さらなる高機能化の一助を担ってきている。現段階では瞳関数制御にとどまっているものの、今後は偏光制御やパルス波形制御を、LCOS-SLM 等のデジタル制御デバイスで実現した全電子式光学技術の進展が望まれる。

その一方で、LCOS-SLM は液晶と CMOS 技術を用いた高性能なデバイスであるため、高い平均出力をもつ加工用レーザーの利用に長期間十分耐えることが望まれている。そのため現在、LCOS-SLM 自体の高性能化（大面積化、紫外光対応、高速化、高集積化）、およびそれを用いた加工と計測を一体化した高精度レーザー加工モジュールの実用化を目指している。その他にも、温度制御[11]やオーバードライブによる高速制御[12]の検討も進めており、脳機能計測[13]や全電子制御顕微鏡[14]、補償光学[15]、光ピンセット応用[16, 17]等、高精度・高安定・高速な位相制御が要求されるアプリケーションの実用化への発展に貢献するデバイスを目指し、研究開発を進めている。

### 【謝辞】

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「光・量子を活用した Society5.0 実現化技術」（管理法人：量研）、JSPS 科研費特別推進研究 JP16H06289 の助成を受けて遂行された。

### 【参考文献】

- [1] 原 勉: 光学, 43, 1 (2013) 20-26.
- [2] Y. Takiguchi et al., JOSA A. 30 (2013) 2605-2610.
- [3] H. Itoh et al., Opt. Express, 17 (2009) 14367-14373.
- [4] Y. Takiguchi et al., Proceedings of SPIE 8949 (2014) 89490C
- [5] 井上卓 他、光アライアンス 2015 年 8 月号 (2015)
- [6] E. Ohmura et al., JAMME 17 (2006) 381.
- [7] M. Kumagai et al., IEEE Trans. Semicond. Manuf. 20 (2007) 259.
- [8] E. Ohmura et al., J. Adv. Mech. Des. Syst. 2(4) (2008) 540.
- [9] Y. Takiguchi et al., Opt. Eng. 56, (2017) 077109.
- [10] S. Hasegawa, et al., Opt. Express, 24 (2016) 18513-18524.
- [11] Y. Takiguchi et al., Opt. Express, 22 (2014) 16087-16098.
- [12] H. Sakai et al., Information Photonics 2017 in OPIC17 (2017).
- [13] 瀧口優 他、光学 46(11) (2017) 455-460.
- [14] Y. Takiguchi et al., Opt. Rev. 23(2) (2016) 364-368.
- [15] H. Huang et al., Opt. Express, 19 (2011) 15026-15040.
- [16] A. Askin et al., Opt. Lett. 11 (1986) 288-290.
- [17] T. Otsu et al., Sci. Rep., 4 (2014) 4579.

# 1 μm ピッチの画素を有する電子ホログラフィックディスプレイ用 光変調素子の構造設計

磯前 慶友<sup>†‡</sup>, 石鍋 隆宏<sup>†</sup>, 柴田 陽生<sup>†</sup>, 藤掛 英夫<sup>†</sup>

† 東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

‡ 日本学術振興会特別研究員 DC1

E-mail: isomae.yoshitomo@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 実用的な視域角を有する電子ホログラフィックディスプレイを実現するためには、1 μm ピッチの画素を有する光変調素子が必要である。しかし、1 μm ピッチの液晶画素では、隣接する画素から電界がもれ出し、液晶の弾性力が伝搬するため、画素ごとの独立した駆動が困難となる。本研究では、誘電体シールド壁構造という新たな画素構造を提案し、作製プロセスの構築および壁構造内において均一な液晶配向を実現する手法を確立した。

**キーワード** 空間光変調素子、液晶、誘電体シールド壁構造、電子ホログラフィックディスプレイ

## Structural Design of Spatial Light Modulator

## Having 1 μm Pitch Pixels for Electronic Holographic Displays

Yoshitomo Isomae<sup>†‡</sup>, Takahiro Ishinabe<sup>†</sup>, Yosei Shibata<sup>†</sup> and Hideo Fujikake<sup>†</sup>

† Graduate School of Engineering, Tohoku University 6-6-05, Aoba, Aramaki,  
Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

‡ Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science

E-mail: isomae.yoshitomo@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** Spatial light modulators having 1-μm-pitch pixels are required to realize electronic holographic displays having enough field of view for practical use. However, when the pitch of the liquid crystal (LC) pixel is 1 μm, individual pixel driving is extremely difficult because of the leakage of electric field and the penetration of elastic force of LC from adjacent pixels. In this study, we propose dielectric shield wall structure, which is a pixel structure having dielectric walls between pixels. We also establish a fabrication process of it and a LC alignment technique in the wall structure.

**Keyword** spatial light modulator, liquid crystal, dielectric shield wall structure, electronic holographic display

## 1. はじめに

電子ホログラフィックディスプレイは、物体から出る光の波面を再現可能であることから、輻輳-調節矛盾[1]のない自然な立体表示が可能な次世代の立体ディスプレイとして期待されている。従来のホログラフィは、感光材料に記録した干渉縞(ホログラム)に再生照明光を照射することにより、立体像を再生する方式であった。一方、電子ホログラフィックディスプレイは、空間

光変調素子にホログラムを表示する。空間光変調素子上のホログラムは電子的に書き換えが可能であることから、任意の立体像を表示したり、立体の動画を再生したりすることが可能である。

電子ホログラフィックディスプレイ用の空間光変調素子として、これまでにフォトリフレクティブポリマーを用いる方式[2]や、磁気光学効果を用いる方式[3], [4], 相変化記録材料を用いる方式[5]が提案されている。しかし、フォトリ

フラクティブポリマーを用いる方式は書き込み用の光学系が必要であるため、システムが大型になるという欠点がある。また、磁気光学効果を用いる方式や相変化記録材料を用いる方式は、振幅型のホログラムしか表示できない。一方、液晶を用いる方式は、位相型のホログラムを表示可能であることから、光利用効率が高いという特徴を有する。さらに、プロジェクター用のシリコン駆動回路基板上に配置された画素電極によって液晶を電圧制御する薄型のデバイスであるため、システムを小型化することが可能である。このことから、本研究では、液晶を用いた位相型の空間光変調素子（以下、位相変調素子）について検討を行ってきた。

電子ホログラフィックディスプレイは、光の干渉や回折により物体光の波面を再生することから、使用者が立体像を観察可能な角度（視域角）は空間光変調素子の画素ピッチに由来する最大回折角に制限される[6]。現在、液晶を用いた位相変調素子の最小画素ピッチは  $3\text{ }\mu\text{m}$ [7]であるが、この場合の視域角は、光の波長を  $550\text{ nm}$  とすると、 $10.5^\circ$  と非常に狭い。実用性を考えると、人間が単純な図形を認識可能な視野（有効視野）[8]に相当する  $30^\circ$  の視域角を有することが望ましいが、 $30^\circ$  の視域角を実現するために必要な画素ピッチは  $1\text{ }\mu\text{m}$  となる。これまでに、液晶画素で  $1\text{ }\mu\text{m}$  ピッチを実現した例はなく、 $1\text{ }\mu\text{m}$  ピッチの画素で生じる問題や設計方針は未解明であった。そこで本研究では、 $1\text{ }\mu\text{m}$  ピッチの画素を有する位相変調素子の実現を目標として、 $1\text{ }\mu\text{m}$  ピッチの液晶画素で生じる問題を解明し、微細な画素において液晶を制御するために必要な画素構造について検討を行った。

## 2. $1\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの画素で生じる問題

位相変調素子の構造について説明する前に、液晶の基本的な性質について述べる。液晶は、図 1(a)に示すように、細長い分子構造を有する材料で、液体のように流動性を有しつつも、結晶のよ

うに分子の方向が揃おうとする性質（弾性力）をもつ。液晶分子は、分子の長軸方向と单軸方向で誘電率が異なる、誘電率異方性を有する。このことから、図 1(b)のように、液晶中に電界を印加することにより、液晶分子の方向を制御することが可能である。また、液晶は入射する光の偏光方向によって屈折率が異なる屈折率異方性を有する。具体的には、偏光の振動方向が液晶分子の長軸に平行になるよう入射した場合の屈折率  $n_e$  と、短軸に平行に入射した場合の屈折率  $n_o$  を比較すると、 $n_e$  の方が大きい。

図 2 に液晶を用いた位相変調素子の基本的な構造を示す。位相変調素子は、透明な共通電極を有するガラス基板と、反射膜を有する画素電極で液晶を挟んだ構造をとる。電圧を印加していない状態では、液晶分子が基板に対して平行になるように配向処理をしているため、液晶分子の長軸方向と平行な偏光を入射すると屈折率が高い状態 ( $n_e$ ) となる。これに対し、画素電極に電圧を印加することにより、液晶層内に電界を発生させると、液晶分子が垂直方向に立ち上がり、入射偏光に対して屈折率が低い状態 ( $n_o$ ) となる。結果として、屈折率が高い方の画素において位相が遅れ、屈折率の低い画素では相対的に位相が進むことになる。以上より、2 次元の画素配列の液晶角度をそれぞれ制御することで 2 次元の位相分布を変調することが可能である。

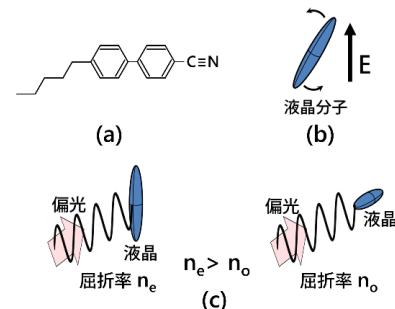


図 1 液晶の基本的性質：(a)液晶の分子構造例 (5CB)，(b)液晶の誘電異方性を活用した分子方向の制御，(c)屈折率異方性

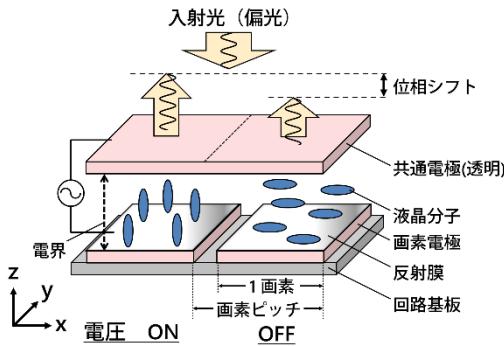
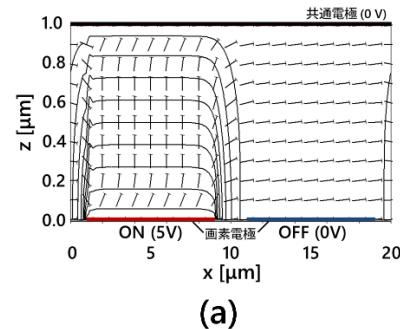


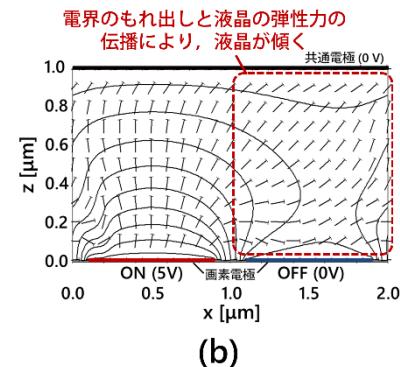
図 2 位相変調素子の構造

液晶配向分布は、液晶の弾性連続体理論[9]に基づく数値シミュレーションにより算出することが可能である。本研究では、 $1\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの液晶画素で生じる問題を明らかにするために、一般的なプロジェクター用のデバイスで用いられる $10\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの画素の液晶配向分布と、 $1\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの画素の液晶配向分布をシミュレーションにより比較した。このシミュレーションでは、ON状態の画素とOFF状態の画素が隣接した場合を想定し、等電位線（電界分布）と液晶配向分布を算出した。液晶層の厚みは、これまでに提案されている高屈折率差液晶材料[10]を用いた場合に位相変調に必要な $1\text{ }\mu\text{m}$ とした。シミュレーション結果を図3に示す。図中の黒い実線が等電位線を示しており、短い線が液晶分子の配向方向を示している。図3(a)は $10\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの場合のシミュレーション結果を示しているが、ON状態の画素電極から共通電極に向かって垂直に電界が向いていることがわかる。この電界方向に並行になるように、ON状態の画素の液晶が基板に対して垂直に立ち上がっている。OFF状態の画素の液晶は初期配向である水平状態を維持したことから、画素ごとの独立した駆動が実現していることがわかる。一方、画素ピッチが $1\text{ }\mu\text{m}$ の場合、液晶層の厚み $1\text{ }\mu\text{m}$ に対して画素の幅も $1\text{ }\mu\text{m}$ となるため、電界が放射状に広がる方向を向き、OFF状態の画素にもれ出していることが

わかる。これに加えて、垂直に立ち上がったON状態の画素の液晶の弾性力がOFF状態の画素の液晶に伝搬するため、結果としてOFF状態の画素の液晶が傾いている。以上の結果より、 $1\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの液晶画素では、隣接する画素からのもれ出し電界と液晶の弾性力の伝播により、画素ごとの独立した駆動が困難となることが明らかとなった。



(a)



(b)

図3 液晶配向シミュレーション結果：

(a) $10\text{ }\mu\text{m}$ ピッチ, (b) $1\text{ }\mu\text{m}$ ピッチ

### 3. 誘電体シールド壁構造

隣接画素から伝搬する液晶の弾性力を抑制するためには、液晶を画素領域ごとに空間的に区切る必要がある。また、隣接画素からもれ出す電界も抑制しなければならない。これらの条件を満たす画素構造として、本研究では誘電体の壁を画素と画素の間に挿入する誘電体シールド壁構造を提案してきた[11], [12]。誘電体シールド壁構造における液晶配向シミュレーション結果

を図 4 に示す。同図より、ON 状態の画素電極からのもれ出し電界が、誘電体壁内部で減衰することで抑制されたことがわかる。また、液晶が空間的に分断されたことにより、液晶の弾性力の伝搬も遮断されている。液晶配向分布をみると、ON 状態の画素の液晶が垂直に立ち上がったのに対し、OFF 状態の画素では液晶が水平状態を保ったことから、誘電体シールド壁構造により、画素ごとの独立した駆動が実現したことがわかる。

壁材料の比誘電率は低い方が電界を減衰できるため、シールド壁として適している。このことから、壁構造の材料としては、微細加工が容易で低い比誘電率を有する  $\text{SiO}_2$  やアクリル系の樹脂が適している。本研究ではこれまでに、最適な壁の幅や、壁の表面で液晶を束縛する力（アンカリング強度）を決定する手法を確立している[13]。

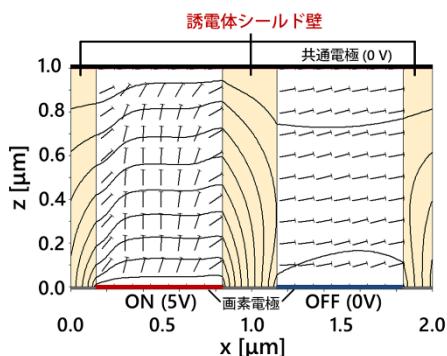


図 4 誘電体シールド壁構造の電界分布と液晶配向分布

#### 4. 誘電体シールド壁構造の試作と液晶配向の均一化

誘電体シールド壁構造のような微細かつ寸法的なアスペクト比の高い構造を、液晶層内に作製した例はこれまでにない。また、誘電体シールド壁構造のような微細な構造内では、液晶の配向が乱される可能性がある。そこで、誘電体シールド壁構造の作製プロセスを構築し、壁構造

内部における液晶配向を明らかにするとともに、液晶配向制御技術について検討を行った。

誘電体シールド壁の形成には、誘電体材料を高いアスペクト比で形成可能であるという理由から、ナノインプリント技術[14]を採用した。ナノインプリントの手順を図 5 (a) に示す。まず、基板上に、アクリルを主成分とする UV 硬化樹脂を塗布する。その上から壁構造の型を有するモールドを押し当て、紫外線を照射する。最後にモールドを剥離することで、壁構造の転写が完了する。

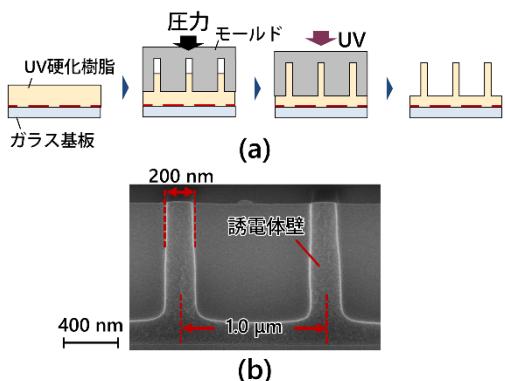


図 5 ナノインプリント技術による微細な壁構造の作製：(a)ナノインプリントの手順、  
(b)ナノインプリント技術により形成された壁構造の断面 SEM 画像

誘電体シールド壁構造を二次元画素配列に適用すると、図 6 に示すように格子状となる。液晶配向は 1 方向に均一（図 6 の赤両矢印方向）である必要があるが、このとき、液晶分子の長軸方向に対して平行になる壁表面と垂直になる壁表面が存在することになる。しかし、液晶は壁構造のような表面に対して、分子間相互作用により平行になろうとする性質を有する[15]ため、同図右に示すように壁表面の作用によって液晶配向が乱されることが予想される。そこで、格子状の壁構造内部における液晶配向分布を確認するために、ナノインプリントにより作製した格子

状の壁構造に液晶を注入し、セル化したのちに偏光顕微鏡を用いて観察を行った。その観察結果を図 7 に示す。この観察では、直交させた偏光板の間に液晶セルを挟んで下部から光を入射させることで、液晶配向分布を光の透過率分布として観察した。均一な液晶配向が実現したと仮定すると、偏光方向に対して液晶セルの配向方向が  $45^\circ$ になるように配置した場合(図 7(a))は、液晶の長軸方向と短軸方向の偏光成分に位相差が生じて偏光が変化するため、直交する偏光板を透過し、均一な明状態となる。一方、平行(または垂直)になるように配置した場合(図 7(b))は位相差が生じないため、均一な暗状態が観察されるはずである。しかし、図 7(a)では部分的に暗くなり、(b)では部分的に光が透過したことから、格子状の壁構造内では液晶配向が乱されることがわかった。

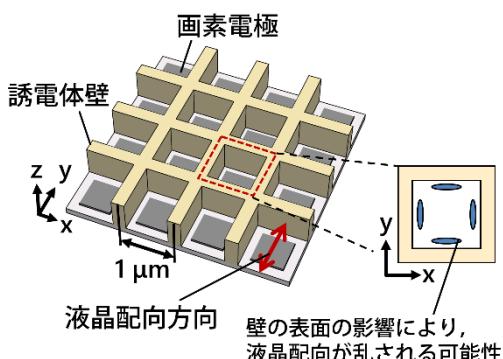


図 6 格子状の誘電体壁内部における液晶配向

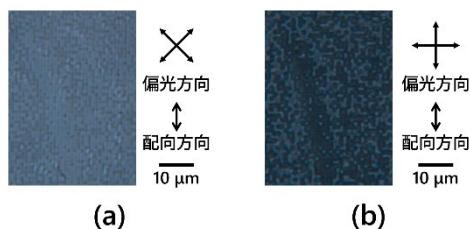


図 7 格子状の壁構造を有する  
液晶セルの観察結果

壁構造の表面による影響は、液晶層の厚さ方向(図 6 の z 軸方向)全体にわたって生じることから、厚さ方向全体において液晶の配向方向を安定化させる構造が必要となる。そこで、本研究では図 8 に示す間仕切り板を有する格子壁構造を考案した[16]。これは、正方形であった格子壁内部の液晶領域を、図 8(a)に示すように二分割するような間仕切り板を有する構造である。間仕切り板を挿入することにより、液晶層の厚さ方向全体にわたって空間的な異方性が生じ、液晶が空間の長軸方向に並ぶことが期待される。図 8 (b)に作製した壁構造の断面 SEM 画像を示すが、格子状の壁構造の内部に間仕切り板が形成されていることがわかる。

間仕切り板を有する液晶セルの観察結果を図 9 に示す。図 9(a)では均一な明状態、図 9(b)では均一な暗状態が観察された。この結果から、間仕切り板によって格子壁構造内において均一な液晶配向を実現可能であることが明らかとなった。

また、誘電体シールド壁構造により、 $1 \mu\text{m}$  ピッチの画素の独立した駆動を実験的に検証した結果を図 10 に示す。この実験では、図 10(a)に示すような、2 つの異なる端子に接続されたストライプ状の電極を交互に組み合わせたものを使用し、液晶層に電圧を印加した。この電極は、片方の端子を OFF 状態、もう片方を ON 状態とすることで、ストライプ方向と直行する断面で見ると ON 状態の画素と OFF 状態の画素が交互に並んだ状態を再現可能である。図 10 (b)に偏光顕微鏡を用いた観察結果を示す。電圧無印加時は、液晶は基板に対して液晶配向方向が水平であるため、位相差が生じて明状態となる。電圧を印加すると、液晶が基板に対して垂直になるように立ち上がるため、位相差が減少し、暗状態となる。この実験結果では、電圧を印加した部分のみが暗状態となったことから、誘電体壁によって隣接する画素の影響を抑制できた事を示して

いる。以上の結果から、誘電体シールド壁構造により、 $1\text{ }\mu\text{m}$  ピッチの画素の独立駆動が可能となることが示された。

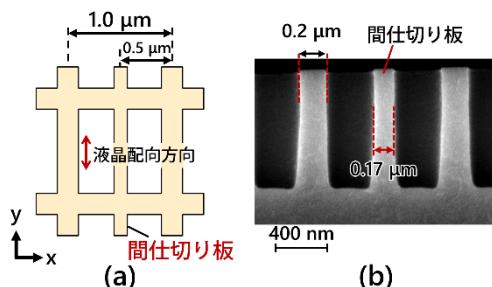


図 8 間仕切り板を有する格子壁構造：  
(a)間仕切り板構造の上面図,  
(b)間仕切り板構造の断面 SEM 画像

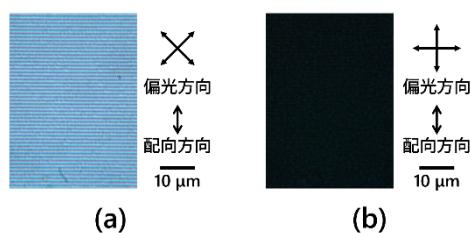


図 9 間仕切り板を有する液晶セルの観察結果

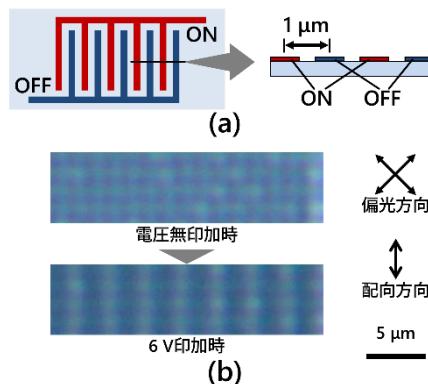


図 10  $1\text{ }\mu\text{m}$  ピッチのストライプ状の電極を用いた光変調の観察：(a)ストライプ状の電極,  
(b)光変調の観察結果

## 5. まとめ

本研究では、広い視域角を有する電子ホログラフィックディスプレイの実現に向け、 $1\text{ }\mu\text{m}$  ピッチの画素を有する位相変調素子について検討を行った。 $1\text{ }\mu\text{m}$  ピッチの液晶画素では、隣接する画素からもれ出す電界と液晶の弾性力の伝搬を抑制する誘電体シールド壁構造が必要となる。しかし、格子状の壁構造内部では、壁構造の表面の影響により、液晶の配向が乱される。この課題を解決するために、格子壁内部に空間的な異方性を与える間仕切り板を挿入した結果、均一な液晶配向を実現した。さらに、誘電体シールド壁構造により、 $1\text{ }\mu\text{m}$  ピッチの画素の独立した駆動が可能となることを実験的に確かめた。近年では、 $1\text{ }\mu\text{m}$  ピッチの画素電極を有する駆動回路が実現しつつある[17]ことから、本研究が提案する誘電体シールド壁構造と組み合わせることで、 $1\text{ }\mu\text{m}$  ピッチの位相変調素子が実現可能であると考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会・科学研究費補助金 (JP17J02046) の助成を受けたものである。また、 $1\text{ }\mu\text{m}$  ピッチの誘電体シールド壁構造の作製やストライプ電極の成膜に関する技術的なご支援を頂いた大日本印刷株会社に感謝する。

## 参考文献

- [1] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, and M. S. Banks, “Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue,” *J. Vis.*, vol. 8, no. 3, p. 33, Mar. 2008.
- [2] S. Tay *et al.*, “An updatable holographic three-dimensional display,” *Nature*, vol. 451, no. 7179, pp. 694–698, Feb. 2008.
- [3] W. E. Ross, D. Psaltis, and R. H. Anderson, “Two-Dimensional Magneto-Optic Spatial Light Modulator For Signal Processing,” *Opt. Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 477–540, Aug. 1983.
- [4] K. Aoshima *et al.*, “Active Matrix Magneto-Optical Spatial Light Modulator Driven by Spin-

- Transfer-Switching,” *J. Disp. Technol.*, vol. 12, no. 10, pp. 1212–1217, Oct. 2016.
- [5] Q. Wang *et al.*, “Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials,” *Nat. Photonics*, vol. 10, no. 1, pp. 60–65, Jan. 2016.
- [6] L. Onural, F. Yaraş, and Hoonjong Kang, “Digital Holographic Three-Dimensional Video Displays,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 4, pp. 576–589, Apr. 2011.
- [7] C.-S. Hwang *et al.*, “46-2: Invited Paper: Ultimate Resolution Active Matrix Display with Oxide TFT Backplanes for Electronic Holographic Display,” *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, vol. 49, no. 1, pp. 610–612, May 2018.
- [8] T. Hatada, H. Sakata, and H. Kusaka, “Psychophysical Analysis of the ‘Sensation of Reality’ Induced by a Visual Wide-Field Display,” *SMPTE J.*, vol. 89, no. 8, pp. 560–569, Aug. 1980.
- [9] H. Gruler, T. J. Sheffer, and G. Meier, “Elastic Constants of Nematic Liquid Crystals,” in *Zeitschrift für Naturforschung*, vol. 27, 1972, pp. 966–976.
- [10] J. Dziaduszek, R. Dabrowski, A. Ziolek, S. Gauza, and S. T. Wu, “Syntheses and mesomorphic properties of laterally fluorinatedphenyl isothiocyanatotolanes and their high birefringent mixtures,” *Opto-Electronics Rev.*, vol. 17, no. 1, pp. 20–24, 2009.
- [11] Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Design of 1-μm-pitch liquid crystal spatial light modulators having dielectric shield wall structure for holographic display with wide field of view,” *Opt. Rev.*, vol. 24, no. 2, pp. 165–176, Apr. 2017.
- [12] Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Experimental study of 1-μm-pitch light modulation of a liquid crystal separated by dielectric shield walls formed by nanoimprint technology for electronic holographic displays,” *Opt. Eng.*, vol. 57, no. 06, p. 1, Jun. 2018.
- [13] Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Dependence of optical phase modulation on anchoring strength of dielectric shield wall surfaces in small liquid crystal pixels,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 3S2, p. 03EG06, Mar. 2018.
- [14] S. Y. Chou, “Nanoimprint lithography,” *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.*, vol. 14, no. 6, p. 4129, 1996.
- [15] B. Jerome, “Surface effects and anchoring in liquid crystals,” *Reports Prog. Phys.*, vol. 54, no. 3, pp. 391–451, Mar. 1991.
- [16] Y. Isomae, T. Ishinabe, Y. Shibata, and H. Fujikake, “Alignment control of liquid crystals in a 1.0-μm-pitch spatial light modulator by lattice-shaped dielectric wall structure,” *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 27, no. 4, pp. 251–258, Apr. 2019.
- [17] J. H. Choi *et al.*, “The new route for realization of 1-μm-pixel-pitch high-resolution displays,” *J. Soc. Inf. Disp.*, no. April, p. jsid.821, Jun. 2019.

## ホログラフィックディスプレイ用位相変調素子の 液晶層における構造パラメータが再生像の画質に及ぼす影響

千田 一馬<sup>†</sup> 磯前 慶友<sup>†‡</sup> 石鍋 隆宏<sup>†</sup> 柴田 陽生<sup>†</sup> 藤掛 英夫<sup>†</sup>

† 東北大学大学院工学研究科 〒981-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

‡ 日本学術振興会特別研究員 〒102-0083 東京都千代田区麹町 5-3-1

E-mail: [kazuma.chida.r6@dc.tohoku.ac.jp](mailto:kazuma.chida.r6@dc.tohoku.ac.jp)

**あらまし** 液晶位相変調素子を用いたホログラフィックディスプレイにおいて、1画素内の液晶配向ムラおよび素子面内における液晶層の厚さムラによって、1画素内および素子面内の位相分布が不均一となり、再生像の画質が低下することが問題となっている。しかし、これらの不均一な位相分布がどの画質特性に影響を与えるのかは明らかとなっていない。そこで本研究では、これらの不均一な位相分布が画質特性へ与える影響について定量的に検討を行った。

**キーワード** 電子ホログラフィックディスプレイ、位相変調素子、液晶、画質

## Effect of Structure Parameters of Liquid Crystal Layer in Optical Phase Modulator on Reconstructed Image Quality for Holographic Display

Kazuma CHIDA<sup>†</sup> Yoshitomo ISOMAE<sup>†‡</sup> Takahiro ISHINABE<sup>†</sup>

Yosei SHIBATA<sup>†</sup> Hideo FUJIKAKE<sup>†</sup>

† Tohoku University, 6-6-05, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 981-8579, Japan

‡ Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science

Email: [kazuma.chida.r6@dc.tohoku.ac.jp](mailto:kazuma.chida.r6@dc.tohoku.ac.jp)

**Abstract** In liquid crystal (LC) optical phase modulator for holographic displays, non-uniform phase distributions that are caused by non-uniform LC alignment in a pixel and by non-uniform thickness distribution on the entire panel degrade reconstructed image quality. However, it is not clear which image quality characteristics are affected by these non-uniform phase distributions. In this study, the effects of these non-uniform phase distributions on image quality characteristics were examined quantitatively.

**Keyword** electronic holographic display, phase modulator, liquid crystal, image quality

### 1. はじめに

次世代の立体ディスプレイとして、人間の立体視の生理的要因をすべて満たす画像表示が可能な電子ホログラフィックディスプレイが注目を集めている[1]。

電子ホログラフィックディスプレイでは、光の

位相を変調する素子として、平行配向型液晶を用いた liquid crystal on silicon (LCOS) と呼ばれる液晶素子が用いられている[2]。LCOS は、図 1 に示すように、2 次元の画素アレイを有するシリコン駆動回路基板とガラス基板で液晶を挟んだデバイスであり、液晶の屈折率異方性および誘電率異方

性を利用して光の位相を変調する。一般に、電子ホログラフィックディスプレイにおいて、広い視野角を得るためにには数  $\mu\text{m}$  の画素ピッチを有するLCOSが必要である。しかし、LCOSの画素ピッチが小さくなるにつれて、隣接画素からのフリンジ電界のもれ出しおよび液晶の弾性力の影響により、1画素内における液晶配向分布が不均一となり、位相分布が不均一となる（画素内ムラ）[3]。また、LCOS素子全面において、ガラス基板やシリコン基板の歪みや反りによって、液晶層の厚さムラが生じ、素子面内の位相分布が不均一となる（素子面内ムラ）[4]。

液晶層の構造に由来して生じる画素内ムラおよび素子面内ムラによって、定性的にホログラム再生像の画質が低下することが報告されている[4], [5]。しかし、これらの位相分布のムラが、定量的にどの画質特性に影響があるのかということは明らかになっていない。このことを明らかにすることは、電子ホログラフィックディスプレイ用LCOSの設計および生産において重要であると考えられる。

そこで本研究では、構造パラメータとして、1画素内の不均一な液晶配向分布によって生じる画素内ムラ、およびLCOS全面の厚さムラによって生じる素子面内ムラを定義し、それらが画質特性に与える影響を数値シミュレーションにより検討したので報告する。今回は画質特性として、重要な項目である回折効率（明るさ）、解像度特性、ノイズ、面均一性について評価を行った。

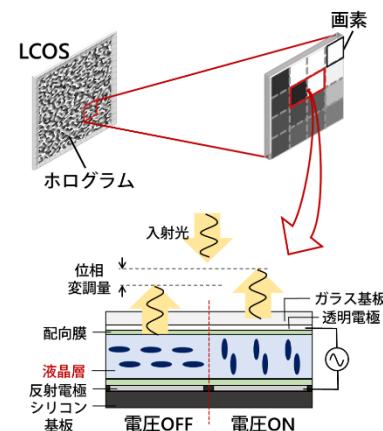


図1 LCOSの構造と位相変調の原理

## 2. 不均一な位相分布を考慮した光学再生シミュレーション

### 2.1. 不均一な位相分布モデル

図2および図3に1画素内において生じる不均一な位相分布（画素内ムラ）のモデルおよび素子全面において生じる不均一な位相分布（素子面内ムラ）のモデルをそれぞれ示す。ここで、LCOSの画素ピッチを $8\text{ }\mu\text{m}$ 、LCOSの画素数を $1024\times 1024\text{ pixels}$ 、液晶層の設計厚さを $1.9\text{ }\mu\text{m}$ とした。また、液晶はE7(Merck社)を用い、光の波長は $633\text{ nm}$ とした。

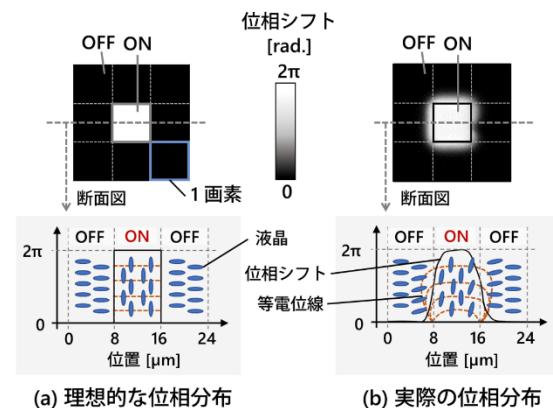


図2 1画素内における不均一な位相分布モデル  
(画素内ムラ)

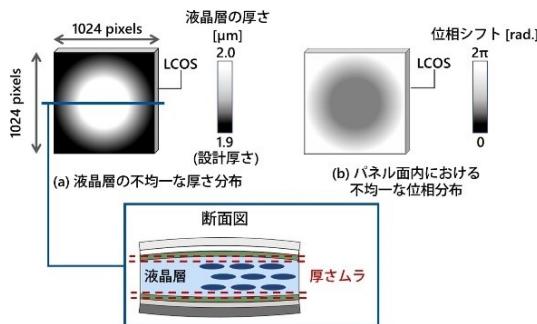


図 3 LCOS 素子面内における

## 不均一な位相分布モデル（素子面内ムラ）

画素内ムラは、磯前らによって提案されている液晶配向を考慮した位相分布を、1 画素を分割して適用する手法[5]を用いて設定した。画素内における位相分布が理想的な場合では、図 2(a) に示すように、隣接している ON 状態の画素と OFF 状態の画素における位相分布は均一である。しかし実際には、図 2(b) に示すように、ON 状態の画素からもれ出すフリンジ電界や液晶の弾性力の影響によって画素内の液晶配向分布が不均一となり、1 画素内における位相分布は不均一となる。これを再現するために、まず弾性連続体理論に基づく液晶配向シミュレーションによって、1 画素内の位相分布を計算する。そして、光学シミュレーションを行う際に、計算された 1 画素内の位相分布を LCOS の全ての画素に適用することにより、画素内ムラを考慮した位相ホログラムを作製する。

LCOS 素子面内における液晶層の厚さムラを図 3(a)に示す。LCOS の中心領域を液晶層の厚さが 2.0  $\mu\text{m}$  の厚い領域とし、LCOS の端の領域を設計セル厚である 1.9  $\mu\text{m}$  の領域とした。図 3(b)に図 3(a)の厚さ分布を基に計算した、LCOS 全面において  $2\pi$  の位相シフトを出力したときの位相分布を示す。これより、端の領域は設計セル厚であるため理想的な位相シフト ( $2\pi$ ) が得られる一方で、

中心の領域においては位相が遅れていることがわかる。この素子面内における位相分布を、画素内ムラの場合と同様に LCOS 全面に適用することにより、素子面内ムラを考慮した位相ホログラムを作製する。

## 2.2. 画質特性の定義

評価する画質特性として、回折効率(明るさ)、解像度特性、ノイズ、面均一性を用いた。以下に画質特性の定義と、それぞれの画質特性を評価するための光学系を記述する。

n 次光の回折効率は、以下の式(1)で定義した。

$$\text{回折効率} (n \text{ 次光}) = \frac{I_{nth}}{I_{in}} \quad (1)$$

ここで、 $I_{in}$  は入射光の強度、 $I_{nth}$  は n 次回折光の強度である。図 4 に回折効率を計算するための光学系を示す。LCOS 面において 0 と  $\pi$  の 2 値の位相格子パターンに画素内ムラおよび素子面内ムラをそれぞれ適用し、フーリエ面において 0 次光、+1 次光、+2 次光の回折効率を約  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  の領域で計算した。

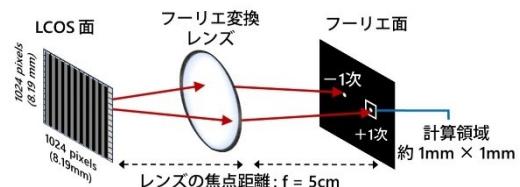


図 4 回折効率計算のために想定する光学系

解像度特性は異なる空間周波数の正弦波縞画像(図 5(a))、ノイズと面均一性は白の領域を含む画像(図 5(b))を再生することにより評価した。図 6 に解像度特性、ノイズ、面均一性を計算するためには想定する光学系を示す。位相ホログラムは、角スペクトル法[6]を用いた Gerchberg-Saxton 法[7]により作成した。このホログラムパターンに画素内ムラおよび素子面内ムラを適用して再生計算を行

い、得られた像について評価を行った。ここで、LCOS 面と再生像の面との間の距離は 50 cm であり、0 次回折光を除去するために焦点距離 5 cm のレンズを用いた 4f 光学系を想定している。

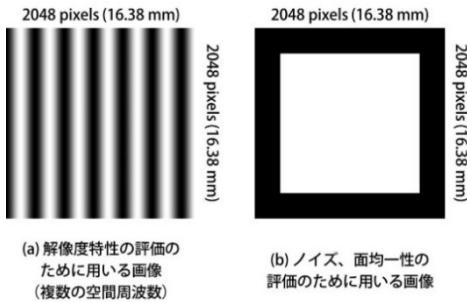


図 5 再生シミュレーションで用いる画像

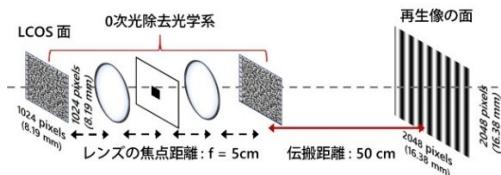


図 6 解像度特性、ノイズ、面均一性を計算するために想定する光学系

解像度特性は、再生像の Modulation Transfer Function (MTF) を計算することにより、評価した。MTF は以下の式(2)で定義される値である。

$$\text{MTF} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2)$$

ここで  $I_{max}$  と  $I_{min}$  は、それぞれ正弦波縞画像 (図 5(a)) を再生したときの最大および最小の光強度である。

再生像のノイズは、スペックルコントラスト[8]を用いて評価を行った。スペックルコントラストは以下の式(3)で表される値である。

$$\text{スペックルコントラスト} = \frac{\sigma}{\langle I \rangle} \quad (3)$$

ここで  $\sigma$  は白の画像 (図 5(b)) を再生したときの画像中の白の領域内における光強度の標準偏差であり、 $\langle I \rangle$  は光強度の平均値である。

再生像の面均一性は、白の画像 (図 5(b)) を再生したときの画像中の白の領域のうち、光強度の最大値 (Max) の 80 % 以上の光強度となる領域が占める割合とした。ここでは、巨視的に見た場合の面均一性を計算するために、再生像の面において平均化フィルタを適用し、ノイズの影響を除去した。平均化後の白の領域内における画素数を  $N$ 、白の領域内において光強度の最大値の 80 % 以上の光強度となる画素数を  $N' (\geq 0.8 \times \text{Max})$  とおくと、面均一性は以下の式(4)で定義される。

$$\text{面均一性} = \frac{N' (\geq 0.8 \times \text{Max})}{N} \quad (4)$$

### 3. 結果

画素内ムラおよび素子面内ムラをそれぞれ適用した場合の 0 次、+1 次、+2 次回折光の回折効率の結果を図 7 に示す。これより、素子面内ムラが回折効率に与える影響は小さいことがわかる。一方で、画素内ムラは像を再生する時に再生像に重なる 0 次回折光および 2 次回折光の回折効率を上昇させ、ホログラフィックディスプレイにおいて像を形成する +1 次回折光の回折効率を低下させることがわかる。このような結果となった理由は、隣接画素との境界付近における位相分布が、矩形波形状の分布から正弦波形状の分布に近づいたことにより、0 次回折光および 2 次回折光の波面が形成されたからである。

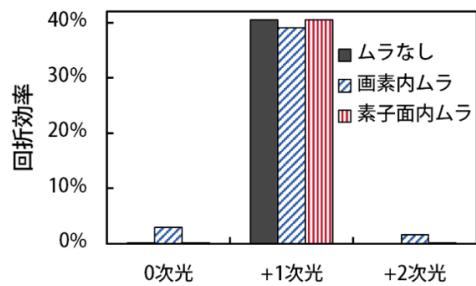


図 7 不均一な位相分布が回折効率へ与える影響

画素内ムラおよび素子面内ムラをそれぞれ適用した場合の解像度特性の結果を図 8 に示す。これより、画素内ムラが解像度特性に与える影響は小さいことがわかる。一方で、素子面内ムラがある場合には、正弦波縞の空間周波数が大きくなるにつれて、再生像の解像度は低下する。これは、素子面内ムラがあることにより、再生像を形成する 1 次回折光の角度が本来の角度からそれで、集光点が拡がったことが原因である。

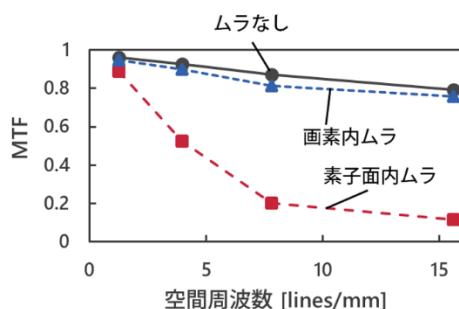


図 8 不均一な位相分布が  
解像度特性へ与える影響

画素内ムラおよび素子面内ムラをそれぞれ適用した場合の再生像に生じるノイズの結果を図 9 に示す。これより、画素内ムラがある場合にはノイズがほとんど増加していないが、素子面内ムラがある場合には、ノイズが増加していることがわかる。これは、素子面内ムラがあることによって角度がそれた 1 次回折光同士が、本来干渉しない位置において干渉したためであると考えられる。

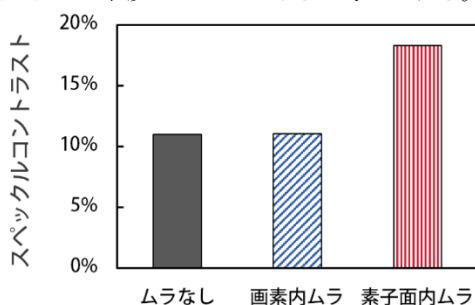


図 9 不均一な位相分布がノイズへ与える影響

また、画素内ムラおよび素子面内ムラをそれぞれ適用した場合の面均一性の結果を図 10 に示す。この結果より、素子面内ムラがある場合には、面均一性はほとんど低下していない。一方で、画素内ムラがある場合には、面均一性が低下していることがわかる。これは、再生像の端付近に向かう広い角度の 1 次回折光の形成のためにホログラムパターンが細くなる領域において、画素内ムラの影響が大きくなることにより、再生像の端付近の領域で明るさが低下するためであると考えられる。

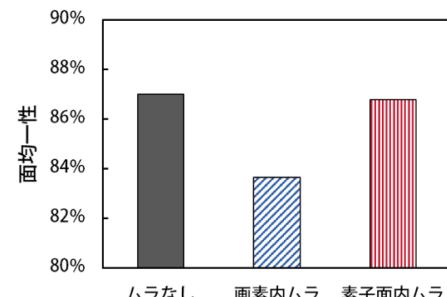


図 10 不均一な位相分布が  
面均一性へ与える影響

#### 4.まとめ

本研究では、LCOS の液晶層において生じる画素内および素子面内の不均一な位相分布が、画質特性である回折効率（明るさ）、解像度特性、ノイズ（スペックルコントラスト）、面均一性に対して与える影響を定量的に検討した。

この結果、液晶配向ムラによって 1 画素内の位相分布が不均一となる場合、回折効率および面均一性が低下する一方で、解像度特性は低下せず、ノイズは増加しないということを明らかとした。また、液晶層の厚さムラによって素子面内の位相分布が不均一となる場合、回折効率と面均一性は低下しない一方で、1 次回折光の角度がそれることにより、解像度特性が低下して、かつノイズが

増加することを明らかとした。

本研究の成果は、高画質なホログラフィックディスプレイのための LCOS の設計および生産に寄与すると考えられる。

### 文献

- [1] L. Onural, F. Yaraş, and Hoonjong Kang, “Digital Holographic Three-Dimensional Video Displays,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 4, pp. 576–589, Apr. 2011.
- [2] Z. Zhang, Z. You, and D. Chu, “Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices,” *Light Sci. Appl.*, vol. 3, no. 10, pp. e213, Oct. 2014.
- [3] Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Design of 1-μm-pitch liquid crystal spatial light modulators having dielectric shield wall structure for holographic display with wide field of view,” *Opt. Rev.*, vol. 24, no. 2, pp. 165–176, 2017.
- [4] X. Xun and R. W. Cohn, “Phase calibration of spatially nonuniform spatial light modulators,” *Appl. Opt.*, vol. 43, no. 35, pp. 6400–6406, 2004.
- [5] Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Simulation of Reconstructed Holographic Images Considering Optical Phase Distribution in Small Liquid Crystal Pixels,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. E100.C, no. 11, pp. 1043–1046, 2017.
- [6] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*. Roberts & Co, 2005.
- [7] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, “A Practical Algorithm for the Determination of Phase from Image and Diffraction Plane Pictures,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 35, no. 2, pp. 237–246, 1972.
- [8] J. Amako, H. Miura, and T. Sonehara, “Speckle-noise reduction on kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator,” *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 17, pp. 3165–3171, 1995.

# ホログラフィックレーザー加工

長谷川智士\*, 早崎芳夫 (宇都宮大学オプティクス教育研究センター)

## Holographic laser processing

Satoshi Hasegawa\*, (Center for Optical Research and Education (CORE), Utsunomiya University)

Femtosecond laser processing is a promising tool for fabricating useful structure on the surface and inside materials. An enormous number of pulse irradiation will be required for fabricating actual structures with millimeter to centimeter scale, and therefore, the throughput of femtosecond laser processing must be improved. One promising method to improve throughput is parallel beam generation based on a computer-generated hologram displayed on a spatial light modulator. In this study, the method has been applied to the beam shaping, vector beam generation and sub-diffraction-limit spot to overcome the diffraction limit for laser microfabrication.

### 1. はじめに

フェムト秒レーザーは、材料の熱拡散速度に比べてパルス幅が十分に短いため、熱影響を低減した高品質な加工を実現する<sup>1)</sup>。また、高いパルスピーク強度により実現される多光子吸収を介した物質励起と、透過性の高い近赤外の波長により、透明材料内部への回折限界以下での加工を可能にする<sup>2)</sup>。加えて、レーザー照射フルエンスに依存して、屈折率構造や複屈折構造、および空孔を局所的に形成する<sup>3)</sup>。これらフェムト秒レーザー加工の特徴を活かして、透明材料内部への回折光学素子<sup>4)</sup>や光導波路<sup>5)</sup>、および光メモリー<sup>6)</sup>の作製に関する報告がされている。上記の応用では、構造を短時間で大面積に加工することが求められる。我々は、高速・高効率なフェムト秒レーザー加工を実現するために、空間光変調素子(SLM)に表示された計算機ホログラム(CGH)を用いたホログラフィックレーザー加工<sup>7,8)</sup>に関する研究を行っている。この技術は、任意の光強度パターンを対象に照射することで、レーザー加工にスループットの向上と光利用の高効率化を与える。講演では、ホログラフィックレーザー加工に関する我々の実例として、ビーム整形<sup>9)</sup>、ベクトルビーム生成<sup>10)</sup>、および超解像ビーム<sup>11)</sup>を用いたレーザー加工を紹介する。本稿では、特に超解像ビームを用いたレーザー加工について述べる。

レーザー加工において、集光ビーム径のサイズは、光の波長と集光レンズの開口数で与えられる光の回折限界によって制限される。通常、集光ビーム径と観察視野は、トレードオフの関係となる。集光ビーム径は、レーザー加工における精度や分解能を決めるため重要となる。一方で、広い観察視野も、高速な光スキャナーの使用により高いスループットを与えるため重要である。よって、分解能を低下させることなく広い観察視野を維持することが望まれる。その課題に対して、我々は、CGHを用いた回折限界以下のビーム集光により、レーザー加工における観察視野と分解能を両立させた。実験結果より、サブ回折限界スポットのビーム径は、

通常の回折限界スポットと比較して、最小で 0.60 倍であった。また、サブ回折限界集光を用いて加工された構造の大きさは、通常の回折限界集光の結果と比較して、最小で 0.39 倍であった。

### 2. 計算機ホログラムの設計方法

図 1(a)は、サブ回折限界スポットを生成する CGH の設計アルゴリズムである。アルゴリズムは、光の複素振幅に拘束条件を有するフーリエ反復法<sup>12)</sup>に基づき構成された。ここで  $a$ ,  $\phi$ , および  $u$  は、それぞれ、CGH の入力・出力面の振幅、位相、および複素振幅,  $i$  はアルゴリズムの繰り返し回数である。図 1(b)は、CGH の出力像における回折ビームの配置と、アルゴリズム内で与える各ビームの 4 つの拘束条件<sup>13)</sup>を示す。回折ビームは、上下左右の周囲光スポットと、中心光スポットの 5 点で構成され、各光スポットは  $7 \times 7$  ピクセルで構成されるセルを有した。第 1 の拘束条件( $C_1$ )により、中心光スポットの位相が、

$$\hat{a}_{\text{out}}^{(i)} = a_{\text{out}}^{(i)},$$

$$\hat{\phi}_{\text{out}}^{(i)} = \begin{cases} \phi_{\text{out}}^{(i)} & (0 \leq \phi_{\text{out}}^{(i)} < \pi/2) \\ \pi - \phi_{\text{out}}^{(i)} & (\pi/2 \leq \phi_{\text{out}}^{(i)} < \pi) \\ \phi_{\text{out}}^{(i)} - \pi & (\pi \leq \phi_{\text{out}}^{(i)} < 3\pi/2) \\ 2\pi - \phi_{\text{out}}^{(i)} & (3/2\pi \leq \phi_{\text{out}}^{(i)} < 2\pi), \end{cases} \quad (1)$$

を用いて、複素平面上の第 1 象限に制限される。キャレット記号 $\hat{\cdot}$ は、それぞれ、拘束条件適用後の振幅と位相である。第 2 の拘束条件( $C_2$ )により、周囲光スポットの複素振幅が制御される。適切な間隔で周囲光スポットを配置し、個々の光スポットの振幅と位相を

$$\hat{a}_{\text{out}}^{(i)} = \sqrt{r_n I_c^{(i)}},$$

$$\hat{\phi}_{\text{out}}^{(i)} = \begin{cases} \phi_{\text{out}}^{(i)} + \pi & (0 \leq \phi_{\text{out}}^{(i)} < \pi/2) \\ 2\pi - \phi_{\text{out}}^{(i)} & (\pi/2 \leq \phi_{\text{out}}^{(i)} < \pi) \\ \phi_{\text{out}}^{(i)} & (\pi \leq \phi_{\text{out}}^{(i)} < 3\pi/2) \\ 3\pi - \phi_{\text{out}}^{(i)} & (3/2\pi \leq \phi_{\text{out}}^{(i)} < 2\pi). \end{cases} \quad (2)$$

により拘束する。ここで、光スポットの位相が複素平面上の第3象限に制限される。式(1)と(2)により、隣接光スポット間の位相差が $\pi$ になると、図1(c)のように、隣接する光スポット間の弱め合う干渉により、中心光スポットのビーム径は回折限界以下となる。また、周囲光スポットによるレーザー加工を抑制するために、係数 $r_n$ ( $0 < r_n \leq 1$ )を式(2)に導入し、その振幅を制御する。 $n$ は周囲光スポットのインデックスである。第3の拘束条件( $C_3$ )により、スポット領域内の回折ビームが配置されない領域において

$$\hat{a}_{\text{out}}^{(i)} = 0, \quad (3)$$

$$\hat{\phi}_{\text{out}}^{(i)} = \phi_{\text{out}}^{(i)},$$

を用いて、振幅が強制的にゼロに置き換えられる。第4の拘束条件( $C_4$ )により、スポット領域外の複素振幅が、

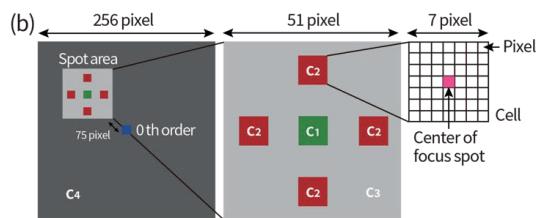
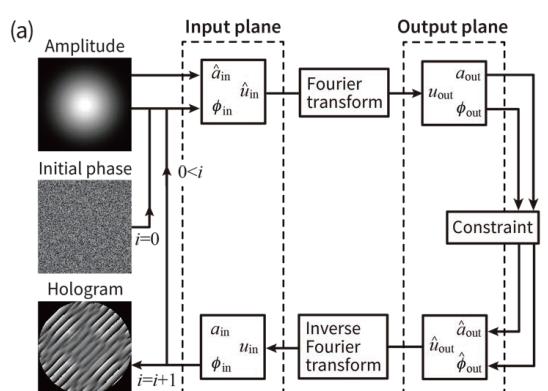
$$\hat{a}_{\text{out}}^{(i)} = C \sqrt{I_c^{(i)}}, \quad (4)$$

$$\hat{\phi}_{\text{out}}^{(i)} = \phi_{\text{out}}^{(i)},$$

を用いて制御される。ここで係数 $C$ ( $0 < C \leq 1$ )は定数であり、回折ビームの光エネルギーの周囲領域への分散に対応する。この操作は、光エネルギーの分散により、周囲光スポット間の同位相な干渉を避けるために用いられる。

### 3. 実験光学系

図2は実験光学系を示す。フェムト秒レーザーシステム(Coherent, Micra and Legend Elite)から射出されたレーザー(中心波長 800nm, パルス幅 110fs, 繰り返し周波数 1kHz)は、液晶空間光変調素子(LCOS-SLM; Hamamatsu, X10468-02)上のCGHにより回折された。その回折ビームは、4f光学系により、開口数( $NA=0.65$ )の対物レンズ(OL; Edmund, ×40)の瞳面に結像された。OLにより集光されたビームは、その焦点面でサブ回折限界スポットを生成した。加工対象には石英ガラスを用いた。加工の様子を観察するために、白色LED、ダイクロイックミラー(DM), 近赤外カットフィルター、およびCMOSイメージセンサー(Thorlabs, DCC1240C)が用いられた。加工による構造物の観察には、走査型電子顕微鏡(SEM: S-4500)を用いた。



- c1: Constraint 1 (sub-diffraction spot)
- c2: Constraint 2 (surrounding spot)
- c3: Constraint 3 (no spot)
- c4: Constraint 4 (surrounding area)

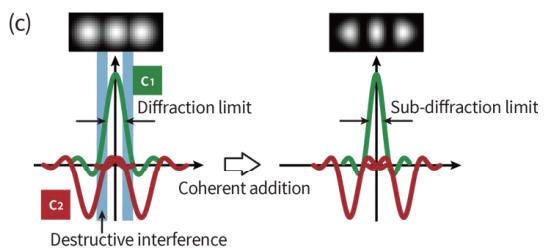
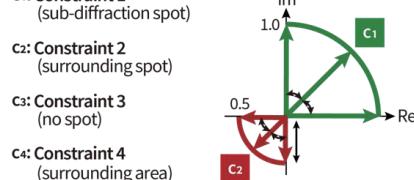


図1 (a) CGHの設計アルゴリズム。(b) 回折ビームの配置と各スポットに適用される拘束条件。(c) 集光ビーム間の弱め合う干渉によるサブ回折限界スポットの生成。

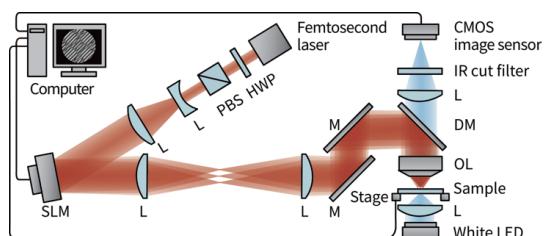


図2 実験光学系

#### 4. 実験結果

図3は、設計したCGHとその再生像における強度と位相イメージを示す。上段が計算機シミュレーションによる再生結果であり、下段が実験系による結果である。図3(a)は、比較のための通常の回折限界スポットを示す。強度プロファイルにおける半値全幅(FWHM: full width at half maximum)を $W_{DL}$ と定義した。図3(b), 3(c), 3(d)は、それぞれ、 $r_n = 0.50, 0.25, 0.10$ の結果を示す。 $r_n$ は、中心と周囲光スポットの強度比に対応する。ここで、中心と周囲光スポット間距離を $d$ 、中心光スポットの強度プロファイルのFWHMを $W_{SDL}$ と定義した。結果より、シミュレーションと実験結果が一致した。また、中心と周囲光スポット間の位相差が $\pi$ となり、弱め合う干渉が生じることを確認した。

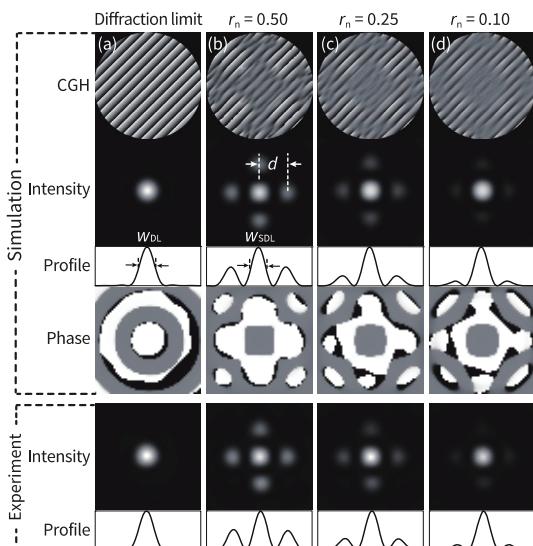


図3 CGHとその再生像における強度と位相イメージ。(a)回折限界スポット、(b)(c)(d)サブ回折限界スポット。

図4は、ビーム間距離 $d$ に対する中心光スポットの直径 $W$ を示す。 $d$ と $W$ は、それぞれ、 $W_{DL}$ で規格化された( $d_{norm} = d/W_{DL}$ )( $W_{norm} = W/W_{DL}$ )。実線はシミュレーション結果、プロットは実験結果を示す。▲、■、◆は、それぞれ、 $r_n = 0.50, 0.25, 0.10$ の結果を示す。挿入図は、 $r_n = 0.25$ 時の各 $d_{norm}$ における光学再生像を示す。結果より、 $r_n$ の増加にともない、 $d_{norm}$ の減少に対する $W_{norm}$ の変化は、より急峻となった。これは、図1(c)より、周囲光スポットの振幅が大きい程、中心光スポットとの干渉の影響が強くなり、ビーム径がより縮小するためである。一方、 $d_{norm} < 0.50$ では、同位相な周囲光スポット同士の強め合う干渉により、サブ回折限界スポットが生成されなかった。 $r_n = 0.50, d_{norm} = 0.75$ の時、 $W_{norm} = 0.60$ となりスポット径は最小であった。

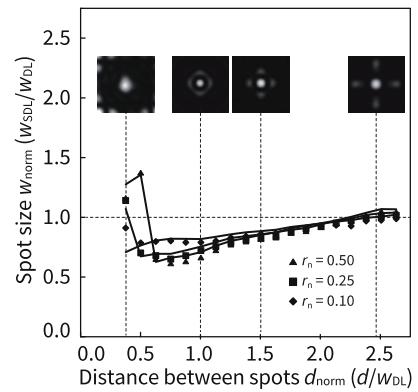


図4 スポット間距離 $d$ に対するスポット径 $w$ 。実線はシミュレーション、破線は実験結果。

図5は、光伝搬方向の強度分布とそのプロファイルを示す。図5(a)は、通常の回折限界スポットを示す。図5(b), 5(c), 5(d)は、それぞれ、 $r_n = 0.50, 0.25$ 、および $0.10$ におけるサブ回折限界スポットを示す。各図における強度は、その最大値で正規化された。光伝搬方向は、図中の左から右方向である。結果は、シミュレーションにおけるベクトル回折計算により得られた。図5(a)-(d)において、強度プロファイルにおけるFWHMは、それぞれ、 $14, 21, 17, 15\mu\text{m}$ であった。結果より、光軸方向強度プロファイルのFWHMは、 $r_n$ の増加にともない伸張した。それは、周囲光スポットによる横向の閉じ込め効果によって、焦点位置( $z = 0\mu\text{m}$ )に対して前方と後方方向に中心光スポットのエネルギーが分離されたためである。結果より、 $r_n = 0.50$ のとき、回折限界スポットと比較して、FWHMは1.5倍に伸張した。一方、 $r_n = 0.25$ と $0.10$ のとき、回折限界スポットと比較して、FWHMは同程度であった。そのため、光軸方向の分解能を考慮する場合は、 $r_n$ を適当な値に設定する必要がある。

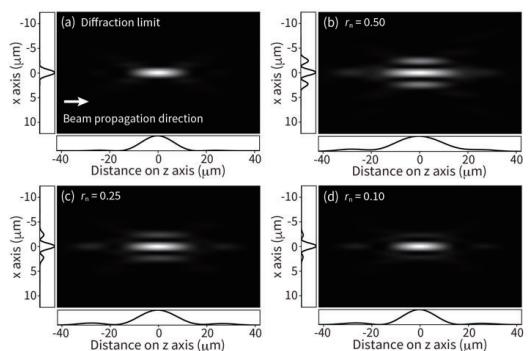


図5 光伝搬方向の強度分布とそのプロファイル。(a)回折限界スポット。(b) $r_n = 0.50$ 、(c)  $r_n = 0.25$ 、(d)  $r_n = 0.10$ におけるサブ回折限界スポット。

図 6 は、サブ回折限界集光を用いたフェムト秒レーザー加工を示す。図 6(a)は、光スポット間隔  $d_{\text{norm}} = 1.25$  の時のパルスエネルギー  $E$  に対する加工された構造の直径  $D$  を示す。 $E$  は中心光スポットの値を示す。加工は、シングルショットパルス照射で行われた。図中の実線は、以下の式で記述される解析値であり、集光面での光強度分布をガウス分布と仮定して求められた。

$$D = \omega \left[ 2 \ln \left( \frac{E}{E_{\text{th}}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

ここで、 $\omega = 0.41/\text{NA}$  は、回折限界における集光スポットのガウス半径、 $E_{\text{th}}$  は加工閾値エネルギー( $0.10\mu\text{J}$ )である。 $*$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ,  $\blacklozenge$  は、それぞれ、回折限界スポットによる結果、 $r_h = 0.50, 0.25, 0.10$  を有するサブ回折限界スポットによる結果を示す。 $E < 4E_{\text{th}}$  では、周囲光スポットの光強度が  $E_{\text{th}}$  以下であったため、フェムト秒レーザー加工の非線形効果により、周囲光スポットによるレーザー加工が上手く抑制された。 $4E_{\text{th}} < E$  における中抜きのプロットは、周囲光スポットにより加工が生じたことを示す。挿入図は、各プロットにおける SEM 像を示す。結果より、解析値と実験結果が良く一致した。また、サブ回折限界スポットによる結果において、式(6)の  $\omega$  内の実行的な  $NA$  は 0.78 であった。 $\blacktriangle(r_h =$

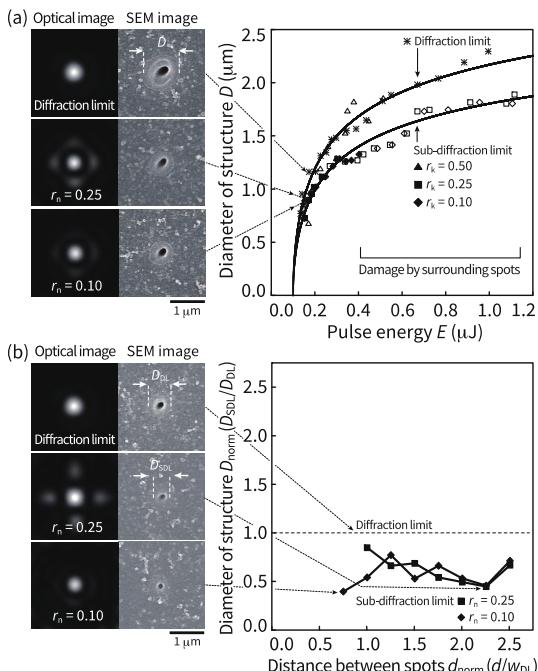


図 6 (a)パルスエネルギー  $E$  に対する加工された構造の直径  $D$ 。(b)スポット間距離  $d_{\text{norm}}$  に対する加工された構造の直径  $D_{\text{norm}}$ 。

0.50)の時、実験で用いた  $E$  すべてにおいて、周囲光スポットによる加工が生じた。図 6(b)は、 $E = 0.17\mu\text{J}$  の時の光スポット間隔  $d_{\text{norm}}$  に対する加工された構造の直径  $D$  を示す。 $D$  は、回折限界スポットにより加工された構造物の直径  $D_{\text{DL}}$  で規格化( $D_{\text{norm}} = D/D_{\text{DL}}$ )された。挿入図は、各プロットにおける SEM 像を示す。結果より、 $r_h = 0.10$ ,  $d_{\text{norm}} = 0.75$  の時、 $D_{\text{norm}} = 0.39$  ( $459\text{nm}$ )となり最小であった。

図 7 は、提案手法を用いて生成された集光ビームを示す。左上の画像は、比較のための回折限界スポットを示す。その他のパターンは、周辺光スポットの位相制御により、スポット間の結合（強め合う干渉）と非結合（弱め合う干渉）の組み合わせによって得られた。例えば、図中央の四角状のパターンは、 $3 \times 3$  個のスポットを  $d_{\text{norm}} = 0.88$  で配置し、各スポットの位相を  $0\pi$  にすることで得られた。結果より、各スポットは、回折限界と同程度の大きさを有した。また、サブ回折限界スポットの生成だけでなく、多様なビームパターンが得られることが示された。

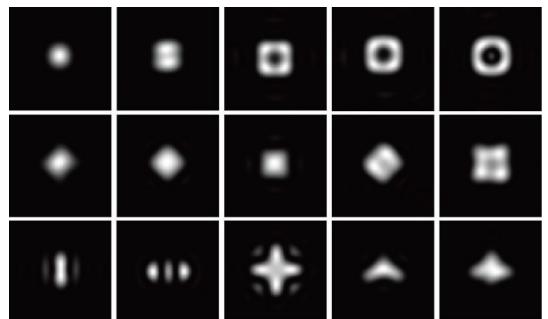


図 7 周辺光スポットの位相制御により生成された多様なビームパターン。

## 5. おわりに

サブ回折限界スポットを生成する CGH を設計し、フェムト秒レーザー加工へ適用した。CGH は、近接ビーム間の複素振幅制御により設計された。ビーム間の位相差を  $\pi$  することで生じる弱め合う干渉の効果により、サブ回折限界スポットが生成された。また、周囲光スポットによるレーザー加工を抑制するために、その振幅が制御された。実験結果より、通常の回折限界スポットと比較して、サブ回折限界スポットは、集光ビーム径を最小で 0.60 倍に縮小した。また、フェムト秒レーザー加工の結果において、サブ回折限界スポットは、加工による構造物の径をレーザー加工の非線形効果との相乗効果により 0.39 倍に縮小した。提案手法は、フェムトレーザー加工や多光子顕微鏡を含む非線形効果を利用した応用に特に有効である。

## 文 献

- 1) B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, and A. Tünnermann: "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids," *Appl. Phys. A* Vol.63, Iss.2, pp.109-115 (1996).
- 2) D. Du, X. Liu, G. Korn, and G. Mourou: "Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO<sub>2</sub> with pulse widths from 7 ns to 150 fs," *Appl. Phys. Lett.* Vol.64, Iss.23, pp.3071-3073 (1994).
- 3) C. Hnatovsky, R. S. Taylor, P. P. Rajeev, E. Simova, V. R. Bhardwaj, D. M. Rayner, and P. B. Corkum: "Pulse duration dependence of femtosecond-laser-fabricated nanogratings in fused silica," *Appl. Phys. Lett.* Vol.87, Iss.1, 014104 (2005).
- 4) Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka, and K. Hirao: "Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements," *Opt. Express* Vol.12, Iss.9, pp.1908-1915 (2004).
- 5) K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, and K. Hirao: "Writing waveguides in glass with a femtosecond laser," *Opt. Lett.*, Vol.21, Iss.21, pp.1729-1731 (1996).
- 6) E. N. Glezer, M. Milosavljevic, L. Juang, R. J. Finlay, T. H. Her, J. P. Callan, and E. Mazure: "Three-dimensional optical storage inside transparent materials," *Opt. Lett.*, Vol.21, Iss.24, pp.2023-2025 (1996).
- 7) Y. Hayasaki, T. Sugimoto, A. Takita, and N. Nishida: "Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.87, No.3, 031101 (2005).
- 8) S. Hasegawa, Y. Hayasaki, and N. Nishida: "Holographic femtosecond laser processing with multiplexed phase Fresnel lenses," *Opt. Lett.* Vol.31, No.11, pp.1705-1707 (2006).
- 9) S. Hasegawa, H. Ito, H. Toyoda and Y. Hayasaki: "Massively parallel femtosecond laser processing," *Opt. Express*, Vol.24, Iss.16, pp.18513-18524 (2016).
- 10) S. Hasegawa, and Y. Hayasaki: "Polarization distribution control of parallel femtosecond pulses with spatial light modulators," *Opt. Express*, Vol.21, No.11, pp.12987-12995 (2013).
- 11) S. Hasegawa, H. Takahashi, M. Ohta, D. Barada, Y. Ogura, J. Tanida and Y. Hayasaki, "Spatial phase shaping of ultrashort laser pulses to overcome the diffraction limit," *OSA Continuum*, Vol.2, Iss.11, pp.3240-3250 (2019).
- 12) R. W. Gerchberg and W. O. Saxton: "A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures," *OPTIK*, Vol.35, No.2, pp.237-246 (1972).
- 13) Y. Ogura, M. Aino, and J. Tanida: "Design and demonstration of fan-out elements generating an array of subdiffraction spots," *Opt. Express*, Vol.22, No.21, pp.25196-25207 (2014).

## 光学スクリーンとして HOE を用いた電子ホログラフィシステムとその応用

Electronic holography system and its applications by using digitally designed

holographic optical element as optical screen

市橋 保之

Yasuyuki Ichihashi

国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所

Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and  
Communications Technology

### Abstract:

We have been working in research and development of wavefront printer in NICT. We created digitally designed holographic optical element (HOE) and presented the electronic holography system by using the HOE as optical screen in 2016. In this paper, I outline the electronic holography system and describe its applications that we are currently working on.

### 1. はじめに

NICT では波面印刷技術を用いたホログラムプリンタ（以下、波面プリンタと呼ぶ）について研究開発を進めている[1,2]。波面の再生には電子ホログラフィ技術を用いており、所望の 3 次元像または位相分布を計算機により作成し、フォトポリマーなどの感光性材料に記録することができる。2016 年には波面プリンタを用いて軸外し凹面鏡の機能を持つ HOE を作製し、これを光学スクリーンとした電子ホログラフィシステムを発表した[3]。本論文ではそのシステムの概要と、現在取り組んでいる応用について述べる[4,5]。

### 2. 波面プリンタ

波面プリンタの概要図を図 1 に示す。図では反射型のホログラムの記録を行っている。光源にはコヒーレンス長の比較的長いレーザーを用いている。レーザー光をコリメートして平行光にした後に、偏光ビームスプリッタ（PBS）により物体光用の光と参照光に分離する。物体光側では再び PBS を用いて空間光変調器（SLM）に光が照射されるようとする。そして、SLM に作成した CGH を表示することで、所望の光が SLM より再生される。

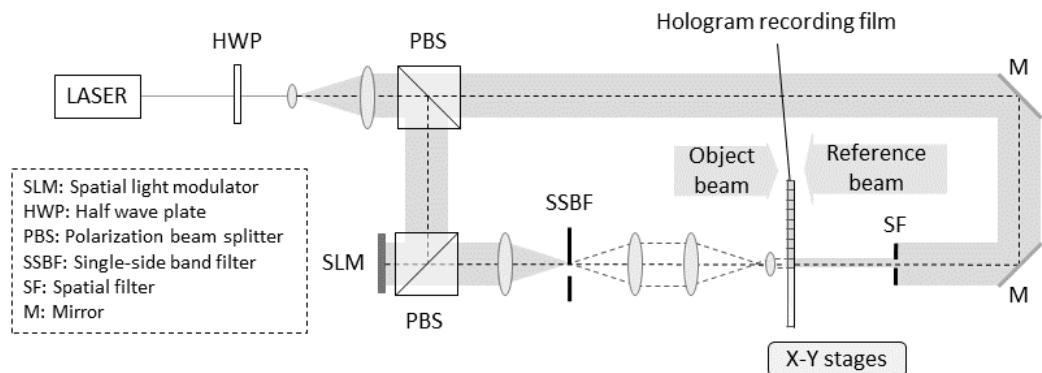


図1 波面プリンタの概要図

現在使用している SLM は JVC ケンウッド製の振幅型 SLM で、解像度は約 800 万画素、画素ピッチは  $6.8 \mu\text{m}$  となっている。このとき最大回折角は緑の波長 532nm で約 2.2 度となる。後述するような映像システム内において、波面プリンタによって作られた光学素子をスクリーンとして使用する場合、この角度は十分な大きさとは言えない。そこで、SLM とホログラム記録面の間に縮小光学系を用いている。現在の縮小率は約 19 倍で、およそ  $0.35 \mu\text{m}$  の細かさで波面を記録している。また 1 回の露光で記録される面積は、最大でも  $1.5 \text{ mm} \times 0.75 \text{ mm}$  程度となる。後述されるディスプレイ用途においては大きさも求められることから、自動ステージなどを用いて水平、垂直に移動させながらタイル状に記録することで、大判のホログラフィック光学素子の作製にも対応している。ステージのストロークは水平、垂直でそれぞれ  $\pm 150 \text{ mm}$  となっており、 $200 \text{ mm}$  四方の素子であれば十分な作成能力を有している。またカラーのホログラムを作製する場合には、光源として RGB のレーザーを用意し、コリメートのところでコンバインなどと組み合わせることで実現できる。ホログラムを記録する感光性の材料は Covestro 社の Bayfol HX を使用している。

### 3. 電子ホログラフィシステムへの応用

ホログラムを表示するための SLM に電子デバイスなどを用いる技術を電子ホログラフィと呼ぶ。電子ホログラフィを用いることで光の波面をデジタルに制御することが可能となる。現在製品として市販されている SLM の画素ピッチは、 $3.74 \mu\text{m} \sim 8 \mu\text{m}$  程度となっている。仮に SLM の画素ピッチを  $3.74 \mu\text{m}$  と仮定すると、その時の最大回折角は 532 nm の波長の光で約 4 度となる。SLM の解像度を 4K2K とした場合、その全面を見るためにはおよそ 300 mm 離れる必要がある。それに対してディスプレイのサイズは約  $14 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  となっており、実用的な大きさの 3 次元像を再生するのは困難である。

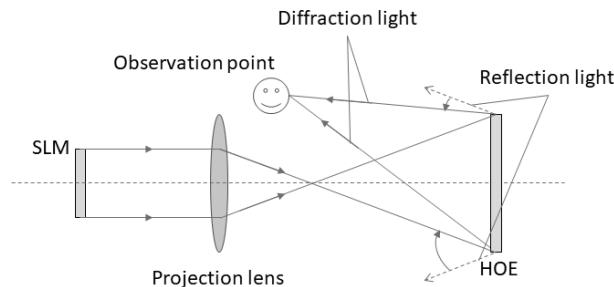


図2 光学スクリーンとして HOE を用いた電子ホログラフィシステムの概要図

そこで図に示すように電子ホログラフィによって再生された波面を、凹面鏡の機能を持った HOE に拡大投影することで、大きな視野と画面サイズを両立することが可能となる。具体的には投影レンズの焦点から広がる球面波を考えたとき、HOE がただのミラーであったとき反射すると考えられる光に対して、回折光が観察点に集光するように HOE を設計する。即ち入射する光に対して光が反射する角度から、観察点に集光するような角度変調量を HOE に持たせることになる。なお実際に電子ホログラフィから再生される波面は単なる平面波ではなく、表示するホログラムによって複雑な波面が形成される。最大回折角の範囲内で様々な波面が再生されるので、再生像の観察が可能となる領域は観察点1点ではなく、その周辺領域を含む。このとき観察領域の大きさは HOE からの距離と HOE 上での最大回折角によって求めることができる。

実際の電子ホログラフィシステムの概観を図に示す。SLM の解像度は  $7,680 \times 4,320$ 、画素ピッチは  $4.8 \mu\text{m}$  となっており、投影レンズの焦点距離は  $500 \text{ mm}$  となっている。このとき4倍に拡大投影すると、SLM と投影レンズの間の距離は  $625 \text{ mm}$ 、投影レンズと HOE の間の距離は  $2,500 \text{ mm}$  となる ( $625 : 2,500 = 500 : 2,000 = 1 : 4$ )。HOE の大きさは約  $147 \text{ mm} \times 83 \text{ mm}$  となる。また集光点は HOE から奥行方向に  $500 \text{ mm}$ 、垂直方向に  $80 \text{ mm}$  離れているように設計した。4倍に拡大投影しているので、HOE 上での最大回折角は  $532 \text{ nm}$  の波長の光で約  $0.79$  度となる。このとき観察領域の大きさは、HOE と観察点の距離および HOE 上の最大回折角の正接の積に比例し、およそその径の大きさが  $7 \text{ mm}$  となる。

またホログラムを計算するためには、投影レンズや HOE の仕様を考慮する必要がある。以下簡単のために光軸方向 (Z 方向) についてのみ検討する。本システムで再生したい点像と HOE の距離を  $z_h$ 、SLM と投影レンズの距離を  $d_1$ 、投影レンズと HOE の距離を  $d_2$ 、投影レンズの焦点距離を  $f_p$ 、HOE の焦点距離  $f_h$  とすると、SLM と SLM から再生される点像の距離  $z_s$  は次の式で表される[4,5]。

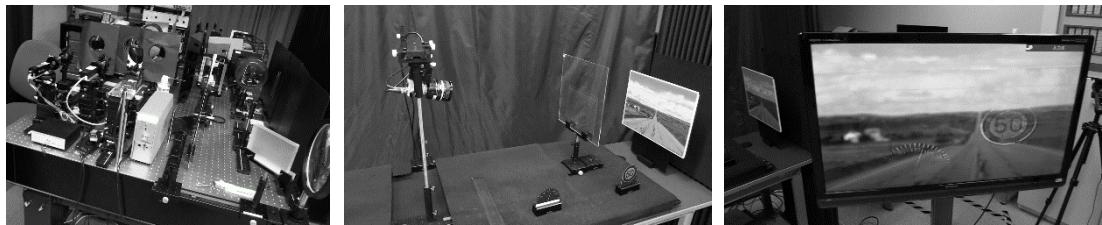


図3 光学スクリーンとして HOE を用いた電子ホログラフィシステム装置

$$z_s = \frac{f_p \{ f_h z_h - d_2(f_h + z_h) \}}{(f_p - d_2)(f_h + z_h) + f_h z_h} - d_1$$

これは幾何光学的に求めることが可能で、X や Y 方向についても同様に求めることができる。再生する像がポイントクラウドのような点像の場合には、像を再生したい位置  $z_h$  を上式に代入して、実際に SLM 上での距離に再生される位置  $z_s$  を求めてホログラムの計算を行う。また CG などの光線情報のモデルを再生する場合は、光線をサンプリングする面の考え方は上式と同じで、HOE からの距離に応じたカメラの向きの設定が必要となる。サンプリング面の距離を変えて再生した例を図4 に示す。

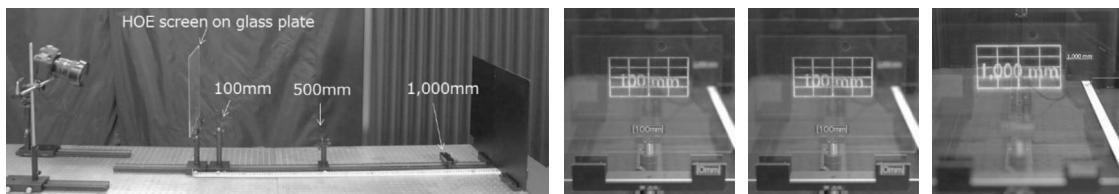


図4 サンプリング面の位置を変えたときの再生結果

#### 4. むすび

光学スクリーンとして HOE を用いた電子ホログラフィシステムとその応用について述べた。現在のシステムでは HOE の印刷精度などが原因で画質が劣化している可能性もあり、HOE の精度の評価といったことに取り組みつつ、インタラクション化や観察領域の拡大などの応用にも取り組んでいきたい。

#### 参考文献

- [1] K. Wakunami, *et al.*, Proc. SPIE **9867**, 98670J (2016).
- [2] Y. Ichihashi, *et al.*, Proc. SPIE **10127**, 101270L (2017).
- [3] K. Wakunami, *et al.*, Nature Comm. **7**, 12954 (2016).
- [4] K. Wakunami, *et al.*, IEICE Transactions on Electronics **E101-C**, 863-869 (2018)
- [5] 天野, 他, 3次元画像コンファレンス 2019, **2-2** (2019.7.4-5) .

## 令和元年第4回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

- 開催日： 2019年11月22日（金）13:00～
- 場 所： 東北大学 青葉山東キャンパス 青葉記念会館 5階大会議室  
<https://www.eng.tohoku.ac.jp/map/?menu=campus&area=c&build=03>
- テーマ： 液晶素子とそのホログラフィ応用（仮）
- プログラム：  
13:00-13:05 HODIC 会長挨拶  
13:05-13:35 瀧口 優（浜松ホトニクス）  
「位相変調型液晶空間光変調器とその応用」  
13:35-14:05 磯前 慶友, 石鍋 隆宏, 柴田 陽生, 藤掛 英夫（東北大学）  
「 $1\mu m$  ピッチの画素を有する電子ホログラフィックディスプレイ用光変調素子の構造設計」  
14:05-14:35 千田 一馬, 磯前 慶友, 石鍋 隆宏, 柴田 陽生, 藤掛 英夫（東北大学）  
「ホログラフィックディスプレイ用位相変調素子の液晶層における構造パラメータが再生像の画質に及ぼす影響」  
14:35-14:55 休憩  
14:55-15:25 長谷川智士, 早崎芳夫（宇都宮大学）  
「ホログラフィックレーザー加工」  
15:25-15:55 的場修（神戸大学）  
「細胞のホログラフィック光刺激」  
15:55-16:25 市橋保之（情報通信研究機構）  
「光学スクリーンとしてHOEを用いた電子ホログラフィシステムとその応用」  
16:25-16:30 情報コーナー  
16:30- 藤掛研究室見学（希望者）

- 研究会参加申込 当日受付（事前の申込は不要です）
- 参加費 会員 無料, 非会員 2,000円, 学生で会報不要の場合は無料
- 問合せ先
  - ・ HODIC 事務局 日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付  
E-mail: [office@hodic.org](mailto:office@hodic.org)

## 令和2年第1回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

- 開催日： 2020年2月下旬から3月中旬頃を予定
- 場 所： 東京、または近郊を予定
- テーマ： 未定
- 研究会参加申込 当日受付（事前の申込は不要です）
- 参加費 会員 無料、非会員 2,000円、学生で会報不要の場合は無料

■問合せ先  
HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付  
E-mail: [office@hodic.org](mailto:office@hodic.org)

### HODIC の WEB ページとメールリストのご案内

HODIC では、独自のドメインにて WEB ページとメーリングリストのサービスしております。WEB ページのアドレス（URL）は

<http://www.hodic.org/>

です、ぜひアクセスしてみてください。なお、WEB ページでは皆さんからの情報やメッセージも掲載できるようになっています。

メールリストサービスは、特定のアドレスにメールを送ると加入者にメールが転送されるものです。HODIC からのお知らせと会員間の自由な意見交換や情報交換のために利用しています。加入も脱退も自由で、費用もかかりません。自分から情報発信したり、分からぬことを質問したりすることも可能です。インターネットへの電子メールの送受信が可能ならどなたでも参加できます。加入の申し込みは、登録したいメールアドレスから [maillist-req@hodic.org](mailto:maillist-req@hodic.org) あてに、本文に SUBSCRIBE と書いて電子メールをお送りください。ご質問は、[w3@hodic.org](mailto:w3@hodic.org) までお知らせください。

## ホログラフィック・ディスプレイ研究会役員（敬称略）

名 誉 会 長	辻内 順平	会 長	伊藤 智義（千葉大学）
副 会 長	山本 健詞（情報通信研究機構）	前 会 長	橋本 信幸（シチズン時計）
国際担当	西辻 崇（首都大学東京）	企画委員長	角江 崇（千葉大学）
会計幹事	山内 豪（大日本印刷）	事務局長	岸本 康（凸版印刷）
編 集 長	吉川 浩（日本大学）		

### 幹 事（50音順）

石井勢津子（美術家）	石川 淳（石川光学造形研究所）	岩田 藤郎
植田 健治（大日本印刷）	太田 和哉（トリマティス）	鎌田 康昌（凸版印刷）
坂本 雄児（北海道大学）	佐藤 甲癸	佐藤 俊一（シャープ）
下馬場朋禄（千葉大学）	白倉 明（アーティエヌ・ラボ）	高木 康博（農工大）
高橋 進（凸版印刷）	谷口 幸夫（大日本印刷）	福田 隆史（産総研）
松島 恭治（関西大学）	三科 智之（日本放送協会）	森田 正紀（アルファアバグ）
山口 健（日本大学）	山口 雅浩（東京工業大学）	渡邊恵理子（電気通信大学）

### 相 談 役（50音順）

上田 裕昭（コニカミルタブ・ラネリウム）	小野 雄三（立命館大学）	勝間ひでとし（湘南 LRT 研究 G）
桑山 哲郎	久保田敏弘（久保田ねぐら工房）	酒井 朋子（千葉大学）
永田 忠昭（arts-unis）	三田村畯右	堀内 道夫（光と風の研究所）
本田 捷夫（本田ひかり技研）		

### 編集部よりのお知らせ

編集部では皆様からの情報を募集いたしております。ホログラフィ関連のお知らせや報告などがございましたら、下記編集部連絡先までお送り下さいますようお願い申し上げます。

なお、次号会報に掲載するためには研究会開催日の1ヶ月前が締切となります。

### HODIC Circular, Vol. 39, No. 4 (Nov. 2019)

2019年11月22日発行

編 集 日本光学会 ホログラフィック・ディスプレイ研究グループ

編 集 長 吉川 浩(日本大学)

HODIC 事務局（入会・連絡先変更・各種問合せ等）

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付（担当：吉川 浩）

〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

TEL/FAX 047-469-5391 E-mail: office@hodic.org

WEB: <http://www.hodic.org/>

ご連絡はなるべく電子メールまたはFAXにてお願ひいたします。

For foreign members, any corresponding to

Hiroshi Yoshikawa, Dept. Computer Engineering, Nihon University

7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, Chiba 2748501 JAPAN

E-mail: [yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp](mailto:yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp)

**HODIC**