

液晶空間光変調素子の最近の展開

原 勉

The Latest Advance in Liquid Crystal Spatial Light Modulators

Tsutomu HARA

Two dimensional phase-only light modulation has aroused a great deal of interest in many applications to optical information processing, such as laser waveform shaping, adaptive optics, holographic measurement, and optical correlation. Therefore a spatial phase-only light modulator is highly desired for the applications. In order to realize a practical device, we have developed an optically-addressed liquid crystal spatial light modulator and electrically-addressed liquid crystal spatial light modulators. We obtained a large depth of phase-only modulation and high diffraction efficiency based on the electro-optical characteristic of a parallel-aligned nematic liquid crystal. Continued efforts on development of spatial light modulators will bring us one step closer to practical applications.

Key words: spatial light modulator, SLM, liquid crystal, phase modulation, optical information processing

光情報処理は、現在では光コンピューティングにとどまらず、光波形成形、光波面補償に至るまで幅広い分野に広がっている。これらの応用分野において必須なものは光情報を並列に表示し処理できるデバイスであり、これを空間光変調器 (SLM: spatial light modulator) とよんでいる¹⁾。これまでに世界中で 100 種類を超える空間光変調器が研究開発されてきたが、実際に使えるレベルに至ったものは少ない。

筆者らは長年にわたり空間光変調器の研究開発に従事し、まず、光電面をアドレス部とし、光変調部として電気光学結晶板 (LiNbO₃) を採用した真空管方式の空間光変調管 (MSLM: microchannel spatial light modulator)²⁾ を完成させた³⁾。MSLM は、マイクロチャンネルプレート (MCP) を内蔵しているので高感度であり、かつメモリー機能を有し、デバイス内部で演算処理も可能な多機能デバイスである^{4,5)}。世界でも数少ない“使える空間光変調器”だったため、国内外の多くの研究者が MSLM を入手して研究を進め、1980~1990 年代にかけて光情報処理研究の

発展に貢献した。

近年になって、光波形成形、光パルス成形、光波面補償、光計測などの分野において、光波の位相を二次元的に制御するためのデバイスの必要性が高まった。そこで、アモルファスシリコン (a-Si) をアドレス部として用い、液晶分子を基板に平行に配向したネマチック液晶層を光変調部とした平行配向液晶空間光変調器 (PAL-SLM: parallel aligned nematic liquid crystal spatial light modulator) を開発した⁶⁾。PAL-SLM は読み出し光の位相だけを二次元的に 2π ラジアン以上変調することができ、理論限界に近い回折効率を有する光アドレス型の空間光変調器である。また、コンピューターとの整合性を考え、液晶ディスプレイ (LCD: liquid crystal display) と PAL-SLM を最適設計された光学系で結合し、画素構造を除去した光利用効率の高い電気アドレス型空間光位相変調器モジュール (PPM: programmable phase modulator) を完成させた^{7,8)}。さらに、近い将来の産業用途を見据え、小型・軽量の LCOS (liquid crystal on silicon)-SLM を開発した⁹⁾。

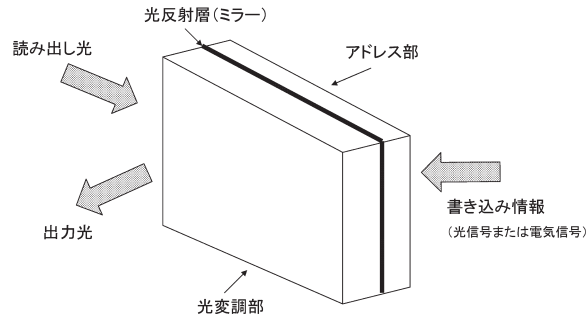


図1 空間光変調器。

アドレス部はCMOSアクティブマトリクス回路からなり、このデバイスの光変調部も光波の位相だけを変調できるように分子を基板に平行に配向した液晶層からなる。

一方で、これらの液晶空間光位相変調器の二次元位相変調の特徴を生かし、デバイスを有効に使用するためには、斜め読み出しや位相歪み補正の導入が必要であり、それらの方法についても言及する。

現在、国内外の大学、研究所および企業において、これらのSLMを用いて、光波面補償技術を利用した光メモリーや生体計測、さらに光波形成技術を利用した光ピンセットやレーザー加工あるいはホログラム計測などの研究開発が活発化しており、今後の展開が楽しみである。

1. 空間光変調器

空間光変調器は、最初はディスプレイ用として、あるいはフーリエ変換に適用するためのインコヒーレント-コヒーレント光変換器として開発された。それが光情報処理の研究の発展とともに、ベクトル-マトリクス演算等の数値演算・光位相補償・スペクトラムアナライザーへの応用展開が意図され、さらに光インターコネクション・並列論理演算・ニューロコンピューティング・光波面制御用のデバイスとしての可能性が検討されるようになった。それに伴い、高解像度・高速応答性など特性に関する要求が強まり、さまざまなデバイス開発に拍車がかかった。

空間光変調器は、図1に示すように、二次元または一次元の読み出し光の位相・偏波面・振幅・強度・伝播方向の分布を書き込み情報によって変調させるデバイスで、アドレス部と光変調部から構成される。つまり、書き込み情報により光変調部の光学的特性を変化させ、その変化に応じて読み出し光が変調され、書き込み情報を反映した出力光を得ることができる並列3端子デバイスである。情報を光学系により直接書き込む光アドレス型と、電気信号により書き込む電気アドレス型に分けられ、さらに図2および図3のようにアドレス部と光変調部の材料によって細分され

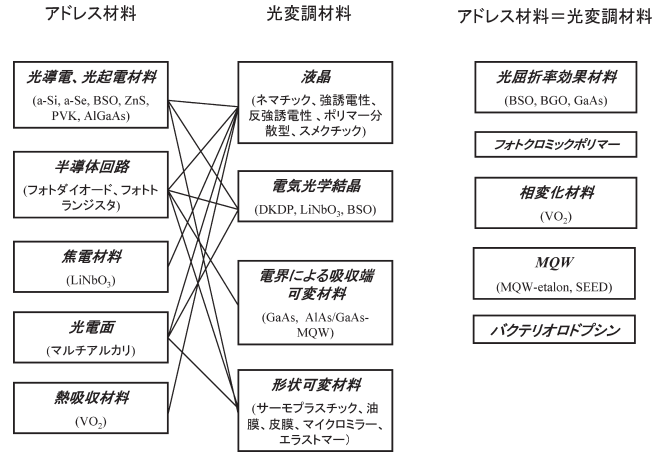


図2 光アドレス型空間光変調器を構成している材料。

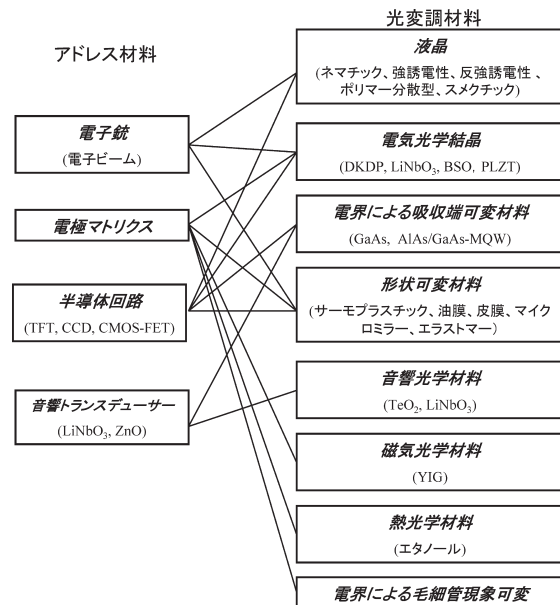


図3 電気アドレス型空間光変調器を構成している材料。

る。さまざまな応用からの要求を満たすため、材料からデバイスの構成に至るまで精力的な研究開発が行われ、これまでに数多くの空間光変調器が提案されてきた。

光アドレス型では、アドレス部として光導電材料・光起電材料・半導体回路・焦電材料・光電面および熱吸収材料などが用いられ、光変調部には、液晶・電気光学結晶・電界による吸収端可変 (electro-absorptive) 材料・形状可変 (deformable) 材料が用いられている。また、光アドレス型では、光変調部がアドレス部の機能をあわせもつものもあり、光屈折率効果 (photorefractive) 結晶・バクテリオロドプシン・フォトクロミックポリマー・相変化材料・化合物半導体の多重量子井戸 (MQW) 構造が利用されている。

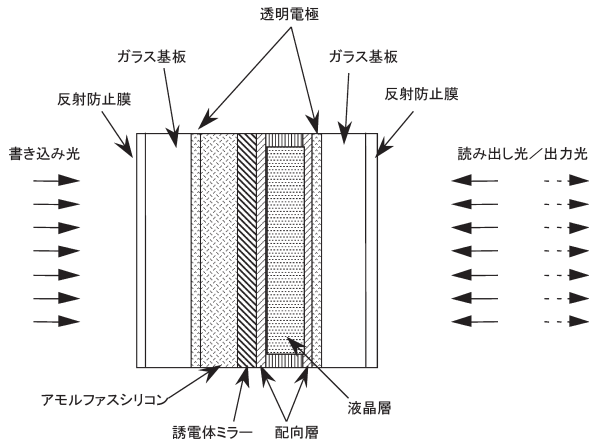


図4 PAL-SLMの構造(断面).

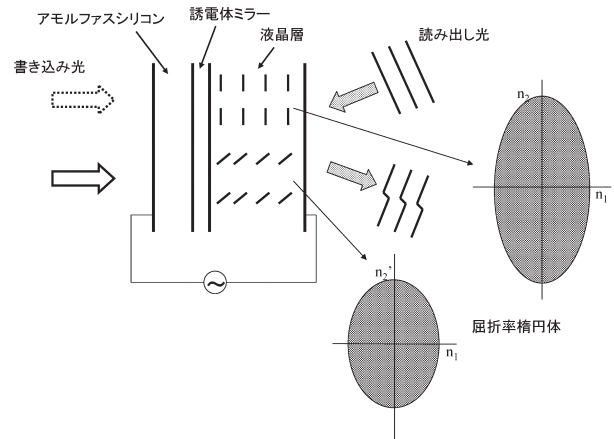


図5 PAL-SLMの動作原理.

電気アドレス型では、アドレス部には電子銃・電極マトリクス・半導体回路および音響トランスデューサーが用いられ、光変調部には、液晶・電気光学結晶・電界による吸収端可変材料・形状可変材料・音響光学材料・磁気光学材料・熱光学材料および電界による毛細管現象可変効果(electro-capillary)が用いられている。

また、光アドレス型空間光変調器をCRT(cathode-ray tube)や液晶ディスプレイ(LCD)と光学的に結合し、電気アドレス型空間光変調器として利用できるものも開発された。

最近では光情報処理分野でも、プロジェクターと同じように、液晶SLM^{10,11)}とMEMS(micro electro mechanical system)^{12,13)}に集約されてきた感がある。以下、筆者らが位相変調を目的として開発を進めてきた液晶空間光変調器を中心に紹介したい。

2. 光アドレス型平行配向液晶空間光変調器(PAL-SLM)

図4にPAL-SLMの構造(断面)を、図5にその動作原理を示す。アドレス部には光導電体である水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)、光変調部としての液晶層にはネマチック液晶が用いられる。SiO₂とTiO₂の多層膜からなる誘電体ミラーにより、書き込み側と読み出し側が光学的に分離されている。液晶層は液晶分子がガラス基板面に平行になるように配向され、読み出し光の偏光方向は、位相だけを変調するためには液晶分子軸に平行に設定される。

透明電極(ITO)間に数ボルトの交流電圧を印加して、アモルファスシリコン層に画像(二次元情報)を書き込む。書き込み光が当たっていない領域では、アモルファスシリコン層のインピーダンスが液晶層のインピーダンスに

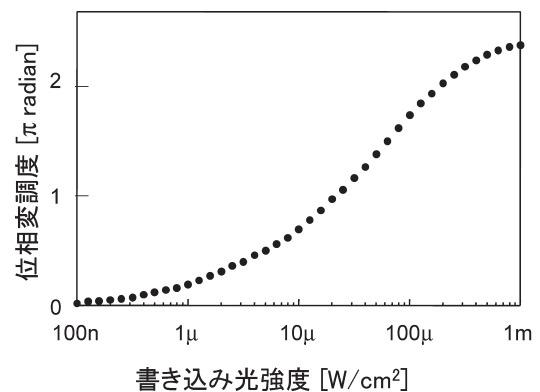


図6 PAL-SLMの入出力特性.

比べて大きいので、液晶層には電圧がほとんど与えられない。そのため液晶分子は傾かない。一方、書き込み光が照射された部分では、アモルファスシリコンのインピーダンスが下がり液晶層に与えられる電圧が上昇するので液晶分子が傾く。その結果、読み出し光に対する液晶の等価的な屈折率が小さくなり(n_2 から n_2' へ変化)、液晶中では読み出し光の位相が進む。このように、書き込み光情報に応じて読み出し光の位相を二次元的に変調することができる。

図6は、PAL-SLMの入出力特性を示したものである。デバイスに3ボルトの電圧を印加し、 $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (波長680 nm)の光強度で書き込むことで、波長680 nmの読み出し光に 2π ラジアン位の位相変調を与えることができる。応答時間は π ラジアン変調時に30 msである。また、干渉縞(正弦波格子)を書き込んだときの回折効率の測定結果を図7に示す。回折効率は+1次回折光の光量 I_1 を、読み出し光の全光量 I_0 で割った値 I_1/I_0 で定義する。5 lp/mm以下の空間周波数のとき、ラマン・ナス回折の理論限界である33.9%に近い値が得られている。

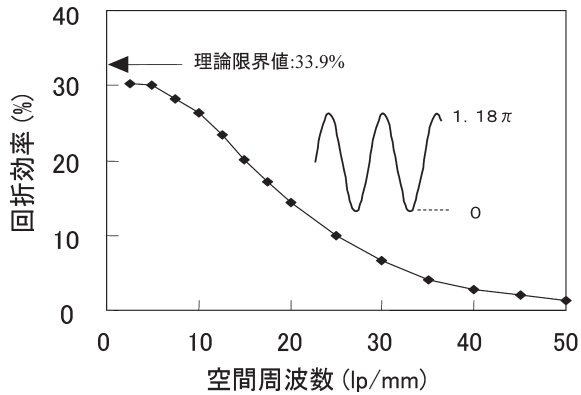


図7 PAL-SLMの回折効率特性(正弦波格子)。

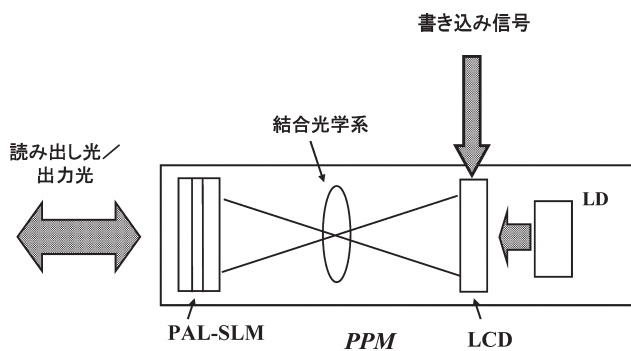


図8 PPMの構造。

3. 電気アドレス型空間光位相変調器モジュール (PPM)

PPMは図8に示すように、PAL-SLM、結合光学系、液晶ディスプレイ (LCD)、書き込み用レーザーダイオード (LD) から構成される。結合光学系は両側テレセントリックレンズ系で、その開口数はSLMの感度、照明光量、LCDのマイクロレンズ開口数を考慮して設計され、伝達関数はLCDの画素ピッチを考慮して設計されている。コンピュータで生成されたパターンは、画素数1024×768の1.3インチLCDに表示され、PAL-SLM上に結像される。

図9は、PPMにパソコンから解像度パターンを書き込み、レーザー光で読み出した画像である。(読み出し用レーザー光の偏光方向を液晶分子軸から45度傾けることにより、強度変調モードで読み出した。) 図9(a)はLCDからの読み出し像であり、LCDの画素構造が表れている。一方、図9(b)に示すように、PPMからの画像はLCDの画素構造が除去されているのがわかる。また、図9(c)では、画像の輪郭が強調されており、 2π ラジアン位相変調が得られていることもわかる。デバイスに書き込まれた画像をフーリエ変換した場合の回折ノイズは、LCDの場合は全読み出し光量の50%に達するが、PPMでは3%

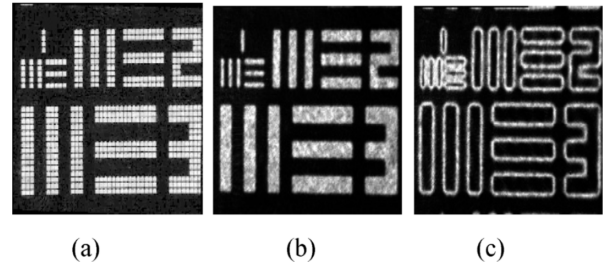


図9 PPMからの読み出し像。(a) LCDからの読み出し像、(b) PPMからの読み出し像 (π ラジアン変調)、(c) PPMからの読み出し像 (2π ラジアン変調)。

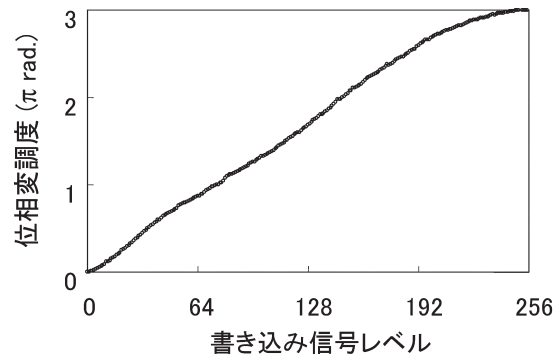


図10 PPMの入出力特性。

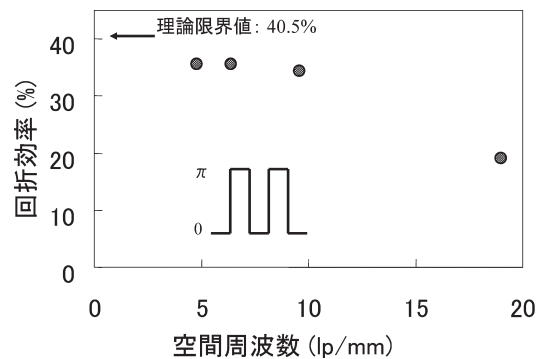


図11 PPMの回折効率特性(二値格子)。

以下に抑えられた。図10はPPMの入出力特性の一例である。書き込み画像信号レベルの増加に従って位相変調度がほぼ線形に増加している。

図11は、デバイスに二値(0, π)位相格子を書き込んだときの回折効率特性である。10 lp/mm以下では35%以上の回折効率を得られている。さらに、四値(0, 0.5π , π , 1.5π)の階段波位相格子を書き込んだときには70%以上の高い回折効率を得られた。

4. LCOS型空間光変調器 (LCOS-SLM)

図12にLCOS-SLMの構造(断面)を示す。アドレス

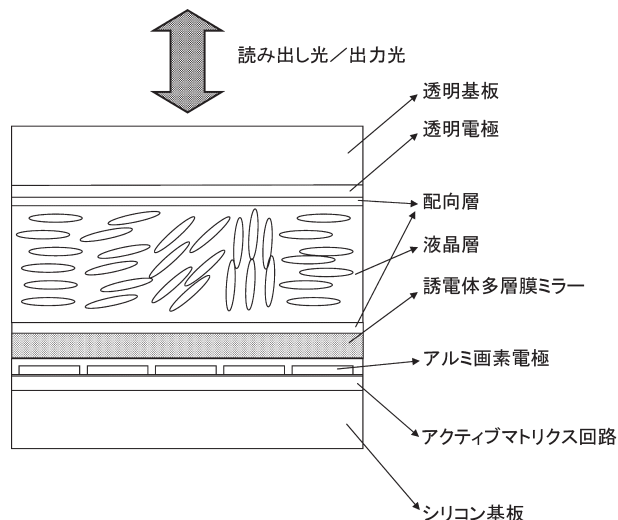


図12 LCOS-SLMの構造(断面).

部は、シリコン基板にCMOSアクティブマトリクス回路が形成され、その上に画素電極が配置されている。今回開発したデバイスの画素数は 800×600 画素、画素ピッチは $20 \mu\text{m}$ である。光変調部は、シリコン基板と、それに対向するガラス基板の間に保持されたネマチック液晶層からなり、PAL-SLM/PPMと同様に液晶分子は基板に平行に配向され、 2π ラジアン以上の位相変調が得られている。また、画素間空隙を狭くして開口率を95%とし、さらに薄膜技術によって光利用効率を90%以上に高めた。LCOS-SLMに二値(0, π)位相格子を書き込んだ場合、 25 lp/mm の空間周波数まで30%を超える良好な回折効率が得られている。

5. 空間光位相変調器の有効な使用方法

筆者らが開発してきた上述の液晶SLMはいずれも反射型の空間光変調器なので、読み出し光と出力光はデバイスの同じ側にある。そのため、読み出し光をデバイスに垂直に入射させた場合には読み出し光のロスが大きい。なぜならば、図13(a)のように、読み出し光と出力光を分離するためにビームスプリッターが必要になるが、位相変調では出力光の偏光状態(偏波面)は変化しないので偏光ビームスプリッターを使用できない。無偏光ビームスプリッターを使用することになるが、ビームスプリッターで反射、透過のロスが生じ、出力光は読み出し光の4分の1以下の光量に減少してしまう。そのため、図13(b)のような斜め読み出しを採用することで、上述の問題を回避できる。読み出し光の偏向方向と液晶分子軸の方向の関係がp偏光の状態の場合に、効率のよい読み出しが行えることを実証した^{10,11)}。

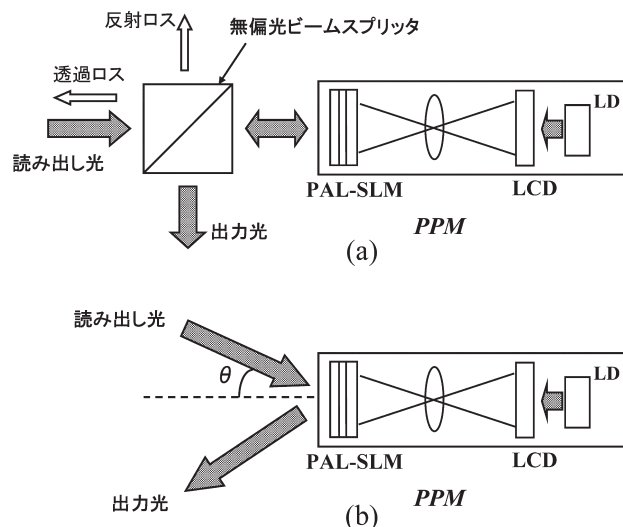


図13 読み出し光学系。(a)垂直読み出し(無偏光ビームスプリッターによる光量のロスが生じる)、(b)斜め読み出し。

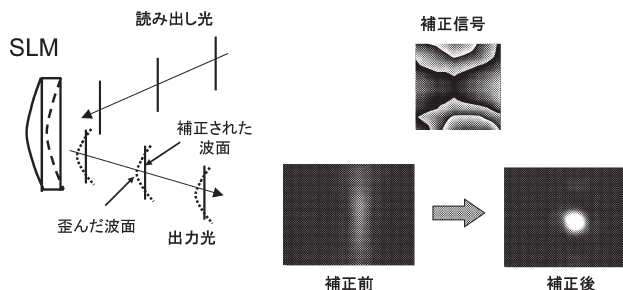


図14 デバイスの歪み補正。

また、SLMを構成する基板は完全な平面ではないため、SLMを反射してきた光波は歪みをもってしまふ。そこで、面精度を干渉計や波面センサーであらかじめ計測し、その歪みを打ち消す信号をSLMに与えることでデバイスの面精度補償を行う。図14には、SLMが歪みを有すると読み出し光(平面波)が歪んでしまい一点に集光できないが、歪みを打ち消す信号(補正信号)をSLMに与えることでSLMの歪みが補正されることを示している。この方法の採用で、SLMを理想に近い二次元位相変調素子として機能させることができた¹²⁾。

6. 光波面制御への応用

近年、レーザーを用いたさまざまな光システムにおいて、任意のビーム形状の作製や、乱れた光の波面を補正する光波面制御¹³⁻¹⁵⁾へのニーズが高まっている。

図15は光波形成形への応用を示す。空間的にガウス強度分布を有するレーザービームが、空間光変調器に書き込まれたコンピューター生成位相ホログラム(CGH)によって、「HPK」の文字に変換されている。(この例では、1

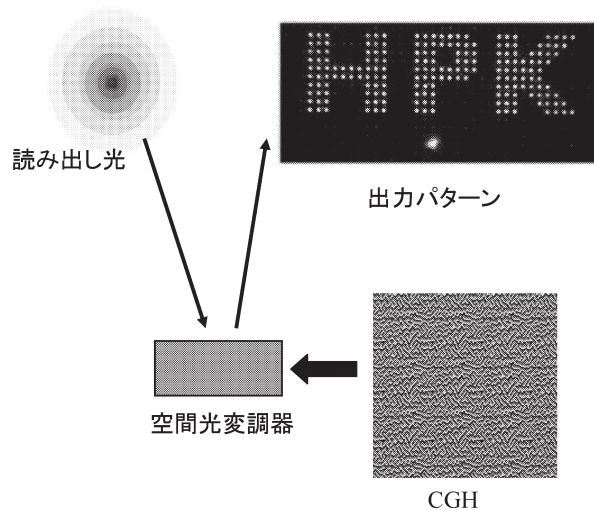


図 15 光波形成形.

本の光ビームが 190 本の光ビームに分岐されていることになる。) この技術は、レーザー加工、多ビーム光ピンセット^{16,17)}に適用されている。さらに、フェムト秒レーザーパルスの時間的波形を制御するパルス波形成形の研究も進められている¹⁸⁾。

図 16 は波面補償システム¹⁹⁾を説明する図である。波面歪み(収差)をもつ光は、空間光変調器の読み出し光として入射し位相変調を受ける。空間光変調器からの反射光の一部は波面センサー(ジャック・ハルトマンセンサー)に送られる。波面センサーは、マイクロレンズアレイとインテリジェントビジョンシステム²⁰⁾の組み合わせであり、レンズアレイを構成する個々のレンズの焦点での光スポットの重心位置情報を高速に検出して、図中に示すような補正パターンを生成する。波面補正前は集光レンズを用いても一点に集光できないが、補正パターンによって空間光変調器を逐次的に制御することで、波面は補正され集光レンズで集光することができる。

1980~90 年代の光コンピューター研究においては、システムのスループットが重要であり、空間光変調器側への要求は、「性能(画素数、速度)は高ければ高いほどよい」というものであった。もちろん、空間光変調器もそのような要求に合致することは不可能であり、結局、提案された光コンピューターアルゴリズムの実験的実証に使われる程度であった。

近年になって、レーザー加工、顕微鏡、検眼鏡、多ビーム光ピンセット、光メモリーなど空間光変調器の具体的な応用分野が示され、性能に対する要求も具体化し、実応用が検討されるようになった。今後、ニーズからシーズへの

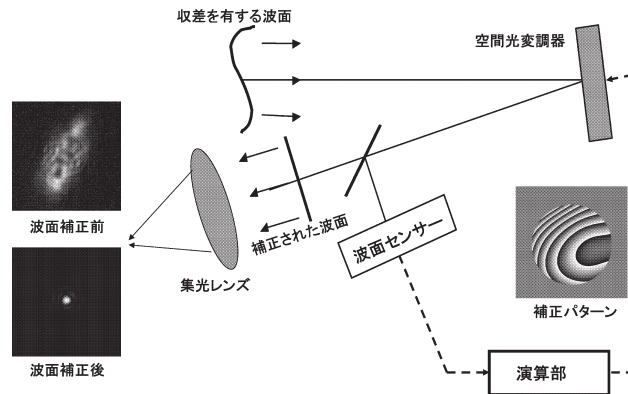


図 16 波面補償.

フィードバックがかかり、空間光変調器も価格や性能面で、よりよいものへ発展していくものと考えている。

そのような状況のもとで、筆者らは光アドレス型および電気アドレス型液晶空間光位相変調器を開発し、二次元の光位相制御を必要とする多くの応用に対して有効なデバイスであることを確認した。幅広い応用分野に利用されていくことを期待したい。

文 献

- 1) 辻内順平, 黒田和男ほか編: 光学技術ハンドブック (朝倉書店, 2002) pp. 314-320.
- 2) C. Warde, A. D. Fisher, D. M. Cocco and M. Y. Burmawi: "Microchannel spatial light modulator," *Opt. Lett.*, **3** (1978) 196-198.
- 3) T. Hara, M. Sugiyama and Y. Suzuki: "A spatial light modulator," *Adv. Electron. Phys. B*, **64** (1985) 637-647.
- 4) T. Hara, Y. Ooi, Y. Suzuki and M. H. Wu: "Transfer characteristics of the microchannel spatial light modulator," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 4781-4786.
- 5) T. Hara and Y. Suzuki: "Microchannel spatial light modulator," *Optoelectronics: Devices and Technologies*, **10** (1995) 393-420.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) T. Hara, N. Fukuchi, Y. Kobayashi, N. Yoshida, Y. Igasaki and M. H. Wu: "Electrically-addressed spatial light phase modulator," *Proc. SPIE*, **4470** (2001) 114-122.
- 9) T. Inoue, H. Tanaka, N. Fukuchi, M. Takumi, N. Matsumoto, T. Hara, N. Yoshida, Y. Igasaki and Y. Kobayashi: "A reflective LCOS spatial light modulator controlled by 12-bit signals for optical phase only modulation," *Proc. SPIE*, **6487** (2007) to be published.
- 10) 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** (2000) 158-165.

- +
- 11) N. Fukuchi, Y. Biqing, Y. Igasaki, N. Yoshida, Y. Kobayashi and T. Hara: "Oblique-incidence characteristic of parallel-aligned nematic-liquid-crystal spatial light modulator," *Opt. Rev.*, **12** (2005) 372-377.
 - 12) 福智昇央, 伊ヶ崎泰則, 吉田成浩, 小林祐二, 原 勉: "電気アドレス型空間光変調装置", *Optics Japan 2002*, 3pB8 (2002) pp. 198-199.
 - 13) T. Shirai: "Liquid crystal adaptive optics based on feedback interferometry for high-resolution retinal imaging," *Appl. Opt.*, **41** (2002) 4013-4023.
 - 14) M. T. Gruneisen and T. Martinez: "Dynamic holography for high-dynamic-range two-dimensional laser wavefront control," *Proc. SPIE*, **4493** (2002) 224-238.
 - 15) J. Liang, D. R. Williams and D. T. Miller: "Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics," *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 2884-2892.
 - 16) Y. Hayasaki, S. Sumi, K. Mutoh, S. Suzuki, M. Itoh, T. Yatagai and N. Nishida: "Optical manipulation of micro-particles using diffractive optical elements," *Proc. SPIE*, **2778** (1996) 229-230.
 - 17) J. E. Curtis, B. A. Coss and D. G. Grier: "Dynamic holographic optical tweezers," *Opt. Commun.*, **207** (2002) 169-175.
 - 18) 伊藤晴康, 浦上恒幸, 青島紳一郎, 土屋 裕: "高強度波形整形パルス光の加工への応用", 電気学会 光・量子デバイス研究会資料, OQD-03-9 (2003) pp. 45-49.
 - 19) H. Huang, T. Inoue and T. Hara: "An adaptive wavefront control system using a high-resolution liquid crystal spatial light modulator," *Proc. SPIE*, **5639** (2004) 129-137.
 - 20) H. Toyoda, N. Mukozaka, S. Mizuno, Y. Nakabo and M. Ishikawa: "Column parallel vision system (CPV) for high-speed 2D-image analysis," *Proc. SPIE*, **4416** (2001) 256-259.
- (2006年10月3日受理)