

液晶による空間光制御 –その歴史と展望–

シチズン時計（株）研究開発センター 開発部

橋本 信幸

hashimotono@citizen.co.jp

Abstract

Spatial light modulation especially utilizing liquid crystal devices is now very attractive for optical information processing such as holography, optical memory, OCT, microscopy, laser processing and so on. I have long been in charge of this field over 40 years when I first met holography during my undergraduate. In this paper, I will describe history and future prospects of liquid crystal spatial light modulators and its applications.

1 : はじめに

私事になるが、早いものでホログラフィに関わって 40 年、そして液晶にも 35 年に渡って関わってきた。巻頭言にも書かせていただいたが、学生時代にホログラフィを学び、現在の会社に入社して液晶と出会い、そして液晶による空間光波面変調とその光学応用の研究開発を、あるときはアングラでそして稀に(?) 事業化目標テーマとして継続してきた。その間に社内外の多くの方々に支えられて、そのいくつかは製品として世の中に出すことができた。一連の研究開発と実用化が評価され企業人としては珍しく OSA と SPIE 両方から Fellow 称号をいただいた。これは本当に名誉でそして多数の方々に感謝しなければならない出来事だった。

駆け出しの頃は、偉い先生が科学技術の歴史と思想そして未来を語って下さったときに、まさか僥越ながら自分も同じようなことを語る時が来るとは想像していなかった。せっかくこのようなチャンスをいただいたので、恥ずかしながら自分が関わってきたことを中心に、液晶とその光学応用の歴史そして今後について語ってみたい。多少なりとも皆様、特に次世代の方々に参考になれば幸いである。

2 : 液晶素子の黎明期

ご存知の方も多いと思うが、液晶表示素子は 64 年に今はなき RCA 研究所の Heilmeyer により最初に報告された¹⁾。このときは電流注入型の散乱モードで消費電力も大きくあまり注目されなかったようだが、Schdat が 71 年に今のネマティック液晶に通ずる電界制御型の液晶デバイスを発表し、液晶は一躍注目されることになった²⁾。特に当時、このデ

バイスに目を付けたのはバッテリーに限りのある時計と電卓メーカーだった。当社もその発表前後から実用化の研究をスタートしていた。当時はすでに CMOS も発明されていて液晶と CMOS を組み合わせることで、電池一個で一年以上動く液晶デジタルウォッチを製品化した。これはもしかすると、その後のデジタルウォッチの流行につながったのでイノベーションといっても過言ではなかったかもしれない。74年のことである。余談だが開発に当たっては、私の上司であった諸川らが活躍していた。現在の時計は皮肉なことにスイスを中心とした機械時計が市場（個数ではなく売り上げ）の大部分を占めている。

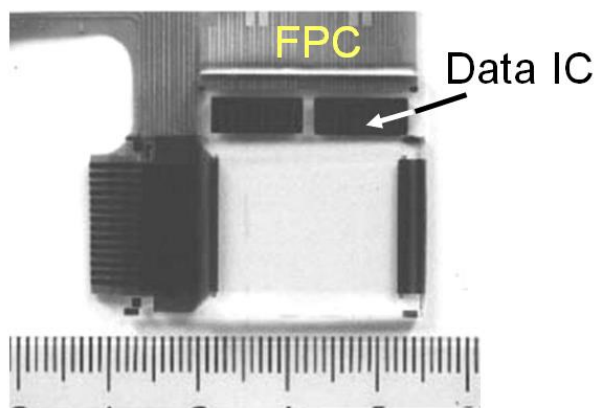
時計や電卓に使われた液晶はセグメント型といわれ、分割独立した画素構造をもち各画素が一对一対応で電源とつながれスタティック駆動される。しかしこの構造では画素数が増えると、引き出し電極が同じだけ増えてしまう。そのため今の液晶ディスプレイに通じるマトリクス時分割駆動が 70 年頃から提案されるようになった。これは各画素間でタイミング電極を共有しているため、基本的には独立駆動が難しい。80 年代に入りエプソン（現、セイコーエプソン）により TFT（薄膜トランジスタ）アレイによるアクティブマトリクス駆動が実用化し、現在の美しい高精彩液晶ディスプレイへと発展した。一方で、空間変調素子として近年注目されている LCOS(Liquid crystal on silicon)だが、77年にはプロジェクター用の反射型液晶表示素子として発表されている⁴⁾。また TFT 駆動も 72年にウエスティングハウスで発表されている。

ここまでは電気アドレス型の話をしたが、70年代は光アドレス型空間光変調器が複雑な駆動回路も不要で高精細であることから注目を集めていた。代表的なものは光学結晶である。一例をあげると BSO（ビスマスシリコンオキサイド）はインコヒーレント光で画像パターンを照射し、その結果生じる屈折率変化（フォトリフラクティブ効果）を利用したレーザー光変調に応用された。いわゆるインコヒーレント・コヒーレント変換素子である。また液晶も光導電層と組み合わせた変調器が提案され、液晶ライトバルブといわれた。潜水艦で作戦用モニタとして使用されたヒューズ社や、光情報処理用に実用化された浜松ホトニクス社そして市販はされなかったと思うが、強誘電性液晶と組み合わせたセイコー電子工業社の物が注目されていた。ただし光書き込み型はその後のデジタル技術との結合が苦手で（レンズや光、電子走査等による書き込みが必要）今はあまり使われていない。

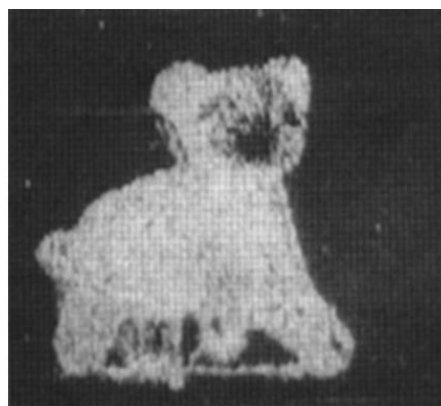
3：液晶によるアクティブ光波面変調と動画ホログラフィの黎明期

液晶をアクティブ光学素子に応用しようという試みは古く、79年には東芝の堀らが回折格子の電極パターンを持った液晶回折光学素子を報告している⁵⁾。また液晶アクティブレンズでは、秋田大学の佐藤らが 85年に液晶球面レンズを報告している⁶⁾。更に 86年にはカリフォルニア工科大学の Mok らが、液晶テレビのパネルを用いて 2次元ではあるが、円環の CGH を再生した⁷⁾。このときの液晶パネルは、当社が 85年に開発し、米国で発売

した白黒の液晶テレビのパネルが使用された。その画素数は 146×122 、画素ピッチは $370 \times 340 \mu\text{m}$ であった。この発表に刺激を受けた我々は独自に高精細の液晶パネルを開発し、91年に当時サンノゼで開催されていた SPIE Practical Holography V で CCD と液晶を用いた実時間ホログラフィを報告した⁸⁾。おそらく液晶を用いた世界初の Holographic 3D-TV として話題となった。



LCTV-SLM (Transparent)
640 × 240 (30 × 60 μm)



Holographic 3D image
Hashimoto et. al SPIE 91

Fig. 1 Real-time holography using LCTV-SLM (Holographic TV system)⁸⁾.

同時期には MIT メディアラボの今は亡き Benton らのグループが、AO 変調素子と回転ミラーを用いた CGH の 3D 動画再生を行って話題となった。本プロジェクトには日大の吉川らも参画していた。ちなみにホログラフィを電子的に記録再生しようとする試みも古く、72年にはベルラボの Doyle らが Lumatron というビジコン（光導電体を用いた電子線描画の撮像素子）を記録再生に用いた実時間ホログラフィシステムを提案し、二次元画像をホログラフィの手法で実時間再生した⁹⁾。

一方、ホログラムに類似したキノフォームであるが、91年にはセイコーエプソンの尼子、曾根原らが独自に開発したポリシリコン TFT 駆動液晶パネルを用いて複素振幅変調を行い、0次光が抑圧された二次元像の再生を報告し話題となった¹⁰⁾。これは Applied Optics の表紙にもなったので（パンダの絵）覚えている方も多いだろう。

液晶パネルを用いた動画ホログラフィは同時期に湘南工科大学の佐藤らによっても精力的に研究されていた¹¹⁾。そして94年には電子情報通信学会に動画ホログラフィ時限研究専門委員会が発足した。その後、計算工学や空間光変調デバイスの飛躍的進歩、新たな光学アーキテクチャの考案等により、当時とは比べ物にならないくらいの画質向上が見ら

れ、ホログラムプリンタ等の用途によっては実用に近いものになった。

一方で、動画ホログラフィを報告した我々は液晶パネルの高精細化と、光情報処理特に実時間光相関演算への応用を試みた¹²⁾。これはホログラフィ TV の実用にあたっては要求される空間光変調器の画素数や画素密度が当時の（今も）常識を超えるものが予想されたからである。実際に、光相関演算は当時の空間光変調デバイスでもある程度可能だったので、光コンピュータや光ニューラルネットワークという名前で多くの研究が行われた。結局光コンピュータは実現しなかったが、現在のデジタルホログラフィにつながったといっていだろう。また光演算はその後、日本女子大の小館らのグループや、電通大渡邊らのグループで研究が続き、特定用途においてかなり実用化に近いレベルまで近づいている¹³⁾。

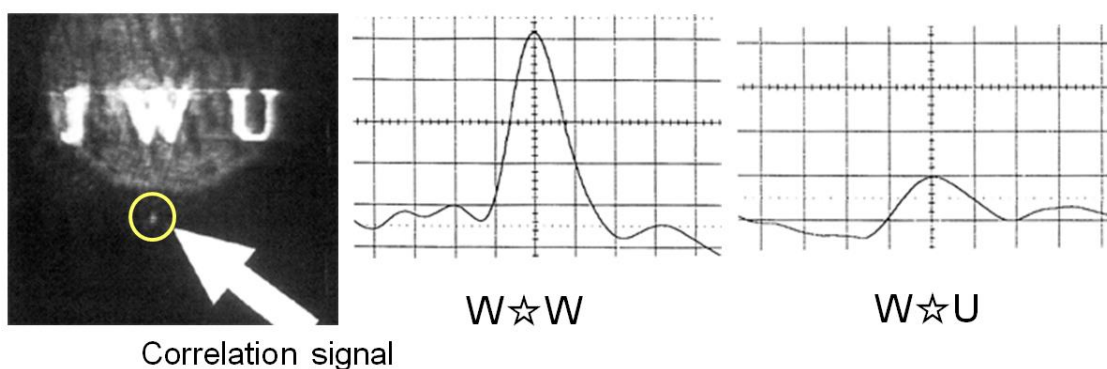


Fig.2 Real-time optical correlation using LCTV-SLM and FZP (IEEE Tokyo 93)¹²⁾.

4 液晶光学素子と光学機器への応用¹⁴⁾

動画ホログラフィとその光コンピュータへの応用も視野にアングラでの研究開発を続けていたが、本来の目的はアクティブな光波面変調素子を実現することだった。レンズやミラー、望遠鏡や顕微鏡そして眼鏡は 14 世紀頃には実用化されていた。そしてそれらのコンセプトは材料や加工、設計技術等の飛躍的進歩はあるが、基本的には現在の光学機器と同じである。非機械的に制御できる光学デバイス（電子的な光波面変調素子）があれば画期的と思ったのが始まりである。そして可能性のあるあらゆるデバイスを調査し結局は液晶に目をつけた。これは当社が持っていた既存技術と生産技術が利用できるということもあった。実際に、液晶素子で光波面制御やその応用開発を目指し、88年には液晶による補償光学と光ピックアップの焦点補正の特許も出願しその後成立した¹⁵⁾。ただ意識していたのは航空宇宙や計測用途で、アクティブ光学素子が民生品に使用されることなど想像していなかった。しかしその時期は以外に早く来ることになった。

4. 1 液晶収差補正素子と光ピックアップ、レーザープリンタへの応用

82年にCDがそして96年にはDVDが実用化された。当時としてはNA0.65の対物レンズを用いるDVDは波面収差的に非常にシビアであり、特に同じ頃使われはじめたカーナビ用のDVD開発は困難を極めていた。なかでも熱等によるディスクの反りで発生するコマ収差は致命的で、機械的にレンズを傾けること(3Dアクチュエータ)で対応していた。そこでパイオニアの大滝や岩崎らが中心となり、液晶コマ収差補正素子を光ピックアップに応用することが提案され¹⁶⁾、当社の持つ液晶波面制御技術が注目された。これは透明電極にコマ収差を近似するパターンを用いた液晶コマ収差補正素子を対物レンズの入射瞳面近傍に設置し、RF信号(光ピックアップが最初に読み取るディスクからの反射アナログ信号)が最大となるように液晶素子にフィードバックをかけるもので、いわゆる補償光学である。これは実にうまくいき、その後は液晶の薄さ(省スペース)からノートPC内蔵のスリムDVD用光ピックアップにも使用された。

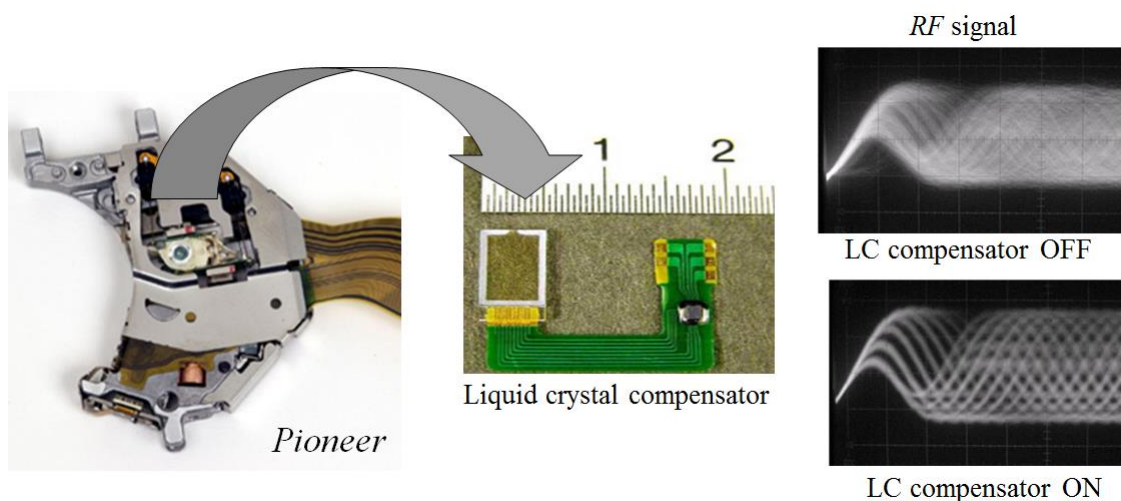


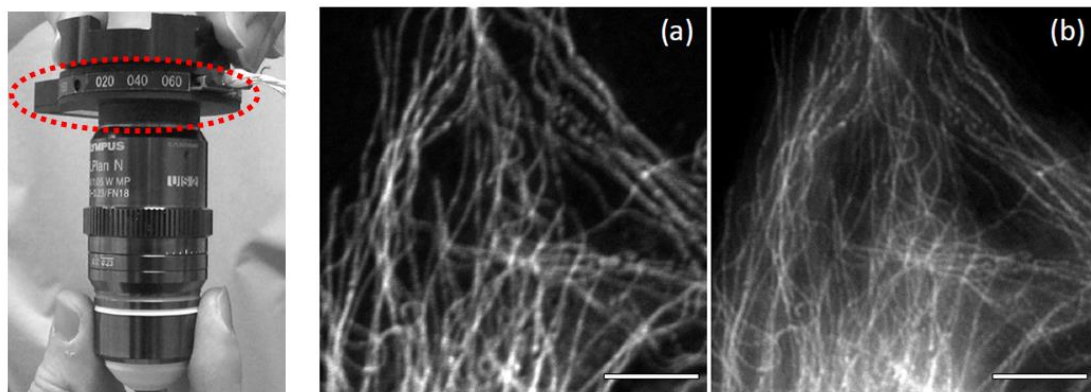
Fig.3 Slim DVD pick up using LC COMA and spherical aberration compensator

その後は更に収差的に厳しいブルーレイのピックアップにも使用され、累計で一億個以上生産した。我々の独占技術であった。今にいたるまで補償光学技術が民生品にそれも億の単位で使われた例はないだろう。量産の立ち上げはわずか一年で、素子の根本性能に関するクレームは皆無だった。これは物理現象の熟知(長年の研究と本学会をはじめ多数の先生方のご指導)と優秀な技術者、製造現場、間接部門の方々そしてパイオニアをはじめとするエレクトロニクスメーカーの情熱に支えられて初めてなし得たことであった。ちなみに本技術はリコーのレーザー複合機(マルチレーザービーム調整用液晶偏向素子)¹⁷⁾や今は消えてしまったが、光磁気ディスク(MD)の位相補正素子としても製品化された。

4. 2 液晶光学素子のバイオイメーjing応用

2006 年頃が光ピックアップ用液晶光学素子の最盛期であったが、その頃から我々は新たな応用を探索していた。光ピックアップに近いものといえばレーザー顕微鏡、レーザー加工そしてレーザープリンタである。ただレーザー加工は一般に大パワーが必要で、液晶にとっては敷居の高い応用であった。そのなかで研究開発や製品化において我々の技術が注目された顕微鏡とプリンタにフォーカスして開発をはじめた。これは波面制御のみならず我々が 97 年に報告した液晶による偏光制御とそれを応用した超解像技術¹⁸⁾、いわゆる空間的な偏光分布を持たせることで、その後注目されるベクトルビーム¹⁹⁾に通じるものであった。

最初のアプリケーションは大阪大学（現所属は北海道大学）の橋本らが研究していたアンチストークスラマン顕微鏡への応用であった²⁰⁾。これはその後、ノーベル賞となった STED 顕微鏡にも通じる研究であった。また 2008 年の下村によるノーベル賞となった GFP の発見で、レーザー顕微鏡が生物・医学研究において必須の技術となり、東北大学の佐藤、北大の根本らの指導のもと、ベクトルビームを用いた超解像や収差補正による生体深部観察などの研究を行った²¹⁾²²⁾。これらは超解像モジュールや収差補償モジュールとして実用化に近いところまで開発が続いたが、一部の特殊品を除き製品化にはいたっていない。



Objective with LC module

Super resolution off

Super resolution on

Fig.4 Liquid crystal super-resolution module and its laser scanning images²¹⁾

NA1.2, λ : 800nm, COS7. Courtesy: S.Sato (Tohoku univ) and T. Nemoto (Hokkaido univ.)

また、ジョンスホプキンス大学の Brooker らとは液晶 GRIN レンズの偏光特性を応用した FINCH(Fresnel Incoherent Correlation Holography)顕微鏡の開発を行った²³⁾。これはインコヒーレント系とコヒーレント系の OTF 双方の利点を合わせ持つ技術で、パーシャ

ルコヒーレント光が利用できるということで、超解像蛍光顕微鏡として注目された。

バイオイメージング応用以外では、詳細は省くが液晶 GRIN レンズ²⁴⁾を応用したスマホや携帯カメラ用のオートフォーカスモジュール、老眼用のアクティブ眼鏡等の開発を行ってきた。

5. 今後と展望 (研究開発とイノベーションそして魔法の板)²⁵⁾²⁶⁾

液晶による空間光制御とその応用に関して、我々の研究開発を中心に長年の取り組みを紹介させていただいた。その間に液晶表示デバイスは飛躍的な進歩をとげ、今やフラットディスプレイとして巨大な市場を築いている。しかし残念なことに初期にはほぼ 100%の市場を握っていた日本に、いまやその面影はなくなった。一方で液晶による光波面制御応用では、一時は多数の光ピックアップに使用された。当時、すでに液晶技術とホログラフィ等の光波面制御技術は当たり前の技術だったので、それを組み合わせ光ピックアップにある種の技術革新を起こしたことはシューペンターの言うイノベーションに近かったかもしれない。面白いことに光ピックアップに実装され、売り上げが毎年伸びていった 2000 年以降は、本技術に関連する論文数も増えていった。中国を見てもわかるように、GDP の成長と論文数の成長は同位相でリンクしている(ともに 2000 年頃から急成長している)。すなわち研究成果の結果として経済が発展したのではなく、経済の発展と共に研究も発展している。

本技術と比較するのは恐れ多いが、誰もが疑わない今世紀最大のイノベーションの一つは、日本人の貢献が大きかったと言われるマクロプロセッサだろう(71 年の Intel 4004)。当時すでに集積回路もプログラミングも存在した。汎用集積回路とプログラミングを組み合わせることが歴史を変えた。ただここで注意してほしいことは研究開発を決して否定しているわけではない。4004 に使われた集積回路やプログラミング技術は量子・物性物理学や数理工学等の多くの科学者、技術者の執念ともいべき長年の研究があつてこそ実現したものである。

液晶もホログラフィもすでに実用化された技術であるが、それらを組み合わせるさいに未だ課題となることは多い。たとえば液晶では位相変調能力や応答性、有機物としての耐光性、温度特性等枚挙に暇がない。ホログラフィにおいても基本的に膨大な情報を必要とし、それゆえ多大なリソースを必要としている。しかしこれらの課題が解決されれば、古典的な光学技術のみならず情報光学においても革新が期待される。

身近な具体例を考えれば、レーザー加工や 3D 造形(実及び虚)、空間モード多重であり、そして時空間変換や究極のホログラフィ TV へとつながるだろう。また古典的であるが、導光に関わるエッジリットホログラム光学素子と高密度表示デバイスによるいわゆる AR/VR は、社会実装間じかの 5G のネットワークと共に時空間を共有する必須アイテムに

なるだろう。

またここでは詳細は省くが、長年我々は強誘電性液晶の開発と実用化を続け、近年ではバイナリ駆動であるが画素数が 2K×2K で 5000fps 駆動できる F-LCOS も発表し²⁷⁾、可能性を秘めたデバイスといえるだろう。また強誘電性液晶技術はレンズレス 3D カメラの位相シフト型フレネルゾーン素子としても注目されている²⁸⁾。

幸いに HODIC 及びその関係者をはじめ多くの方々が切磋琢磨し、またお互いにポジティブなコミュニティを築いている。液晶（あるいはその類似）+ホログラフィは THz 光を含め原理的に光をいかようにも制御できる可能性がある。その魔法の板（光のマイクロプロセッサ？）の実現を楽しみにこの世界の片隅にもう少し身を置かせていただこう。

参考文献

- 1) G.H. Heilmeyer, L.A. Zanoni and L.A. Barton: Prpc. IEEE. **56**(1968)1162
- 2) M. Schdat and W. Helfrich: Appl. Phys. Lett. **18**(1971)127
- 3) Dargent, B et.al., “Twisted Nematic Flat Panel Display”: SID Digest.(1977)60-61
- 4) M. H. Schuck, D. J. McKnight and K. M. Johnson: “A planarized LCOS display for projection applications”: OSA Tech. Digest. Spatial Light Modulators. (1977)72-73
- 5) 堀, 浅井, 深井 : 学振第 142 委員会液晶部会研究報告書, 190(1979)
- 6) S. Sato, A. Sugiyama and R. Sato: Jpn. J. Appl. Phys. **24** (1985) L626-628
- 7) F. Mok, J. Diep, H. K. Liu, and D. Psaltis: “Real-Time Computer-Generated Hologram by Means of Liquid-Crystal Television Spatial Light Modulator,” Opt. Lett. **11** (1986) 748–750
- 8) N. Hashimoto, S. Morokawa and K. Kitamura : "Real-time holography using high-resolution LCTV-SLM", Proc. SPIE 1461 in Practical Holography V (1991) 291-302
- 9) R. J. Doyle and W. E. Glenn: “Remote Real-Time Reconstruction of Holograms Using the Lumatron”, Appl. Opt. **11**(5)(1972)1261-1264
- 10) J. Amako and T. Sonehara: “Kinoform using an electrically controlled birefringent liquid-crystal spatial light modulator”, Appl. Opt. **30**(32)(1991) 4622-4628
- 11) 佐藤、樋口、勝間 : “液晶表示デバイスを用いたホログラフィテレビジョンの基礎実験”, テレビ誌 (映像情報メディア学会誌) **45**(1991)873-875
- 12) N. Hashimoto, K Ogawa, S. Morokawa and K. Kodate: IEEE Denshi Tokyo (1993)
- 13) K. Ikeda, H. Suzuki, and E. Watanabe: “Optical correlation-based cross-domain image retrieval system”: Opt Lett. **42**,(13) (2017) 2603-2606
- 14) N. Hashimoto (Ed. L. Vicari): “Optical Applications of Liquid Crystals” in

Chap2. CRC Press (2003)ISBN: 0-7503-0857-5

15) 橋本信幸：特開昭 63-249125 号.

16) S. Ohtaki, N. Murao, M. Ogasawara and M. Iwasaki : "The Applications of a Liquid Crystal Panel for the 15 Gbyte Optical Disk Systems", Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) 1744-1749

17)https://jp.ricoh.com/-/Media/Ricoh/Sites/jp_ricoh/technology/techreport/36/pdf/A3603.pdf

18) N. Hashimoto: OSA TOPS14, Spatial Light Modulators. (1997)227

19) 小澤祐市, 佐藤俊一：“ベクトルビーム 覚醒する光波の潜在能力”, 応物, **82** (2013) 27-32.

20) 吉木啓介, 阿井川智正, 橋本守, 栗原誠, 橋本信幸, 荒木勉：“小型偏光モード変換器を用いた細胞器官の高分解観察”, 生体医工, 46(6)(2008) 698-702

21) S. Ipponjima, T. Hibi, Y. Kozawa, H. Horanai, H. Yokoyama, S. Sato and T. Nemoto: "Improvement of lateral resolution and extension of depth of field in two-photon microscopy by a higher-order radially polarized beam", Microscopy (Oxford, England) **63**(1)(2014/02) 23 – 32

22) A. Tanabe, T Hibi, S. Ipponjima, K. Matsumoto, M. Yokoyama, M. Kurihara, N. Hashimoto and T. Nemoto: "Correcting spherical aberrations in a biospecimen using a transmissive liquid crystal device in two-photon excitation laser scanning microscopy", J. of Biomedical Optics, **20**(10)(2015) 101204

23) G. Brooker, N.Siegel, J. Rosen, N. Hashimoto, M. Kurihara and A. Tanabe: "In-line FINCH super resolution digital holographic fluorescence microscopy using a high efficiency transmission liquid crystal GRIN lens", Opt. Lett. **38**(24)(2013) 5264-5267

24) 橋本信幸, 栗原 誠：“液晶分布屈折率型量子化レンズの特性と可変焦点光学素子への応用”, 第 31 回光学シンポジウム講演予稿集, (2006) 53-54

25) 小川絃一：“オープン&クローズ戦略” 翔泳社(2015) ISBN : 9784798144252

26) 西村吉雄：“電子立国は、なぜ凋落したか” 日経 BP 社(2014) ISBN : 9784822276980

27) 橋本信幸：“液晶高速空間光変調器”, レーザー研究, **44**(7)(2016) 439-443

28) M. Sao, Y. Nakamura, K. Tajima and T. Shimano: "Close-up Technology for Lensless Light-field Imaging", Tech. Digest. ISOM2017