

プロジェクター光学技術の進展と現状課題

枡 本 吉 弘

Technological Development of Projector Optics and Summary of Present

Yoshihiro MASUMOTO

In these 20 years, a great variety of development and utilization had been accomplished in the projector optics which use the light valves. A large number of innovative achievements can be mentioned, especially in the fields of light source, illuminating optics, polarization, optical thin films, light valves, projection lens, screen and so on. LCOS (liquid crystal on silicon), HTPS (high temperature poly-silicon), and DMD (digital micro-mirror device) are major light valves in current application. Theoretical and practical consideration had been applied to enhance the optical throughput between light source to screen to maximize the brightness. A summary of these optical technology will be described and study the present subjects for additional growth of this industries.

Key words: projector, light valve, LCD, DMD, lens

プロジェクター光学装置は、映画とともに発明された。1895年、Louis Lumiereは、“Cinematographe”を用いて世界初の商用上映を行い、Thomas Edisonは1896年に、“Vitascope”を開発した。これらは、フィルムの光学像をスクリーン上にアニメーション投影し、複数の観客に動画像を呈示する方式を提供した¹⁾。

その後、テレビ技術に代表されるエレクトロニクスの発達とともに、空間的に光を変調して光学像を形成する素子（以下、ライトバルブ）を電子化する取り組みがなされた。例えば、シュリーレン光学系と油膜式ライトバルブを組み合わせた、eidophor（反射型）²⁾、talaria（透過型）³⁾がある。これらは、電子ビームを使って油膜表面に回折格子を形成し、遮光バーを通過する光と通過しない光に変調する方式である。映写機の置き換えをねらった超高輝度用途などで実用化されたが、構成の複雑さから現在は使われていない。

赤、緑、青の高輝度CRT（cathode-ray tube）を用いる三管式プロジェクターは、業務用と民生用の両市場において一定の普及が進んだ。現在は、後述するプロジェクタ

ーへの置き換えが急速に進んでいる。

この20年間、液晶層の電気光学効果を用いるライトバルブや、MEMS（micro electro mechanical systems）とよぶ電気機械効果を応用したライトバルブは、開発、実用化され、多くの改良がなされた。これらはマイクロデバイス（以下、MD）とよばれ、MD方式のプロジェクターは急速な普及と発展を遂げた。当初、PCを用いた電子プレゼンテーション用途が見いだされ、高精細化と高輝度化の実現により、電子シネマの実現に至っている。民生用途は、40～70インチの大画面テレビを普及価格で実現している。

本報告は、MDの発展とともになされたプロジェクター光学技術の進展を俯瞰する。技術改良の経緯について特筆すべき内容を紹介し、現状課題の考察を行う。

1. 市場動向

MD方式のプロジェクターについて、図1は出荷台数の推移、図2は事業規模の推移、をそれぞれ示す⁴⁾。いずれもCRT方式は含んでいない。

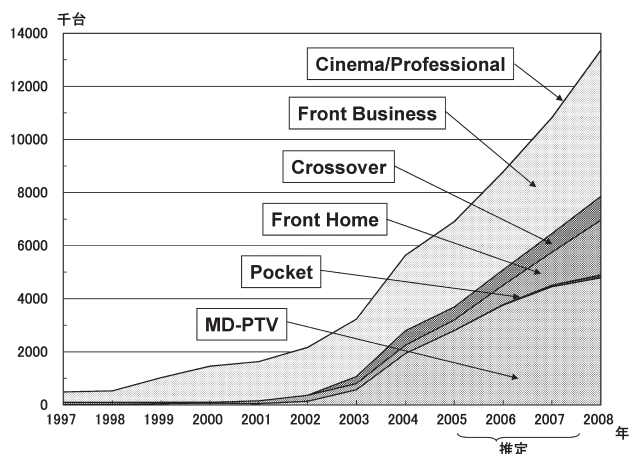


図1 プロジェクター出荷台数の推移。(株)テクノシステムリサーチ社提供。

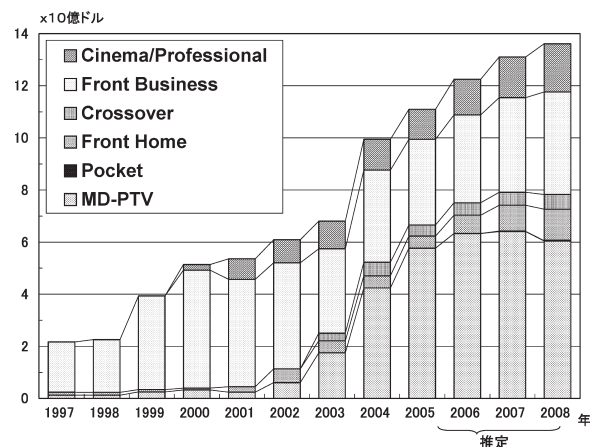


図2 プロジェクター事業規模の推移。(株)テクノシステムリサーチ社提供。

cinema/professional：電子シネマや、レンタル用途の超高輝度プロジェクターである。数千台の台数推移に対し、売り上げ規模は大きく、安定した事業環境を提供している。

front business：アスペクト比4：3の業務用途であり、プレゼンテーション等に使われる。1995年以降、本格普及が進み、2005年に約320万台の市場まで成長している。

crossover：アスペクト比4：3のプロジェクターであるが、メーカーにより多用途と明記され、業務用/民生用の境界が不明確な製品を示す。

front home：アスペクト比16：9のホームシアター用途である。2001年以降、業務用と共通部材を活用して普及価格を実現し、現在、約40万台の本格的な市場を形成している。

pocket：新しいカテゴリーであり、LED等に代表される新光源を用い、容積1リットル以下、重量1kg以下、バッテリー駆動、等の超小型機が開発されている⁵⁾。

MD-PTV：民生用のプロジェクションTVを示し、従来のCRT方式(図1に含まず)を急速に置き換え、約300万台の市場を形成している。

MD方式のプロジェクターは、台数を拡大させる一方で単価は急速に下落している。今後も成長を維持するには、合理化設計、コストダウン、付加価値の向上、新規応用と市場の開拓、を継続し、数量拡大と収益確保の両立が要求される。

2. おもなライトバルブの方式

2.1 反射型液晶パネル

鏡面画素を形成したシリコン上面に液晶層を設けるライトバルブは、liquid crystal on silicon (“LCOS”) とよば

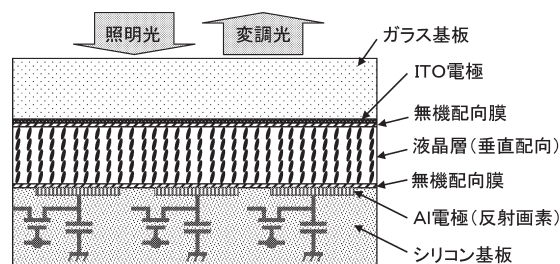


図3 反射型液晶パネルの断面構成図。

れる⁶⁻⁸⁾。1970年代の電子銃やレーザーによる走査型描き込み方式に始まり、現在は二次元画素をアクティブマトリックス駆動する方式に発展している。構成の一例を図3に示す。液晶層には、高いコントラストと表示均一性を得られる利点から、垂直配向が広く用いられる。画素開口率を高くできるので、小型化と高精細化に向いており、滑らかな表示画像を得られる利点がある。一方、光学系の構成が複雑となることや、液晶層が $2\mu\text{m}$ 以下と非常に薄く、量産性と信頼性の確立が課題であった。現在は、その多くが解決され、実用普及期となっている。

2.2 透過型液晶パネル

当初、対角3～5インチのアモルファスシリコンを使った TFT 液晶パネルがプロジェクター用途に開発、実用化された^{9,10)}。ただし、アモルファスシリコンは電荷移動度が遅く、画素とパネルの小型化、高精細化に不向きであった。これに対し、“HTPS” とよばれる高温ポリシリコン (high temperature poly-silicon) を用いた液晶パネルは、1984年の開発以降、目覚ましい改善を遂げ、現在では広く使われている^{11,12)}。構成例を図4に示す。

電荷移動度の高いポリシリコンを使えば、ドライバーICをガラス基板上に形成できる。一方、多結晶化には

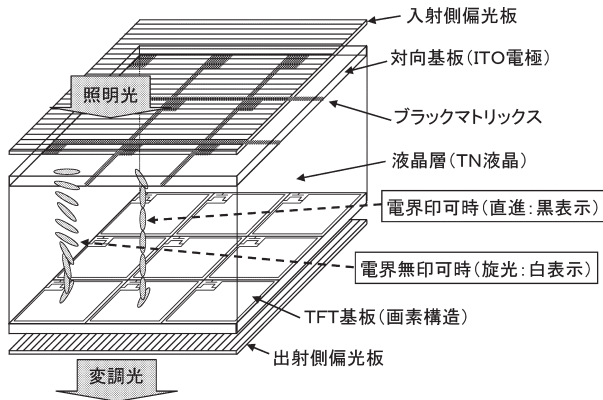


図4 透過型液晶パネルの構成図。

1000℃近いアニールを必要とし、高価な石英基材が使われる。したがって、大型基板には不向きであり、小型で緻密な画素を必要とするライトバルブに特化し、高精細化、高開口率化、表示均一性の向上、等の取り組みがなされた^{13,14)}。

2.3 DMD (digital micro-mirror device)

MEMS 応用のライトバルブは、Texas Instruments 社の開発した DMD (digital micro-mirror device) に代表される^{15,16)}。この方式は DLP™ (digital light processing) とよばれ、三板式¹⁷⁾ (3 chip DLP™)、単板式¹⁸⁾ (1 chip DLP™)、がある。

2 画素に相当する構造を図5に示す。微小なアルミ製ミラーを二次元状に配列し、各ミラーは規定方向に±12度ずつ傾斜する。ミラーの駆動は、CMOS 基板内のメモリアレイに、“1”、“0”の二値データを転送し、必要な電極側に電位を与えて行う。階調表示は、オン期間を制御する PWM (pulse width modulation) を用いる。

3. 光学システムの整合設計

プロジェクターを開発する場合、幾何学的な光の広がりを表す etendue (エタンデュ) に立脚した整合設計が重要となる¹⁹⁾。光は、放射時点で広がり方を定義する。光損失のない場合、通過面積を小さく収斂させれば、照射角は大きくなる。逆に、照射角を小さく平行な光を形成すれば、通過面積は大きくなる。ラグランジュ・ヘルムホルツの不変量式(1)は、この別表記である。 $y_1, y_2, \dots, y_n$ は光学系で伝播される光の像高 (横倍率) であり、 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ は照射角 (角倍率) である。

$$y_1 \cdot \theta_1 = y_2 \cdot \theta_2 = \dots = y_n \cdot \theta_n \quad (1)$$

表面積 $S_L [\text{m}^2]$ の発光面から、立体角 $\Omega_L [\text{sr}]$ の領域に光が放射された場合、すべての光を含む etendue は、式

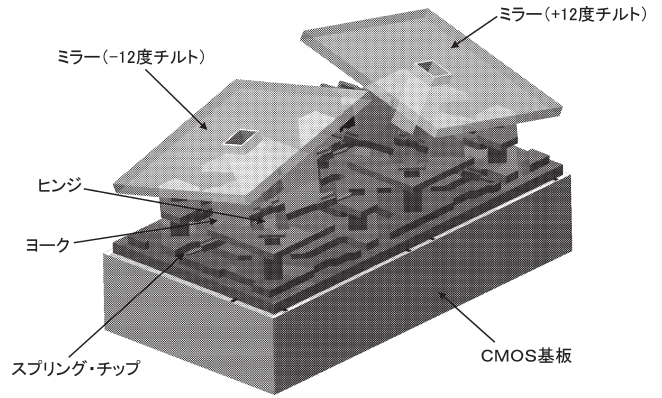


図5 DMD の構造 (2 画素相当)。

(2) で定義される。

$$E_L = S_L \times \Omega_L \quad (2)$$

一方、ライトバルブの面積を $S_P [\text{m}^2]$ 、投写レンズの集光角を $\theta_P [\text{deg}]$ 、とした場合、投写レンズの集光範囲は、式(3)の立体角 $\Omega_P [\text{sr}]$ となる。

$$\Omega_P = \pi \times \sin^2 \theta_P \quad (3)$$

このライトバルブと投写レンズを有効に通過する光の etendue は、式(4)となる。

$$E_P = S_P \times \Omega_P = S_P \times \pi \times \sin^2 \theta_P \quad (4)$$

この場合、光学システムの整合条件は式(5)となる。

$$E_P \times \kappa \geq E_L \times \eta \quad (5)$$

η はシステム全系の集光効率であり、鏡面の反射率や光学界面のフレネル損失を含まず、光源から放射される光のうち、積分的に捉えて有効利用される光の割合を表す。いいかえれば、光源から放射される光の etendue に対し、有効に利用される光の etendue を表す係数である。 κ は投写レンズの瞳利用率である。入射瞳の全面積に対し、通過する光の実効的な広がり面積総和が占める割合である。インテグレーターを用いる照明方式では、瞳上には発光体の実像に相当する複数の部分光束の断面が離散的に形成される。瞳上に利用しない“隙間”を発生するので $\kappa = 1.0$ とならず、これより低い値となる。

式(5)は、プロジェクター光学系の開発経緯において、重要なトレードオフを提供し続けており、以下に列記するジレンマとともに紹介する。

- ① ライトバルブは小型化したい。これにより、プロジェクターの小型化、光学部材の小型化、低コスト化を実現できる。

- ② ライトバルブの小型化は etendue を小さくする。明るさ（集光効率）を確保するためには、発光体を小型化し、光源側の etendue を小さくしなくてはならない。
- ③ 光源の輝度向上と点光源化が必要となるが、容易ではない。一般的な放電ランプの短アーク化には、発光特性、寿命、信頼性、の課題解決を伴う。
- ④ 投写レンズの F 値を小さくすれば etendue を大きくできる。一方で、 F 値の下限はライトバルブにより制約されるとともに、投写レンズは難易度が高くなり、課題が多い。

etendue を考えた実際の開発は、上記①～④の制約下で、個別部品の自由度を広げる開発と、可能な部品を最適なバランスで組み合わせる整合設計となる。

4. 照明光学系の発展

以下、プロジェクターの照明光学系について、特記すべき技術事例を紹介する。

4.1 発光体の点光源化，集光方式の改良

小型高輝度のメタルハライドランプは、1989 年に実用化された。当時、一般照明用途では 20 mm 以上あったアーク長を 5～7 mm まで短アーク化し、広い立体角で集光する放物面鏡に組み込み、固着される小型の発光管が開発された。これは、対角 3 インチ程度の透過型液晶パネルを用いた初期のプロジェクター用途に広く活用された²⁰⁾。

1995 年、アーク長 1.4 mm の超高圧水銀ランプが開発され²¹⁾、ライトバルブとシステムの小型化に貢献するとともに、現在では光源の主流となっている。これは、水銀ランプの動作内圧を 150 気圧程度まで高めて映像用途に適した演色性を実現し、発光管と反応製の高い希土類金属を含まないため、長寿命化にも貢献している²²⁾。一方で、動作内圧が高く、発光管の破裂する故障モードを定格寿命中や寿命末期に発生させる課題がある。

さらに、集光する立体角を従来の 2 分の 1 程度とし、より小さい etendue に整合させる光源モジュールも開発されている。残りの空間へ放射される光は、発光管に形成された反射面や補助的な球面ミラーにより、発光体に戻して再利用する工夫が提案されている²³⁾。

4.2 等光路長とするシステムレイアウト

三原色に応じて 3 枚のライトバルブを用いる構成は、一般的である。この際、光源からライトバルブに至る 3 つの光路を等光路長とすることは、表示均一性の観点から必須の要件となる。当初、平板ダイクロイックミラーを用いたミラー順次方式が提案された^{10,24)}。この方式は、投写光路におけるミラー面の精度、傾斜したガラスの厚みによる非

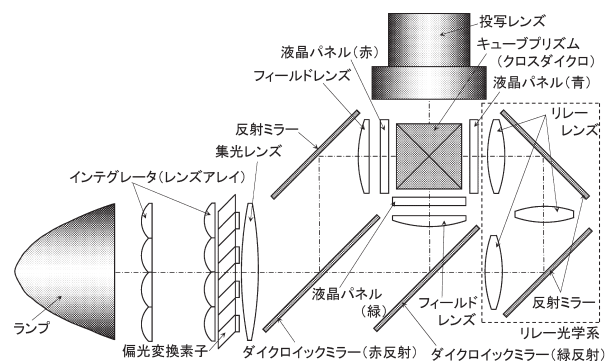


図6 液晶プロジェクターの構成例。

点隔差、等が問題となり、ライトバルブの小型化とともに使われなくなった。

図6は、現在主流のキューブプリズム方式について代表的な構成を示す²⁵⁾。3枚の液晶パネルを通過した光は、ダイクロイックミラーをX字状に配置したキューブプリズムにより合成される。この場合、光源から最も離れたライトバルブに至る光路長は、他の2つの光路長に比較して長くなる。この問題は、3つのレンズを組み合わせたリレーレンズの採用により解決され、実質的に等光路長として扱えるようにしている²⁶⁾。

4.3 明るさ均一性の改善技術

明るさの均一な投写画像は、インテグレーターの導入により実現された。図6に示す液晶プロジェクターの構成では、2枚のレンズアレイを使う。1枚目のレンズアレイは、明るさむらの小さい複数の部分光束を形成し、2枚目のレンズアレイは各部分光束を拡大し、集光レンズにより液晶パネル上に重畳する²⁷⁾。光束を断面方向に微小分割して積分するので、均一性の高い照明光を実現できる。ほかに、四角柱のライトガイドに光を導き、多重反射により出射端面の明るさを均一にし、リレーレンズで受光面に導く方式もある。

また、レンズアレイの各レンズを、適宜、偏心させるとともに、出射側の開口を異形化し、明るさを向上させる工夫も実用化されている。これは、決められた etendue の制約下で瞳利用率 κ を大きくし、光利用効率を改善できる²⁸⁾。

4.4 その他の改善技術

4.4.1 偏光変換技術

液晶ライトバルブは、直線偏光を利用する。したがって、光源の放射する自然偏光の 50% しか利用できない。このため、不要偏光成分の偏波面を回転させ、再利用する光学系が各種開発されている。図6に示す液晶プロジェクターでは、レンズアレイで分割した部分光束ごとに、偏光

分離プリズムを一次元状に配列し、必要な偏光成分は通過させ、他方の偏光成分は位相差板で偏波面を90度回転させている²⁹⁾。

4.4.2 色順次照明技術

図7は、単板DMDを用いたプロジェクションTV用光学システムの構成例を示す。DMDは、高速のフィールドレートで色順次表示を行い、RGBの透過型フィルターセグメントをモーターで高速回転させ、同期した色順次の照明光を形成している。この方式は、色順次照明によるスペクトル帯域の制限により、光利用効率は約3分の1になる反面、構成が簡便で実用性が高く、広く採用されている^{30,31)}。

単板色順次方式の効率は、カラスロールによる改善が提案されている。具体的に、RGBのカラーバンドをライトバルブ上に面積を分割して形成する。これにより、光源の放射するスペクトルを同時に利用し、カラーバンドをライトバルブ上でスクロールさせて、ライトバルブの表示もこれに同期させる^{32,33)}。なお、この方式は、実効的にライトバルブの面積を3分の1に取り扱うので、etendueの制約がより厳しくなる欠点がある。

5. 投写光学系の発展

プロジェクターの発展は、関連する光学産業に大きな影響を与えた。φ30～100 mmの大判ガラスレンズ、異常分散ガラス材料、大口径非球面プラスチックレンズ、機能性光学多層膜、等の需要が急増し、技術革新、生産能力向上、コスト低下が進んだ^{34,35)}。

5.1 投写レンズの要求仕様

プロジェクター用投写レンズに要求される仕様を以下に列記する。

- ① 長いバックフォーカス：投写レンズとライトバルブの間に、ミラーやプリズムを配置する空間を必要とし、レトロフォーカス型のレンズ構成となる。広角の仕様では、大きなバックフォーカス比（バックフォーカス÷焦点距離）と収差補正の両立が課題となる。
- ② テレセントリック性：均一な変調をライトバルブの全領域で確保するために、入射角をそろえる必要がある。したがって、バックフォーカス空間で高いテレセントリック性が要求される。これは、入射瞳を無限遠に配置する構成であり、後群レンズの大口径化を招く。
- ③ 倍率色収差と歪曲の抑制：ライトバルブは固定画素であり、レンズ系で発生する倍率色収差や歪曲を表示側で柔軟に補正できない。したがって、表示画面での

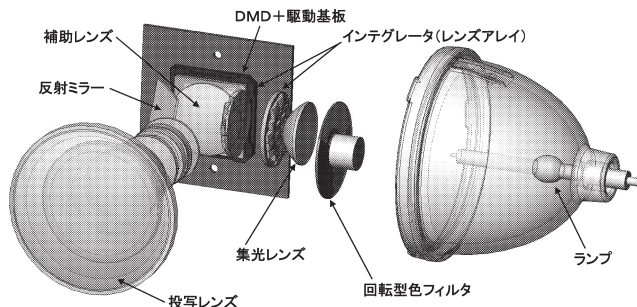


図7 1 chip DLP™ プロジェクターの構成例。

色ずれや歪みは、レンズ設計で抑制しなくてはならない。超高圧水銀ランプの場合、440 nmの青紫色スペクトルは視感輝度は低いものの色ずれは視認されやすく、同時に、赤色側は630 nm程度まで考慮する必要がある。広い波長帯における倍率色収差を全域で抑制する必要から、強いパワーをもつ後群レンズを中心に、異常分散ガラスを使う場合が多い。

④ 軸外まで均一で高い解像度：おもにPC画面を映す業務用途は、画面全域に1画素単位の情報を表示する。民生用途でも、高品位デジタル化、高精細なOSD表示、等の影響で、周辺まで高い解像度性能を要求する。7～14 μm程度まで微細化された二次元画素を四隅までフレアを発生させず、均一に解像する性能が要求される。

⑤ ケラレのない周辺光量：インテグレーターは、全面域を一定照射角で照明する光を形成する。このため、周辺光量比の低いレンズでは、確保されるべき画面周辺の明るさを低下させる。したがって、70～100%に近い周辺光量を確保するレンズ仕様が要求される。

5.2 開発例：1 chip DLP™ リアプロジェクションTV用途

図7の光学システムに採用された投写レンズの構成を、図8に示す³⁴⁾。投写レンズは、約46度の半画角、DMD上で完全に近いテレセントリック性、周辺画角まで均一なMTFと周辺光量、RGBの評価波長で1画素以下の倍率色収差補正、を実現している。

さらに、DMDの前面で、照明光と投写光の光路を分離して共存させる工夫として、テレセントリック補正の補助レンズを、DMD直後に配置している。これにより、主レンズ群と補助レンズの間に、必要な折り曲げミラー空間を確保しながら、実用的な設計解のレンズ構成としている。超広角の仕様と、周辺まで均一な解像度と明るさは、スクリーン側に配置した大口径の非球面プラスチックレンズの導入が寄与している。

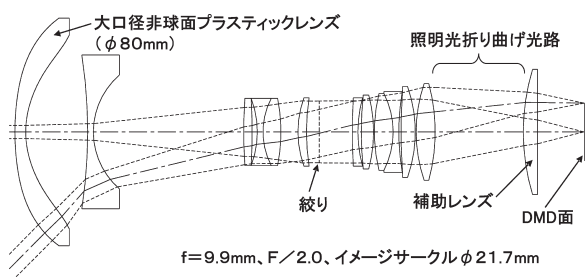


図8 投写レンズの構成例 (1 chip DLP™, リア PTV 用途)。

6. 今後の課題と展望

6.1 光 源

新光源は、プロジェクター産業の大きな期待である。より高輝度で点光源となれば、etendue の制約を緩和し新たな発展を加速する。さらに、色再現性、起動性、信頼性、寿命、等の改善も要望される。これに対し、LED³⁶⁻³⁸⁾、レーザーダイオード³⁹⁾、の開発事例が報告されている。LED は、発光面積の小型化と輝度（総光束）の向上が課題であり、実用化と普及の重要な要素となる。レーザーダイオードは点光源に近く平行度が高いので、より小さい etendue への整合性は高い。一方、大出力の素子は発展途上であり、特に緑波長の直接発光は研究開発の途上である。同時に、高いコヒーレンスによるスペックルノイズを抑制し、眼にやさしい滑らかで自然な投写画像を実現する技術開発が必要となる。

6.2 照明光学系

現状において、個別ライトバルブの特質と光学レイアウトに合わせて、各種の照明光学系は最適化され、工夫改良の余地は乏しい。光利用効率も、実用上、ほぼ改善余地のないレベルに高められている。この事情は、各種プロジェクターの性能改善を制約している。新しい光源やライトバルブと、これらに関する新技術を活用し、従来にない、小型、高輝度、高効率のプロジェクター光学系を追究する取り組みが必要である。本稿で述べた etendue の制約は不変である。明るさを向上させるには、瞳利用効率 κ を向上させる取り組みや、ライトバルブ側でより大きな etendue を実現する必要がある。

6.3 投写光学系

フロント投写方式のプロジェクターでは、ライトバルブの小型化、画素数の向上に合わせ、より高い MTF 特性や、高倍率のズーム比、広角から望遠までの広いバリエーション、等の追究が継続される。一方で、合理化、コストダウンへの対応も必要となる。

リア投写方式では、2つの方向に特化すると推定できる。1つは、民生市場の厳しい価格要求に合わせ、ライト

バルブの小型高精細化への追従と、合理化低コスト設計、より安価なものの作り、等への対応である。2つ目は、薄型化を実現する超々広角の斜め投写に代表されるような、特異性の高い新たな価値を生む商品を実現する取り組みである⁴⁰⁾。

6.4 ライトバルブ

ライトバルブの重要課題は、低コスト化と光利用効率の向上である。低コスト化は、半導体プロセスに依存するので、微細加工を進展させて小型高精細化を志向させる。一方、etendue の整合を考えれば、明るさの視点から適切な画面サイズには下限がある。過度の小型化を避け、用途ごとに適切な表示領域を維持し、低コスト化と性能改善が必要となる。

効率面では、画素開口率の向上、フレネル損失の低減、といったライトバルブ単独で決まる効率の改善とともに、プロジェクターの光学要素と相関する相補的な改良が重要である。特に、より広い入射角の光を高い消光比（コントラスト）で変調する能力は、利用可能な光の etendue を増やすので重要となる。

大画面の映像は、映画、業務用プレゼンテーション、民生テレビ、等の応用において、対象者にさまざまな情報と感動を与えている。プロジェクターは、この目的に最適な映像装置のひとつであり、本稿で述べた各種技術開発の集大成により、今日の産業を築いている。今後も、各種光学デバイスの技術革新とともに、光学設計、システム設計、ものの作り、の技術開発が相乗効果を生みだし、より大きな発展を遂げることを期待している。

文 献

- 1) 例えば、口石弘敬：シネマ 100 年技術物語（日本映画機械工業会、1995）。
- 2) E. Baumann: "The Fischer large-screen projection system," J. SMPTE, **60** (1953) 344-356.
- 3) 日野谷勝弘、藤目俊郎：“ビデオプロジェクター”，テレビジョン, **26**, No. 1 (1972) 2-13.
- 4) M. Takaso: "Changing projection TV and large display market," IDW/AD '05 (2005) pp. 1875-1877.
- 5) 例えば、M. Maeda, Y. Kurosaka, T. Miwa, T. Ikeda, H. Kanayama and H. Murata: "LED-based cable-less projector with high efficiency collimation optics," IDW/AD '05 (2005) pp. 1915-1918.
- 6) J. L. Sanford, E. S. Schlig, T. Tomooka, K. Enami and F. R. Libsch: "Silicon light-valve array chip for high-resolution reflective liquid crystal projection displays," IBM J. Res. Develop., **42** (1998) 347-358.
- 7) A. Nakano, A. Honnma, S. Nakagaki and K. Doi: "Reflective active matrix LCD: D-ILA™," Proc. SPIE, **3296** (1998) 100-104.
- 8) S. Hashimoto, O. Akimoto, H. Ishikawa, T. Kiyomiya, T. Togawa, T. Isozaki, H. Abe, M. Nakai, H. Terakawa, H.

- Horikiri, T. Ishii and M. Kogure: "SXRD (Silicon X-tal Reflective Display); A new display device for projection displays," *SID '05 Digest* (2005) pp. 1362-1365.
- 9) I. Kobayashi, M. Uno, S. Ishihara, K. Yokoyama, K. Adachi, H. Fujimoto, T. Tanaka, Y. Miyatake and S. Hotta: "Rear-projection TV using high resolution a-Si TFT LCD," *SID '89 Digest* (1989) pp. 114-117.
- 10) M. Adachi, T. Matsumoto, N. Nagashima, T. Hishida, H. Morimoto, S. Yasuda, M. Ishii and K. Awane: "A high-resolution TFT-LCD for a high-definition projection TV," *SID '90 Digest* (1990) pp. 338-341.
- 11) S. Morozumi, K. Oguchi, T. Misawa, R. Araki and H. Ohshima: "4.25-in. and 1.51-in. B/W and full-color LC video displays addressed by poly-Si TFTs," *SID '84 Digest* (1984) pp. 316-319.
- 12) S. Aruga, R. Araki, H. Kamakura, J. Shinozaki and S. Morozumi: "High-resolution full-color video projector with poly-Si TFT array light valve," *SID '87 Digest* (1987) pp. 75-78.
- 13) N. Okamoto: "Developments in p-Si TFT LCD projectors," *SID '01 Digest* (2001) pp. 1176-1179.
- 14) H. Hosaka, H. Iisaka, T. Takeuchi, H. Kawata and K. Ishii: "New driving method for next-generation HTPS TFT LIGHT valves," *IDW/AD '05* (2005) pp. 1935-1938.
- 15) L. J. Hornbeck: "Current status of the digital micromirror device (DMD) for projection television application," *International Electron Devices Technical Digest* (1993) pp. 381-384.
- 16) L. J. Hornbeck: "Digital light processing and MEMS: Timely convergence for a bright future," *Proc. SPIE*, **2639** (1995) 2-21.
- 17) G. Sextro, T. Ballew and J. Iwai: "High-definition projection system using DMD display technology," *SID '95 Digest* (1995) pp. 70-73.
- 18) M. Wada, Y. Fushimi, H. Ohmae, H. Yamaguchi, S. Kimura and Y. Masumoto: "High performance projection TV optics using DMD," *Proc. of ODF2000* (2000) pp. 301-304.
- 19) C. Nicolas, B. Loiseaux and J.-P. Huignard: "Analysis of the optical component in liquid crystal projectors by their geometrical extend," *Eurodisplay '93* (1993) pp. 537-539.
- 20) 漆原 嗣, 増井元宣, 金井義介, 柵木教一: "液晶プロジェクター用光源", 第231回蛍光体同学会講演予稿, 論文番号13 (1990) pp. 21-26.
- 21) E. Schnedler and H. v. Wijngaarde: "Ultrahigh-intensity short-arc long-life lamp system," *SID '95 Digest* (1995) pp. 131-134.
- 22) H. Moench, H. Giese, U. Hechtfisher, U. Niemann and J. Laet: "Long life UHP lamps for consumer applications," *SID '05 Digest* (2005) pp. 1600-1603.
- 23) H. Moench and A. Ritz: "Higher output, more compact UHP lamp systems," *SID '02 Digest* (2002) pp. 1160-1163.
- 24) K. Takeuchi, Y. Funazo, M. Matsudaira, S. Kishimoto and K. Kanatani: "A 750-TV-line-resolution projector using 1.5-megapixel a-Si TFT LC modules," *SID '91 Digest* (1991) pp. 415-418.
- 25) 小川恭範: "液晶プロジェクターの光学系", *光学*, **31** (2002) 660-667.
- 26) 橋本吉弘, 宮武義人: 特許第2608946号.
- 27) A. H. J. Brandt, H. J. Blankers, S. Jinsi, P. J. M. Os, M. V. C. Stroomer, W. A. G. Timmers, W. G. C. Verbeek and H. A. Werdt: "New plusfactors in an LCD-projector," *IDRC '91* (1991) pp. 151-154.
- 28) 橋本吉弘, 宮武義人: "異形開口レンズアレイを用いた液晶プロジェクター用高効率照明光学系", *光学連合シンポジウム浜松 '94* (1994) pp. 135-136.
- 29) Y. Itoh, J. Nakamura, K. Yoneno, H. Kamakura and N. Okamoto: "Ultra-high-efficiency LC projector using a polarized light illuminating system," *SID '97 Digest* (1997) pp. 993-996.
- 30) A. Kunzman and G. Pettitt: "White enhancement for color-sequential DLP™," *SID '98 Digest* (1998) pp. 121-124.
- 31) Y. Masumoto, M. Wada and Y. Fushimi: "Simplified projection TV optics using DMD," *IDW '03* (2003) pp. 1573-1576.
- 32) D. S. Dewald, S. M. Penn and M. Davis: "Sequential color recapture and dynamic filtering: A method of scrolling color," *SID '01 Digest* (2001) pp. 1076-1079.
- 33) J. A. Shimizu: "Scrolling color LCOS for HDTV rear projection," *SID '01 Digest* (2001) pp. 1072-1075.
- 34) 菅原三郎: "投射レンズ", *O plus E*, **22** (2000) 324-331.
- 35) 朝倉義信: "プロジェクター用投射レンズの技術動向と最近の光学設計", *光技術コンタクト*, **43** (2005) 497-499.
- 36) 八木隆明: "プロジェクター用LED光源", *O plus E*, **26** (2004) 282-285.
- 37) G. Kuhn, S. Groetsch, N. Breidenassel, W. Schnabel and S. Wallner: "A new light source for projection applications," *SID '05 Digest* (2005) pp. 1702-1705.
- 38) A. Conner, R. Auerbach, E. English, S. Magarill and T. Rutherford: "Performance of LED as the illumination source for microdisplay rear projection TV," *IDW/AD '05* (2005) pp. 1907-1910.
- 39) A. V. Shcegro, J. P. Watson, D. Lee, A. Umbrasas, S. Hallstein, G. P. Carey, W. R. Hitchens, K. Scholz, B. D. Cantos, G. Niven, M. Jansen, J.-M. Pelaprat and A. Mooradian: "Development of compact blue-green lasers for projection display based on novalux extended-cavity surface emitting laser technology," *Proc. SPIE*, **5737** (2005) 113-119.
- 40) S. Shikama, H. Suzuki, T. Endo, M. Kuwata and T. Sasagawa: "Ultra-thin rear projector," *SID '05 Digest* (2005) pp. 1910-1913.

(2006年1月25日受理)