

高画質の大画面ディスプレイとして期待される液晶プロジェクトは、光利用効率の向上を図る近年の多くの技術開発に支えられ、利用分野の拡大と普及が進んできた。当社では、今後いつその画質向上や装置の小型化などを達成するため、光源から液晶パネルに光を導く照明光学系の方式について基礎的検討を進めてきた。ここでは、照明光学系の課題を整理し、効率向上や小型化に重要な指向性を極力維持するビーム形状変換方式を提案する。最小二乗法<sup>(注1)</sup>と光線追跡を組み合わせて自由曲面光学素子を設計し、不均一な円形光ビームの強度分布を、均一な矩(く)形状の分布に変換する。これにより、効率向上と均一性が確保され、指向性の高い照明ができる。ここでは機能評価のためのシミュレーションを行い、設計手法の妥当性を検証した。

Recent technological advances in liquid crystal projectors are expected to provide high-quality, large-area displays. We have studied illumination optics to achieve further improvements in system performance.

In this paper, the basic concepts of various illumination methods are reviewed and a new type of illumination optics is proposed. This uses a pair of special lenses whose surface profiles are determined by nonlinear least-square fitting combined with ray-tracing calculations. The circular cross section of the incident light beam is transformed into a rectangular form. The results of simulation suggest that high-efficiency, well-collimated illumination is possible.

### 1 まえがき

近年の液晶技術の発展や大画面ディスプレイに対する需要の拡大を背景に、液晶プロジェクトの開発が盛んになってきている。液晶プロジェクトは、小型・軽量で大画面高画質の表示を実現できるため、マルチメディア時代にふさわしいディスプレイとしての発展が期待されている。

技術課題としては光利用効率の向上の必要性が指摘され、種々の技術が開発されてきた<sup>(1),(2)</sup>。光利用効率の向上は、表示画面の明るさの向上だけでなく、拡散性の高いスクリーンの利用による観察可能角度(視野角)の拡大、低消費電力化、装置の小型化などに結びつくもので、プロジェクトの利用分野の拡大と普及につながる。ここでは、光源で発生した光を液晶パネルに導くまでの、照明光学系についての基礎的な技術検討結果と、新しい照明方式としてのビーム形状変換技術の開発検討結果について述べる。

### 2 液晶プロジェクトの構成と照明光学系の課題

単板式液晶プロジェクトの構成を図1に模式的に示す。スライド映写機のフィルムの位置に液晶パネルを設置した形である。高輝度のランプから出た光をリフレクタで集光して得られる光ビームで液晶パネルを照明する。投射レン

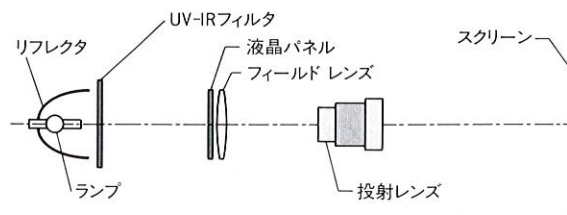


図1. 単板式液晶プロジェクトの光学系 スライド投影機と同様の原理で、色フィルタによる損失がある。

Optics of single-panel LC projector

ズを用いて液晶パネルの像をスクリーンに結像する。高強度の光ビームとなるので、リフレクタをコールドミラーにしたり、さらに紫外、赤外域の不要光を除去するため、UV-IR(紫外線-赤外線用)フィルタを光路に挿入する。

液晶パネルの各画素には三原色に対応する開口が形成され、対応する色フィルタがそれぞれの開口に形成されて、カラー表示が実現される。単板式は構成が単純だが、フィルタを用いるために光の利用効率が低下する。

3板式液晶プロジェクトの構成例を図2に示す。光源を出た光は3色に分離され、各色用の3枚の液晶パネルを通過したのち合成される。光の利用効率が分光的に高いのに加え、同じ開口率であれば画素数を多くとれるので、高解像度でできる。3板式の別の構成例として、クロスダイクロイックプリズムを用いたものを図3に示す。この構成は液

(注1) いくつかの与えられた点に曲線を合わせ手法の一つで、各点での曲線からの偏差の2乗の和を最小にする。



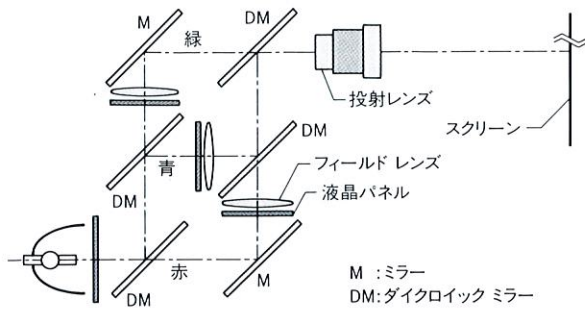


図2. 3板式液晶プロジェクタの光学系(1) ダイクロイックミラーで三原色成分を分離、合成する。

Optics of 3-panel LC projector (1)

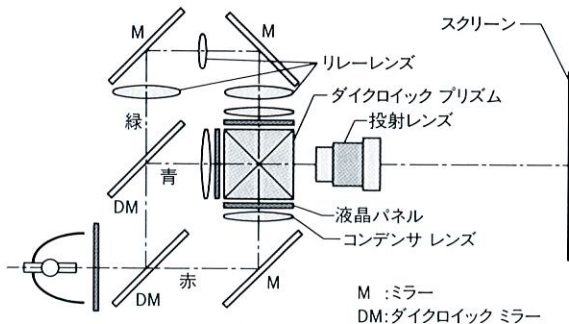


図3. 3板式液晶プロジェクタの光学系(2) クロスダイクロイックプリズムで三原色成分を合成する。

Optics of 3-panel LC projector (2)

品パネルから投射レンズまでの距離を短くしやすい。しかしながら、いずれの3板式の構成も光学系が複雑になるため、主に高級機種で採用されてきた構成である。

液晶プロジェクタにおける光量の損失は光の経路のさまざまな段階で生ずる。3板式装置でも、スクリーンに到達する光量は、通常の場合ランプから出た光の数%程度にすぎない<sup>(1)</sup>。そこで、光の通過するすべての構成要素で、効率向上のための種々の技術が開発されている。

照明光学系を考える際に、液晶パネルを照明するまでの光利用効率の向上とともに、照度の均一性と、指向性の確保を図らねばならない。しかしながら通常これらは光利用効率とトレードオフ(相対関係)の関係にある。

光源のランプから出た光は通常、放物面鏡または回転楕(だ)円面鏡などのリフレクタで集光され、光ビームとして用いられる。光利用効率を高めるには、光源から発散する光をより大きな立体角にわたって集光するようにリフレクタを設ける必要があるが、光ビームの周辺の強度が弱くなる。また、光ビームの中心部はリフレクタのランプ取付け穴、あるいはランプの電極の影響で暗い影となる。これは中抜けなどと呼ばれ、照度むらの一因となっている。

照明光の指向性は、コントラストの確保や、投射光学系まで含めた光利用効率の向上に必要である。液晶パネルは

指向性の良い(強い)光に対して良好な変調特性をもち、許容入射角を超える照明光成分があると画質が低下する。また、指向性が確保されないと、液晶パネルを通過しても投射レンズの開口に入らない光が増え、最終的な光利用効率が低下する。開口の大きい(F値の小さい)投射レンズを用いるのでは、装置サイズやコストの増大になる。なお、発光領域を小さくすることは指向性向上に有効なため、ショートアークのメタルハライドランプが盛んに開発されている。

### 3 照明効率の制約条件

光利用効率と指向性の間にはトレードオフの関係がある。すなわち、高い指向性を実現しようとする、効率に原理的な制限が課せられてしまう。この関係は輝度不変則から導かれ、単純化したモデルでは次式で与えられる<sup>(1)</sup>。

$$\eta = \tau(S_p/S_L)/(4f_e^2)$$

ここで、 $\tau$ は途中の光学系全体の透過率、 $S_L$ は光源の表面積、 $S_p$ はパネルの面積、 $f_e$ は有効F値である。 $f_e$ が大きいほど指向性が高い。F値の大きい、すなわち開口の小さい投射レンズを用いるには、相当する大きな $f_e$ の値が実現される必要がある。しかしながら(1)式からわかるように、 $f_e$ を大きくすると効率 $\eta$ は小さく規定されてしまう。この条件は、光学系での損失 $\tau$ を除けば光源と液晶パネルの面積比だけで決まり、途中の光学系の構成に依存しない本質的制約条件である。したがって、この条件に矛盾しない仕様を設定することが必要である。

### 4 照明系の各種方式

通常用いられるTN(ねじれネマチック)型液晶パネルでは、特定の直線偏光成分だけが用いられるので、パネルの前に挿入される偏光板で光量が1/2以下になってしまう。そこで両偏光成分を利用する技術が種々提案されている。原理的には、偏光ビームスプリッタを用いて両偏光成分を分離し、偏光方向を回転して偏光方向をそろえ合成して照明に用いる。1/2波長板を用いて偏光を回転する構成<sup>(3)</sup>が簡便だが、波長板に波長特性があり、色むらが出やすく色度や照度の均一化を図るための技術が必要とされる。これには、分割数を増やして合成する<sup>(4)</sup>、分離したそれぞれの光を45度ずつ逆方向に回転させて色むらを補償する<sup>(5)</sup>、反射鏡を組み合わせて偏光を回転する<sup>(6)</sup>、プリズム型偏光ビームスプリッタとレンズアレーを組み合わせる<sup>(2)</sup>などの技術が提案されている。

高い光利用効率と均一な照度を実現する光インテグレータ技術として、図4のようなロッドプリズムを用いる方式



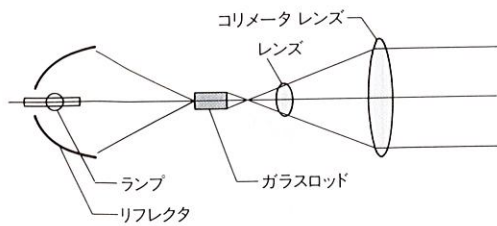


図4. ガラスロッドインテグレータによる照度の均一化 ロッド内での多重反射により照度の均一性が向上する。

Homogenization by glass rod integrator

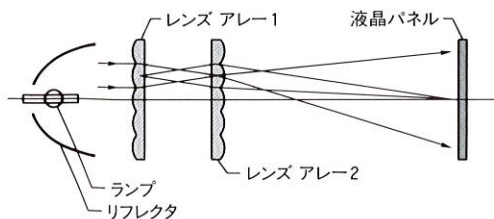


図5. フライアイインテグレータによる照度の均一化 レンズアレイによる多重照射で照度の均一性が向上する。

Homogenization by fly-eye integrator

や、図5のようなレンズアレイを用いる方式などがある<sup>(1)</sup>。ただし、いずれも光源から異なる方向に出た光を重ね合わせるため、本質的に指向性の劣化を伴う。したがってそれが問題にならないように、パネルや投射レンズとのマッチングを考慮した設計が必要となる。

そのほか、両偏光成分を変調する高分子分散型液晶パネル<sup>(7)</sup>や、回折型液晶パネル<sup>(8)</sup>では、光の散乱あるいは回折の強度が変調されるため、シュリーレン光学系<sup>(注2)(7)</sup>と呼ばれる構成が用いられる。シュリーレン光学系では、光源側で小さな開口に光を絞り込んで照明光の指向性を高めるため、指向性を高く設定すると開口での損失が増大する。すなわち指向性と効率がトレードオフの関係にある。

## 5 ビーム形状変換技術

光利用効率と指向性や一様性を両立する新たなアプローチとして、図6に示すように2枚の素子を用いる方式を検討した<sup>(9)</sup>。素子1で配光を制御して均一で矩(く)形に近い照度分布を実現し、素子2で指向性を回復する。

設計では、素子の特徴づけるものとして未知パラメータを含む関数形の位相関数  $\phi$  を想定し、最適化の手法でその未知パラメータの値を決定する。まず複数の入射光線を想定し、それぞれ目標到達点を設定する。例えば素子1への  $i$  番目の光線の入射位置を  $(x_i, y_i)$  とし、その目標到達点の座標を  $(x'_i, y'_i)$  とする。各光線の実際の到達点を  $(x''_i, y''_i)$  としたとき、目標到達点と実際の到達点の距離の二乗和、

(注2) 光の散乱あるいは回折の変調強度を利用した光学系。

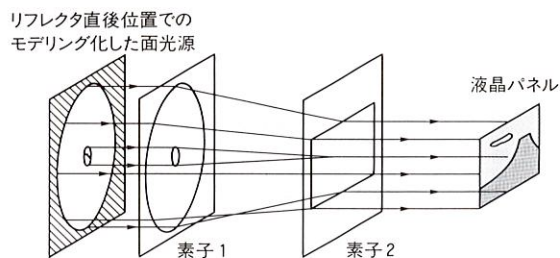


図6. ビーム形状変換の原理 素子1で配光を制御し、素子2で指向性を回復する。

Principle of beam profile transformation

$$S = \sum \{(x''_i - x'_i)^2 + (y''_i - y'_i)^2\}$$

が最小となるように未知パラメータを決定する。最適解は一般的な非線形最小二乗法で求める。ただし、最適解が求まってもこれで期待する特性が実現される保証はないので、解の妥当性や実用性は改めて光線追跡などで確認する必要がある。

図7にサンプル光線の入射位置と目標到達点の例を示す。

素子1を設計すると、素子1に入射した光線の、素子2への実際の到達点を求めることができる。素子2の設計に際しては、逆向きに入射した光が対応する点を逆向きに通過するように、同様の計算でパラメータを決定した。

光線追跡によるビームの形状変化のシミュレーション結果を図8に示す。リフレクタ開口部の入射光は有効半径が  $R=45$  mm、中心に半径5 mmの無効領域があるとした。ガウス形の分布を仮定し  $1/e^2$  値半幅  $W$  は、 $R/W=0.7$  であると仮定した ( $e$ : 自然対数の底)。パネルは4:3のアスペクト比で対角長3インチの矩形とした。素子1と2の間隔は

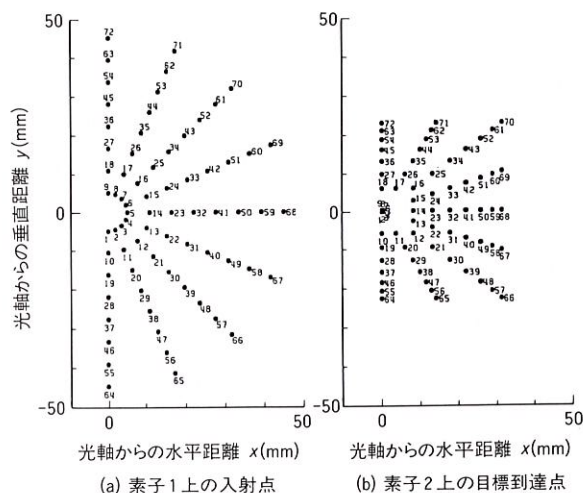


図7. サンプル光線と目標到達点 最適化計算の設計に用いた各サンプル光線の位置(a)に番号を付け、その目標到達点の位置を(b)に示す。

Sample rays and their target positions

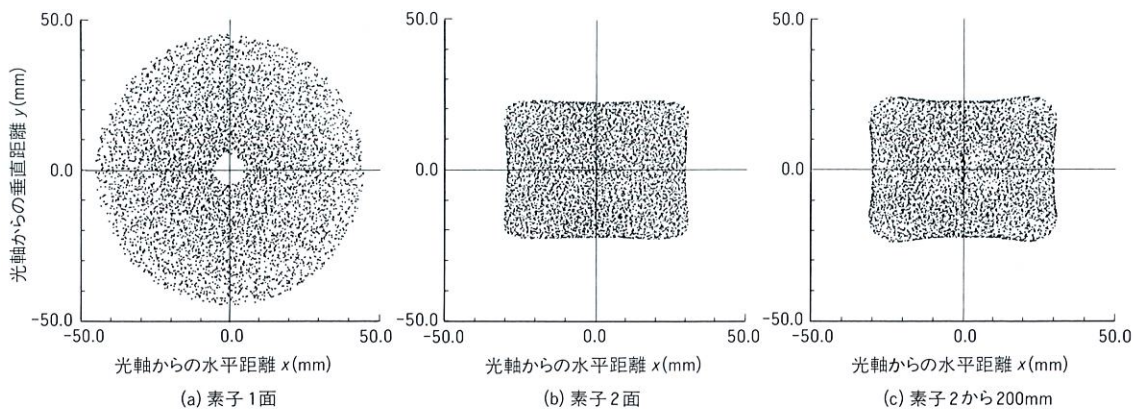


図8. モンテカルロシミュレーションによる評価結果 ビーム断面が円形から矩形様に変形され、照度の均一性も向上する。  
Results of Monte Carlo simulation of beam profile transformation

200 mm とした。中抜けが解消し、矩形の領域が、ほぼ一様に照明されている。さらに、素子2から200 mm 離れても照射パターンがあまり乱れず、指向性もよく確保されていることがわかる。

位相関数で特徴づけられた素子は、薄肉素子と近似できる場合、屈折率  $n$  の光学材料で表面形状を  $\phi/(n-1)$  とした素子を形成することで実現できる。

## 6 あとがき

液晶プロジェクタの照明光学系について、従来の方式と対照しながら、現在検討中の技術について述べた。液晶プロジェクタには、想定する用途や価格帯に応じたさまざまな要請があるため、種々の技術方式の特性をよく理解して組み合わせ、全体のマッチングを考慮しながらバランスのよい設計をする必要がある。最適設計技術を応用したこの方式は、照明光の指向性を重視する技術方式の一つとして実用的なアプローチになる。

こうした自由曲面を光学面として利用する技術は、近年の精密加工技術の発展により現実的、実用的な技術として考えられるようになってきた。設計技術や加工技術を基盤とするビーム形状変換技術は、液晶プロジェクタに限らず、指向性の重要な各種光学系にも有用な技術と考える。

## 文献

- (1) 本宮佳典, 液晶プロジェクタの照明光学系, ディスプレイアンドイメージング, 6, 1, 1997, p.17-26.
- (2) 西田信夫, 高性能なプロジェクタの技術動向, 応用物理, 67, 1,

1998, p.53-57.

- (3) Shikama, S., et al. A polarization-transforming optics for a high-luminance LCD projector. Proc. S.I.D. 32, (4), 1991, p.301-304.
- (4) Nicolas, C., et al. Efficient optical configuration for polarized white light illumination of 16/9 LCDs in projection display. Japan Display '92, 1992, p.121-124.
- (5) 平 和樹, 他, 小型・高性能液晶プロジェクター用偏光変換光学系, 1993年テレビジョン学会年次大会講演予稿集, 1993, p.41-42.
- (6) Imai, M., et al. High-brightness liquid crystal light valve projector using a new polarization converter. Proc. SPIE. 1255, 1990, p.52-58.
- (7) Ooi, Y., et al. LCPC projection display system for HDTV. Japan Display '92, 1992, p.113-116.
- (8) Shimura, K. Performance estimation of projection display system using a diffraction-based liquid crystal spatial light modulator. Proc. SPIE. 3013, 1997, p.157-164.
- (9) 本宮佳典, 液晶プロジェクタの照明光学系, 光学, 25, 1996, p.703-704.



本宮 佳典 HONGUH Yoshinori, Ph. D.

研究開発センター 情報・通信システム研究所主任研究員, 理博。  
光応用機器の研究・開発に従事。応用物理学会, OSA 会員。

Communication & Information Systems Research Labs.



三原 久幸 MIHARA Hisayuki

東芝エー・ブイ・イー(株) 第一事業部シニアエンジニア。  
マルチメディアディスプレイ応用機器の研究・開発に従事。  
Toshiba AVE Co. Ltd.



高島 譲 TAKASHIMA Yuzuru

生産技術研究所 精密技術研究センター。  
光応用精密機器の研究・開発に従事。応用物理学会,  
SPIE 会員。

Manufacturing Engineering Research Center