
垂直配向強誘電性液晶を用いた光路シフト素子

Optical path shift device utilizing the vertically aligned ferroelectric liquid crystal

鴫田 才明*
Toshiaki TOKITA

杉本 浩之
Hiroyuki SUGIMOTO

松木 ゆみ
Yumi MATSUKI

加藤 幾雄
Ikuo KATOH

亀山 健司
Kenji KAMEYAMA

滝口 康之
Yasuyuki TAKIGUCHI

要 旨

高解像度のディスプレイへの適用を目指し、プロジェクションディスプレイの画素数を増倍させる画像高精細化技術を開発した。すなわち、全く新しい動作原理に基づく垂直配向強誘電性液晶および透明ライン電極群を採用し、ライトバルブ画素列の半ピッチ分に相当する光路シフトをフレームレートに比較して高速に動作させる光路シフト素子を開発した。本素子の試作・評価を通じて、従来素子よりも格段に優れた光路シフト性能が得られ、高精細のプロジェクション画像を表示することが可能であることを確認した。

ABSTRACT

The resolution enhancing technique for the projection display is necessary to realize high-resolution displays. A new optical path shifting device has been developed based on a novel structure and a novel principle of operation, which shifts the optical path of projected light from pixel arrays by half pitch of the pixels with fast switching speed. The device has Vertically Aligned Ferroelectric Liquid Crystal (VA-FLC) layer and Multiple Line-shaped Transparent Electrodes (MLTE's) to apply uniform electric field to the VA-FLC layer. These features of the device provide good optical performance as an optical path shift device and produce excellent projection images.

* 研究開発本部 フォトニクス研究所
Photonics R&D Center, Research and Development Group

1. 背景と目的

会議などディスカッションの場での、より効率的なコラボレーション環境を提供するための大画面高解像度ディスプレイが求められている。このディスプレイの重要機能として、大画面でありながら文字や図形などの優れた視認性があげられ、現在さまざまな研究機関において視認性向上のための画像高精細化技術が研究開発されている。その技術の一つとして、プロジェクションディスプレイのスクリーン上での画素数を増倍させるピクセルシフト技術がある。

ピクセルシフト技術は、プロジェクションディスプレイにおいて表示画像を形成するライトバルブからスクリーンに投影される各画素を、光路を偏向する光路シフト素子によって、画素の半ピッチに相当するシフト量だけ高速に光路シフトさせることで、ライトバルブ画素数の整数倍の解像度をスクリーン上で得るものである。ピクセルシフト技術を採用することで、ライトバルブの画素数を増大させることなく高解像度化が図れるため、低コストでシステムを構築できるメリットがある。

従来、強誘電性液晶と複屈折板を組み合わせたピクセルシフトデバイスが提案されている^{1) 2)}が、このピクセルシフトデバイスは各ピクセルシフト位置における色バランスやコントラストが十分でなかった為、必ずしも高品質の画像を提供するまでには至っていなかった。

今回我々は、従来に比べて各段に優れた高精細画像を形成することを目的に、全く新しい動作原理に基づくピクセルシフトデバイスを開発したので、その概要を紹介する^{3) 4)}。

2. 技術

2-1 ピクセルシフト原理

Fig.1はピクセルシフトの原理を示すモデル図である。Fig.1において、ピクセルシフトデバイスは縦方向および横方向に光路を切替える2つの光路シフト素子からなる。ライトバルブのそれぞれの画素から出射した光は、ピクセルシフトデバイスの制御によって光路が切替えられ、スクリーン上で画素半ピッチに相当する4つの位置を順次移動する。移動のタイミングとしては、一フレームの画像を表示する時間単

位となる画像フィールドを4つのサブフィールドに分割し、それぞれのサブフィールドに対応して各ピクセルシフト位置が得られるように制御される(Fig.2)。

一方ライトバルブの各画素には、それぞれのサブフィールドにおいて表示すべき、各ピクセルシフト位置に対応した画像信号が伝送され光変調がなされる。

このように一枚の画像フレームを、時間分割した四枚のサブフレームにより構成し、これらを高速に切替えながら表示することで、合成された四倍の高解像度画像が得られるようになる。

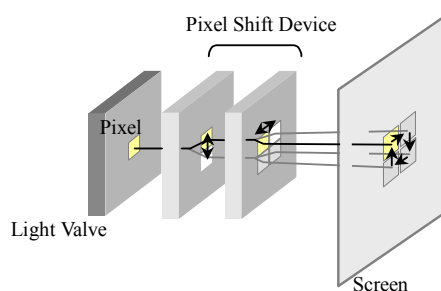


Fig.1 Pixel-Shift diagram.

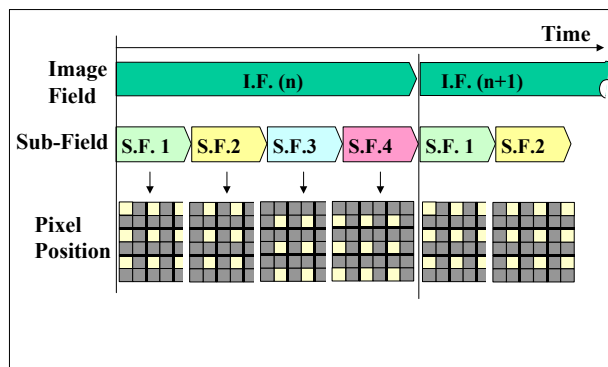


Fig.2 Time table of Pixel-Shift.

2-2 光路シフトメカニズム

今回我々の立案したピクセルシフトデバイスは2つの光路シフト素子よりなり、各光路シフト素子は、カイラルスメクチックC相よりなる強誘電性液晶によって構成される。この強誘電性液晶は液晶分子が層状に配列しており、無電界下では各層間で液晶分子の長軸方向が螺旋的に回転しているいわゆる螺旋構造をとることが特徴である(Fig.3)。我々の光路シフト素子では、後述する通りこの螺旋軸が基板面に対して垂直方向を向くように配向制御を行っており、この特徴から

VA-FLC (Vertically Aligned Ferroelectric Liquid Crystal) 素子と呼んでいる。

Fig.4は、このVA-FLC素子に対して電界を印加した場合の、電界方向と液晶分子配向状態との関係を示している。電界方向を液晶層の面内の一方向（この場合+X方向）にとること、図中各液晶分子の先端に矢印で示す自発分極が電界方向に揃うため、結果として液晶分子の螺旋構造が解け各液晶分子は同一方向を向くようになる。この方向は電界方向に垂直で、螺旋軸方向から液晶材料物性に基づくチルト角分だけ傾いた方向である。

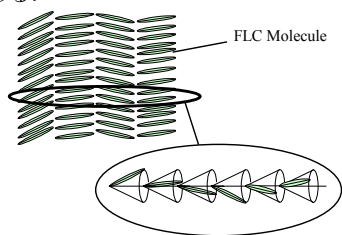


Fig.3 FLC molecules structure.

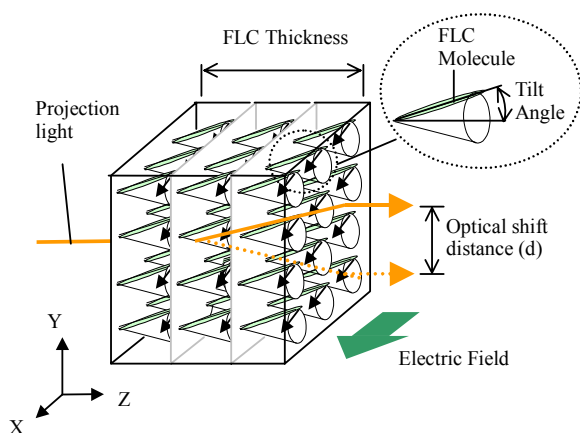


Fig.4 Schematic of FLC molecule direction and optical path under an electric field.

この液晶分子状態において、電界ベクトルがY方向にある直線偏光を、Z軸正方向に進行させて液晶に入射させた場合、入射光は光学軸の傾き、すなわち液晶分子のチルトによって、液晶層厚および液晶分子の常光/異常光屈折率に応じた光路シフトを受ける。さらにこの状態から電界方向を反転させた場合、液晶分子は螺旋の外周面に沿って回転し螺旋軸から軸対称の位置をとり、光路シフト方向も軸対称の方向に反転する。従って電界方向をスイッチングすることで光路シフトが制御できる。

本光路シフト原理における光路シフト量 d は、液晶層厚 t 、

チルト角 ψ 、液晶の常光屈折率 n_o 、異常光屈折率 n_e を用いて以下の式で表すことができる⁵⁾。

$$d = \frac{2t \cdot (a^2 - b^2) \sin \psi \cdot \cos \psi}{b^2 \cos^2 \psi + a^2 \sin^2 \psi} \quad (1)$$

$$a = 1/n_e, \quad b = 1/n_o \quad (2)$$

この式から、液晶層厚 t を制御することで所望の光路シフト量が得られることがわかる。Fig.5は(1)式より得られる光路シフト量を、液晶分子のチルト角をパラメータに $n_o=1.455$, $n_e=1.615$ の場合について、液晶層厚に対して示したものである。

今回のデバイス設計における光路シフト量目標は、用いるライトバルブの画素ピッチが $13 \mu\text{m}$ である為 $6.5 \mu\text{m}$ とした。この場合に設定すべき液晶層厚としては、室温において使用した液晶材料のチルト角が 25° であることから、Fig.5より $50 \mu\text{m}$ とした。

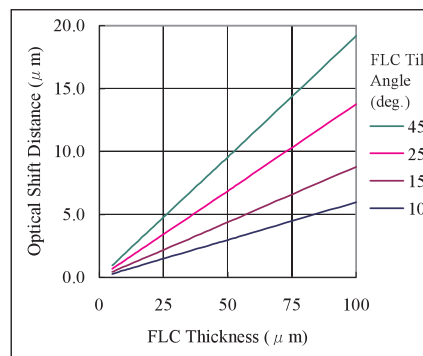


Fig.5 Optical shift distance as a function of tilt angle of FLC molecule.

2-3 VA-FLC素子構造

Fig.6に、今回作製したVA-FLC素子の構造を示す。一対の透明ガラス基板の内面側に、ITO (indium-tin oxide) よりなる複数の平行配置された透明ライン電極群MLTEs (Multi-Line shaped transparent electrodes) が形成され、誘電体を介して強誘電性液晶が設けられている。また強誘電性液晶の両界面には、強誘電性液晶を垂直配向させるための配向膜が設けられている。MLTEsを構成する各透明ライン電極は、等しい抵抗値を有し直列に配列された抵抗(分割抵抗)の各接続端にそれぞれ接続されており、液晶層内にはライン電極と垂直な方向に電界が発生するよう構成されている。MLTEsと液晶層の間の誘電体は、液晶層における電界分布の局所的変動を抑え均一化する為に設けられる。また液晶層厚を制御す

る為のスペーサが、光透過領域の周囲に形成されている。

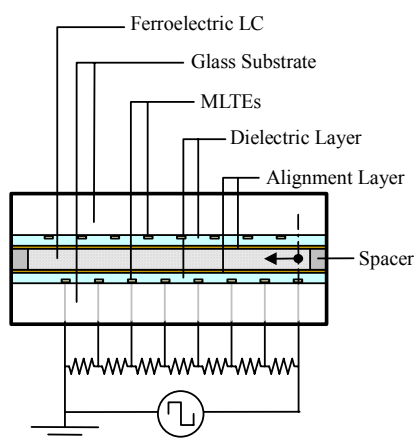


Fig.6 Schematic cross section of the VA-FLC Device.

Table 1 Thickness and Refractive index for each layer of the VA-FLC Device.

Material	Thickness (μm)	Refractive index ($\lambda=550\text{nm}$)
Glass Substrate	1100	1.5
MLTEs [ITO]	0.15 (Width=10) (Pitch=100)	~ 2.0
Dielectric Layer [Glass]	150	1.5
Alignment Layer [Polyimide]	0.06	—
FLC CS1029 (Chisso)	50	$\angle n=0.16$

Table 1にVA-FLC素子の各層を構成する材料と層厚，屈折率を示す．今回用いた液晶材料は，CS1029（チッソ製）で前述の通り層厚は $50\mu\text{m}$ に設定している．

Fig.7は，Fig.5およびTable 1に示すVA-FLC素子の液晶層に印加される面内方向の電界を，ポアソン方程式によって計算した結果を示している．MLTEsを構成するライン電極数として各基板側にそれぞれ20本ずつの場合を示しており，電圧勾配は同一基板内の隣り合う電極間で10Vとしている．計算に用いた誘電体層，液晶層，基板の各比誘電率は，それぞれ10，10，8であり，層厚その他の条件はTable 1に示す値を用いている．

図中横軸は，液晶層内において，MLTEsの端部ライン電極上を原点とした時の電界印加方向（Fig.6における矢印方向）の位置を示し，縦軸はこの方向に発生する電界の強度を示す．MLTEsとの比較の為，液晶層内に2mmの間隔で配置し

た平行電極対（Single Electrode Pair）を有する素子を想定し，MLTEsへの印加電圧と等しい電圧をこの平行電極対に印加した場合に発生する電界を，同時に計算した．

図から明らかなように，MLTEsによる電界はほとんど全面に渡って均一であるに対して，平行電極対により発生する電界は位置によって強度ムラがあり，一部領域ではMLTEsよりも値が小さくなる．このことからMLTEsを採用することで効率的に所定電界が得られること，また全面に渡って電界強度が均等である為，液晶反転時に配向の乱れが発生しにくいことなどが特徴としてあげられる．

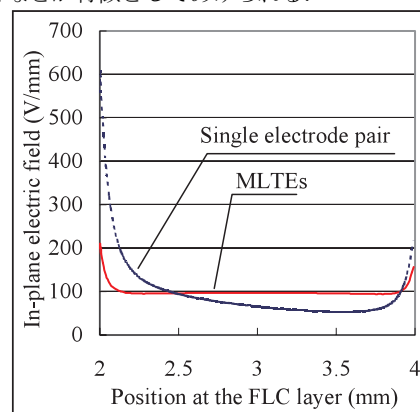


Fig.7 Calculated in-plane electric field at the FLC layer.

今回我々が作成したVA-FLC素子の写真をFig.8に示す．

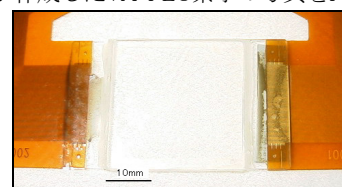


Fig.8 Picture of the VA-FLC Device.

2-4 光学特性

2-4-1 コノスコープ像解析

作製したVA-FLC素子の光学軸方向を特定する為に，コノスコープ(conoscope)像による解析を行った⁶⁾．

Fig.9はVA-FLC素子のコノスコープ像を示しており，(A)は無電界下における像である．十字模様を中心であるメラトープ⁶⁾が観察領域の中心に一致していることから，このサンプルの光学軸すなわちカイラルスメクチックC相の螺旋軸が基板面に対して垂直方向を向いていることが確認でき

る。(B) (C)は、紙面右方向に電界を印加した状態で撮影したもので、メラトープは電界強度に依存して右方向に移動している。この場合、メラトープの観察領域中心からの距離を測定することで、下式を用いて光学軸傾斜角 θ (液晶分子の平均チルト角) を求めることができる。

$$\alpha = \sin^{-1}(\text{NA}) \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\tan \alpha \cdot \frac{x}{y}\right) \quad (4)$$

ここに、 x は観察領域中心からメラトープまでの距離、 y は観察領域の半径、 α はサンプルから受光面までの距離、NAは顕微鏡対物レンズの開口数である。

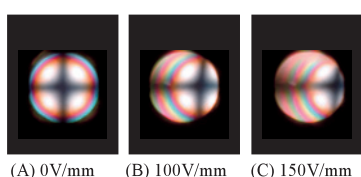


Fig.9 Conoscope images of the VA-FLC Device.

Fig.10は、印加電界と(4)式により求めたチルト角との関係を示す図である。チルト角変化の傾向は、電界の極性に対してほぼ対称であり、 $\pm 200\text{V/mm}$ の電界強度で飽和している。この結果から、VA-FLC素子に対して飽和電界以上の電界を作用させることで、一定の光路シフト量が得られ、シフト方向が電界印加方向で制御できることが確認できる。

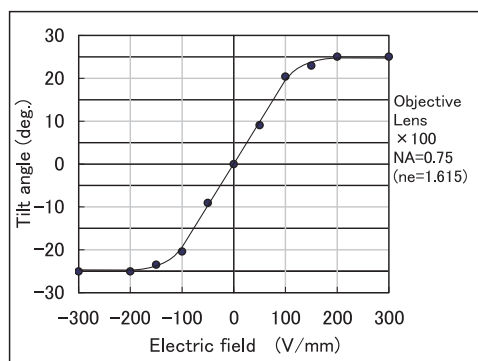


Fig.10 Tilt angle dependence on the electric field.

液晶分子の状態に注目した場合、無電界下では、前述の通り液晶分子は基板法線方向から所定角度保ちながら層厚方向に螺旋的に回転した螺旋構造を有し、平均的な光学軸は螺旋軸方向、すなわち基板法線方向を向いている。この状態から液晶層面内方向に電界を印加することによって螺旋構造の一部が解け平均的な光学軸が傾くようになり、飽和電界 E_s 以

上を印加することですべての液晶分子が同一方向をとると考えられる⁷⁾。

2-4-2 光路シフト特性

Fig.11(a)に、光路シフト量測定システムの概略図を示す。光路シフト量の測定は、ライトバルブ内ピクセルに見立てた $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ の開口部を有するマスクパターンを用いて行った。すなわち、光源からの光を偏光子によって直線偏光化してマスクパターンに照射し、開口部を、VA-FLC素子を介してハイスピードカメラで撮影することで行った。VA-FLC素子に対する電圧は、ファンクションジェネレータにより生成した所定周波数(60Hz)の矩形波を、増幅回路で増幅して印加した。電圧印加によってVA-FLC素子による光シフトが生じ、マスクパタンの開口部位置がハイスピードカメラ上で変位する為、その変位量と変位に要する時間を測定すればそれぞれ光路シフト量と応答時間を計算することができる。なおここでの評価はすべて室温下で実施している。Fig.13(b)にはハイスピードカメラによって得られる画像の例を示す。マスクパタンの開口部は縦 $10\mu\text{m}$ 横 $20\mu\text{m}$ のピッチで配列されており、ここでは縦方向に光シフトさせた場合の変位状態を示している。電界を -200V/mm から $+200\text{V/mm}$ に変化させることで、拡大写真に示す通り開口部の移動が観察できた。

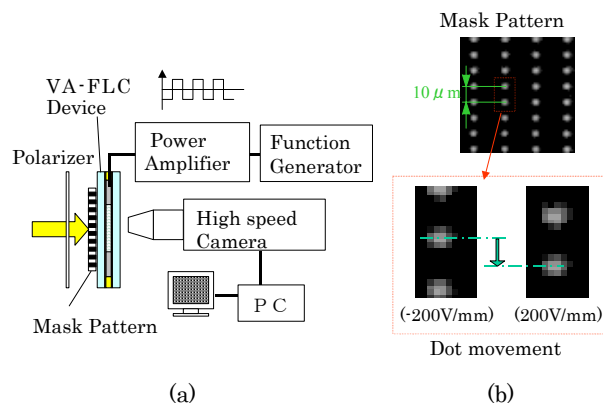


Fig.11 Optical system for the optical shift characteristics measurements (a) and observed images by this system (b).

Fig.12に、印加電界に対する光路シフト性能を示す。

光路シフト量は、電界強度の増大とともに増加し、前述のチルト角測定結果と同様 200V/mm で飽和する。図中示されるとおり、この電界において今回目標とした $6.5\mu\text{m}$ を確保している。

図中光路シフト量に対しては、測定値の他にFig.10に示すチルト角を用いて式(1)、(2)によって求めた計算値も示した。光路シフト量の飽和する電界(200V/mm)において、実測値と計算値は良く一致しており、本デバイスにおける光路シフトが予測した通りに機能していることを裏付けている。

一方、光路シフトの応答時間は印加電界の増大とともに短くなる傾向にあり、200V/mmにおいては0.7msを下回る。仮にプロジェクション画像表示におけるフレーム周波数を60Hz、ピクセルシフト周波数を240Hzに設定した場合、一つのサブフィールド表示時間は4.3msとなるが、ピクセルシフトに要する時間、すなわち上記応答時間はこの表示期間に対して十分短く、高精細画像表示に対して良好に機能するといえる。ただし応答時間については、より短いほど画像品質の改善効果が高い為、今後さらなる短縮化を図っていく必要がある。

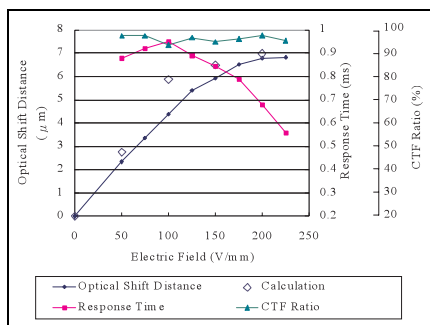


Fig.12 The optical shift characteristics of the VA-FLC Device as a function of electric field.

またFig.12には、コントラスト評価法の一つであるCTF (Contrast Transfer Function) 測定の結果を同時に示す。CTFは、100本/mm密度のライン状マスクパターンを、VA-FLC素子を介して高解像度CCDカメラで撮影し、その明暗のピーク強度から求めている。CTF測定値は測定対象であるVA-FLC素子の性能だけでなく、光学系全体の解像力を表すことになるため、今回はVA-FLC素子と同程度の厚みを持つガラス板をVA-FLC素子のリファレンスとして用意し、両者のCTF測定値の比率 (CTF比) を計算することによってVA-FLC素子単独のコントラスト性能を得た。

Fig.12に示す通り、電界にほとんど依存せずCTF比は90%以上を確保している。このことは、VA-FLC素子を光学系内に挿入しても元画像に対するコントラスト劣化が少なく問題にならないことを示している。

Fig.13には、VA-FLC素子における透過率を各色ごとに測

定した値を示す。図中の“A”, “B”は、VA-FLCへの電界(200V/mm)の印加方向、すなわちそれぞれの光路シフト方向に対応している。“A”, “B”それぞれに対して、入射光の偏光方向を保持したまま出射し光路シフトが正常になされている有効透過光成分 (Effective Light) と、偏光解消された状態で出射し光路シフトが正常になされていない成分(Ghost)とを示す。今回作製のVA-FLC素子には表面に無反射コーティングが施されていないものの、有効透過光成分に対して良好な透過率が得られており、ゴースト成分も極めて少ないことが確認できる。特に各色での透過率にほとんど差がないことと、光路シフト方向“A”, “B”間でやはり透過率差がほとんど発生していないことは、本素子がピクセルシフト位置に依存せず色バランスに優れた表示を行える性能を有することを示している。

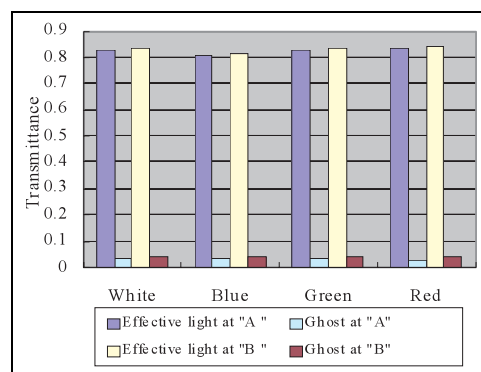


Fig.13 Transmittance dependence on each pixel-shift position “A” and “B”.

2-4 プロジェクション評価

今回、プロジェクション画像評価に用いたピクセルシフトデバイスは、2つのVA-FLC素子と90° 旋光素子により構成した。90° 旋光素子にはツイストネマティック構造の高分子液晶を用いた。それぞれのVA-FLC素子は、Fig.14に示す通りシフト方向が垂直となるよう配置している。

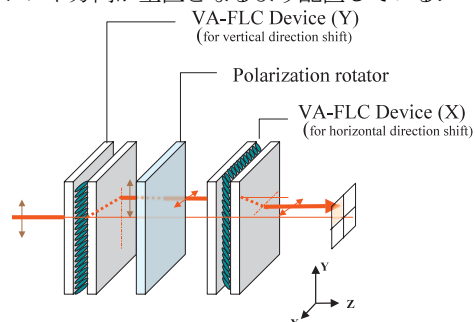


Fig.14 Pixel-Shift Device structure consists of two VA-FLC Devices and a polarization rotator.

図中+Z方向に進行する直線偏光は、第一段目のVA-FLC素子でY方向に光路シフトを受けた後に、90° 旋光素子により偏光方向がX方向に回転し、第二段目のVA-FLC素子でX方向に光路シフトを受けることになる。

試作したプロジェクション評価システムの構成をFig.15に、外観をFig.16に示す。主要な構成要素としては、高圧水銀ランプよりなる光源ユニット、光源ユニットからの白色光をRGB三原色に時間的に切替えるカラーホイール、照明光学系、ライトバルブ、投射レンズ、およびピクセルシフトデバイスである。

各ピクセルシフト位置に対応する画像信号は四つのフレームメモリにあらかじめ蓄積しておき、それぞれのサブフィールド表示タイミングに同期させライトバルブに伝送した。またピクセルシフトデバイスの駆動はライトバルブを駆動する垂直同期信号よりタイミングをとって行っている。

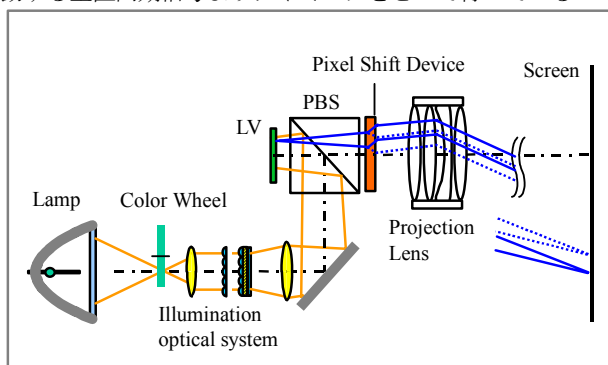


Fig.15 Schematic diagram of projection system with the Pixel-Shift Device.

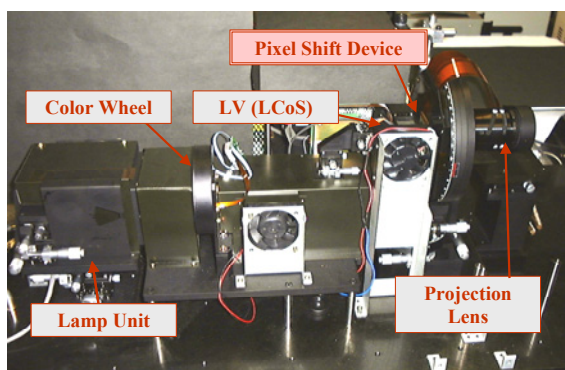


Fig.16 Projection system with the Pixel-Shift Device.

Fig.17は、Fig.15, 16に示す光学系内に、VA-FLC素子よりなるピクセルシフトデバイスを設けた場合（VA-FLC）、従来方式のピクセルシフトデバイスを設けた場合（Conventional）およびピクセルシフトデバイスを設けていな

い場合(Ref.)のそれぞれにおける、ライトバルブ画素1ドットのスクリーン上での拡大写真を示す。表示色は白色である。各ピクセルシフトデバイスにおける電界は一方向に印加した状態で、スイッチングは行っていない。またここで示す従来方式素子は、水平配向強誘電性液晶とLiNbO3板を組み合わせで構成したものである。この従来方式素子を設けた場合の画素の像は、素子を設けない場合と比較して画素下部の輪郭がぼやけ、ゴースト像が発生していることが視認される。これは、従来方式の素子においては波長依存性が高く、可視光域内における狭い波長範囲でしか理想的な光偏向がなされないことによる。一方VA-FLC素子を設けた場合は画素の劣化はほとんど視認されず、Fig.13に示すとおり、RGBそれぞれの波長域で良好に光路制御がなされている。



Fig.17 Projected pixel images on screen passing through the pixel-Shift Device.

このVA-FLC素子よりなるピクセルシフトデバイスを機能させて得られるプロジェクション画像をFig.18に示す。画像は、ピクセルシフト技術を用いない場合の16ドット文字を、ピクセルシフト技術によって32ドット文字に高精細化したものである。ピクセルシフトを機能させることで画素エッジ部に発生していた不連続なパターン(ジャギ-)が解消され、滑らかな画像が得られていることが確認できる。

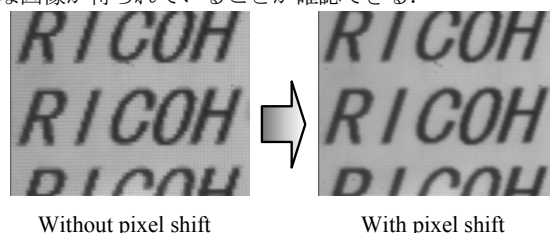


Fig.18 Projection images with and without Pixel-Shift technique.

3. 結論

プロジェクションディスプレイの高精細化実現に向けて、従来の光路シフト素子とは動作原理が全く異なる垂直配向強誘電性液晶を用いた光路シフト素子（VA-FLC素子）を立案・作製し、ピクセルシフト技術への応用を図った。

光学特性評価を通じて、本VA-FLC素子が、ピクセルシフト技術に対応した

高速応答性を有すること、および、波長依存性の少ない優れた透過率特性とコントラスト特性を有することが確認された。

実際に、プロジェクション評価システムによってピクセルシフト技術を用いた画像を生成し、優れた高精細画像を形成できることを確認した。

今後、ピクセルシフト素子に対してより一層の性能向上を図りながら、本技術を採り入れたプロジェクションディスプレイのシステム化を進める予定である。

参考文献

- [1] A. Yasuda, et al.: FLC wobbling for high-resolution projectors, J. of the SID, Vol.5, No.3, (1997), pp.299-305.
- [2] D. C. Chen: Display resolution enhancement with optical scanners, Applied Optics, Vol.40, No.5, (2001), pp.636-643.
- [3] 杉本 他: 第49回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No3, (2002), p.957.
- [4] T.Tokita, et al.: FLC Resolution-Enhancing Device for Projection Displays, SID 02 DIGEST, (2002), pp.638-641.
- [5] M. Françon and S. Mallick: *Polarization Interferometers*, WILEY-INTERSCIENCE, (1971), pp.137-140.
- [6] 坪井: 偏光顕微鏡, 初版, 岩波書店, (1966), p.180.
- [7] 福田, 竹添: 強誘電性液晶の構造と物性, 初版, コロナ社, (1991), p.51.