撮像用液晶フィルタのフレア抑制

Flare Reduction of Liquid Crystal Filters for Video Image Capturing

正会員 藤掛 英夫[†], 正会員 佐藤 弘人[†], 正会員 河北 真宏[†],
正会員 飯野 芳己[†], 正会員 菊池 宏[†]

Hideo Fujikake[†], Hiroto Sato[†], Masahiro Kawakita[†], Yoshiki Iino[†] and Hiroshi Kikuchi[†]

Abstract We studied the flare appearing in video images when a liquid crystal filter is used in front of a video camera. To clarify the generating mechanism of the flare, the relationship between the concentration of spacer particles dispersed in the liquid crystal and the intensity of light scattered by the filter was examined in detail by using a schlieren optical system with a laser light beam. We found that the light scattering is mainly caused by the spacers and glass substrates, so we evaluated their contribution ratio. From microscopic observation, we determined that the light scattering originated by the spacers includes light scattered by the spacer particles and that resulting from by liquid crystal alignment deformation caused by the spacer surfaces. As the light scattering of the spacers was in proportion to the spacer concentration, it could be considerably reduced by decreasing the spacer density. The flare in video images was reduced by decreasing the light scattering. The liquid crystal filter fabricated by using the flare-reduction method described above was utilized in actual television program.

キーワード：液晶フィルタ，撮像，フレア，光散乱，スペーサ粒子

1. ま え が き

電子画像の伝送・処理技術が著しく進展する中で，画像情報が簡便に取得できるように，撮像システムには多様な照明環境に適応しうる柔軟性が求められている．撮像素子の電子補正機能では対処できない被写体撮影の場合，光領域での前処理¹⁾が威力を発揮する．入射光の性質を自在に電圧制御できる液晶の機能性は，電子ディスプレイなどの画像出力媒体はもとより，画像入力の前処理にも有用であり，筆者らはテレビ撮影用の電圧制御型光学フィルタの研究を進めている．そして，これまでに映像撮影で支障となる反射光を除去する偏光フィルタ²⁾をはじめ，照明光の色温度が大きく異なる屋内外でシームレスな撮影を可能にする色温度変換フィルタ³⁾，および撮像素子のダイナミックレンジを確保するための可変減光フィルタ⁴⁾を開発してきた．それらの液晶フィルタは，映像撮影の自由度と表現の可能性を飛躍的に広げるものであり，これまでにさまざまな番組制作に応用されている．

多彩な光機能を発揮する液晶フィルタではあるが，さらに用途を拡大するためには，液晶フィルタを装着した際に生じるフレアを解消していかなければならない．すなわち，

液晶フィルタを装着したカメラに，直射日光などの強い光が斜方から入射した場合，入射光以外の映像領域まで輝度が増す現象が認められている⁵⁾．フレアの発生原因については，液晶フィルタの素子構造が複雑なこともあり，これまで明らかにしていない．

フィルタを構成する液晶素子には，通常，ガラス基板に挟まれた液晶層の厚みを一定に保つため，硬質プラスチック製のスペーサ粒子が分散される．我々はスペーサによる光散乱が，フレアを引き起こす大きな要因と考えた．拡散照明光を入射して透過光を直視するこれまでのディスプレイ用途では，液晶による散乱は支障にならない．それに対して，液晶素子の撮像応用では狭い画角で入射する光画像を撮像素子に結像するため，液晶フィルタを含む光学系で光散乱が生じた場合，フレアが発生する可能性が高い．

今回，液晶内に分散するスペーサに着目して，フィルタで生じる光散乱効果を詳細に検討した．本論文では，フレアを引き起こす液晶フィルタの構造を考察した上で，光学測定により，フィルタ内の光散乱の発生要因を明らかにする．さらに，それらの散乱光を減少させることにより，映像内に現れるフレアを抑制できることを示す．

2. 液晶フィルタの構造

色温度変換フィルタをはじめ，既存の撮像用フィルタは，単一の光学材料（着色したガラス，プラスチックなど）で構成されており，特性は固定したものである．それに対し

2001年11月16日受付，2002年4月10日最終受付，2002年5月16日採録

[†] NHK放送技術研究所

(〒157-8510 世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-2394)

[†] NHK Science & Technical Research Laboratories

(1-10-11, Kinuta, Setagaya-Ku, Tokyo 157-8510, Japan)

て、液晶フィルタでは電圧制御機能が得られる反面、素子構造が複雑になる。液晶フィルタの構成要素として、複数の液晶素子（ホモジニアス配向のゲストホスト素子、ツイステッドネマティック配向素子など）や偏光板などを積層して用いることが多いが、ここではフレアの基本的な発生機構を明らかにするため、分子配向が単純なホモジニアス配向素子をモデル素子として、単独で評価に用いることとした（同素子は色素添加や偏光板を伴わないため、光変調機能をもたない）。

液晶素子では、図1に示されるように液体の液晶層が、透明電極（ITO）付きガラス基板で挟まれており、その厚みを一定に保つため、液晶層内には硬質プラスチックのスペーサ粒子が分散される。我々は、スペーサと液晶の屈折率差で生じる光の散乱（屈折と反射）が、フレアを増加させる要因と考えた。そこで、スペーサの分散密度 D （個/ mm^2 ）を変えて、散乱光の測定を行うこととした。

評価用素子の作製では、ガラス基板（0.7mm厚）に塗布したポリイミド膜（配向膜）の表面にラビング（摩擦）処理を施し、 $6\mu\text{m}$ 径のスペーサ（図2）を分散した後、同様に処理したもう一枚のガラス基板で貼り合わせた（2つの配向膜のラビング方向はアンチパラレル）。通常の液晶ディスプレイでは、スペーサ密度が数百個/ mm^2 程度とされるが、ここでは分散密度を70~700個/ mm^2 まで大きく変えて試作を行った。さらにスペーサの種類として、ディスプレイ素子に広く用いられている透明なスペーサ粒子と、着色されて

光を透過しない黒色スペーサを用いた。最後に、基板間に形成されたギャップ（ $6\mu\text{m}$ ）にネマティック液晶（チソソ社JB-1010、常光屈折率1.508、異常光屈折率1.676）を真空注入し、液晶分子を配向膜のラビング方向に配向させた。

3. 散乱光の測定

ここでは、液晶素子で生じる微弱な光散乱を検出するため、図3に示すように、直進性が高いレーザビーム光（波長633nm）を液晶素子に垂直入射し、直進する透過光を光学マスクにより取り除き、散乱光のみをフォトダイオードで測定した（シュリーレン光学系⁶⁾）。液晶素子による散乱は小さく、透過光は直進光（ビーム拡散角 0° ）付近に集中するため、 1° という微小な角度以上に広がる光を散乱光として検出した。

図4に、入射光で正規化した散乱光強度の測定結果を示す。透明スペーサを用いた場合、入射光に対して2%以下の強度の散乱光が検出された。その強度は、スペーサの分散密度 D に比例して増加することがわかった。

また、スペーサを減らしていった散乱光の強度は、スペーサや液晶を伴わず、ガラス基板だけで生じた散乱レベル（約0.2%）に漸近した。ガラスによる光散乱は、ガラス内部の屈折率の不均一性（組成や応力の空間分布などにより発生）や基板表面の平坦性の欠如などが要因と考えられる。

図4により、スペーサとガラス基板に起因する光散乱を明確に分離できたことになる。なお本測定では、スペーサ

図1 ビデオカメラに装着される液晶素子の基本構造
Schematic diagram of a liquid crystal (LC) device mounted on a video camera.

図2 スペーサ粒子の顕微鏡写真
Microscope photographs of the spacer particles.

図3 液晶素子で生じる散乱光強度の測定光学系
Optical setup for measuring the intensity of light scattered by the LC device.

図4 散乱光強度とスペーサ密度の関係
Dependence of the scattered light intensity of the LC device on spacer concentration.

がない場合に予想される散乱光 ($D=0$) と、ガラス基板のみの散乱光にレベル差がないことから、液晶材料そのものによる散乱は認められなかったことになる。

一方、図4には、表面を黒に着色したスペーサ粒子を用いた場合の結果も示してある。黒色スペーサを用いた場合、スペーサに直接入射する光が吸収されるため、散乱光レベルは減少している。しかし、スペーサを多量に分散した場合でも、黒色スペーサによる散乱光の抑制効果は、3割程度にとどまった。

4. 液晶の配向乱れ

黒色スペーサを用いても散乱が残るのは、スペーサが液晶分子の配向を乱して、光を屈折させて散乱するためと考えられる。そこで、スペーサ周辺の液晶の分子配向を、クロスニコルの偏光顕微鏡で観察した。図5の観察結果では、入射側の偏光板の光透過軸を、液晶素子のラビング方向に平行としているため、ラビング方向に配向した液晶領域では複屈折が生じず、光が漏れない。それに対して、液晶分子の配向がラビング方向から傾斜して乱れている部位は、光が漏れて明るく見える。

透明スペーサの場合、スペーサ自体やそれに近接した液

晶領域で光が透過している。それに対して黒色スペーサでは、ラビング方向を軸としたスペーサの両極付近に光漏れが認められる。これは、ディスクリネーションと呼ばれる配向乱れによるものであり、液晶のディスクリネーションは不連続な屈折率分布を伴うため、光散乱の要因となる。

黒色スペーサ周辺の液晶配向は、ディスクリネーションの発生部位から、図6のように推察される。基板表面のラビング配向膜によるアンカリング効果⁷⁾と、スペーサ表面の配向規制力が均衡し、スペーサの両極に分子配向の乱れた領域が生じたと考えられる。

なお、スペーサ表面における液晶配向は、液晶の接するスペーサの表面材料に依存し、表面に垂直に分子配向する場合も報告されている⁸⁾。透明スペーサを用いた本実験でも(図5(a))、液晶分子が表面に垂直に配向して、配向乱れを誘起している可能性がある。なぜなら、その場合、図7の液晶配向モデルに示されるように、ラビング方向からそれた分子配向が、スペーサを取り囲むように発生しやすくなるためである。

一方、黒色スペーサを含む液晶素子に電圧を印加しながら、液晶のディスクリネーションを観察した結果を図8に示す。印加電圧がない場合(図8(a))、および十分に強い場合(図8(c))には、配向乱れの領域が小さく、それらの間の電圧印加で(図8(b))、配向乱れが大きくなる現象が認

(a) Transparent Spacers

(b) Black Spacers

図5 スペーサ周辺の液晶配向乱れの偏光顕微鏡写真
(印加電圧なし)

Polarizing microscope photographs of disordered LC alignment around the spacers without driving voltage.

図6 水平配向を促すスペーサ付近の液晶配向モデル
LC alignment model around the spacer with horizontal surface anchoring.

図7 垂直配向を促すスペーサ付近の液晶配向モデル
LC alignment model around the spacer with vertical surface anchoring.

図8 電圧駆動時の液晶配向の偏光顕微鏡写真
Polarizing microscope photographs of LC alignment under various applied voltages.

められた。

筆者らは、そのメカニズムを以下のように考察した。印加電圧がない場合、液晶のダイレクタは配向膜のアンカリングとスペーサ表面の影響で決まり、前者が支配的であるため、ディスクリネーションは小さい。中間調の印加電圧において配向乱れが拡大するのは、液晶の分子軸を基板に水平に向けようとする配向膜からの回転トルクと、垂直方向に駆動しようとする誘電トルクが拮抗して相殺されるため、結果的にスペーサ表面の影響が現れやすくなると考えられる。さらに電圧を大きくした場合には、液晶分子が電界方向に強く駆動されるため、スペーサ表面の影響は生じにくくなると推察される。

5. 散乱光の発生要因

前述の散乱測定の結果から、液晶素子で生じる散乱光の強度 I_t を整理すると、次のように表すことができる。

$$I_t = D I_s + I_g \quad (1)$$

ここで I_s および I_g は、それぞれ1個のスペーサ粒子およびガラス基板による散乱光の強度である。散乱光の強度 I_t が、スペーサの分散密度 D を係数として I_s に比例するという現象は、1個の粒子で散乱した光が他の粒子で散乱される頻度がほとんどないということを意味する。これは、スペーサ粒子が光の入射軸と垂直方向に分布して、しかもその分散密度が低いと考えられる。なお I_g は、前述の顕微鏡観察から、スペーサ自身および液晶配向乱れによる散乱の寄与を含んだものと言える。

ここで素子の散乱光 I_t の大半は図4に示されるように、スペーサに起因する散乱光強度 $D I_s$ であるため、スペーサ量 D を減らすことにより、光散乱を効率良く抑制することが可能である。一方、ガラス基板自体による散乱は、ガラス

の研磨工程や材質の改善により、低減が可能になると思われる。

6. フレアの抑制効果

光散乱の抑制に伴うフレアの低減効果を確認するため、図9に示すように、意図的にフレアを発生させて映像撮影を行った。ここでは、試作した液晶素子(図10)を業務用テレビカメラ(東芝HM-87)のズームレンズ(フジノンA15x8)に装着して、レンズの斜方(約45°)から強いビーム照明光(光強度は被写体からの光の50倍、100Wのハロゲンスポットランプを使用)を入射した。なお、液晶素子のガラス基板には可視光全域の無反射処理(誘電体多層膜の蒸着)を施し、さらに液晶層に接する面での反射も少なくなるように、透明電極ITOの厚みが設計された。

図11は、ビーム光を見切った状態で、被写体を撮影した映像である。透明スペーサを高密度に分散した場合(図11(a))、右端部にビーム光のフレア(映像レベルの増加)が発生している。それに対して、黒色スペーサに変えた場合(分散密度は一定)、図11(b)に示されるように、映像内のフレアが減少することがわかる。図11(c)に示されるように、黒色のスペーサ量 D を減らした液晶フィルタでは、ビーム光周辺におけるフレアがさらに抑制された。上記の結果は、液晶フィルタ内のスペーサの改善により、撮影される映像に現れるフレアを大幅に抑制できることを示すものである。

なお、液晶フィルタをカメラレンズに取り付けた本実験では、光を厳密に垂直入射した散乱測定光学系(図3)と異なり、フィルタには斜方から光が少なからず入射する。その場合、液晶フィルタ内部で光ビームの光路が、反射を繰り返して面内を移動し、光ビームの周辺部を明るくするため、フレアが助長されると予想される。上記の撮影実験で解消できなかったフレアには、そのような多重反射に起因するものも含まれている可能性がある。

本方法により、フレアが低減された色温度変換用液晶フィルタは、すでに野外中継のテレビ番組制作に使用されており、今後、他のさまざまな液晶フィルタにも適用を図っていく予定である。

図9 映像内に現れるフレアの評価実験
Measurement for evaluating flare appearing in captured images.

(a) Transparent Spacers (D=700)

(b) Black Spacers (D=700)

(c) Black Spacers (D=70)

図11 液晶素子を通して撮影されたビデオ画像
Video images captured through the LC device.

図10 フレア評価用に試作した液晶素子の外観
Appearance of the LC device fabricated for evaluating the flare effect.

7. む す び

フレアを引き起こす液晶フィルタの光散乱効果を実験的に検討した。光学測定の結果、液晶フィルタ内で生じる散乱光は、主にスペーサとガラス基板に起因し、前者が大半を占めることがわかった。スペーサは、スペーサ自体とその周辺の液晶配向乱れにより散乱光を生じ、その散乱強度はスペーサ密度に比例した。均一な厚みの液晶層を有する液晶フィルタを構成するには、一定量のスペーサの使用は避けられないが、分散密度を減らして黒色化することで、映像に現れるフレアを大幅に抑制できることが確認された。

さらにフレアを抑制するためには、ガラス基板の材質や表面研磨方法を改善するとともに、斜方入射に対する基板の無反射処理を徹底しなければならない。また、液晶配向を乱さないスペーサの形状や、スペーサ表面の配向処理についても検討が必要と思われる。

最後に、液晶フィルタの研究・開発に関して、NHK名古屋放送局の多くの方々から、ご支援・ご協力を頂きました。ここに記してお礼申し上げます。

〔文 献〕

- 1) L.B.Wolf and T.A.Mancini: "Liquid Crystal Polarization Camera", Proc. IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, pp.120-127 (1992)
- 2) H. Fujikake, K. Takizawa, T. Aida, T. Negishi and M. Kobayashi: "Video Camera System Using Liquid-Crystal Polarizing Filter to Reduce Reflected Light", IEEE Trans. on Broadcast., 44, 4, pp.419-426 (1998)

- 3) H. Fujikake, J. Yonai, H. Sato, H. Kikuchi, Y. Iino, M. Kawakita, Y. Tsuchiya, K. Iwashita and S. Umeda: "Automatic Color-Temperature Compensating System Using Guest-Host Liquid Crystal Filter for Video Image Sensing", Appl. Opt., 40, 14, pp.2275-2281 (2001)
- 4) 藤掛英夫, 佐藤弘人, 菊池宏, 飯野芳己, 河北真宏, 土屋謙: "液晶減光フィルタを用いた映像撮影効果", 映情学誌, 55, 10, pp.1322-1328 (2001)
- 5) 藤掛英夫, 佐藤弘人, 菊池宏, 飯野芳己, 河北真宏, 土屋謙: "撮像用液晶フィルタのフレア低減", 映情学年大, 23-1, pp.334-335 (2001)
- 6) K.Takizawa, H.Kikuchi and H.Fujikake: "Transmission Mode Spatial Light Modulator Using a $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ Crystal and Polymer-Dispersed Liquid Crystal Layers", Appl. Phys. Lett., 56, 11, pp.999-1001 (1990)
- 7) P. Sheng: "Introduction to the Elastic Continuum Theory of Liquid Crystals", RCA Rev., 35, pp.408-432 (1974)
- 8) M. Hasegawa and Y. Yamanaka: "Leakage of Light from Spacer Balls in Nematic LCDs", Proc. Int. Disp. Workshop, LCTp2-2, pp.45-48 (1998)

藤掛 英夫 1983年、東北大学工学部通信工学科卒業。1985年、同大学院修士課程修了。同年、NHKに入局。同長野放送局を経て、1988年、同放送技術研究所に勤務。以来、液晶光デバイス、液晶ディスプレイ、光情報処理の研究に従事。現在、同所表示・光デバイスに所属。正会員。

佐藤 弘人 1997年、千葉大学電気電子工学科卒業。1999年、同大学院修士課程修了。同年、NHKに入局。同放送技術研究所表示・光デバイスに勤務。以来、液晶デバイスの研究に従事。正会員。

河北 真宏 1988年、九州大学理学部物理学科卒業。1990年、同大学院修士課程修了。同年、NHKに入局。同鹿児島放送局を経て、1993年、同放送技術研究所先端素子研究部に勤務。以来、液晶デバイス、空間光変調素子、立体表示などの研究に従事。現在、同所表示・光デバイスに所属。正会員。

飯野 芳己 1983年、早稲田大学電気工学科卒業。同年、NHKに入局。同金沢放送局を経て、1987年、同放送技術研究所に勤務。以来、集積回路、光情報処理などの研究に従事。1996年から1999年まで、ATR環境適応通信研究所に出向。現在、同所表示・光デバイスに所属。正会員。

菊池 宏 1982年、豊橋技術科学大学電気電子工学科卒業。1984年、同大学院修士課程修了。同年、NHKに入局。同神戸放送局を経て、1987年、同放送技術研究所に勤務。以来、光双安定デバイス、空間光変調素子、光情報処理技術などの研究に従事。現在、同所表示・光デバイスに所属。正会員。