SURE 静岡大学学術リポジトリ
Shizuoka University REpository

電子ディスプレイにおける映像信号の不整合とその補完技術に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 静岡大学 公開日: 2015-12-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 長瀬, 章裕 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00009281

静岡大学　博士論文

電子ディスプレイにおける映像信号の不整合と

その補完技術に関する研究

2015年6月

大学院　自然科学系教育部
情報科学専攻

長瀬　章裕

目 次

第 1 章　序論 **3**
1.1　緒言 3
1.2　本研究の背景 4
1.3　映像信号の変遷 5
1.3.1　放送規格における解像度の変遷 5
1.3.2　色域の変遷 8
1.4　表示デバイスの変遷 12
1.5　映像信号規格と電子ディスプレイ性能の不整合 18
1.6　本研究の目的 22
1.7　本論文の構成 23
1.8　結言 23
参考文献 24

第 2 章　色域補完技術 **28**
2.1　緒言 28
2.2　多原色化の手法による電子ディスプレイの広色域化 28
2.2.1　はじめに 28
2.2.2　MD-PTV の基本構造 29
2.2.3　フィールドシーケンシャルカラー表示 31
2.2.4　6 原色ライトエンジンの開発 33
2.2.5　測定結果 40
2.2.6　まとめ 43
2.3　原色点の色純度を高める手法を用いた広色域ディスプレイ 43
2.3.1　はじめに 43
2.3.2　レーザー TV の概要 45
2.3.3　レーザー TV の要素技術 47
2.3.4　レーザーバックライトの概要 51
2.3.5　レーザーバックライトの要素技術 52
2.3.6　試作機の開発と評価 56
2.3.7　まとめ 57
2.4　半導体レーザーのディスプレイ光源への応用 59
2.4.1　はじめに 59
2.4.2　シンチレーション 59
2.4.3　レーザーバックライトのサーマルマネージメント 62
2.4.4　まとめ 71

2.5 結言 73
参考文献 74

第 3 章 解像度補完技術 79
3.1 緒言 79
3.2 デジタル画像のスケーリング処理 79
3.3 デジタル画像のスケーリング処理における問題 81
3.4 画像の拡大縮小技術を用いた輪郭補正技術 82
3.4.1 はじめに 82
3.4.2 システムの構成と動作 83
3.4.3 輪郭の誤検出対策 87
3.4.4 ラプラシアンフィルタとの組み合わせ 96
3.4.5 まとめ 98
3.5 画素ずらし方式による画素数補正 99
3.5.1 はじめに 99
3.5.2 スムースピクチャの問題点 100
3.5.3 黒領域拡張アルゴリズム 102
3.5.4 まとめ 107
3.6 結言 107
参考文献 108

第 4 章 階調補完技術 110
4.1 緒言 110
4.2 超階調 111
4.2.1 はじめに 111
4.2.2 高ビット深度化処理 112
4.2.3 ハードウェア化と回路規模削減 118
4.2.4 まとめ 126
4.3 結言 126
参考文献 129

第 5 章 結論 131

謝辞 134

本論文に関する発表論文 135
論文 135
国際会議 135
寄稿 136
国内口頭発表 137
表彰 138

用語解説 139

第1章　序論

1.1　緒言

映像を表示させる電子ディスプレイは，TV(Television) や PC(Personal Computer) モニターは言うまでもなく，携帯電話やタブレット端末機器，車載情報表示装置，駅などに設置されている広告表示用モニターなど，もはや我々の生活に欠くことができない機器になっている．

ブラウン管 (CRT: Cathode Ray Tube) が表示デバイスの主役だった時代，デバイスの大きさが足枷となり，電子ディスプレイの設置可能な場所は限られていた．しかし，2000 年頃を境に液晶ディスプレイ (LCD: Liquid Crystal Display) やプラズマディスプレイ (PDP: Plasma Display Pane) といった，いわゆるフラットパネルディスプレイ (FPD: Flat Panel Display) が急速に普及し始めたことで，従来では考えられなかった場所にも電子ディスプレイが設置・活用されるようになってきた．さらに最近では，OLED(Organic Electro-Luminescence Diode) のフレキシブル性を利用した曲面ディスプレイや MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 技術を応用した超小型のプロジェクタなど，新しい表示デバイスが次々に開発され，電子ディスプレイの活躍の場は拡がり続けている．

電子ディスプレイは，情報掲示板等のように特定のコンテンツのみを表示させる専用映像表示装置と，TV 等のように様々なフォーマットのコンテンツを表示させることが求められる汎用映像表示装置とに分類することが出来る．

専用映像表示装置の場合，解像度や色再現範囲など表示デバイスの表示特性に合わせたコンテンツが予め用意されるため，電子ディスプレイ側は与えられた映像信号をそのまま表示させればよい．一方，汎用映像表示装置の場合，様々なフォーマットの映像信号が送られてくるため，基本的には電子ディスプレイ側で受信した映像信号を表示に適したフォーマットに変換することが必要になる．また，放送信号のように信号の帯域制限に起因してデータが間引かれていたり，ノイズが重畳されている場合もあるため，電子ディスプレイ側で映像信号の劣化を補償することも求められる．

人々が電子ディスプレイに求める性能には臨場感や忠実再現といったものがある．これら欲求を満たすには映像コンテンツの高画質化と電子ディスプレイの高画質化が共に必要になり，これまでにも多くの新しい技術が開発されてきたが，未だ満足のいくレベルは到達していない．そのため電子ディスプレイの大画面化，高精細化，高色域化，高ダイナミックレンジ (HDR: High Dynamic Range) 化等の高画質化に関する研究・開発は継続的に続けられている．また映像信号に関しても，表示デバイスや信号伝送技術の進化に呼応して，より高画質な映像コンテンツが伝送可能な，様々な高規格フォーマットが提案され続けている．

本章では，本研究の対象となる映像信号規格の変遷と電子ディスプレイの開発の変遷について述べると共に，本研究の背景と目的を明らかにする．

1.2 本研究の背景

電子ディスプレイに表示させる映像コンテンツの一つに，個人がカメラで撮影した画像がある．電子ディスプレイと同様にカメラの進化は日進月歩であり，1990 年代に普及しはじめたデジタルスチールカメラ (DSC: Digital Still Camera) の解像度は当初は高々30 万画素 (640×480 画素) 程度であった．しかし CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor) などの固体撮像素子の進化に伴い，今では 1000 万画素を越える機器が一般的になっている．当然，20 年前に撮影された画像の多くは，貴重な映像資産として電子データが残っている．つまり DSC で撮影された画像には 30 万画素程度の低解像度の画像から，1000 万画素を超える高精細な画像まで混在しているのである．

同様に，普及率が 40%を超えるようになった民生用ビデオカメラ [1] においても，普及し始めた 1990 年代は，当時の放送規格に合わせて SD(Standard Definition) 解像度が普通であったが，2004 年に SONY が世界初のデジタルハイビジョンカメラを発表 [2] して以降，1920×1080 画素の HD(High Definition) 解像度はもちろん，今では 4K(3840×2160 画素) の超高解像度ビデオカメラが一般向けに販売されている．

一方で，電子ディスプレイの雄である TV に注目すると，現在市場を流通している機器は 4K 解像度か HD 解像度のものが殆どである．しかし，家庭内では SD 解像度の TV が完全に駆逐されたわけでもない．このように，電子ディスプレイも異なる解像度のものが混在して使われている状況にある．

当然，映像コンテンツと電子ディスプレイの解像度に不整合が存在する場合は，映像コンテンツの解像度を変換して表示させる必要があり，異なる解像度の映像コンテンツや表示デバイスが市場に混在している状況において，解像度変換の必要性は高い．

また，映像信号と電子ディスプレイ間で発生する不整合は色に関しても存在する．鮮やかな花弁の色や，珊瑚礁が広がる南国のエメラルドグリーンの海の色など，自然界には極めて純度の高い色が存在する．加えて蛍光色のプラスチック製品などの人工物ではさらに鮮やかな発色を示すものもある．分光感度の高い光学センサーが搭載されているカメラで撮影された映像は高彩度の信号まで記録することが可能である．しかし蛍光体などを使い加法混色で色を再現させている多くの表示デバイスでは，蛍光体の発色性の悪さも要因となり，これら高彩度の色を再現することができない．

色に関しては映像信号の規格が問題になる場合もある．異なる電子ディスプレイ間で色を正しく再現させるために，従来の信号伝送系では標準色空間 sRGB[3] が広く使われてきた．図 1.1 は，M.R.Pointer が報告した物体色が存在する色の範囲 (Pointer's color)[4] と，sRGB の色域を CIE 1931 XYZ 座標系で比較して示した図である．実線で示す sRGB の色域と比較し，ドットで示す物体色の分布は広い．このことは高彩度の物体色の多くは sRGB に準拠した従来のディスプレイシステムでは正しく色再現できないことを示している．

sRGB の色域は，規格が制定された 1999 年当時に主流であった CRT の色再現性から決められた経緯がある．現在では，LCD など多くの表示デバイスが sRGB よりも広い色域を再現させることが表示可能であるが，例えば現在のハイビジョン放送の規格である ITU-R BT.709[5](以下, BT.709 と略する) のように，映像信号の色域が sRGB を準拠している限り，表示デバイスの色再現能力がどんなに高くても，高彩度の色を忠実に再現することが出来ないのである．

電子ディスプレイと信号源がケーブルで一対一接続が可能な場合，例えば VESA(Video

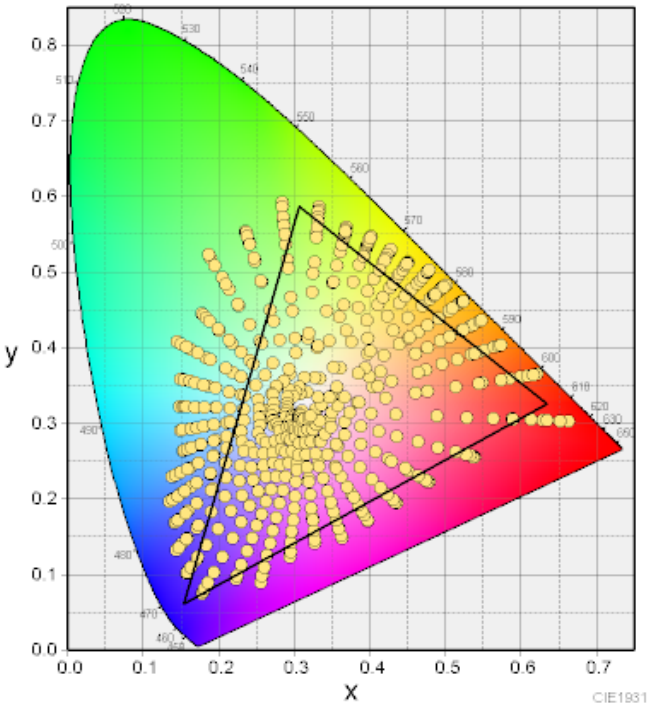


図 1.1: sRGB の色域と物体色の分布

M.R.Pointer が報告した物体色 (Pointer's color) の色度点と，sRGB の色域（実線で図示）を CIE 1931 XYZ 座標系上で比較した図である．多くの物体色が sRGB の色域外に存在する．

Electronics Standards Association) が定めた DVI(Digital Visual Interface) の規格では，電子ディスプレイ側に組み込まれている EDID(Extended Display Identification Data) を参照し，リンクアップの過程で信号源側に表示デバイスが表示可能なフォーマットを伝えることができる．そのため，信号源側で最適な映像に補正することも可能である．

しかし，放送電波などのように一対不特定多数の関係の映像配信システムでは，電子ディスプレイは常に受動的な動作を強いられ，映像信号と電子ディスプレイの性能の不整合に関しては，電子ディスプレイ側で補完することが求められる．

1.3 映像信号の変遷

1.3.1 放送規格における解像度の変遷

日本の TV の歴史は，1926 年に静岡大学工学部の前身である浜松高等工業学校助教授の高柳健次郎博士が電子式 TV 受像機を用いて「イ」の字を表示させたことに始まる [6]．そして 1953 年 2 月に日本放送協会 (NHK) が地上波アナログ TV 放送 (白黒) を開始した．図 1.2 に地上波アナログ TV 放送開始後から現在に至るまでの，日本の TV 放送規格の変遷を示す．

1960 年に開始されたカラー TV 放送では，日本では米国の National Television System Committee (NTSC) が定めた SMPTE-170M[7] の規格に従い映像が放送されてきた．1954 年に標準化された NTSC のカラー TV 規格は従来のモノクロ信号と互換が高いものであった．具体的には従来のモノクロ信号と同じ信号帯域でカラー信号を送信するために，Y 信号（輝

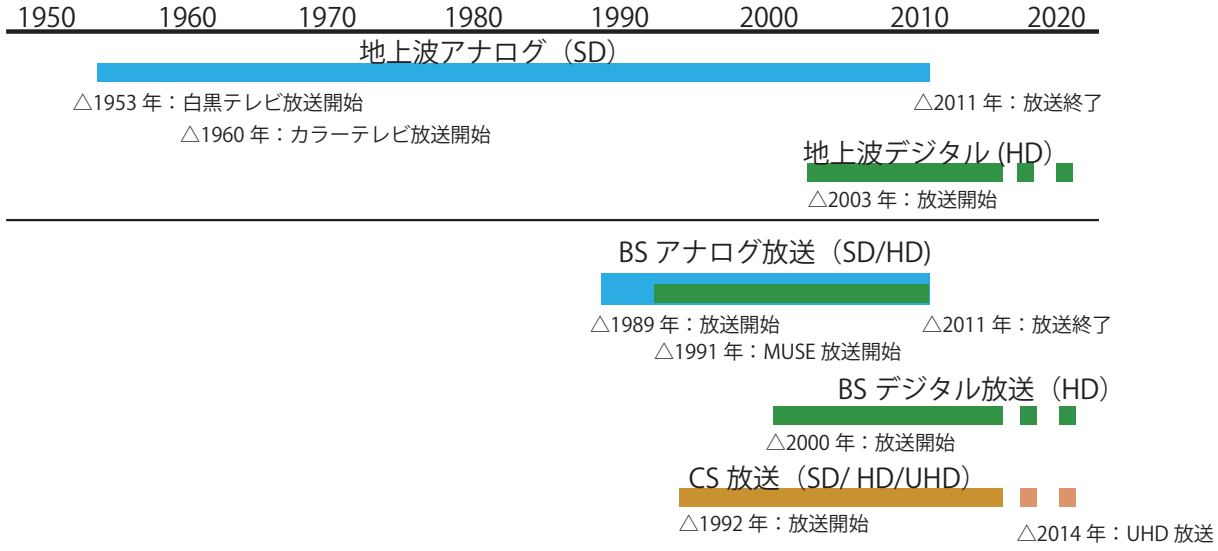


図 1.2: 日本の TV 放送規格の変遷

白黒 TV 放送開始から現在に至る日本の TV 放送規格の変遷を示した図である．近年になり解像度の異なる複数の放送信号が使われている．

度信号）に Pb/Pr 信号（色差信号）を多重化するという方法で互換性の問題を解決していた．走査線の本数やフレーム周波数は変更されていないため，モノクロ受像器では，多重化された Y 信号と Pb/Pr 信号を分離することなく Y 信号のみを使用すればよく，カラー受像器では多重化された信号から，Y 信号と Pb/Pr 信号を分離することのみが求められた．

一方で世界的に見ると，当時のカラー TV の方式は表 1.1 に示す 3 つの放送方式が混在していた [8]．それぞれの方式では走査線の本数やフレーム周波数が異なっていたが，国ごとで方式が分かれていたため，受像機側に各放送方式差に対応した汎用性が求められることはなかった．

表 1.1: カラー TV の放送方式の比較

	NTSC	PAL	SECAM
走査線数	525	625	625
フレーム数	29.97	25	25
フレーム周波数	59.94Hz	50Hz	50Hz

1989 年 BS(Broadcasting Satellite) アナログ放送が開始され，NHK は MUSE 方式 (MUltiple Sub-nyquist-sampling Encoding system)[9] のハイビジョン放送を試験的に開始した．MUSE 放送の有効走査線本数は 1035 本と NTSC の 525 本から倍増し，アスペクト比も 16:9 と従来の 4:3 から横長に変更になった．この 16:9 のワイドアスペクト比は視距離 d が画面高さ h の 3 倍の場合に水平画角が 30° になる．これは，人間の好む画角を評価した結果 [10] と，映画との互換性を考慮して決められた値である．

MUSE デコード回路搭載のハイビジョン受像機が開発されると，新旧異なる方式の放送信号と，その信号に対応した異なる画面形状の受像機が混在することになった．当然，アスペクト比 4:3 で送信されてくる従来の NTSC 放送を，アスペクト比 16:9 のハイビジョン受像機

でも違和感なく表示させることが課題になった．また，既存の NTSC 用受像機に，解像度の異なる MUSE 放送をダウンコンバートして表示させるということも課題になった [11].

そこで 16:9 のワイドアスペクト比の映像を従来の 4:3 のアスペクト比の表示デバイスに表示させるためのレターボックス表示 [12] や，4:3 のアスペクト比の画像を 16:9 のワイドアスペクト比の表示デバイスに全画面表示させるための，水平パノラマ変換といった種々の表示方法が検討されてきた．

2000 年には BS デジタルの本放送が開始された．さらに 2003 年からは地上デジタル TV 放送開始が東京，名古屋，大阪の都市圏で開始された．日本の放送規格は電波産業会 (ARIB: Association of Radio Industries and Businesses) が制定した標準規格に従う．表 1.2 に ARIB の高精細度テレビジョン放送標準規格 [13] の主要項目を示す．ここで，1035 システムは MUSE 放送の規格であり，デジタル放送は国際電気通信連合 (ITU: International Telecommunication Union) によって制定された BT.709[5] に準拠した 1080 システムが採用されている．

表 1.2: ARIB 1126/60 高精細度テレビジョン方式スタジオ規格（抜粋）

	1035 システム	1080 システム
走査線数	1125	
有効走査線数	1035	1080
インタレース比	2:1	
アスペクト比	16:9	
フィールド周波数	60/59.94	
ライン当たりのサンプル数 (R,G,B,Y)	1920	

放送信号のデジタル化は，既存のアナログ放送周波数帯を，需要が拡大している移動体通信分野に開放するという国策的要素が大きいが，デジタル放送はノイズ耐性が強く，また LCD や PDP といったマトリクス型の表示デバイスとの親和性が高いこともあり，従来のアナログ放送と比較して鮮明な映像を表示させることを可能にした．一方で，サンプリング処理によってデジタル化してある映像信号では，解像度を変更する場合には欠落している位相データを推定補間する必要がある．そのため，低解像度コンテンツを高解像度のマトリクス型表示デバイスで表示させる場合，解像度変換の際に発生する周波数特性の劣化に起因する画像のぼやけが問題になった．

ムーアの法則 (Moore's Law)[14] が示すように，半導体製造プロセスは年々微細化され，LSI(Large Scale Integration) の高集積化が進んだ現在では，フレームメモリも比較的安価に用いることが可能になってきた．そのため，超解像 [15] など計算量の多い複雑な処理も TV など一部の電子ディスプレイに実装されるようになった．しかし価格競争の厳しい小型の電子ディスプレイなどでは，未だに小さなロジック，少ないメモリ容量で画像鮮鋭度を落とすことなく解像度を変換させることが求められる．

2011 年，地上波アナログ放送および BS アナログ放送が停波され，デジタル放送への完全移行が完了したのは記憶に新しい．しかし既に CS(Communication satellite) 放送では，2014 年から 4K UHDTV(Ultra High Definition Television) の試験放送が開始されている．

当然，電子ディスプレイメーカは既に高付加価値が期待できる 4K の高解像度液晶ディスプレイの開発に力を入れており，4K 放送デコーダ未搭載の 4K 高解像度 TV といった風変わりな製品も販売されている．国内では 2011 年に SD 解像度の放送は終了しているとはいえ，

家庭内には DVD(Digital Versatile Disk) や古いゲーム機など，SD 解像度の映像コンテンツが多く残っている．一方で放送信号は HD から 4K へと高解像度化が進行しており，多種多様な映像信号フォーマットが混在する状況に陥っている．また追い打ちを掛けるかのように 2018 年には更に高解像度の 8K(7680×4320) UHDTV の放送も総務省主体で計画されている．

映像に高臨場感を求める上で解像度は重要な要素の一つである以上，表示デバイスの高解像度化は今後も進むであろう．しかし，放送インフラを更新するには莫大なコストがかかるため，表示デバイスのように短期間で高解像度に対応するのは難しい．また一般家庭には旧規格で記録された画像コンテンツが貴重な財産として多く残存するような状況において，映像信号と電子ディスプレイの解像度の不整合が完全に解消されることはなく，解像度補完の技術は必要とされ続ける．

1.3.2 色域の変遷

カラーマネージメント

電子ディスプレイに求められる性能の一つに，自然界にあるすべての色を忠実に再現させることがある．

加法混色で発色させる電子ディスプレイでは，再現可能な色域は光源に使われる発光デバイスの原色数とその色純度によって決まる．また，表示可能な色域内の色を忠実に再現させるためには，カラーマネージメントの概念が重要になる．

例えば，ICC(International Color Consortium) が提案するカラーマネージメントの技術 [16] では，電子ディスプレイに表示される色の三刺激値 (X, Y, Z) は，電子ディスプレイの基準白色と，原色の色度座標から定義される 3×3 色変換マトリクスによって，入力信号の三刺激値 (R, G, B) から変換される．

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}^{\frac{1}{\gamma}} \tag{1.1}$$

ここで γ は表示デバイスのガンマ値，k は比例定数である．

表示デバイスと同様にカメラの撮像素子の光電効果にも非線形性があり，例えば $\gamma = 0.7$ 程度である [17]．TV の放送信号規格では表示デバイスのガンマ特性が 2.2 であると仮定している．そのためカメラ光電変換では，出力信号電圧 V はカメラの入力光 L $(0 \leq L \leq 1)$ に対して $1/2.2 \cong 0.45$ の逆補正が掛けられる [5]．

$$\begin{cases} V = 1.099L^{0.45} - 0.099 & \text{, when} \quad 1 \geq L \geq 0.018 \\ V = 4.500L & \text{, when} \quad 0.018 > L \geq 0 \end{cases} \tag{1.2}$$

しかし実際の表示デバイスのガンマ特性はデバイスごとに異なり，また条件によっても変化する場合がある．例えば一般的な CRT では γ=2.6 から 3.0 程度である [17]．但し吉田らは，普及型の CRT では背景の信号レベルが変化するとガンマ特性も変動すること，LCD のガンマ特性は CRT に近いが背景の信号レベルにより値は変動しないことを報告している [18]．

カメラで撮影された映像を電子ディスプレイで忠実に色再現させるためには，カメラから電子ディスプレイまでのシステム全体で γ=1 にする必要がある．しかし先に述べたように表

示デバイスのガンマ特性には個体差があり，その上 $\gamma > 2.2$ であるため，$\gamma = 2.2$ で逆補正されている映像信号をそのまま一般的な電子ディスプレイに表示すると，システム全体のガンマ特性は往々にして 1 を超える．結果，低階調側が圧縮された「TV ルックな画像」が画面に映し出される [19]．さらに非線形なガンマ特性は色の再現性に悪影響を及ぼし，色の忠実再現を困難にしている．

標準色空間

1990 年代後半になると，液晶など新しい表示デバイスが実用化され始め，PC モニターやデータプロジェクタなど，放送以外の映像信号を表示させる電子ディスプレイが普及し始めた．しかし，表示デバイス毎に色再現能力には差があり，図 1.3 に示すように同一の画像データを写した場合でも，表示デバイスによって色が異なって表示されてしまうという問題が発生していた．

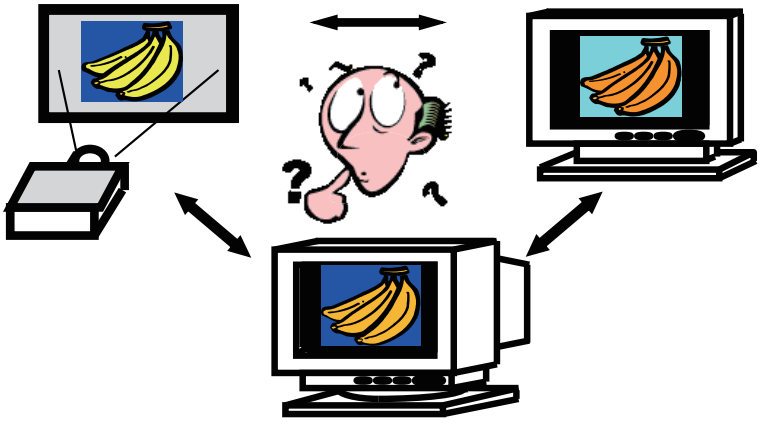


図 1.3: 表示デバイスによる色再現能力差

色の基準が無い場合，忠実な色再現ができないばかりでなく，同じ映像でも表示させるデバイスによって表示される色が異なってしまうという問題が発生する．

1999 年，色を正しく表示させたいというニーズに答え，IEC(International Electrotechnical Commission) は標準色空間 sRGB を制定した [3]．表 1.3 に sRGB の色度点を示す．sRGB は PC 等の静止画用の色域として制定されたが，現在使用されているハイビジョン放送の規格 BT.709 も原色点は sRGB と同じであり，伝送系を含めた多くのデバイスが sRGB を準拠したことで表示デバイス間での色の統一を可能にした．

表 1.3: sRGB の各原色の色度点 (CIE,1931)

	x	y
Red	0.640	0.330
Green	0.300	0.600
Blue	0.150	0.060

しかし，sRGB は当時ディスプレイデバイスの主流であった CRT の蛍光体の発色性を基

準に定められたため，例えば Mansell Color Cascade769 色の 55% 程度しか表現できていなかった．

一方，DSC の分野では sYCC[20] などの拡張色空間が早くから用いられていた [21]．また，インクジェットプリンタなども sRGB よりも広い色空間を表現できていた．つまり DSC で撮影した画像をインクジェットプリンタで印刷すると高彩度の色も忠実に表現できるのに対し，画像を sRGB 準拠の電子ディスプレイに表示させると，図 1.4 に示すように高彩度の色は sRGB 色域内の低彩度の色に変換 (クリッピング) されるため，色潰れのある，くすんだ色の画像として表示されていた．

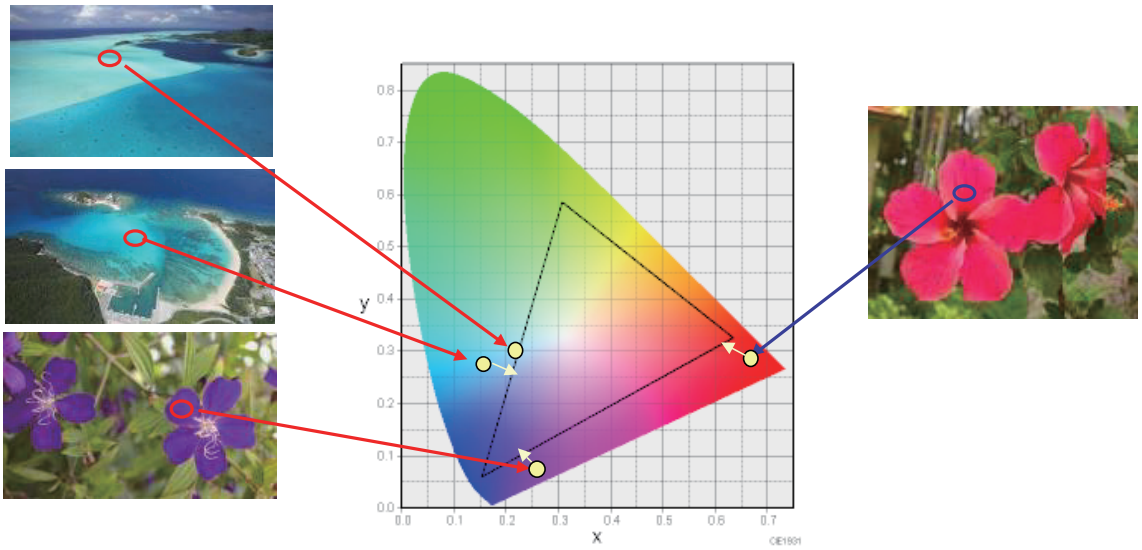


図 1.4: 電子ディスプレイにおける高彩度信号の色再現

映像信号に電子ディスプレイの色域外の色が含まれる場合，色域外の色は色域内の色に変換して表示されるため，色潰れなどが発生する．

拡張色空間

近年液晶ディスプレイなどは，sRGB より広い範囲の色を発色させることが可能である．そのため，色の忠実再現を考慮しなければ，sRGB の色域外の鮮やかな色を表現することが可能である．実際，忠実な色再現よりもユーザーに好まれる色再現が優先される TV などでは，メーカ独自のカラーマッピングにより，記憶色 [22] などを強調して表示することで印象深い映像を作れる設定が設けられることが多い．但し，DTP(DeskTop Publishing) などに用いられる PC モニターの世界では色の忠実再現は重要であり，動画を含めて sRGB を超える新たな拡張色空間を求める機運が高まっていた．

2006 年，動画を対象にした拡張色空間の規格 xvYCC が IEC から勧告された [23]．xvYCC は sYCC と同様に R,G,B の値に負値を導入したものであり，CIE 1931 XYZ 値を RGB 値に変換するには次式を用いる．

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \tag{1.3}$$

ここで，原色点を結ぶ三角形よりも外側にある色は，負値の R,G,B の値や 1 以上の R,G,B の値を用いることで表現する．

$0 \leq$ R,G,B ≤ 1 以外の信号値が導入されたことで，光電変換特性も新たな範囲に対応した拡張が必要になる．そこで，xvYCC の光電変換特性は次式に示すように，式 1.2 に示す BT.709 の光電変換特性を $L < 0$ および $1 < L$ に拡張したものになっている．

$$\begin{cases} V = -1.099 \times (-L)^{0.45} + 0.099 & \text{, when} \quad L \leq -0.018 \\ V = 4.500 \times L & \text{, when} \quad -0.018 < L < 0.018 \\ V = 1.099 \times L^{0.45} - 0.099 & \text{, when} \quad 0.018 \leq L \end{cases} \tag{1.4}$$

$$\text{where,} \quad L \in \{R, G, B\}$$

xvYCC は BT.709 の上位互換性を有すると共に sRGB の色域外の色も定義できるため，従来表現できなかった高彩度の色まで忠実に再現させることを可能にした．また，代表的なマルチメディア符号化の規格の一つである MPEG(Moving Picture Experts Group) や，広く普及している HDMI(High-Definition Multimedia Interface)[24] といった伝送系も相次いで xvYCC を準拠し始めたことで，高彩度画像を表示する環境は整いつつある．当然，電子ディスプレイの広色域化に対する期待も高まっている．

さらに 2012 年に，次世代の放送規格の一つである ITU-R BT.2020(以下，BT.2020 と略す) が勧告された [25]．BT.2020 は UHDTV 放送の規格である．4K もしくは 8K の解像度，また 120Hz までのフレーム周波数が注目されているが，表 1.4 に示すように BT.2020 では原色点が色度図のスペクトル軌跡上に配置され，従来の放送規格である BT.709 よりも格段に広色域の画像データを扱うことが可能になる．

ただし，BT.2020 の色域は従来の液晶ディスプレイなどでは再現しきれないため，新たな規格に対応する広色域表示デバイスの開発が求められている．

表 1.4: BT.2020 の各原色の色度点 (CIE,1931)

	x	y
Red	0.708	0.292
Green	0.170	0.797
Blue	0.131	0.046

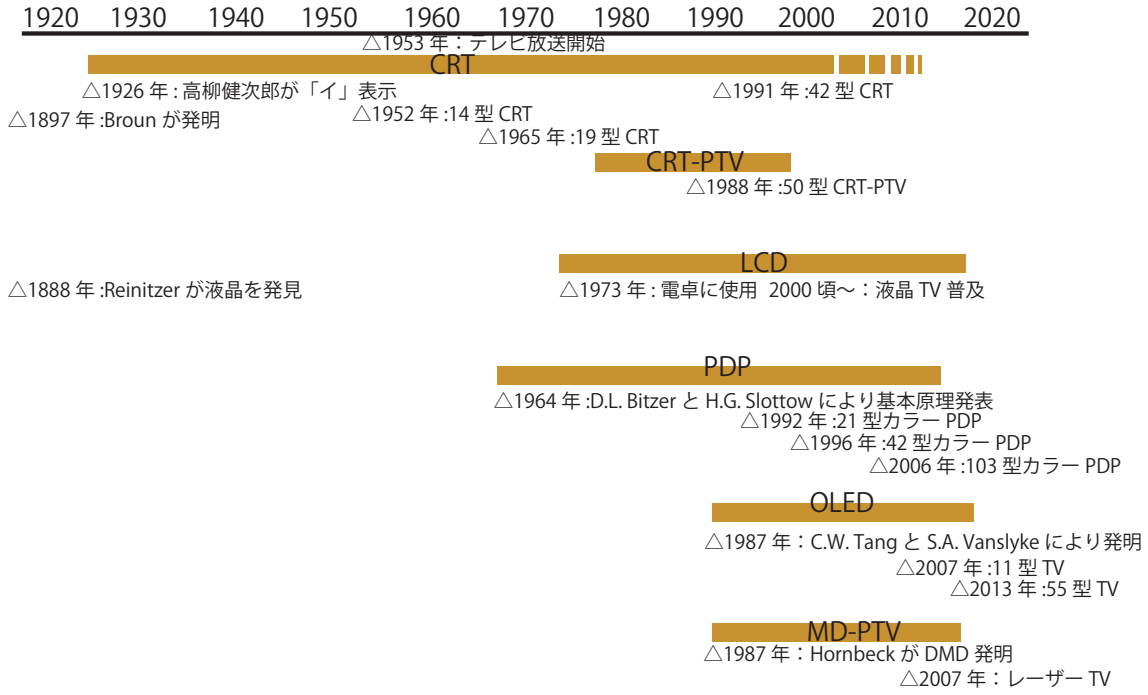


図 1.5: TV 向け表示デバイスの変遷

TV に使われてきた代表的な表示デバイスの変遷を示した図である．近年では性能の異なる，多種多様な表示デバイスが使われるようになっている．

1.4 表示デバイスの変遷

電子ディスプレイはその使用目的に応じ，多種多様な表示デバイスが開発され，用いられてきた．図 1.5 は，TV に用いられてきた代表的な表示デバイスの変遷を年表形式にまとめた図である．

ドイツの Karl Ferdinand Braun が 1897 年に開発した CRT は，20 世紀の表示デバイスの主役であったことは誰もが認めるところである．カラー化など常に進化を続けてきた CRT ではあるが，90 年代後半になると大画面化に優れた投射型のディスプレイや，薄型化でフラット画面の LCD, PDP といった新しい表示デバイスが実用化され，急速に CRT からの置き換えが進んでいった．

図 1.6 は表示デバイスを，直視型ディスプレイ向けおよび投写型ディスプレイ向けという視点で大分類し，また，自発光型のデバイスと非発光型デバイスで細分化した図である．

CRT や LCD は代表的な直視型ディスプレイ向けの表示デバイスであるが，投写型ディスプレイにも使われている．また LBS(Laser Beam Scanning) はマイクロプロジェクタ等に応用されている他，近年盛んに開発が行われている HMD (Head-mounted display) や HUD(Head-up Display) などの網膜投写型の表示デバイスにも用いられる．

自発光型の表示デバイスは，画素毎に区分された蛍光体セルを電子ビーム等を用いて励起発光させる方式のものが多く，画面の解像度は蛍光体セルの大きさ (ピッチ) によって決まる．自発光型の表示デバイスは一般的にコントラスト性に優れる．しかし蛍光体の残光特性等から広色域化には限界がある [26]．

一方，非発光型の表示デバイスは，空間光変調素子の画素ピッチで解像度が決まる．近年

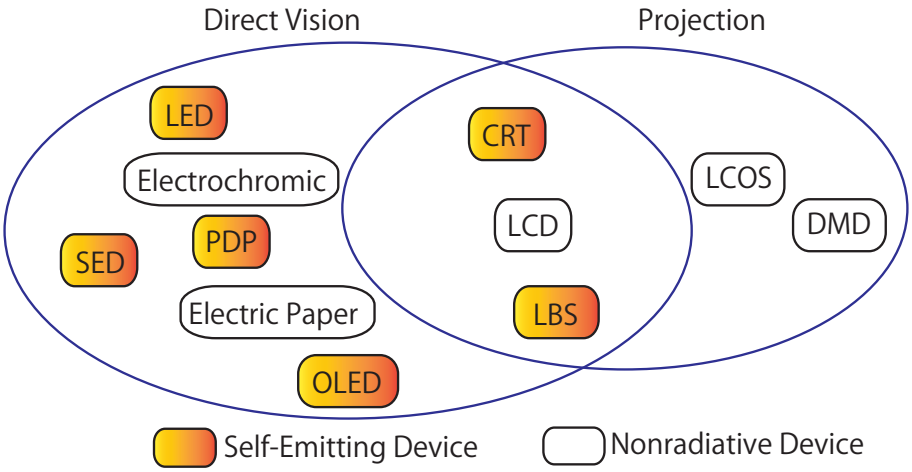


図 1.6: 表示デバイスの分類

表示デバイスを直視向けと投写向け，自発光型と非発光型の視点で分類した図である．

の映像信号の高解像度化に伴い，30 インチから 40 インチ台の画面サイズで 4K の解像度を得られるような液晶セルも開発されている [27][28].

このように表示デバイス毎に異なる長所・短所を備えており，次節以降でそれぞれの特徴を簡単に整理する．

直視型 CRT

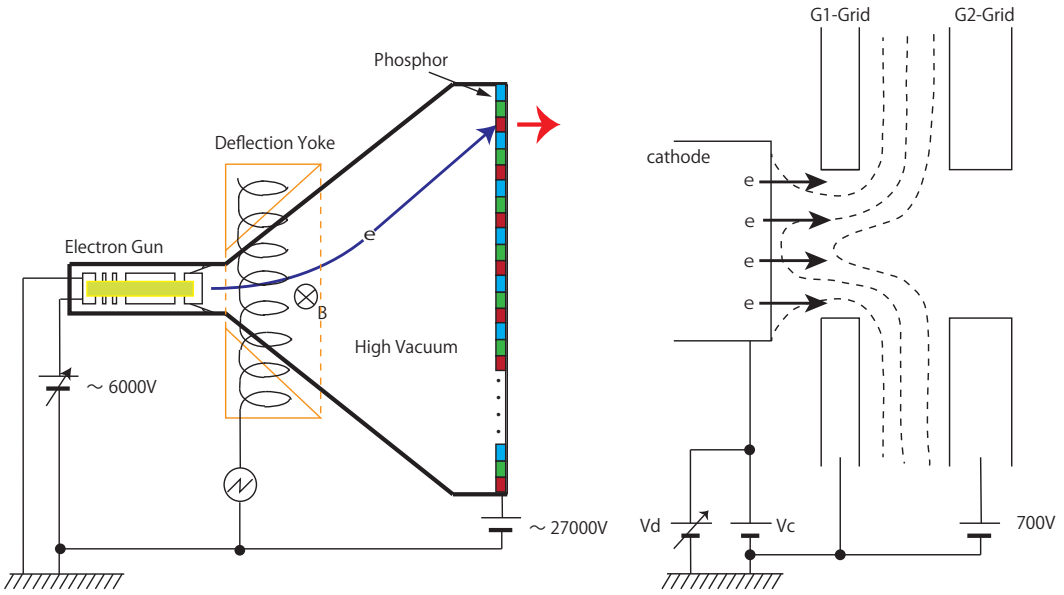
1953 年 2 月に NHK が地上波アナログ放送を開始した時，受像機は画面のアスペクト比が 4:3 の CRT であった．

CRT は開発から 100 年もの間，表示デバイスの主役であった．図 1.7 は CRT の概略構造を示す図である．図 1.7(a) は CRT の走査方法を示した図であり，電子銃より放出された電子ビームは偏向ヨークが発生する交播磁場によって偏向走査されながらスクリーンに放射される．スクリーンには蛍光体が塗着されており，電子ビームが当たることで，蛍光体が励起発光する．CRT の発色は蛍光体の発光スペクトルに依存する．カラー TV 放送の基準であった NTSC 信号の色域は，TV の開発初期に将来実用になると考えられた 3 つの蛍光体の色度に基づき決められた．しかし，多くの CRT は残光特性や画面輝度を優先に開発されたため，動画性能を犠牲にした広色域 CRT でも色域は NTSC 比 93%程度であった [29].

図 1.7(b) は電子銃の三極部構造を模式的に示した図である．カソードドライブ方式の電子銃は，カソードの電位を制御することでカソード表面の電界密度を変化させ，カソード表面から放出する電子ビームの電流量を調整する．

CRT での画像の鮮鋭度は電子ビームのフォーカス性能で決まるが，輝度を高めるために電流量を増やすと，カソード面の動作面積の拡大などに起因してフォーカス性能が低下してしまうという問題があった．そのため，高い解像度が求められるディスプレイモニター向けの CRT では，高エミッタンス化が可能なカソードの開発や低収差の電子レンズの開発が行われてきた [30][31].

CRT は自発光，走査型の表示デバイスであり，ピーク輝度が高く動画応答性も高いという



(a) CRT の断面図　　(b) 電子銃の三局部の模式図

図 1.7: CRT の概略構造

(a) は CRT の走査の原理を説明する図である．電子銃から出射された電子ビームは，偏向ヨークが形成する交播磁場によって，蛍光体が塗着されたスクリーン面上を走査させる．(b) は電子銃の三局部の模式図である．カソード，G1 電極，G2 電極で構成される三局部が形成する電界を制御することで，カソードで熱励起された電子の放出量をコントロールする．

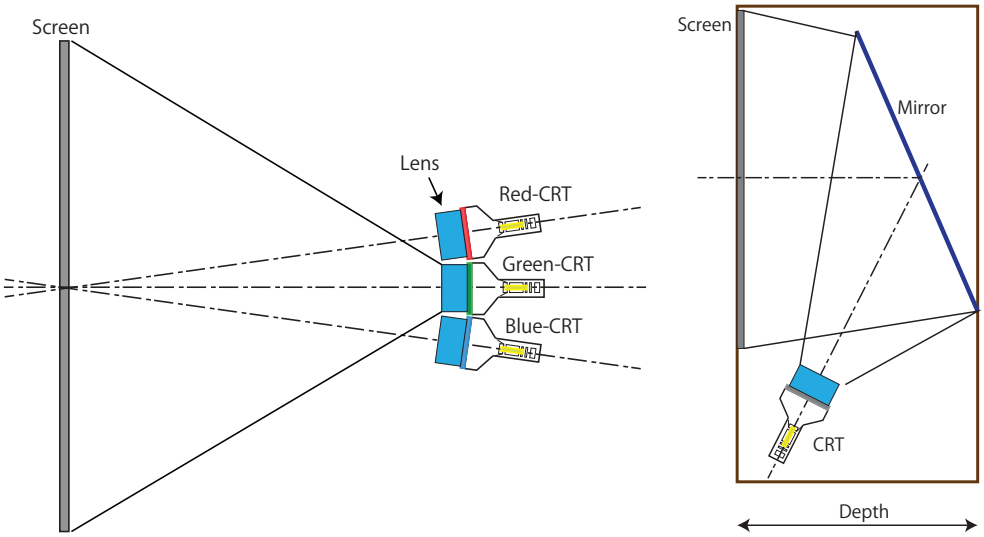
特徴を有する．しかし，電子銃から放出された高速の電子ビームを，偏向ヨークが形成する磁界で曲げるため，電子銃から蛍光面まで一定の距離が必要になる．また，内部の高真空状態を機械的に保つためには厚いガラスが必要であった．結果，例えば最大クラスの 42 型の CRT では奥行き 641mm，重量 98kg と大きくなる [32]．電子ディスプレイに必要となる周辺機器を組み込むことを考えると，さらに一回り大きくなるため，CRT は大画面化には不利と言わざるを得ない．

背面投写型ディスプレイ

大画面を比較的安価に構成できる電子ディスプレイとして投写型ディスプレイがある．投写型ディスプレイはスクリーンと投射エンジンの位置関係から前面投写型と背面投写型に分けることができる．40 型を超える大画面ディスプレイでは CRT よりも背面投写型ディスプレイの方が重量を軽くすることが可能であり [33]，1980 年代初め頃から盛んに開発が行われた [34][35]．結果，居住環境が広く大画面の TV が好まれる北米を中心に，背面投写型のディスプレイ (PTV:rear-Projection TV) が 1980 年代から普及しはじめた．

図 1.8 は CRT 投写型ディスプレイ (CRT-PTV) の概略構造を示したものであり，単色管 3 管式と呼ばれる投写管の方式 [36] を例に示してある．3 原色分用意された小型 CRT に表示させた映像を，CRT の前面に配置した投射レンズを介してスクリーンに映像を拡大投影する構造である．

構造的特徴から比較的軽量化が可能な投写型ディスプレイだが，大画面化した時には筐体



(a) 単色管 3 管式の CRT 投写型ディスプレイの基本構造

(b) 背面投写型ディスプレイの概略光学系

図 1.8: CRT-PTV の概略構造

(a) は単色管 3 管式の CRT 投写型ディスプレイの基本構造を示す図である．3 管の CRT で形成した映像は投写レンズによりスクリーンに拡大投写される．(b) は背面投写型ディスプレイの概略光学系を示す図である．

の奥行きが問題になる．そこで背面投写型の CRT-PTV では筐体の奥行きを短くするため，図 1.8(b) に示すようなミラーを用いた折り返し光学系が用いられた．加えて投射レンズの広角化等も行われた．その結果，80 年代後半には 590mm 程度であった 42 型 TV の奥行きは [37]，90 年代後半になると 400mm 程度まで薄くできるようになった [38].

大画面の CRT-PTV において十分な画面輝度を得るためには，蛍光体に照射する電流量を増す必要がある．しかし，電流量の増加はビーム径の増大を招き，解像度感が失われるという問題があった．そのため CRT-PTV は輝度やコントラストが低くぼやけた映像になりがちであり，日本の市場ではあまり受け入れられなかった．

1980 年代後半になると LCOS(Liquid Crystal On Silicon)[39][40] や DMD(Digital Micromirror Device)[41] といったマイクロディスプレイデバイスが開発され，その後 1990 年代に入り，マイクロディスプレイデバイスを投写型ディスプレイの光学エンジンに用いた MD-PTV(Micro display Device Projection TV) が開発されるようになった [42][43].

大きさが 1 インチ程度のマイクロディスプレイデバイスを空間光変調素子に用いることで，光学系の小型化が可能になった．また，マイクロディスプレイデバイスは光の利用効率が高いため，CRT-PTV の弱点であった輝度やコントラストが大幅に向上した薄型の投写型ディスプレイが作られるようになった．そして大画面化が容易であるという特徴を生かし，研究レベルではあるが 200 型の超大画面 [44] ディスプレイも開発されている．

フラットパネルディスプレイ

2000 年頃より LCD や PDP といった表示デバイスは，CRT が苦手とした薄型化を武器に，表示デバイス市場の主役に躍り出た．

液晶の発見は 1888 年に Reinitzer がコレステロールの安息香酸エステル液晶を加熱することで得られる白濁した粘稠な液体を見つけたことと言われている [45]．これは，1897 年に Thomson が電子線を発見し，Braun が CRT を発明するよりも昔である．しかし，液晶が電子ディスプレイとして実用化されたのは 1973 年に電卓の表示装置として用いられたのが最初であり，表示デバイスとしては比較的新しいものである．

液晶は 1990 年代に入り，PC モニターや TV といった電子ディスプレイの表示デバイスに用いられるようになった．当初は視野角の狭さ，動画応答性の悪さ，コントラストの低さ等画質の点で多くの問題点を有していた．しかしそれらの多くは技術革新により克服されてきている．

1964 年に Bitzer と Slottow によって基本原理が発表された PDP も 1990 年代から表示デバイスとして使われ始めるようになった．開発当初は LCD と比較してコントラストや動画応答性に優れており，大画面ディスプレイ向きと言われていたが，LCD パネル製造技術の進化および画質の向上により，2006 年頃には 40 型を超える大型 TV でも PDP-TV の出荷数は LCD-TV に負けるようになった [46]．そして，景気低迷の煽りを受けて国内大手メーカは PDP から撤退するに至り，今では LCD が直視型ディスプレイの市場を席巻している．

表 1.5 は Aoe らが 2003 年に纏めた当時の 32 型ディスプレイの環境特性を比較したものである [47]．PDP-TV や LCD-TV は同じ大きさの CRT-TV と比較し，重さについては大幅に軽量化されたが，消費電力については優位性は無かった．しかし 2005 年あたりから始まった所謂エコブームの波に乗り，光源の LED(Light Emitting Diode) 化やバックライトの間欠点灯 (ディミング駆動)，画面更新の必要がなくリーク電流も少ない IGZO-TFT の開発などを経て，LCD は大幅に低消費電力化が進んだ．

表 1.5: 32 型ディスプレイの環境特性比較

	CRT-TV	PDP-TV	LCD-TV
Product weight	59kg	28kg	21kg
Annual power consumption	229 kWh/yr	326 kWh/yr	218 kWh/yr
Rated power consumption(Normal)	204W	213W	176W
Standby power consumption	0.2W	1W	0.3W

PDP や CRT とは異なり，LCD は自発光の表示デバイスではないため，バックライトが必要になる．図 1.9 は液晶パネルのバックライト構造の一例を示したものである．当初は光源に冷陰極管 (CCFL:Cold Cathode Fluorescent Lamp) がよく使われていたが，昨今の省エネルギー化の流れもあり，現在では白色 LED を光源に用いるのが主流になっている．

バックライトはその名の通り液晶パネルの背後に配置される．CCFL や LED など分散配置された複数の発光素子からの放出光は，一旦アクリル樹脂で作られた導光板で集められ均一な白色面光源を形成する．導光板の前面には拡散板などの光学シートが配置され．光学シートの前面に配置される液晶パネルは，電気的に液晶の配向を変化させることで画素セル毎のバックライトの透過量を制御し画像を形成する．

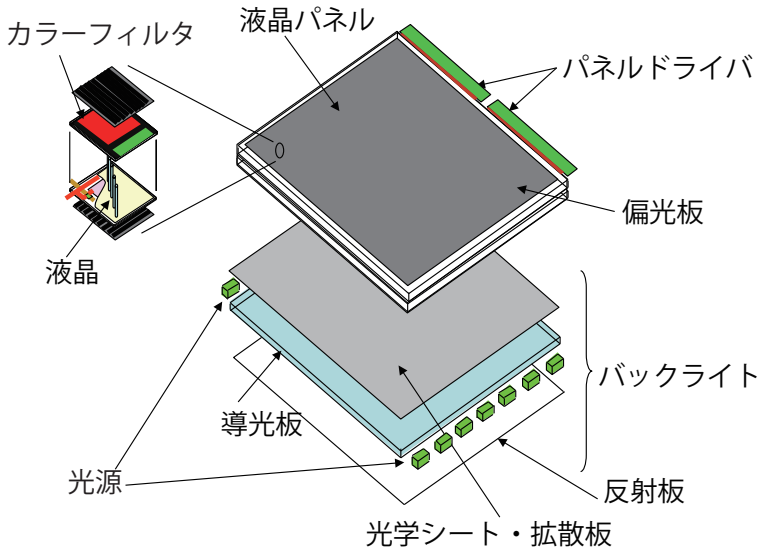


図 1.9: エッジライト方式の液晶パネルの基本構造

エッジライト方式の液晶パネルの基本構造を示した図である．バックライトユニットで作られた白色面光源により液晶パネルを光らせている．

解像度や動画応答性といった特性は液晶パネルの性能に依存するが，色再現性やダイナミックコントラストといった画質特性に関しては，バックライトの構造や制御方法が重要になる．

その他の表示デバイス

近年，表示デバイスに OLED を用いた電子ディスプレイが注目を集めている．OLED は 1987 年に Tang と Vanslky によって発明された [48] が，大画面化が難しく当初は小型機器の表示板などで使われるだけであった．しかし製造プロセスの改善により最近では 50 型を超える大型 TV も作られるようになった [49]．曲げることも可能な OLED は，薄膜トランジスタと共にフレキシブルディスプレイの材料としても注目を浴びている．

また，光源にレーザーを用いた電子ディスプレイの研究も盛んに行われている．1 素子で 5W の出力が可能な赤色半導体レーザーが開発 [50] されるなど，可視光半導体レーザーの高出力化が進む中，レーザー光の直進性を利用し小型の MEMS スキャナと組み合わせたピコプロジェクター [51] や，HMD に代表されるウェアラブルディスプレイなど，新しい分野への応用が模索されている．

1.5 映像信号規格と電子ディスプレイ性能の不整合

ここまで述べてきたように，近年多種多様な表示デバイスが次々と提案され，電子ディスプレイは画質の向上が図られてきた．また，電子ディスプレイの進化に呼応するように，映像信号の高解像度化，広色域化も急速に進んでいる．

映像信号の高規格化と電子ディスプレイの進化は，高画質化や高臨場感化といった方向性は同じである．しかし，それぞれの進化のタイミングは必ずしも同期していない．そのため，映像信号で定められている因子毎に程度の差こそあれ，性能の不整合が発生している．

色域の不整合

現在のメインストリームの放送信号である BT.709 の色域は，sRGB と同等であり高彩度の色信号は伝送できない．しかし多くの電子ディスプレイに用いられている LCD などの表示デバイスは，既に sRGB を超える色再現能力を有しており，現時点では色再現能力は冗長になっている．

一方, 次世代の放送規格である BT.2020 は原色点がスペクトル軌跡上に配置された広色域な放送規格になる．これは LCD などの現在の表示デバイスの色域を大きく超えるものである．このことは近い将来，現状の電子ディスプレイに BT.2020 の映像信号を表示させた場合には，表示デバイスの色再現能力が不足するため，電子ディスプレイ側で表示可能な色域まで映像信号の彩度を落として（ダウンコンバートして）表示させなくてはならないことを示している．

つまり，図 1.10 に示すように，現状の電子ディスプレイでは極めて高彩度の色情報を有する BT.2020 の映像信号で映像が送られてきても，エメラルドグリーンの海の色や，鮮やかな花の色などは表示させることが出来ないのである．そして，BT.2020 の映像信号に含まれる全ての色を忠実に再現させるには，表示デバイスの広色域化と，それに適したカラーマネージメントを組み合わせた色域補完が必要になる．

解像度の不整合

BT.709 は HD 解像度の映像信号である．しかし，既に市場を流通している TV の多くは 4K 解像度である．これはコモディティー化が進んだ TV 市場では，グローバルな競争に勝ち抜くための差別化要素として，メインストリームの映像信号で規定されている解像度以上の高解像度な表示デバイスを採用する傾向があるからである．同様にスマートフォン等の開発競争が激化している小型の電子ディスプレイでも高解像度化が急速に進んでいる．

BT.2020 の放送信号のように高解像度の，高規格な映像信号が今後普及していくと予想される一方で，一般家庭に保管されているホームビデオ等の貴重な映像資産には，SD 解像度などの低解像度のコンテンツも多い．つまり解像度の異なる多くの映像コンテンツが混在している状況において，電子ディスプレイの解像度と整合しない映像コンテンツは，映像信号を電子ディスプレイ内で解像度変換した後に表示することが必要になる．

映像信号の解像度変換方法はここで改めて紹介するまでもなく，既に多くの手法が開発され，実用化されている．しかし，電子ディスプレイに求められるリアルタイム処理を低コストで行えるような解像度変換方法（補間アルゴリズム）は，図 1.11 に示すようにしばしば鮮

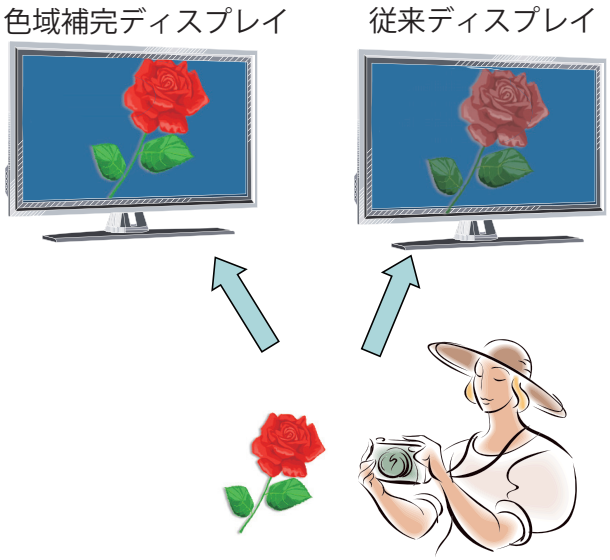


図 1.10: 色域補完の効果

既存の電子ディスプレイでは忠実に表示出来ない色も，色域補完により忠実に色再現することが可能になる．

鋭感の低下を伴う．つまり，最新の高解像度，高精細の表示デバイスを用意しても，解像度が不足している映像信号を拡大して表示させた途端，期待する画質は得られなくなる．

そのため，解像度の不整合を解消するためには，解像度変換に伴う鮮鋭度の改善技術を含んだ解像度補完技術が必要になる．

階調数の不整合

デジタル映像信号では量子化数（階調数）も重要な高画質パラメータの一つである．激化する電子ディスプレイのスペック競争も相まって，近年急速に進む電子ディスプレイの高輝度化は，図 1.12 に示すように，1digit あたりの輝度変化量を増大させ，偽輪郭を視認させる原因になっている．そのため HDR ディスプレイにおいても滑らかな階調変化が得られるように，10bit 以上の階調数を有する表示デバイスも開発され，一部の電子ディスプレイで採用され始めている．

しかし，BT.709 などの従来の映像信号の多くは 8bit/ch. のビット深度である．例え 10bit 以上の階調数を有する HDR ディスプレイであっても，既存の 8bit 以下の低階調数映像信号をそのまま表示させると，図 1.13 にイメージを示すように，緩やかな階調変化を有する領域で偽輪郭が視認されることになる．

BT.2020 では量子化数が最大 12bit の信号まで扱えるようになるため，多くの HDR ディスプレイで偽輪郭発生の低減が期待されるが，映像資産として残る低階調の映像信号を表示させるような場合は勿論のこと，符号化誤差や複雑化が進む各種画像処理での演算誤差に起因する階調とびなどが原因となり，偽輪郭は視認され続ける可能性が高い．

そこで，映像信号の階調数を伸張させると共に，演算誤差等が原因として発生する階調とびなどのアーティファクトを低減させることが可能な階調補完技術が重要になる．

(a) 期待値画像　(b) バイキュービック補間　(c) ニアレストネイバー補間

図 1.11: 解像度変換の弊害

解像度変換による画像ぼやけを示す図である．(b) と (c) はそれぞれ期待値画像の解像度を 2/3 に落とした後，それぞれの補間手法で拡大処理した結果である．

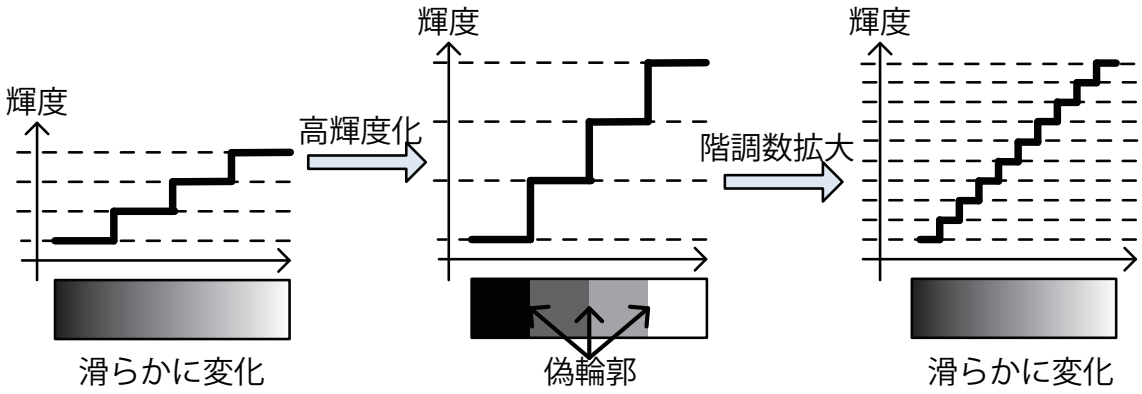


図 1.12: 偽輪郭の発生原理と階調数補完の必要性

従来の低階調映像信号を HDR ディスプレイに表示させると，1 階調あたりの輝度変化量が大きくなってしまい偽輪郭が視認される場合がある．そのため HDR ディスプレイでは階調数補完が必要になる．

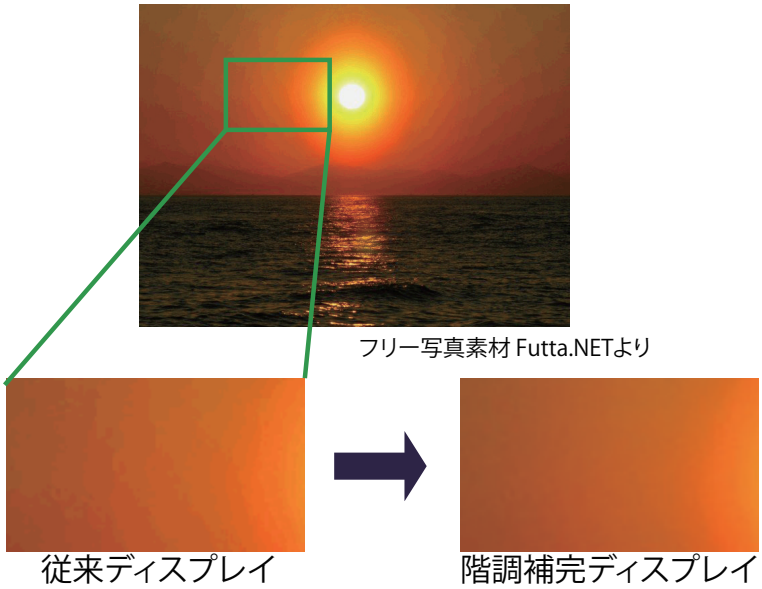


図 1.13: 階調数補完の効果

従来の HDR ディスプレイでは，映像によっては偽輪郭が視認される場合があるが，階調数補完により画質は改善される．

フレームレートの不整合

映像信号の重要な因子にフレームレートがある．映像信号の伝送帯域は 1 フレームあたりの画素数とフレーム周波数に大きく依存するため，放送信号などでは表 1.1 や表 1.2 に示すように，フリッカが問題にならないために最低限必要とされる 60Hz 程度のフレーム周波数に定められていた．

2000 年ごろから普及し始めた FPD では，ホールド発光型ディスプレイのデメリットである動画ぼやけが問題となり始めた [52]．特に液晶の中間調の応答速度がフレーム周波数よりも遅いという問題があり，オーバードライブによる不整合解消の技術開発が盛んに行われた [53][54]．

OCB(Optically Compensated Bend) 等の応答速度の速い液晶が実用化されると，より動画表示性能を向上させるために，信号処理によってフレーム間の補間画像を生成し，入力する映像信号よりも高いフレームレートで画像を表示させるフレームレート変換技術が開発されるようになった [55]．結果として，フレームレートに関しては既に電子ディスプレイの性能が映像信号の規格を超えている．

BT.2020 ではフレームレートが 120fps まで対応する．しかし既に実用化されているフレームレート変換技術によって，多くの表示デバイスは 120Hz 以上の駆動が可能になっており，今後更なる映像信号の高規格により不整合が解消されることが期待される．

1.6 本研究の目的

図 1.14 は高画質化に関する 4 種のパラメータ軸とし，現在のメインストリームの放送信号である BT.709 と現在の一般的な TV の特性を比較して示したものである．また図には次世代の放送規格である BT.2020 の特性も併せて示してある．

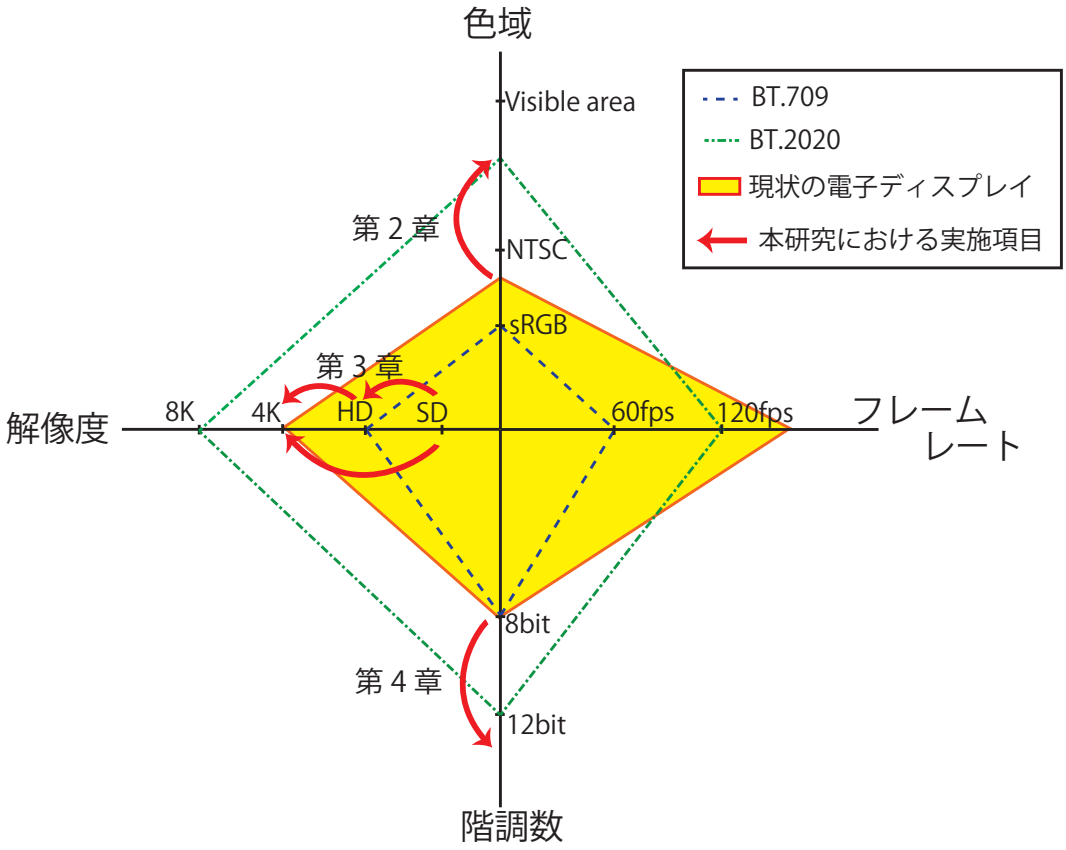


図 1.14: 映像信号と電子ディスプレイの性能の不整合

現在の代表的な映像信号規格と現状の電子ディスプレイの性能の間に存在する性能の不一致を示した図である．

映像信号規格と電子ディスプレイの性能の不整合は多く存在し，これら不整合の解消は映像表示技術の重要なテーマである．なかでも解像度変換や色変換は，映像の高画質化・高臨場感化には欠くことのできない技術であり，これらの補完技術を研究開発することは，映像表示技術の発展において意義深い．

電子ディスプレイは自動車などと同じように多くの技術分野の上に成り立っている．そのため電子ディスプレイの高画質化には，映像信号処理によるアプローチはもちろん，光学や伝熱学，さらには生理学に至る多くの知見をもとにした考察が必要になる．

そこで本研究は，高規格化が進む映像信号と電子ディスプレイの性能の間に存在する性能の不整合に注目し，特に画質に対する影響の大きい色域，解像度，階調の各不整合に起因する問題点を明確にすると共に，各不整合を解消する方法を多岐技術視点から検討することで，電子ディスプレイの性能向上を図ることを目的とする．

1.7 本論文の構成

本論文は，5 つの章から構成されている．以下に各章の概要を述べる．

第 2 章では，電子ディスプレイの色域補完技術について述べる．ここでは多原色化による広色域化手法と三原色の色純度改善による広色域化手法という異なる 2 つの手法を提案し，それぞれの効果について比較検証する．また半導体レーザーを光源に使う際の問題点とその解決方法についても示す．

第 3 章では，解像度補完技術として，信号処理による解像度変換の際の課題を示し，その問題の解決方法について提案する．また投写型ディスプレイで用いられる画素ずらしによる解像度変換の利点と課題を示し，その問題の解決方法についても併せて示す．

第 4 章では，階調補完技術について述べる．HDR 化が進む電子ディスプレイにおいて，従来の低ビット深度の映像を表示させた場合に視認される偽輪郭の問題を示すとともに，ハードウェア化を考慮した画像処理による解決方法を提案し，その効果について検証する．

最後に，第 5 章で本研究で得られた成果を総括する．

1.8 結言

本章では，本研究の対象となる映像信号規格の変遷と電子ディスプレイに用いられる表示デバイスの変遷について述べるとともに，本研究の位置付けおよび目的を明らかにした．

CRT が表示デバイスの主役であった時代，高画質な電子ディスプレイを量産するには，ある種の職人的感と経験が必要であった．しかし表示デバイスのデジタル化が進んだ結果，市場への参入障壁が低くなり，今では異業種参入も含め世界中の企業が開発に凌ぎを削る状況になっている．グローバルな競争に勝ち抜くために，いわゆるスペック競争も激化しており，メインストリームの映像信号規格以上の表示性能を謳う電子ディスプレイが市場に多く出回っている．

標準化が必要な映像信号の規格と，メーカ各社の思惑でスペックが決められる表示デバイスの性能の不整合は今後も当面解消されることはない．つまり本研究の目的である，高規格化が進む映像信号規格に対する電子ディスプレイの性能補完は，今後も求め続けられる技術と言える．

参考文献

[1] 総務省統計局，“第六十三回 日本統計年鑑 平成 26 年,” 2014.

[2] http://www.sony.co.jp/CorporateCruise/Press/200409/090907/.

[3] “IEC 61966-2-1 ed1.0, Multimedia systems and equipment – colour measurement and management – part 2-1: Colour management – default RGB colour space – sRGB,” Oct. 1999.

[4] M.R.Pointer, “The gamut of real surface colours,” Color Research and Applicaton, vol.5, no.3, pp.144–155, 1980.

[5] “ITU-R BT.709, Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange,” April 2002.

[6] 高柳健次郎，“Television の実験,” 電気学会雑誌，vol.48，no.482，pp.932–942，Sept. 1928.

[7] “SMPTE 170M–2004, Composite analog video signal – NTSC for studio applications,” Jan. 2004.

[8] “ITU-R BT.470-6, Conventional Television System,” Nov. 1998.

[9] “ITU-R BO.786, MUSE system for HDTV broadcasting-satellite services,” March 1992.

[10] T. Hatada, H. Sakata, and H. Kusaka, “Psychophysical analysis of the ”sensation of reareal” induced by a voisual wide-field display,” SMPTE Journal, vol.89, pp.560–569, Aug. 1980.

[11] 山口孝一，金沢　勝，“16:9 ワイドアスペクト受像機,” テレビジョン学会誌，vol.46，no.4，pp.395–399，April 1992.

[12] 影山昌広，石倉和夫，吉木　宏，吹抜敬彦，“レターボックス方式における垂直周波数特性向上の一手法,” テレビジョン学会技術報告，vol.13，no.41，pp.37–42，Sept. 1989.

[13] “1125/60 高精細度テレビジョン方式スタジオ規格 BTA S-001C,” July 2009.

[14] G.E. Moore, “Cramming more components onto integrated circuits,” Electronics, vol.38, no.8, pp.114–117, April 1965.

[15] 奥富正敏，田中正行，竹島秀則，松本信幸，“画像超解像処理技術の最新動向,” 電子情報通信学会誌，vol.93，no.8，pp.693–698，Aug. 2010.

[16] “Specification ICC.1:2010, Image technology colour management– architecture, profile format, and data structure,” Nov. 2010.

[17] 熊田純二，金澤　勝，“テレビジョンの色再現,” 映像情報メディア学会誌，vol.55，no.10，pp.1233–1237，Oct. 2001.

[18] 吉田育弘，山本洋一，“明環境下に設置した液晶ディスプレイのカラーマネージメント,” 電子情報通信学会論文誌 A，vol.J85-A，no.7，pp.793–805，July 2002.

[19] 金澤　勝，“映像システムに於ける「色の見え」の再現の検討–CIECAM のテレビジョンへの応用について–,” 電子情報通信学会技術研究報告. EID, 電子ディスプレイ，vol.107, no.247，pp.17–20，Oct. 2007.

[20] “IEC 61966-2-1 amendment1 ed1.0, Multimedia systems and equipment — colour measurement and management — part 2-1: Colour management — default RGB colour space -sRGB,” Jan. 2003.

[21] “CP-3451C ディジタルスチルカメラ用画像ファイルフォーマット規格 Exif 2.3,” May 2013.

[22] 槇　究，増田倫子，“記憶された色の時間的変化,” 日本色彩学会誌，vol.24，no.4，pp.232–243，Dec. 2000.

[23] “IEC 61966-2-4 first edition, Multimedia systems and equipment — colour measurement and management — part 2-4: Colour management — extended-gamut YCC colour space for video applications — xvYCC,” Jan. 2006.

[24] “High-Definition Multimedia Interface Specification Version 1.4a – Extraction of 3D Signaling Portion,” March 2010.

[25] “ITU-R BT.2020, Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange,” Aug. 2012.

[26] 玉谷正昭，“ディスプレイ用蛍光体 –CRT 用蛍光体の最近の動向–,” テレビジョン学会誌，vol.39，no.2，pp.150–157，Feb. 1985.

[27] Y. Kataoka, H. Imai, Y. Nakata, T. Daitho, T. Matsuo, N. Kimura, T. Nakano, Y. Misuno, T. Oketani, M. takahashi, M. Tsubuku, H. Miyake, T. ishitani, Y. Hirakata, J. Koyama, S. Yamazaki, J. Koezuka, and K. Okazaki, “IGZO techinology for the innovative LCD,” Proc. IDW’13, pp.12–15, Dec. 2013.

[28] K. Ono and H. Matsukawa, “High performance IPS technology suitable for high resolution LCDs,” Proc. IDW’13, pp.24–25, Dec. 2013.

[29] 渋谷圭祐，谷添秀樹，平川辰博，飯村和之，増田暁雄，野田秀夫，奥田博志，金子英之，杉浦博明，“拡張色空間対応 CRT ディスプレイモニター,” 映像情報メディア学会年次大会予稿集，pp.8–11，March 2003.

[30] 長瀬章裕，平野孝之，近藤利一，村上文昭，中西功二，“高輝度モニタ用 CRT,” 三菱電機技報，vol.76，no.11，pp.735–738，Nov. 2002.

[31] 白石哲也，藤川正洋，樋野本宣秀，山口　博，長瀬章裕，中田修平，奥田荘一郎，“高電流・低エミッタンスを実現する表面に突起を有するカソード,” 映像情報メディア学会誌，vol.59，no.3，pp.455–459，March 2005.

[32] K. Mitsuda, K. Sugawara, O. Konosu, and S. Ashizaki, “107 cm screen diagonal 16:9 color CRT for HDTV dicolor,” Display Research Conference 1991, pp.35–38, Oct. 1991.

[33] 金沢　勝，“ハイビジョン用背面投写型ディスプレイの動向,” テレビジョン学会技術報告，vol.9，no.32，pp.13–18，Nov. 1985.

[34] 久保徳司，金澤　勝，藤沢清次，“背面投写式高品位テレビ用プロジェクターの開発,” テレビジョン学会全国大会，vol.19，pp.289–290，July 1983.

[35] 田口新一郎，松村阿曽美，佐藤昭一，“高品位テレビ用投写形ディスプレイ –42 型背面投射形ディスプレイの開発–,” テレビジョン学会技術報告，vol.7，no.21，pp.53–57，Oct. 1983.

[36] 藤沢清次，友田克明，“2. ブラウン管投写形ディスプレイ,” テレビジョン学会誌，vol.38，no.8，pp.11–16，Aug. 1984.

[37] M. Ohsawa, H. Yoshikawa, M. Shiomi, T. Watanabe, S. Sakurai, K. Ando, I. Yuki, and T. Asano, “A high-resolution rear projection TV for home-use,” IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol.35, no.3, pp.325–333, Aug. 1989.

[38] T. Watanabe, N. Kabuto, K. Hirata, and K. Aoki, “Recent progress in CRT projection display,” SID Symposium Digest, vol.31, pp.306–309, May 2000.

[39] D.J. McKnight, D.G. Vass, and R.M. Sillitto, “Development of a spatial light modulator: a randomly addressed liquid-crystal-over-nMOS array,” Applied Optics, vol.28, no.22, pp.4757–4762, Dec. 1989.

[40] K.M. Johnson, D.J. McKnight, and T. Underwood, “Smart spatial light modulatiors using liquid crystal on silicon,” IEEE Journal of quantum electronics, vol.29, no.2, pp.699–714, Feb. 1993.

[41] L.J. Hornbeck, “Deformable-mirror spatial light modulators,” Spatial Light Modulators and Applications III, SPIE Critical Review, vol.1150, pp.86–102, Aug. 1989.

[42] P.F.V. Kessel, L.J. Hornbeck, R.E. Meier, and M.R. Douglass, “A MEMS-based projection display,” Proceedings of the IEEE, vol.86, no.8, pp.1687–1704, Aug. 1998.

[43] S. Hirota, M. Tsumura, H. Nakagawa, K. Shibata, and I. Takemoto, “A silicon-chip-based light valve with reflective twisted-nematic mode for high-deginition projectors,” Journal of the Society for Information Display, vol.8, no.4, pp.305–311, April 2000.

[44] N. Inoue, M. kawakita, and K. Yamamoto, “200-inch glasses-free 3D display and electronic holography being developed at NICT,” Laser and Electro-Optics Pacific Rim(CREO-PR), 2013 Conference on, pp.1–2, June 2013.

[45] 杉浦　孝，“液晶のエレクトロニクスへの応用,” 化学教育，vol.32，no.5，pp.418–421，Oct. 1984.

[46] V.B. Kreng and H.T. Wang, “The competition and equilibrium analysis of LCD TV and PDP TV,” Technological Forecasting & Social Change, vol.78, no.3, pp.448–457, March 2011.

[47] T. Aoe, T. Michiyasu, Y. Matuoka, and N. Shikata, “Case study for calculation of factor X (eco-efficiency) – comparing CRT TV, PDP TV and LCD TV –,” Proceedings of EcoDesign2003: Third International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, pp.650–655, IEEE, Oct. 2003.

[48] C.W. Tang and S.A. Vanslyky, “Organic elecrtoluminescent diodes,” Applied Physics Letters, vol.51, no.12, pp.913–915, Sept. 1987.

[49] W.J. Nan, J.S. Shim, H.J. Shin, J.M. Kim, W.S. Ha, K.H. Park, H.G. Kim, B.S. Kim, C.H. Oh, B.C. Ahn, B.C. Kin, and S.Y. Cha, “55-inch OLED TV using InGaZnO TFTs with WRGB pixel desigin,” SID Symposium Digest, vol.44, pp.243–246, June 2013.

[50] K. Kuramoto, T. Nishida, S. Abe, M. Miyashita, M. Mori, and T. Yagi, “High power AlGaInP red laser diode for display applications,” Proc. IDW’14, pp.1064–1067, Dec. 2014.

[51] W.O. Davis, R. Sprague, and J. Miller, “MEMS-based pico projector display,” 2008 IEEE/LEOS International conference on optical MEMS and nanophotonics, pp.31–32, Aug. 2008.

[52] T. Kurita, “Moving picture quality improvement for hold-type AM-LCDs,” SID Symposium Digest, vol.32, pp.986–989, June 2001.

[53] 奥村治彦，“ハイビジョン液晶テレビ市場を切り開くオーバードライブ技術の現状とその課題,” 電子情報通信学会論文誌 C，vol.J88-C，no.7，pp.474–483，July 2005.

[54] 長瀬章裕，奥田悟崇，染谷　潤，中西邦文，杉浦博明，“1/6 圧縮フィードフォワード駆動法の開発,” 映像情報メディア学会誌，vol.63，no.7，pp.984–990，July 2009.

[55] 荻野昌宏，高野橋健太，福田伸宏，中嶋満雄，浜田宏一，“動き補償型フレームレート変換における視覚特性を考慮した映像処理技術,” 情報処理学会論文誌 コンシューマ・デバイス & システム，vol.4，no.3，pp.21–31，Oct. 2014.

第2章　色域補完技術

2.1　緒言

ディスプレイの性能を評価する指標の一つに色域がある．CRT が表示デバイスの主流であった時代，表示可能な色域は CRT に用いられていた蛍光体の発色性によって制限されていた．1999 年に IEC が制定した標準色空間 sRGB は，当時の CRT の色域を基準に決められており，sRGB を準拠した映像信号ならば，CRT を用いることで映像信号の色を余すことなく表示させることが可能であった．

2000 年頃から普及し始めた LCD や PDP といった，いわゆる FPD は画像の精細感を飛躍的に向上させた．しかし色域に関しては CRT と大差はなく，sRGB で定める色域よりも若干広い程度であった．

2006 年，IEC により動画を対象とした拡張色空間規格 xvYCC[1] が勧告されたことで，従来の sRGB 色空間では表現できなかった彩度の高い色までを定義することが可能になった．以前より高彩度の色を扱えていた撮像系に加え，MPEG や HDMI といった信号伝送系の標準規格が相次いで xvYCC を準拠し始めたことで，従来の表示デバイスの色域のままでは，映像信号に含まれる高彩度の色を再現できない状況が生じ始めている．

2012 年に次世代の放送規格の一つである BT.2020 が勧告された [2]．BT.2020 は UHDTV で採用される放送規格であり，原色点が色度図のスペクトル軌跡上に配置されている．つまり，従来の放送規格である BT.709(sRGB の色域と同じ) よりも格段に広色域の画像データを扱うことが可能になる．近い将来にメインストリームになるであろう広色域映像信号に対応した電子ディスプレイを得るためには，現状の表示デバイスの色域を大幅に拡張しなくてはならない．

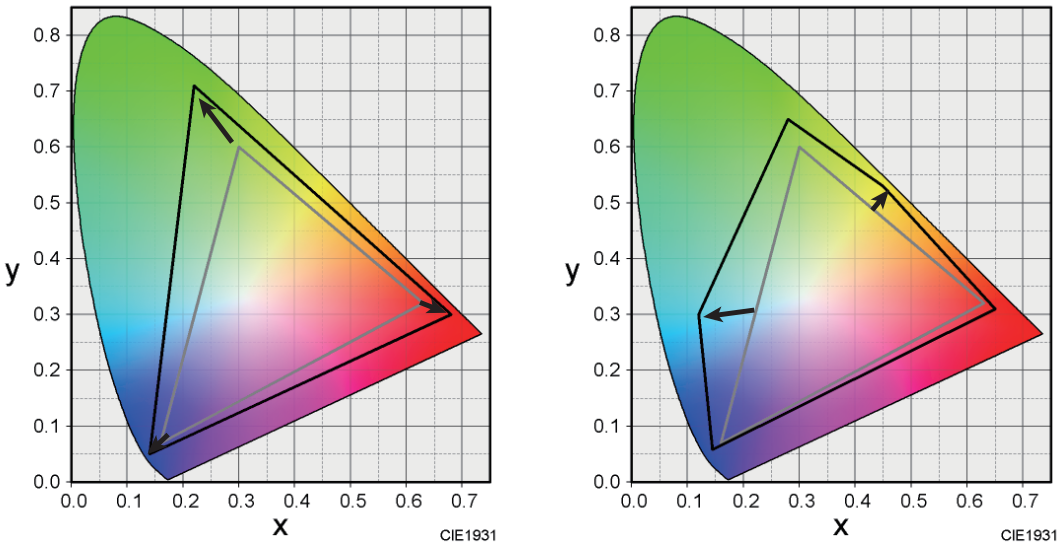
加法混色で色再現を行う電子ディスプレイにおいて，色域を広げる方法は図 2.1 に示すように各原色の色純度を高める方法と多原色化の 2 手法が考えられる．本章では各手法を用いた電子ディスプレイの色域拡張方法について具体的に検討を行う．

また，色純度の高い光源素子として半導体レーザーが注目を集めているが，実際に電子ディスプレイ用光源として用いるには課題が多い．今回，半導体レーザーを使う上で特に問題になる過干渉ノイズ対策と温度管理についても検討を行う．

2.2　多原色化の手法による電子ディスプレイの広色域化

2.2.1　はじめに

赤，青，緑の 3 原色の代わりに 4 色以上の原色（多原色）を用いて電子ディスプレイの色再現性を向上させる試みは古くから行われてきた．1994 年に NHK が最初に発表した 4 原色ディスプレイは，3 原色 LCD にシアンを 1 色追加したものであった [3]．2006 年には 6 原色



(a) 3 原色方式　　(b) 多原色方式

図 2.1: 電子ディスプレイ広色域化手法

電子ディスプレイを広色域化するためには，(a)3 原色の色純度を向上させる方法（3 原色方式）と，(b) 多原色化（多原色方式）の 2 つの手法がある．

の LED をバックライトを用いた液晶モニターも開発されており [4]，2010 年に発表された黄色を 1 色追加した 4 原色液晶 TV[5] は市場にも投入されている．その他にも LCD の多原色化については多くの研究が行われてきた [6][7][8].

一方，FPD と比較して大画面化が容易であり，大画面が好まれる北米の TV 市場で高い支持を得てきた PTV も，映像信号の広色域化に伴い色再現能力を向上させる必要が出てきた．

そこで本節では，空間光変調素子にマイクロディスプレイを用いた背面投写型 TV である MD-PTV(Micro Display Projection Television) の広色域化について詳しく述べる．

2.2.2 MD-PTV の基本構造

投写型の電子ディスプレイには，前方投写型と背面投写型の 2 種類があるが，本節で扱う PTV は，リアプロとも呼ばれている背面投写型の電子ディスプレイである．特に画像形成のための空間光変調素子にマイクロディスプレイを用いている PTV は MD-PTV とも呼ばれる．

図 2.2 に MD-PTV の基本光学系の一例を示す．使用される代表的な光学素子は光源，カラーホイール，空間光変調素子，投射レンズである．ここでは空間光変調素子に単板の DMD を用いた例を示している．

光源にはショートアークの超高圧水銀灯 (UHP: Ultra High Performance lamp) が広く用いられる [9]．UHP ランプは水銀蒸気中のアーク放電の発光を利用する光源である．ガス圧の低い低圧水銀灯は鋭いピークスペクトルを有するが，ガス圧力を高くした UHP ランプはなだらかな分光特性が得られる．

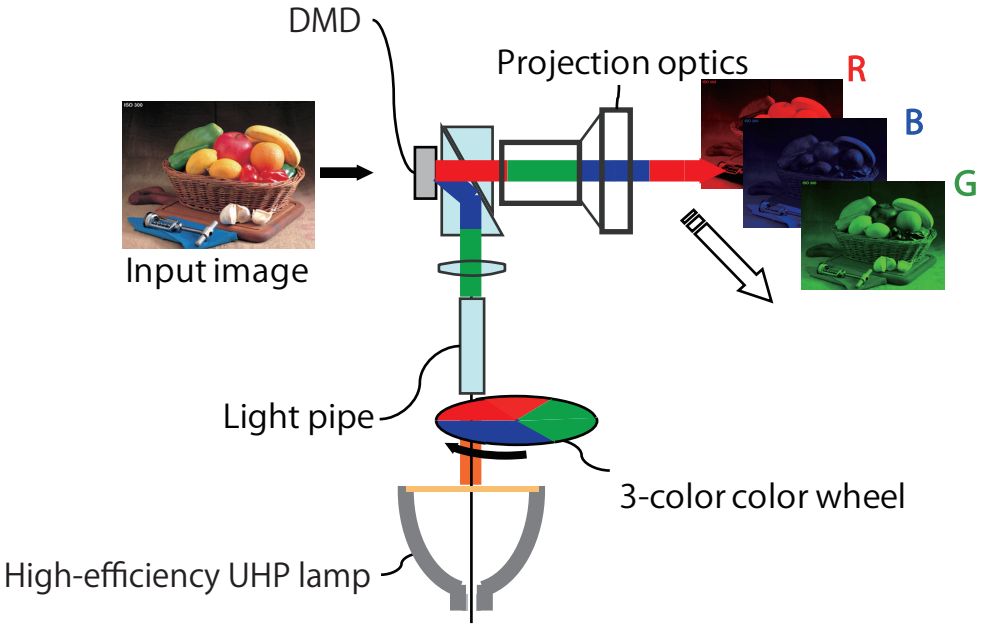


図 2.2: 3 原色 MD-PTV の基本光学系

空間光変調素子に DMD を用いた MD-PTV の基本光学系を示した図である．光源から放出された光はカラーホイールで濾波された後，DMD に照射される．DMD で空間変調された光は投射レンズによりスクリーンに拡大投影される．

UHP ランプから放出された光は，3 原色のカラーフィルタを備えた 3 色カラーホイールで継時的に濾波される．図 2.3 に UHP ランプの分光放射率および 3 色カラーホイールに装着される赤，緑，青のカラーフィルタの分光透過率の例を示す．

UHP ランプの分光放射率は，380nm から 490nm の波長領域と，540nm から 590nm の波長領域に大きなピークを持つ．一方，600nm より長い赤色の波長領域はブロードである．

3 色カラーホイールに装着されるカラーフィルタの分光透過特性は，UHP ランプの分光放射特性を基に設計されている．

表 2.1 にそれぞれのカラーフィルタの透過波長帯域を示す．青のカラーフィルタは 505nm より短波長側に透過波長帯を設定してあり，UHP ランプの 500nm 以下の強いスペクトルを利用している．また，緑のカラーフィルタは，480nm から 570nm の光を透過するように設計されている．480nm から 505nm の帯域は青のカラーフィルタと透過波長帯域が重複するが，UHP ランプの 480nm 付近のサブピークを活用することで輝度を得ている．さらに，赤のカラーフィルタは，600nm 以上の光を透過するように設計されており，赤色波長領域でスペクトルがブロードな UHP ランプにおいても十分な輝度が得られるようになっている．

表 2.1: 3 色カラーフィルタの透過波長帯域

	Blue	Green	Red
透過波長帯	380∼505nm	480∼570nm	600∼830nm

UHP ランプのスペクトルは 580nm 付近に強めのサブピークを有するが，3 色すべてのカラーフィルタで，570nm から 600nm の波長領域の光を透過させていない．これは，仮に視

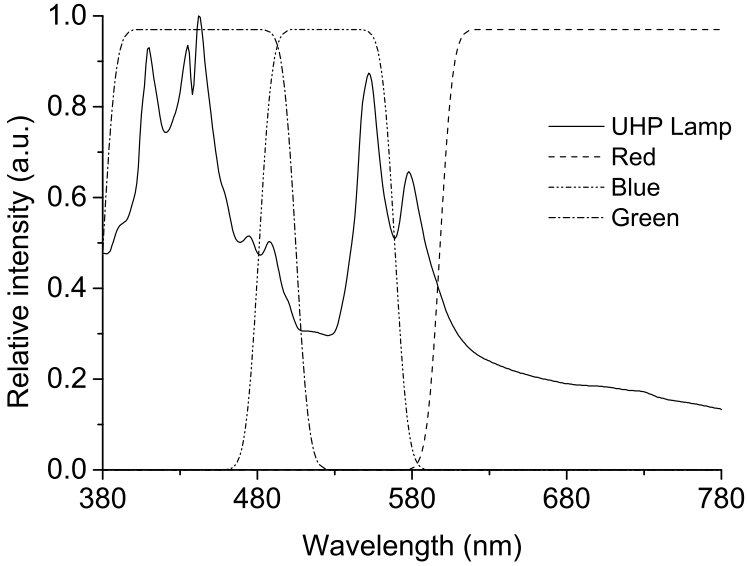


図 2.3: UHP ランプの分光放射率とカラーフィルタの分光透過率

UHP ランプの分光放射率と 3 色カラーフィルタの分光透過率を比較して示した図である．580nm のサブピークはどの色のカラーフィルタも透過させていない．

感度の高い 580nm 付近の強い光を緑や赤のフィルタで透過させた場合，緑色は黄緑色に，赤色は橙色になり，結果として色域が狭くなるからである．

3 色カラーホイールはモータで回転するようになっており，UHP ランプが出す光を継時的に濾波する．濾波された光はライトパイプで成形されたのち，空間光変調素子であるマイクロディスプレイに照射される．マイクロディスプレイの種類には高温ポリシリコン TFT(Thin Film Transistor) 液晶や LCOS などのデバイスもよく使われるが，今回は図 2.4 に示す DMD を単板で用いた．

DMD は，シリコン基板上に静電界作用によって動作するマイクロミラーを作り込んだ，いわゆる MEMS デバイスの一つであり，対角 1 インチ以下の画面サイズで，HD の画素数を有する高解像度の製品も量産されている．

光学系を単板 DMD で構成するメリットは，光を分配する必要がないため光学系が小型化できることに加え，低コスト化が可能になる点である．

DMD 上に形成されたマイクロミラーで選択的に反射 [10] されることによって空間変調された照明光は，投射光学系を介してスクリーンに背面から投写される．スクリーンはフレネルレンズとレンチキュラレンズの 2 種類で構成されており，表示したい解像度に応じてレンチキュラレンズのピッチは最適化されている [11].

2.2.3 フィールドシーケンシャルカラー表示

単板の DMD で照明光を空間変調する MD-PTV は継時加法混色型の電子ディスプレイに分類される．継時加法混色型の電子ディスプレイは，受信した 1 フレーム分の映像信号を赤，緑，青の各色成分のみの映像データで構成されるサブフィールドに分解し，それらサブフィー

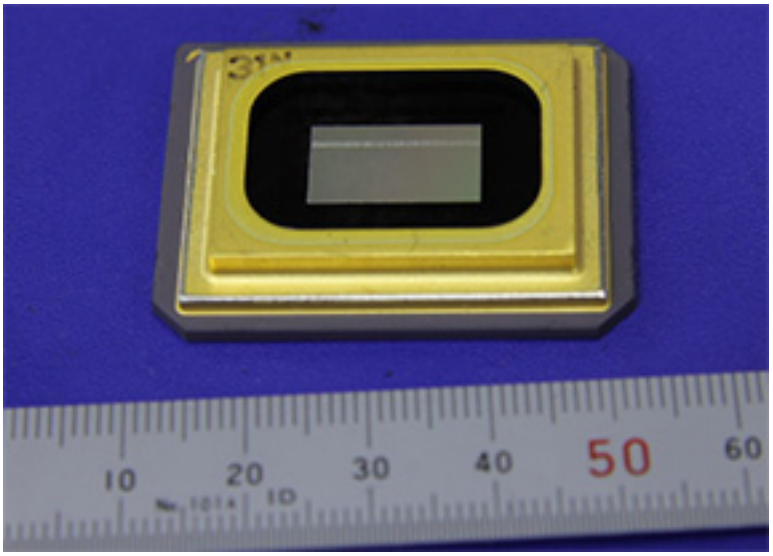


図 2.4: DMD チップ外観

MEMS デバイスの一つである DMD チップは，中央に高速で動作するマイクロミラーが画素数分配置されており，照射された照明光を空間変調する．

ルドを順次表示させていく．フィールドシーケンシャルカラー (FSC:Field Sequential Color) 表示とも呼ばれる本方式では，駆動条件によっては色割れが視認されることが知られている [12][13].

色割れに関する研究は比較的古くから行われており，例えば Arend らは，フレーム周波数 60Hz のモノクロ CRT の前面に 180Hz のサブフィールドで電気的に駆動できる液晶カラーシャッタを配置し，色割れの最小弁別閾についての評価実験を行っている [14]．また，Post らは評価実験を回帰分析することで，色割れが視認されなくなるフレーム周波数とターゲット輝度，網膜上の像の移動速さ，輝度の変調量の関係を求めている [15]．同様に森らも網膜上の像の移動速度とフレーム周波数の関係を調べ，両者が非線形の関係にあることを示すとともに，継時加法混色型のプロジェクタで色割れを視認されなくするためには少なくとも 120Hz よりも速いフレーム周波数が必要と結論づけている [12]．さらに Janssen らは空間光変調素子に LCOS を用いた MD-PTV で評価実験を行い，色割れが許容されるレベルに達するためには 150Hz 以上のフレーム周波数が必要と報告しており [16]，岡野らや Miettinen らは，衝動性眼球運動（サッケード）などの速い眼球運動が生じた場合などは，色表示周波数が 1kHz を超えていても色割れは視認されるという結果を報告している [17][18].

このように色割れは，RGB 各色の 1 周期表示期間である色表示周波数や，網膜上の像の移動速さ，画面輝度，観測者の視力などに依存していることが分かっており，FSC 表示を行うためにはサブフィールドの表示周波数を高くすることが求められる．

表示周波数を高くする際に問題になるのは表示デバイスの応答速度であるが，DMD の応答速度は 10μs オーダーと非常に高速であり [19]，FSC 表示に適したデバイスの一つといえる．

一方，図 2.2 に示すように UHP ランプから放出される白色の連続光を RGB の回転式カラーホイールを用いて継時的に濾波することで 3 原色の光を得る場合，色表示周波数はカラーホイールの回転特性によって制約される．

カラーホイールのモータの回転数を R[rpm]，カラーホイールが一回転する際の色の繰り

返し数を n とすると，色表示周波数 f_{color}[Hz] は,

$$f_{color} = \frac{n \cdot R}{60} \tag{2.1}$$

色表示周波数 f_{color} は入力する映像信号のフレーム周波数の整数倍である必要があり，カラーホイールのモータの回転数 R は,

$$R = 3600m \tag{2.2}$$

$$\text{where,} \quad m \in \{1, 2, ..., \}$$

高速モータはコストが嵩む上，ノイズ等の問題も発生するため MD-PTV のカラーホイール駆動用に用いるには好ましくない．また，隣接するカラーフィルタの境界が光路を横切る間は，照明光は隣接する 2 種の色が混じった状態になるため，高い色再現性を得るためにはカラーフィルタ境界の光を使うことはできない．さらに，カラーホイール内の繰り返し数 n を増すと，カラーホイールの境界数が増えるため，光を利用できない時間が増えてしまい，結果として光の利用効率低下が問題になる．

2.2.4 6 原色ライトエンジンの開発

広色域化

図 2.5 の破線で囲まれた領域は従来の 3 原色 MD-PTV の色域を示したものであり，実線で囲まれた領域は比較のために示した BT.709 の色域である．また，図中のドットは物体色 (Pointer's color) の分布を示したものである．従来の 3 原色 MD-PTV の色再現範囲でも BT.709 の色域をほぼカバーしていたが，表示できない物体色は多い．xvYCC などの拡張色空間対応の映像信号が普及してきた昨今，従来の 3 原色 MD-PTV の色域では十分とは言えなくなってきた．

そこで，赤，青，緑の 3 原色に，新たに黄，シアン，マゼンタの 3 色を加えることで 6 原色化した広色域 MD-PTV（6 原色 MD-PTV）を開発した [20].

図 2.6 に 6 原色 MD-PTV の構成図を示す．図 2.2 に示す従来の 3 原色 MD-PTV との違いは，カラーホイールが 6 色化されたこと，6 色化のために専用のカラーマネージメント処理回路が追加されたことである．

6 色カラーホイール

図 2.7 は 6 色カラーホイールの外観写真である．6 色カラーホイールは，従来の赤，緑，青の 3 色に，その補色である黄，シアン，マゼンタを加えた合計 6 色のカラーフィルタで構成されている．

図 2.8 に，追加した黄，シアン，マゼンタのカラーフィルタの分光透過率を示す．

黄のカラーフィルタは 500nm 以上の波長を透過するように設計されている．従来は赤や緑の色純度を落とす原因になるため遮蔽していた UHP ランプの 580nm 付近のサブピークを有効に活用している．結果，従来の緑と赤の混色によって再現する場合と比較して，黄の色域が広がったことに加え，黄の輝度を上げることも可能になった．

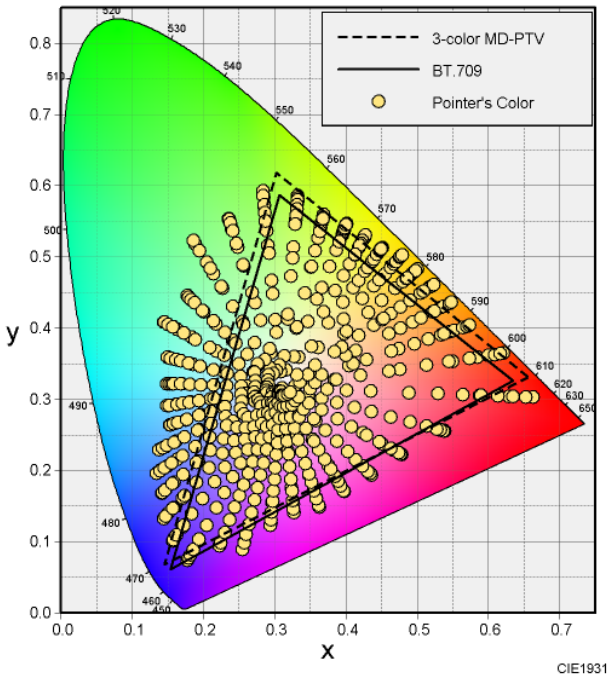


図 2.5: 3 原色 MD-PTV の色域

CIE 1931 XYZ 座標系上で，従来の 3 原色 MD-PTV の色域（波線）を BT.709 の色域（実線）および物体色 (Pointer's Color) と比較した図である．

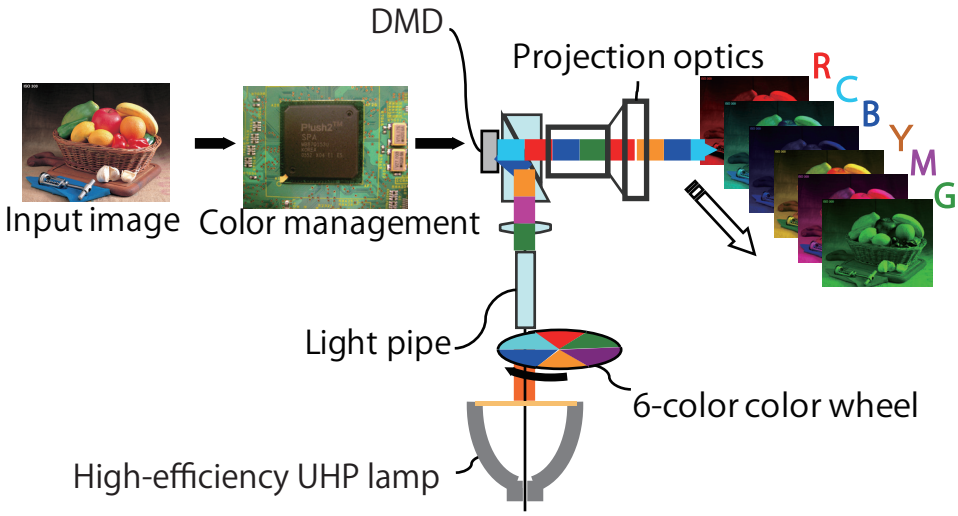


図 2.6: 6 原色 MD-PTV の基本光学系

図 2.2 に示す 3 原色 MD-PTV の基本光学系との違いは，カラーホイールが 6 色化されたこと，6 色化のために専用のカラーマネージメント処理回路が追加されたことである．

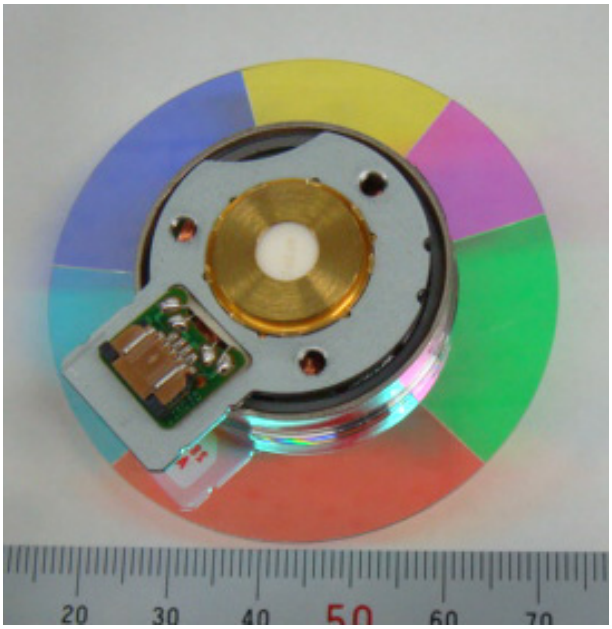


図 2.7: 6 色カラーホイールの外観

6 色カラーホイールは，従来の赤，緑，青の 3 色に，その補色である黄，シアン，マゼンタを加えた合計 6 色のカラーフィルタで構成されている．

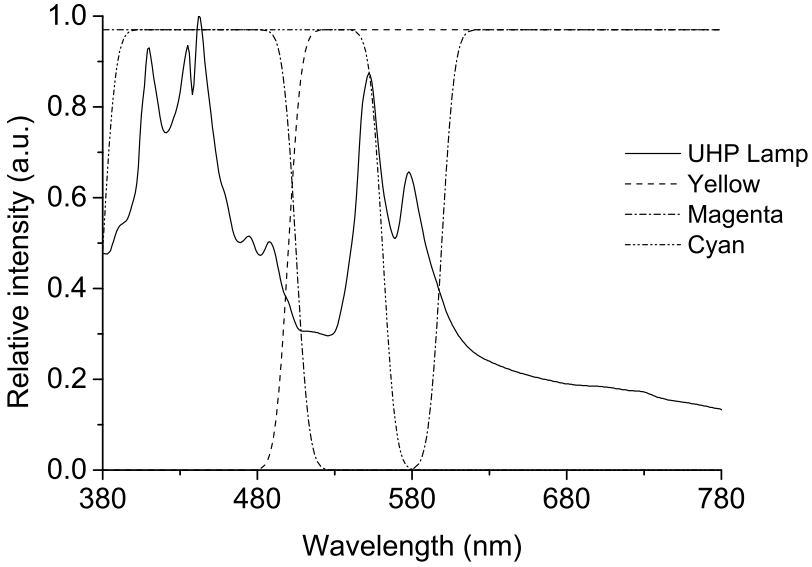


図 2.8: UHP ランプの分光放射率とカラーフィルタの分光透過率

UHP ランプの分光放射率と，6 色化において追加した黄，シアン，マゼンタのカラーフィルタの分光透過率を示した図である．

シアンのカラーフィルタは 561nm 以下の波長の光を透過するように設計してある．これは，青のカラーフィルタの透過帯域と緑のカラーフィルタの透過帯域を足した波長領域とほぼ一致する．同様にマゼンタのカラーフィルタは 505nm 以下の光と，599nm 以上の光を透過する．これは青と赤のカラーフィルタがそれぞれ透過させる波長領域と一致する．

表 2.2: 6 色カラーフィルタの諸特性

	Red	Cyan	Blue	Yellow	Magenta	Green
透過波長帯	598nm∼ 830nm	380nm∼ 561nm	380nm∼ 505nm	500nm∼ 830nm	∼505nm, 599nm∼	481nm∼ 569nm
最大透過率	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
占有角度	90°	52°	68°	52°	36°	62°
相対明度	8.19%	20.47%	5.29%	34.9%	3.07%	28.33%

各カラーフィルタの透過波長帯域を狭くすることで原色の色純度を高める方式では，光の利用効率が低下するため，色域が広がる半面輝度が低下してしまう．しかし，6 色カラーホイールでは，カラーホイールに占める赤，緑，青のカラーフィルタの面積割合を減らし，新たに黄，シアン，マゼンタを追加することで，カラーホイールを透過する光量を相対的に増やすことが可能になる．結果，輝度を約 20%向上させることに成功した．

単板 DMD を用いた MD-PTV では，多色化による色割れの発生が懸念される．そこで 6 原色 MD-PTV では回転数が 10800rpm の高速モータでカラーホイールを回転させている．6 色カラーホールではカラーフィルタの分割数を増やすことは困難であり分割数 n は 1 としており，色表示周波数 f_{color}[Hz] は式 2.1 から

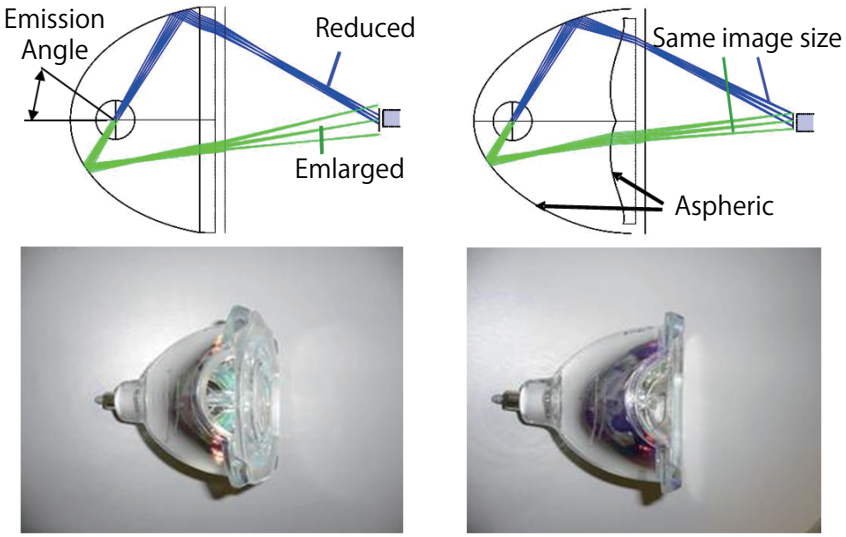
$$f_{color} = 180 \tag{2.3}$$

非球面リフレクタ UHP ランプ

カラーホイールのモータ高速化に伴い，単位時間当たりにカラーホイールの境界が光路を横切る回数が増えるため，低下する光利用効率を補う必要がある．そこで，6 原色 MD-PTV では非球面リフレクタを採用した高効率 UHP ランプを光源に採用した．図??に従来ランプと非球面リフレクタランプの構成と原理の差を示す．

従来ランプの楕円形状のリフレクタは，放射角によってアーク像サイズが異なってしまうため十分に集光ができず，ライトパイプから光が溢れてしまう．結果として光利用効率が低下するという問題があった．

新たなランプの光学系では，リフレクタとフロントガラスを高次の非球面形状にしたことで，放射角ごとにアーク像サイズを適切にコントロールすることができ，ライトパイプへの入射ロスを低減することを可能にした．この集光効率向上によりスクリーン中心にて従来比約 10%の高輝度化が実現した．また，経時変化によってランプのアークギャップが拡大した場合でも集光効率低下が低減でき，ランプの長寿命化も図れる．



(a) 従来光学系　　(b) 新光学系

図 2.9: UHP ランプの構成と原理

(a) 楕円形状のリフレクタの従来 UHP ランプと，(b) 非球面リフレクタを採用した新 UHP ランプの構造の違いを示した図である．

新画像処理 ASIC

通常の映像信号は赤，緑，青の 3 原色からなる信号であり，多原色ディスプレイに映像を綺麗に表示させるためには，専用の画像処理が必要になる．

図 2.10 は 6 原色 MD-PTV 用に新たに開発した画像処理 ASIC(Application Specific Integrated Circuit)Plush2^{TM} SPA の外観写真である．この ASIC には内臓 SRAM(Static Random Access Memory) を含む 3.2MGate の大規模なロジック回路が組み込まれている．

図 2.11 は Plush2^{TM} SPA の概略ブロック構成図を示したものである．Y/C 分離などの映像入力信号のデコード処理から，ノイズリダクション，スケーリング，エッジエンハンサ [21][22]，カラーマネージメント [23] といった高画質化処理まで，従来ならば複数の ASIC に分けて構成していたロジック回路が，1 つの ASIC 内にまとめて組み込まれている．

Plush2^{TM} SPA は特徴として拡張色空間 xvYCC にも対応している．ハイビジョンの放送規格である BT.709 では，YCC 色空間と RGB 色空間には次の関係がある．

$$\begin{pmatrix} Y \\ Cb' \\ Cr' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ -0.1146 & -0.3854 & 0.5000 \\ 0.5000 & -0.4542 & -0.0458 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \tag{2.4}$$

$$\text{where,} \quad 0 \leq \{R, G, B\} < 2^Q$$

ここで Q は映像信号のビット深度である．

負値を持つ YCC 色空間の信号を YUV-RGC 変換回路において RGB 色空間に変換を行う際，従来は RGB 色空間信号には $0 \leq \{R, G, B\} < 2^Q$ の制限がかけられていた．Plush2^{TM}

図 2.10: 画像処理 ASIC Plush2^{TM} SPA の外観

内臓 SRAM を含む 3.2M ゲートの大規模なロジック回路が組み込まれている統合型の画像処理 ASIC であり，6 原色 MD-PTV 用に開発された．

SPA では図 2.12 に示すように，YCC 色空間信号から RGB 色空間信号に変換後も，演算によって生じる負値や 2^Q 以上の値を，システムの後段に配置されているカラーマネージメント処理まで保持させている．これにより，YCC 色空間の映像信号に含まれる sRGB 色域外の高彩度色情報を有効に活用できる．

また，Plush2^{TM} SPA には歪補正回路が搭載されている．ノンテレセントリック光学系を用いる MD-PTV では，筐体を極限まで薄くするために，例えば 136° 以上の投射角を有する光学系を用いる [24]．このような超広角投射光学系の場合，レンズ周辺部で発生する歪曲収差を低減する必要があるが，光学的に補正を行うには複雑なレンズ系が必要になるため，コストが嵩む．一方，電気的な歪補正 [25] ならば比較的安価に歪曲収差を補正できる．

DMD の駆動制御には Texas Instruments 社製の専用 ASIC[26] が使われるが，その ASIC の入力インターフェースはビット深度 Q =10bit のデュアルチャンネル RGB 信号である．そのため Plush2^{TM} SPA では，内部で 6 原色表示用に最適化された独自の高画質処理を行った後，後段に配置される DMD 駆動制御用 ASIC 向けにデュアルチャンネル 10bit の RGB 信号を出力する．

カラーマネージメント

赤，緑，青の 3 原色からなる映像信号を 6 原色 MD-PTV で適切に色再現させるためにはカラーマネージメントが重要になる．

図 2.13 は Plush2^{TM} SPA に搭載したカラーマネージメント回路（以下，NCM: Natural Color Matrix と呼ぶ）のブロック構成図である．NCM に入力する映像信号は RGB の 3 チャンネルであり，YUV-RGB 変換処理において生じた 2^Q 以上の値や負値も保持された信号である．

$$-2^{Q-1} \leq \{R_i, G_i, B_i\} < 2^{Q+1} - 2^{Q-1} \tag{2.5}$$

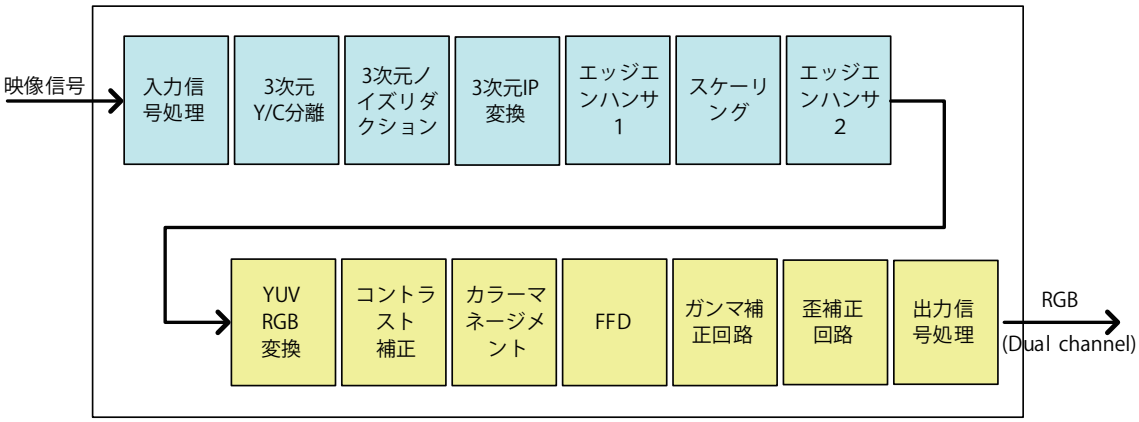


図 2.11: 画像処理 ASIC Plush2^{TM} SPA のブロック構成図

映像信号のデコード処理から高画質化処理まで，従来ならば複数の ASIC に分けて構成していたロジック回路が，1 つの ASIC 内にまとめて組み込まれている．

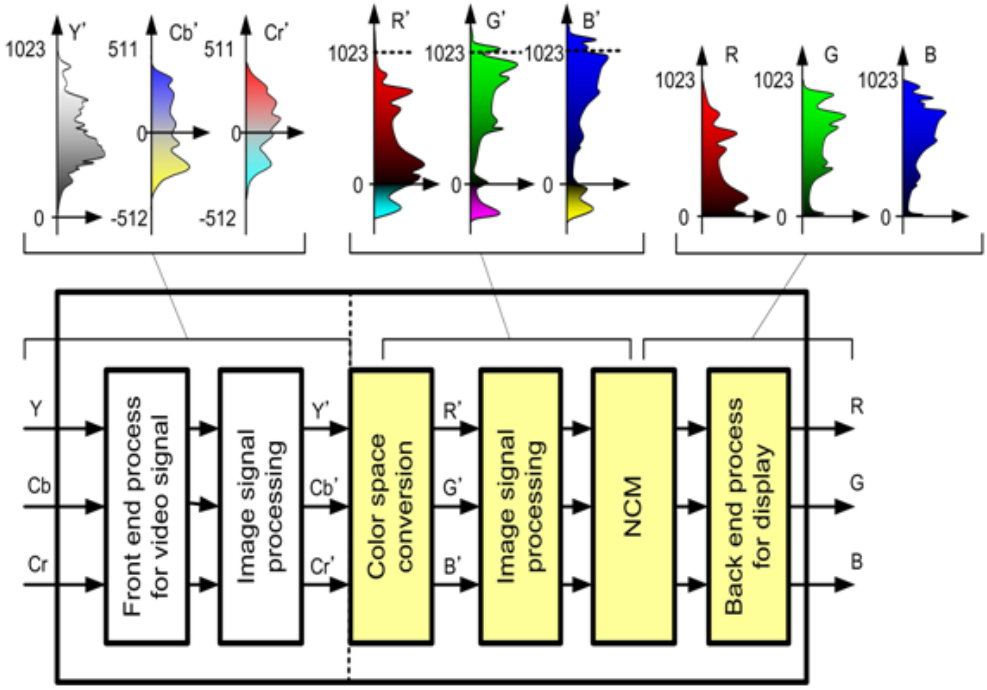


図 2.12: xvYCC 対応画像処理におけるビット深度推移

YC フォーマットで入力された映像信号を，RGB フォーマットへ変換する際に生じる負値や 1 以上の値をそのまま保持させて画像処理を施した後，NCM で表示デバイスの規定値にマッピングする．

NCM に入力した映像信号 (R_i, G_i, B_i) は，はじめに有彩色信号と無彩色信号に分けられる．次に図 2.14 に示すように有彩色信号は赤，緑，青，シアン，マゼンタ，黄の 6 つの色相成分と，これらの色の色相間成分の合計 12 の色成分に分けられる．

合計 12 の色成分に分けられた映像に対して，外部レジスタ E_{ij} よって適宜色調補正を行うが，色を細分化して補正を行うことで，他の色に影響を与えることなく，特定の色の色相，彩度，明度を独立して調整することが可能になる．

色調補正処理では，信号レベルの飽和が問題になる場合がある．NCM では予め検出しておいた彩度や明度といった特徴情報 CA を用いて，処理による高彩度部の色つぶれを補正している．

$$\begin{bmatrix} R_m \\ G_m \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_i \\ G_i \\ B_i \end{bmatrix} + f(CA) \begin{bmatrix} \Delta r \\ \Delta g \\ \Delta b \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

ここで，$f(CA)$ は補正量制御係数であり，Δr，Δg，Δb は基準補正量である．

色つぶれ補正を行った後，有彩色信号は予め用意しておいた色変換マトリックスによって色変換され，無彩色信号 α と共に RGB 信号に戻される．

$$\begin{bmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_m \\ G_m \\ B_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta r & \Delta g & \Delta b & \Delta c & \Delta m & \Delta y & \Delta ry & \Delta gy & \Delta gc & \Delta bc & \Delta bm & \Delta rm & \alpha \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2.7}$$

なお，NCM から出力される信号レベルは，それぞれ次の範囲にマッピングされる．

$$0 \leq \{R_o, G_o, B_o\} < 2^Q \tag{2.8}$$

色調補正の間も YUV-RGB 変換回路において生じた 2^Q 以上の値や負値を含んだまま計算をするので，xvYCC の拡張色空間信号を十分に生かすことができる．

また，NCM は 12 の色成分毎に独立して色調整ができるので，6 色カラーフィルタを構成している 6 色の色度を個別に調整することが可能になる．そのため，忠実再現のためのカラーマッピングはもちろん，適切な GUI(Graphical User Interface) を設けることで，肌色や芝生の緑色，青空の色などのいわゆる記憶色 [27] を，ユーザ自身が好みに合わせて再調整することも可能にする．

2.2.5 測定結果

色域測定結果

図 2.15 に 6 原色 MD-PTV と従来の 3 色カラーホイールを用いた MD-PTV の色域測定データを CIE 1931 XYZ 座標系上に比較して示す．

6 原色 MD-PTV は，従来の 3 原色 MD-PTV では使えなかった UHP ランプの 580nm 付近のサブピークを黄のカラーフィルタで活用したことで，黄の色域が広くなっているとともに，黄色の輝度が 30%向上した．また 6 原色 MD-PTV は，赤，緑，青のカラーフィルタの透過波長も見直したことで，緑と赤の色純度も若干改善されている．

これらの結果，3 色のカラーホイールを用いた従来の MD-PTV では CIE 1931 XYZ 座標系上で BT.709 比 104.1%であった色域を，6 原色 MD-PTV では 115.7%まで広げることが可能

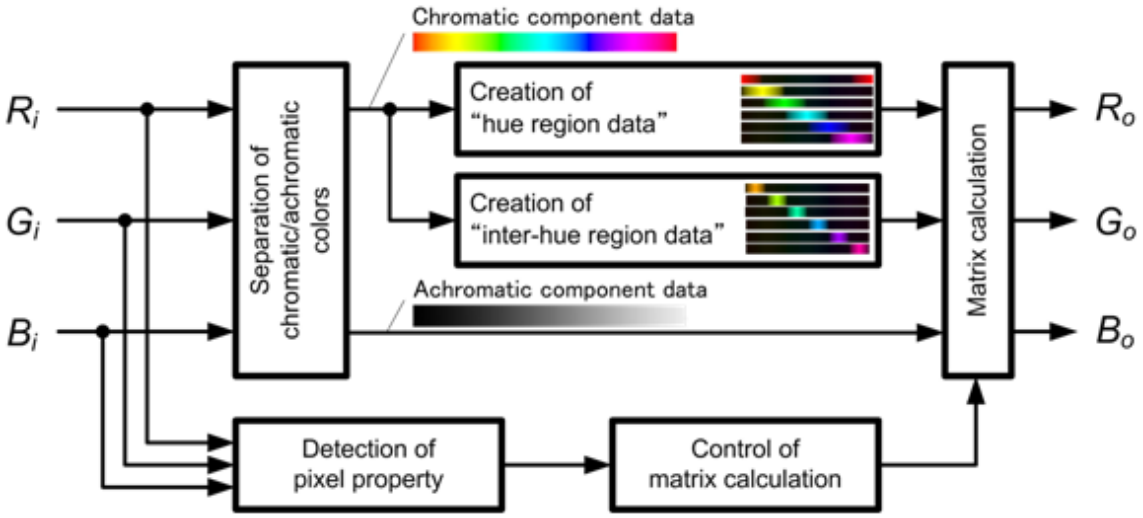


図 2.13: NCM のブロック構成図

NCM では入力した映像信号を 12 の色成分に分けた後，個別に色調整を行うことで，6 原色表示に対応した色調性が可能になる．

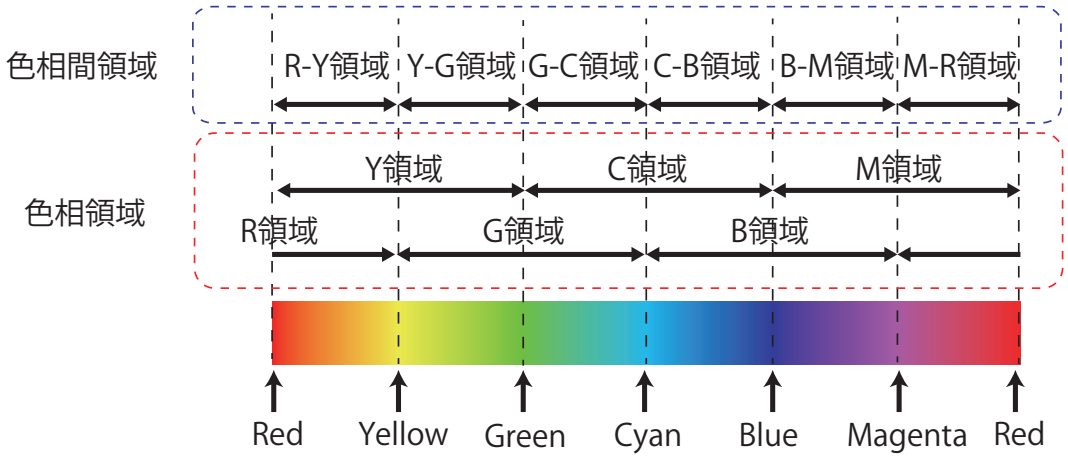


図 2.14: NCM で扱う 12 の色成分

NCM では有彩色信号を赤，緑，青，シアン，マゼンタ，黄の 6 つの色相成分と，これらの色の色相間成分の合計 12 の色成分に分けて色補正を行う．

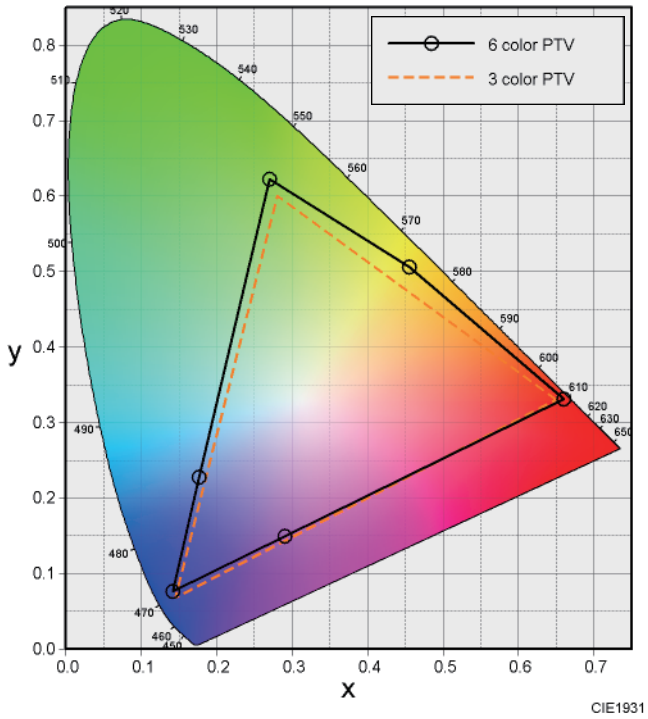


図 2.15: 6 原色 MD-PTV の色域

CIE 1931 XYZ 座標系で 6 原色 MD-PTV と 3 原色 MD-PTV の色域を比較して示した図である．6 原色化により黄色の色域が拡大している．

になった．また CIE 1976 均等色度図の u'v' 色度座標に換算した結果でも，3 原色 MD-PTV の色域は BT.709 比 101.7%であったが，6 原色 MD-PTV の色域は BT.709 比 103.8%まで拡大する．

表 2.3: 6 原色 MD-PTV の色域と 3 原色 MD-PTV の色域 (BT.709 比)

	3color MD-PTV	6color MD-PTV
CIE 1931 XYZ	104.1%	115.7%
CIE 1976 USC	101.7%	103.8%

色割れ

6 原色 MD-PTV の色表示周波数は，式 2.3 に示すように 180Hz である．

これまでに述べてきたように，色表示周波数が 180Hz 程度の場合，画面輝度などの視環境にも依存するが，サッケードのような速い眼球運動が起きると色割れが視認されてしまう可能性が高い．しかし 6 原色 MD-PTV では特に色割れが顕著に認められるということはなかった．

この理由については Langendjk らが報告 [28] しているように，色割れの発生は同じ色が繰り返される周期である色表示周波数 f_{color} と共に，各色の表示時間も影響している．6 色カ

ラーホイールでは各色の表示時間が短くなったことで色表示周波数が低いにもかかわらず色割れが視認されにくかったのだと推測する．また表 2.2 に示すように，カラーフィルタを明度の差が大きい色が隣接するように配置したことも色割れが視認されにくくなった一因ではないかと推測する．

コントラスト

図 2.16 は，6 原色 MD-PTV と，6 原色 MD-PTV が開発された 2007 年頃の 65 型クラスの代表的な PDP-TV，LCD-TV の画面照度に対するネイティブコントラスト (全画面白色と全画面黒色の輝度比) の特性を示したものである．6 原色 MD-PTV は，画面照度に依らず LCD-TV， PDP-TV に対してコントラストが高い結果を得た．

6 原色 MD-PTV は，高効率の非球面リフレクタ UHP ランプと 6 色カラーホイールの採用により，高い画面輝度を得ることが可能になった．そのため，一般家庭での TV の視聴環境である画面照度 100 lx 程度の照明環境下 [29] でも，6 原色 MD-PTV は，500:1 のコントラスト比を得ることが出来る．これは同サイズの PDP-TV， LCD-TV よりも高い値である．

また，Plush2^{TM} SPA に搭載しているコントラスト補正回路は，映像に応じて光源からの光強度を変化させる光源制御が可能である．暗い映像のときは光源を暗くすることで漏れ光を抑制し，黒色輝度をより低くすることが可能になるため，画面照度が低い場合にも高いコントラスト感を得ることができる．

電子ディスプレイの色域を考える場合，通常，暗室で測定された値によって議論が行われるが，実使用環境における色の忠実再現を考える場合，外光（照明光）の影響を考慮する必要がある [30]．その点，外光によらず高いコントラストが得られる 6 原色 MD-PTV は，数値的に色域が広いだけではなく，実際の色の見えの点についても他の表示デバイスと比較して優れていると言える．

2.2.6 まとめ

本節では多原色化手法を用いた電子ディスプレイの広色域化の一例として，6 原色表示技術を用いた広色域 MD-PTV の構造，カラーマネージメント手法および画像表示特性について述べた．

6 原色 MD-PTV は従来の赤，緑，青に加え，黄，シアン，マゼンタの各カラーフィルタを用いた 6 色カラーホイールと，非球面リフレクタ UHP ランプおよび拡張色空間に対応した画像処理を組み合わせた 6 原色ライトエンジンによって，色域は BT.709 比 115.7%（CIE 1931 XYZ 座標系）になることを確認した．

2.3 原色点の色純度を高める手法を用いた広色域ディスプレイ

2.3.1 はじめに

多原色化手法による色域拡大では，追加する原色の色度座標次第では大きく色域を拡げることが可能になる．しかし MD-PTV のように白色光源の光をカラーフィルタ等で濾波して照明光を作る場合，白色光源の分光放射率や輝度の制約によって，追加する原色の彩度を高

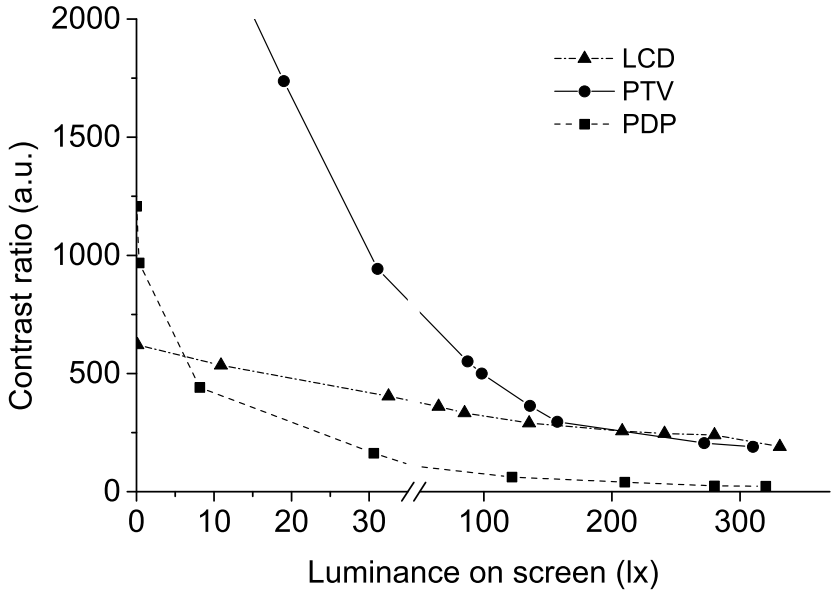


図 2.16: 画面照度とコントラスト比

6 原色 MD-PTV と PDP-TV，LCD-TV の画面照度に対するネイティブコントラストの特性を示したものである．

くすることは困難な場合が多い．そこで本節では，もう一つの広色域化手法である，原色点の色純度を高め手法について詳細に述べる．

色純度の高い光源の一つに半導体レーザー (LD: Laser Diode) がある．LD は 1962 年に Hall らが赤外光の発振に成功 [31] させて後，Holonyak らが可視光の発振に成功．その後ダブルヘテロ接合構造の提案などを経て室温での連続発振が可能な素子が開発されてきた．

多くの産業分野で活用されている LD だが，その代表格は光ファイバー通信や光学ドライブなどのデータ転送用途である．

これら機器のデータ伝送速度や情報密度はレーザーの波長が大きく影響する．例えば 1982 年に発売された CD(Compact Disc) ドライブのピックアップには 780nm の近赤外光が用いられていた．その後 1996 年に発売された DVD では，660nm の赤色光を用いることでデータの高密度化が進められた [32]．

より短波長の青色 LD は，1991 年に Haase らが ZnSe を使って 490nm の発振に成功し [33]，1993 年に中村らにより GaN を用いた 440nm で発振する LD が開発された [34]．その後 GaN を用いた青色レーザーの開発が進み 405nm で発振する青色 LD を用いた BD(Blu-ray Disc) が 2003 年に発売されている．

このように光学ドライブ分野では赤色から青色に一足飛びに短波長化が進んだが，表示デバイスの光源としては，赤と青の中間の波長である緑色を含めた三原色が必要になる．また DVD で用いられた 660nm の赤色 LD は分光視感度が低い波長帯にあたるため，表示デバイス用光源としてはより短波長の赤色 LD が必要になる．

図 2.17: レーザー TV の外観

レーザー TV は 3 原色の可視光半導体レーザーを光源に用いた，広色域の背面投射型プロジェクション TV.

2.3.2 レーザー TV の概要

レーザー光をディスプレイの光源に用いる試みは 1960 年代から既に始まっている．当時は He-Ne や Ar などのガスレーザーが用いられた大掛りな装置であった [35]．民生向けの電子ディスプレイとしては，2008 年に 3 原色の可視光 LD を光源に用いたレーザー TV を三菱電機が初めて製品化した [36][37].

図 2.17 にレーザー TV の外観写真を示す．レーザー TV はいわゆる背面投射型の電子ディスプレイである．レーザー光の高い指向性を利用することで光学系を小口径に出来るため，従来の UHP ランプを用いた MD-PTV と比較して光学系の小型化が可能になる．また，投射レンズと非球面ミラーで構成される超広角投射光学系により，レーザー TV の奥行きは 65 型で約 270mm と，従来の MD-PTV と比較して大幅に薄くすることが可能になった [38]．さらに，LCD や PDP のようにパネル面周辺に電極を設ける必要が無いため，狭額縁スタイルも可能になる．

図 2.18 はレーザー TV の概略光学系を示す図である．赤，緑，青の各 LD 光源から継時的に出射された光はライトパイプに導かれる．ライトパイプは発散角の小さいレーザー光を内部の多重反射によって成形し，マイクロディスプレイ (レーザー TV では単板 DMD を使用) に均一な照明光を照射できるようにする．そして，マイクロディスプレイで空間変調されたレーザー光は投射光学系を介してスクリーンに広角投影される．

レーザー TV の最大の特徴は，色域が広いことである．

図 2.19 はレーザー TV の色域を示す図である．原色点がスペクトル軌跡上にあるレーザー TV では，CIE 1976 USC 色度図（$u'v'$ 色度図）において，NTSC[39][40] 比 175%の広色域を達成する．これは，従来の LCD の約 2 倍の色域に相当する．

レーザー TV のもう一つの特徴は消費電力が少ない点である．LD の電気光変換効率 (WEP: Wall-Plug Efficiency) は，LED や CCFL の WEP と比較して優れていることに加え，LCD のようにカラーフィルタや透過型液晶等で光のロスが発生しないため，例えば 65 型のレーザー TV でも，500cd/m^2 の高輝度でありながら定格 135W と同サイズの PDP や LCD の半分以下（開発当時）の低消費電力になっている．

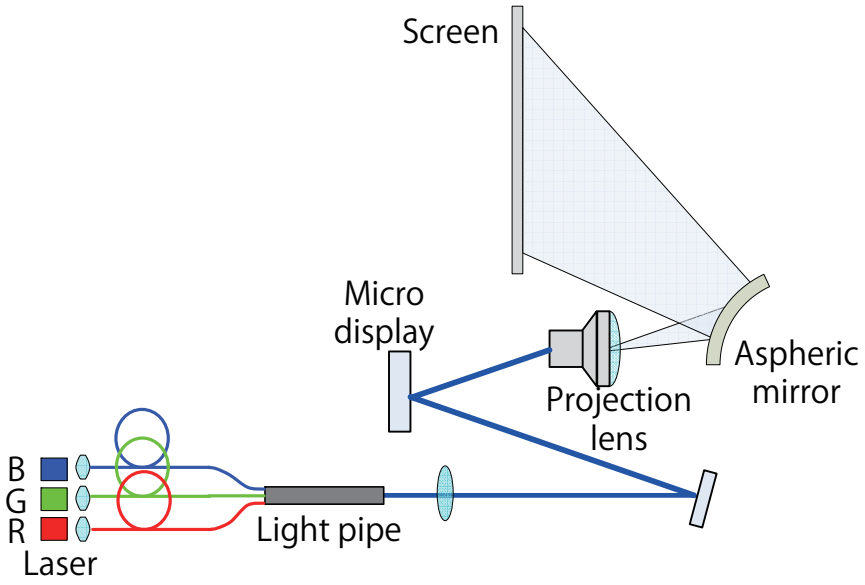


図 2.18: レーザー TV の基本光学系

レーザー TV の光学系は RGB の各 LD 光源，ライトパイプ，マイクロディスプレイおよび投射レンズで構成されている．

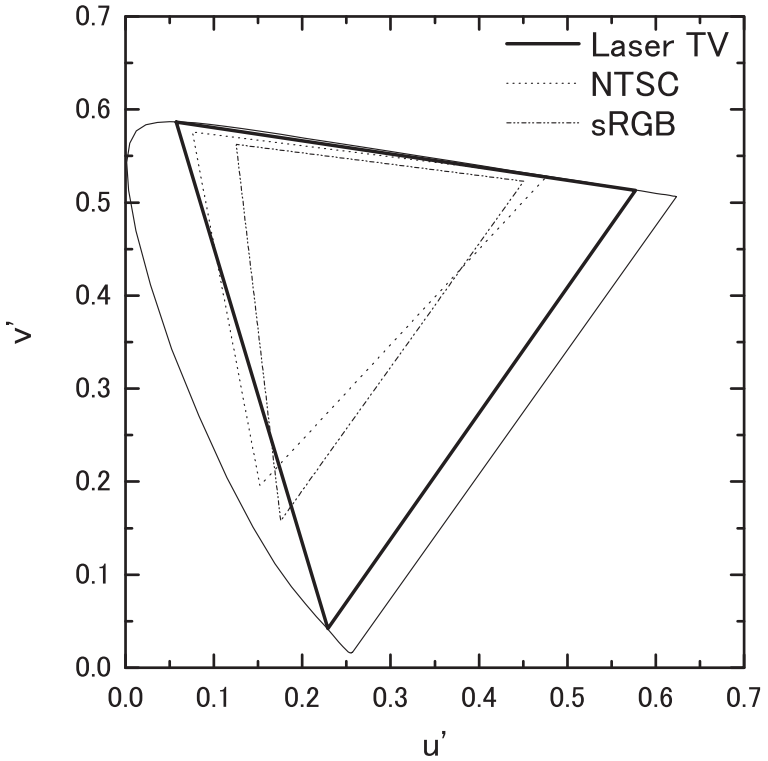


図 2.19: レーザー TV の色域

レーザー TV の色域を CIE 1976 USC 色度図上に示した図である．原色点がスペクトル軌跡上に位置し，NTSC 比 175%の広色域を達成する．

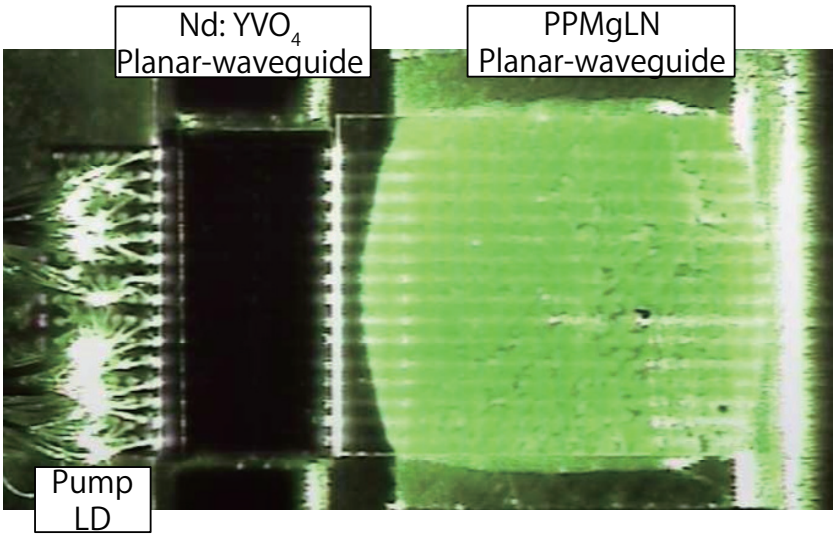


図 2.20: 緑レーザーの詳細構造

緑レーザーは，Nd:YVO_4 導波路から出力される 1064nm の基本波を PPMgLN によって半波長変換することで 532nm の光を得ている．

2.3.3 レーザー TV の要素技術

レーザー光源

レーザー TV に用いられている 3 原色の LD の発振波長は，青が 447nm，緑が 532nm，赤が 640nm である．青，赤は該当波長で直接発振が可能な LD を使用しているが，緑は LD から直接高出力の光を発振させるのが困難なため，赤外 LD で発振させた基本波を波長変換して生成している．

図 2.20 は緑のレーザー [41] の内部写真である．発振波長 808nm の励起レーザーアレイ，Nd:YVO_4 導波路，PPMgLN(Periodic-poled MgO-doped lithium niobate) 導波路で構成されており，Nd:YVO_4 導波路から出力される 1064nm の基本波を PPMgLN に通すことで 532nm に変換している．

表 2.4 に各レーザーモジュールの特性を示す．65 型で 500cd/m^2 の輝度を得るため，各レーザーモジュールは赤が 6.3W，緑が 5.0W，青が 8.1W で合計 19.4W のピーク出力を必要とする．この比率は，画面に表示される白色の色温度 (ホワイトバランス) が最適になるように設計された値である．

また，表 2.4 に示すように各レーザーモジュールはマルチエミッタの LD で構成されている．マルチエミッタで構成されるレーザーモジュールは，1 つのエミッタに COD(Catastrophic Optical Damage) 等の故障が発生してもモジュール全体として致命的な光量の低下につながらない利点がある．さらに，レーザーを光源に用いた電子ディスプレイの課題の一つに，レーザー光のコヒーレント性に起因して発生するスペックルノイズ対策が挙げられるが，光源をマルチエミッタ化することで，複数の位相の異なるレーザー光をスクリーンに投射することになるため，スペックルパターンが角度多重化され，スペックルコントラストを低減させる効果も期待される [42]．

表 2.4: レーザーモジュールの特性

	Red	Green	Blue
Wavelength	640nm	532nm	447nm
Peak power	6.3W	5.0W	8.1W
Number of emitter	20	15	14
Modules volume	60ml	30ml	220ml

レーザー光源ユニット

図 2.21 は，65 型レーザー TV 用のレーザー光源ユニットの内部写真である．薄型のレーザー TV を実現するため，赤，緑，青の各レーザーモジュールの他，レーザーモジュール用の冷却器，レーザー駆動電源およびレーザー制御回路が厚さ 106mm のユニット内部にコンパクトに納められている．

各レーザーモジュール内部には，LD とカップリング光学部品が組み込まれており，LD から出射された光は，カップリング光学系を介して，レーザー光源ユニット外部にある，マイクロディスプレイや投射光学系などで構成される光学エンジンに送られる．またレーザーモジュールからの発熱は，ヒートパイプ，軸流ファン，ペルティエ素子を組み合わせて構成されている冷却器によって効率よく排熱されている．

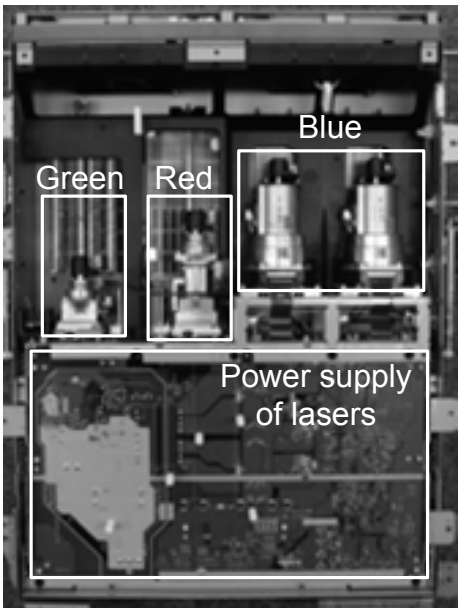


図 2.21: レーザー光源ユニットの内部

レーザー TV のレーザー光源ユニットの内部写真である．赤，緑，青のレーザーモジュールやレーザーの電源基板，冷却器等で構成されている．光出力の関係から，青のレーザーモジュールのみ 2 個で構成されている．

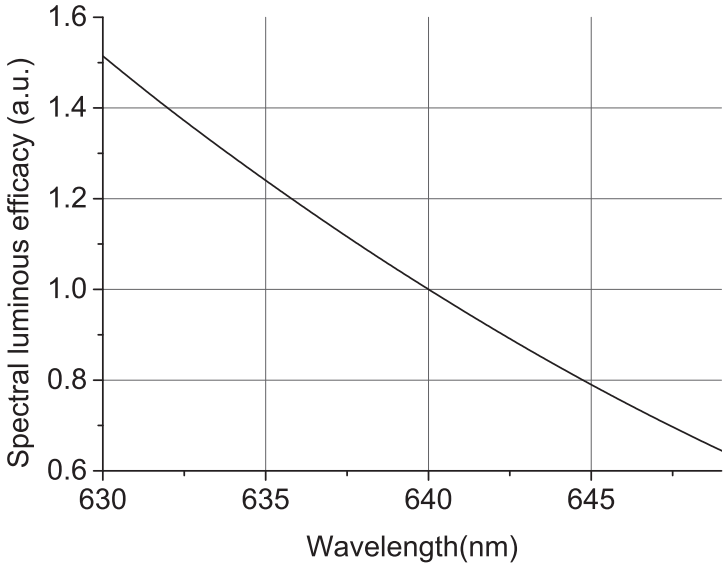


図 2.22: 分光視感度曲線

レーザー TV で使う赤色 LD の発振波長である 640nm 付近の分光視感度を示す図であり，640nm の値で正規化してある．

光源駆動制御

図 2.22 は 640nm 付近の分光視感度曲線であり，640nm の感度で正規化したものである．人の目は 555nm 付近の黄緑色で最も視感度が高く，640nm 付近では波長が長くなるに従い急激に視感度が低下する．

LD の WEP および発振波長はジャンクション温度に対して敏感に変動する．特に赤色 LD の発振波長とジャンクション温度には約 0.2nm/K の相関があり，定電流駆動の条件でも LD のパッケージ温度が 10K 変化すると輝度が 10%程変化する．

図 2.23 は，レーザー TV の光源制御システムの構成を示した図である．赤，緑，青の各レーザーモジュールには，温度コントローラと，フォトセンサが組み込まれている．

温度コントローラはレーザー素子の温度が温度指令値に従うように冷却器を制御すると共に，温度測定結果を制御マイコンに出力する．フォトセンサはレーザーの発振状態を検知し，結果を同じく制御マイコンに出力する．制御マイコンではこれらの検出結果をもとにレーザーの状態を監視し，非常時にはレーザーの発振を停止させる．

また，各レーザーモジュールの近くにはスイッチング方式の定電流回路が配置されている．定電流回路は，レーザー制御回路から出力される電流指令値に応じて，レーザーモジュールに電流を供給する．

ライトパイプの出口にはカラーセンサが設置してある．カラーセンサは各レーザーモジュールから出力，伝送されてくる光量を検出し，結果を制御マイコンに出力する．制御マイコンではカラーセンサの検出結果を解析し，各レーザーからの光出力が予め決めておいた比率になるように各レーザーの電流指令値を更新すると共に，その結果をレーザー制御回路に出力する．レーザー制御回路では，マイクロディスプレイ制御回路から送られてくるレーザーの

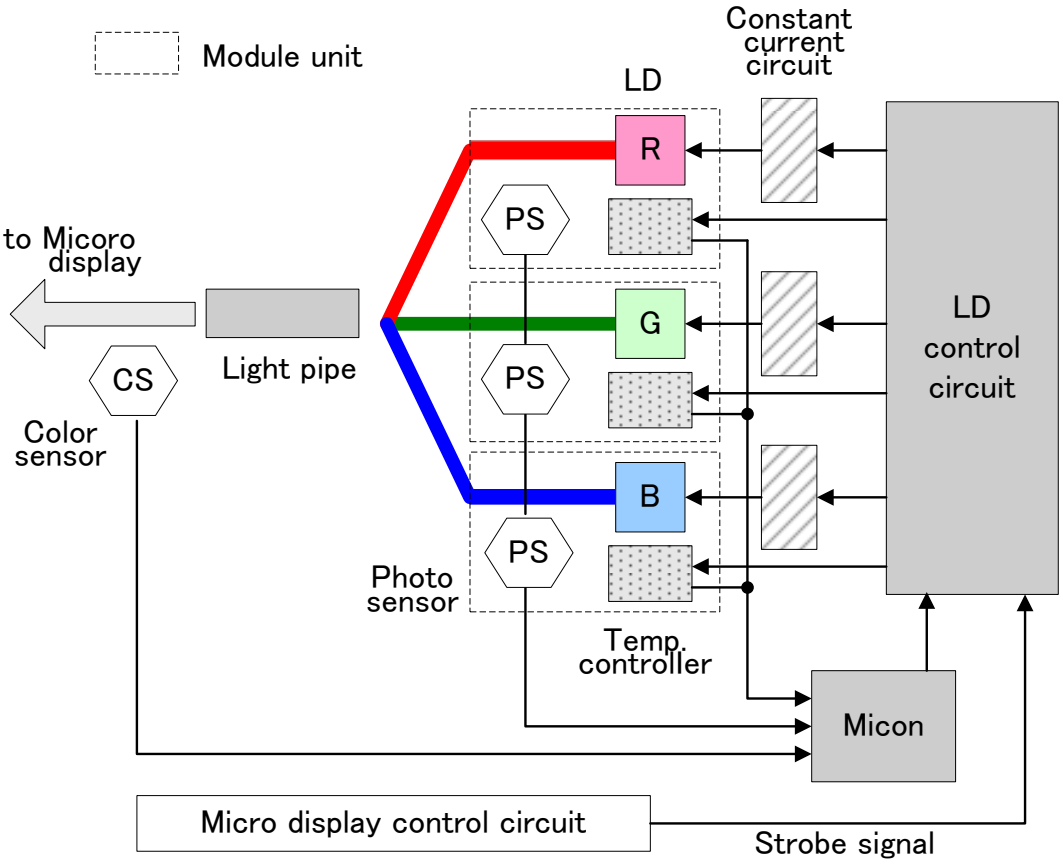


図 2.23: レーザー TV の制御系構成

レーザー TV のレーザー制御システムの概略構成を示す図である．各レーザーモジュールには温度コントローラとフォトセンサが組み込まれており，フィードバック制御が行われている．

点灯タイミングを示すストローブ信号に同期させ，制御マイコンから出力されてくる各種指令値を，定電流回路に出力する．

レーザー TV では各レーザーモジュールの温度管理以外に，各レーザーモジュールから出力される光量を検出し，その検出結果に基づき，レーザーモジュールに供給する電流量を調節するフィードバック制御を導入することで，ホワイトバランスの経時変化を防いでいる．

フィールドシーケンシャルカラー表示

図 2.18 に示すように単板の DMD で照明光を空間変調するレーザー TV は，MD-PTV と同じ継時加法混色型のディスプレイである．

UHP ランプから放出される白色光を回転式のカラーホイールを用いて継時的に濾波して照明光を得る従来の PTV では，カラーホイールの回転に用いるモータ等が制約となり色表示周波数 f_{color} は 360Hz 程度が限界であった．

図 2.24 はレーザー TV で用いているレーザー光源の立ち上がり特性の一例を示した図であ

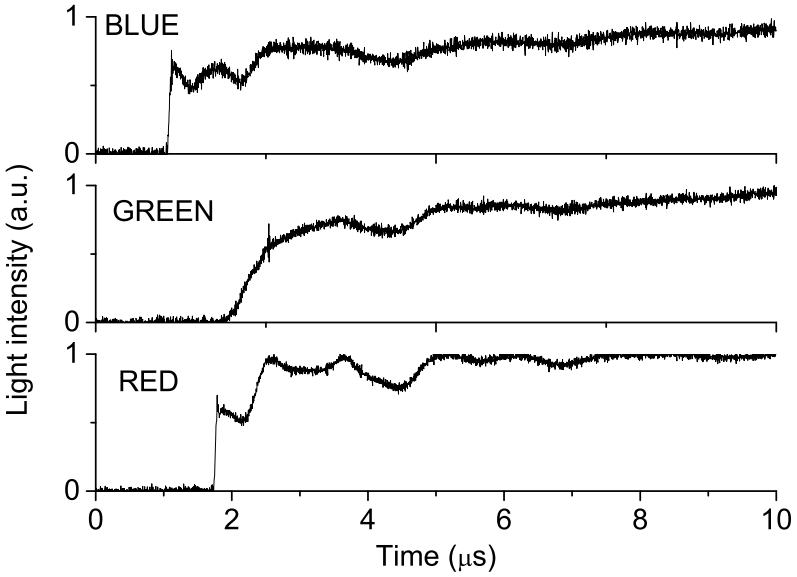


図 2.24: レーザー光源の立ち上がり特性

レーザー光源各色の立ち上がり特性を示した図である．各レーザーともマイクロ秒オーダで光のスイッチングが可能である．

り，マイクロディスプレイ制御回路から出力されるストローブ信号 (光の ON/OFF を制御する信号) をトリガとして，レーザーモジュールからの出力光量（スクリーンからの出射光）の経時変化を光プローブを用いて測定した結果である．

レーザー制御回路では，各色の発光タイミングの微調整を行っているため，ストローブ信号を受信した後，定電流回路に電流が流れ出すまでに若干の遅延が発生する．さらに，レーザー発振後も出力が安定するまでに若干の時間を要する．しかしこれらはマイクロ秒オーダであり，カラーホイールを用いていた MD-PTV と比べると桁違いに速い色のスイッチング動作が可能である．

このレーザー光源システムの高速スイッチング特性を利用し，レーザー TV では色表示周波数 f_{color} を 1680Hz で動作させており，色割れが視認される可能性を大幅に軽減している．

2.3.4 レーザーバックライトの概要

2000 年頃から普及し始めた LCD は従来の CRT と比較して画像の精細感を飛躍的に向上させた．しかし色域に関しては sRGB の色再現範囲を大きく広げるものではなかった．近年，光源に白色 LED を採用した液晶パネルが急速に普及しはじめている．青色 LED から放出される 465nm 付近の光を用いて YAG(Yittrium-Aluminium-Garnate) 蛍光体を励起する方式の白色 LED は，WPE が高く低消費電力化に有効である．一方で，白色 LED は赤や緑のスペクトルピーク強度が弱くブロードであるため，色再現範囲が狭いことは周知のとおりである [43].

図 1.9 に示したように，一般的な液晶パネルはバックライト部と表示部に大きく分けることができる．バックライト部は光源（例えば白色 LED），導光板，拡散板などの数種の光学

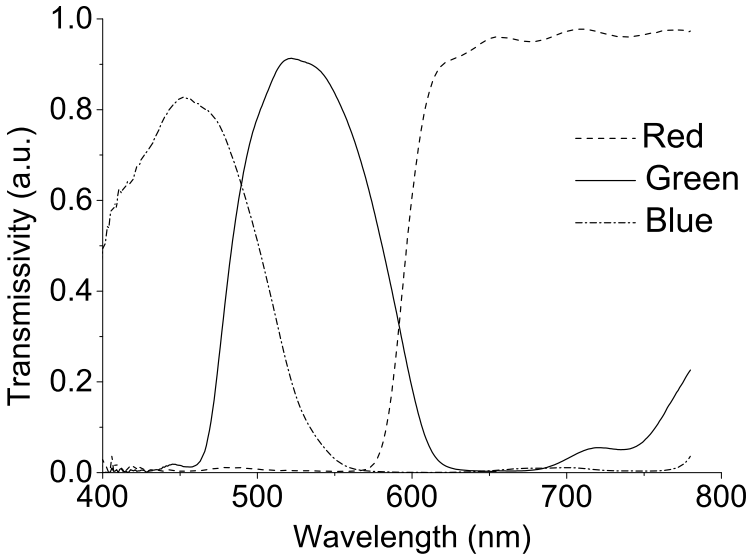


図 2.25: カラーフィルタの透過率特性

一般的な液晶パネルに搭載されているカラーフィルタの透過率特性を示したものである．

シートで構成される．表示部は偏光板や液晶セル等で構成される．白色 LED を用いた 3 原色表示の液晶パネルは，液晶セルの内部に光源の光を濾波するための 3 色のカラーフィルタを備えている．

図 2.25 に液晶用カラーフィルタの透過スペクトルの 1 例を示す．

3 原色液晶ディスプレイは，バックライトから供給される白色照明光をカラーフィルタによって赤，緑および青に濾波する事で色表現を行っているため，バックライトの光源に白色 LED のようなスペクトルがブロードな発光素子を用いた場合，色再現範囲を広げるためには各色のカラーフィルタの透過波長帯域を狭くせざるを得ない．しかし，カラーフィルタの狭透過波長帯域化は光の利用効率を低下させ，所望の輝度を得るためには光源の光出力を増す必要がある．これは消費電力の増大につながる．またディスプレイ全体の発熱量が増すため，信頼性の点でも問題になる．

今回，LCD の色再現範囲を広げる目的で，バックライトにシアン色の LED と赤色 LD を用いた 55 型 LCD 向けエッジライト方式の広色域バックライトである,「レーザーバックライト」を開発した [44].

LD をバックライトの光源に用いるという試みは新しいものではなく，今までにも光学特性に注目した幾つかの研究が行われている [45][46].

2.3.5 レーザーバックライトの要素技術

エッジライト方式

液晶パネルの照明方式には大きく分けてエッジライト方式と直下型方式がある．近年の電子ディスプレイでは低消費電力性が重要視されており，光源素子の使用数が少なくてすむエッ

ジライト方式が主流になっている．レーザーバックライトも，既存のバックライトシステムとの置き換えを考慮し，エッジライト方式を採用している．

エッジライト方式は，光源から出射された光をアクリル製の導光板に端面（側面）から入射させ，アクリルと空気層界面の屈折率の差による全反射を利用することで入射した光を導光板内に広げていく．また導光板裏面に設けた拡散素子により光を拡散させ，入射光軸と直角の位置関係にあたる液晶セル側に面光源として光を取り出す [47].

エッジライト方式の光源は，画面の上下辺 (長辺側)，もしくは左右辺 (短辺側) に配置されるが，短辺側に配置する場合には，表示画像のコントラスト改善を目的とした 1 次元のローカルディミング (1D dimming) や，動画表示性能を改善するために，LCD パネルのアドレススキャン方向にブロック単位でバックライトを走査する手法を適用することが可能になる [48][49].

今回用いたシアン LED の定格出力は 150mW 程度である．2.4.3 節で述べたように 55 型の LCD では，シアン LED からの光出力は合計 30W 程度必要になる．つまり，200 個程度の LED 素子が必要になる．そこで 8 ブロックに分割した 1D dimming が可能な構成を考え，片側に $96(= 8 \times 12)$ 個の LED 素子を並べた．

一方，LD は 1 素子あたりの光出力が大きいため，LED と比べて使用する個数を少なく出来る．例えば 1 素子あたり 0.3W 程度の光出力を得られる LD を用いれば，32 個で 10W 程度の総光出力が得られ，55 型であれば 400cd/m^2 程度の画面輝度を得ることが可能になる．

表 2.5: 光源の設計パラメータ

	LD	LED
Number of elements	32	192
Divergence angle	// 7deg $\perp$ 35deg	120deg
Total radiation flux	About 10 W	About 30W
Total heat generation	About 30 W	About 30W
Target	$\Delta T_{ac} \leq 10$K	$\Delta T_{as} \leq 50$K

光学的制約

図 1.9 に示すようなエッジライト方式のバックライトシステムにおいて，液晶の画像表示領域に均一照射される照明光を得るためには，パネル端部に隣接して配置された複数の光源から出射された光のうち，少なくとも隣接する素子から出射した光は，導光板裏面に設けた拡散素子に入光するまでの光路中で交差させておく必要がある．

図 2.26 に示すように隣接する素子から発散角 2γ で出射された光が交差するまでに必要な助走距離 $w1$ は，素子のピッチを $d1$ とすると，

$$w1 = \frac{d1}{2\tan\gamma} \tag{2.9}$$

今回使用した LED の発散角は 120° である．また光源のピッチは約 7mm である．つまりパネル端部に配置された LED から出射された光は，1.8mm 程度の助走距離で隣接して配置さ

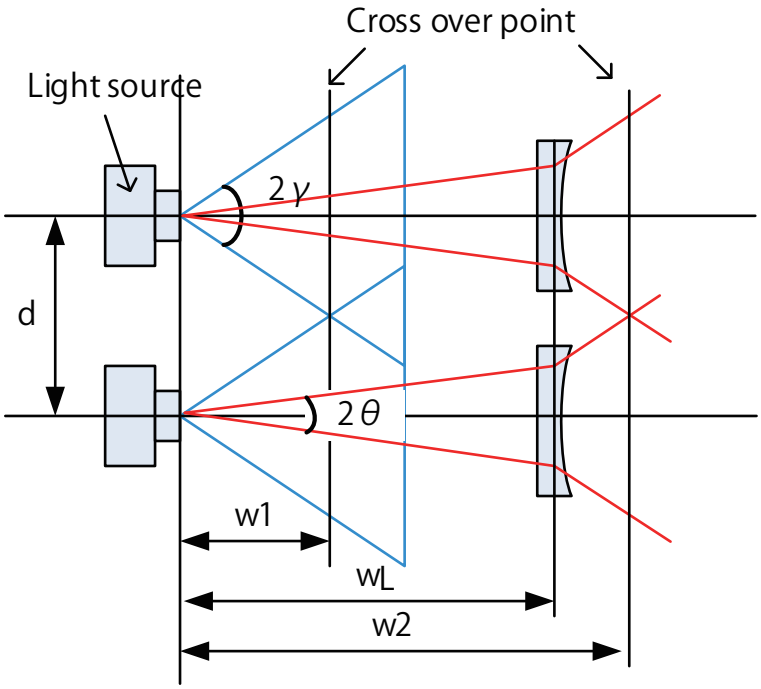


図 2.26: 光学的制約条件

レーザーバクライトに求められる光学的制約条件を満たすための，光源の位置関係を示す図である．

れた LED から出射する光と交差するため，LED はパネルの端部に接するように並べても光学的必要条件を容易に満足できる．

一方，赤色 LD の発散角は異方性を持っており，活性層と平行な方向には 7°，垂直の方向には 35° である．LD と LED のように配光の異なる 2 種以上の光源を組み合わせて使用する場合，液晶セルに入射させる前に各々の配光を揃えておくことが重要である．

そこで配光を揃えるために光源から w_L の位置に拡散レンズを配置する場合を考える．

発散角 2θ で LD 光源から出射した光が，拡散レンズを透過することで LED と同じ発散角 2γ になったとする．ピッチ $d2$ で配置された隣接する LD 光源から出射された光と交差するまでに必要な助走距離 $w2$ は，

$$w2 = \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\gamma}\right) w_L + \frac{d2}{2\tan\gamma} \tag{2.10}$$

薄い導光板に対する光のカップリング効率を考えると，導光板に光が入射するまでは発散角は小さくしておき，導光板の界面で発散角が増すのが望ましい．そこで，発散角調整用の拡散レンズが導光板端面に設けられた場合，

$$w2 \simeq W_L \tag{2.11}$$

発散角が 35° 活性層と垂直方向の光が同一平面上になるように LD を並べたとしても，隣接する LD 光源からの光と交わり，導光板端面で線状光源を得るためには，$w2$ は 67.4mm 程度必要になる．

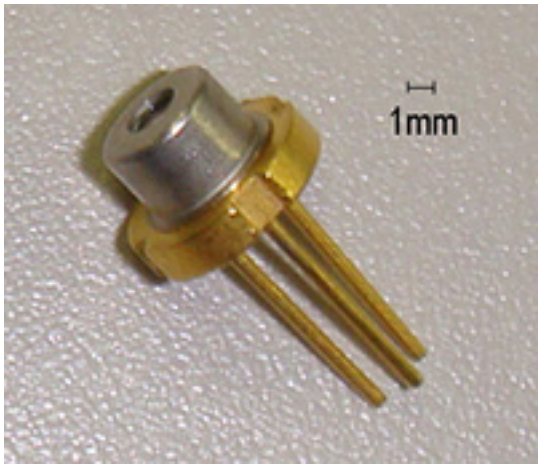


図 2.27: 赤色 LD の外観

レーザーバックライトで使用した赤色 LD は，フランジ径 ϕ5.6mm の TO-CAN パッケージに収められている．

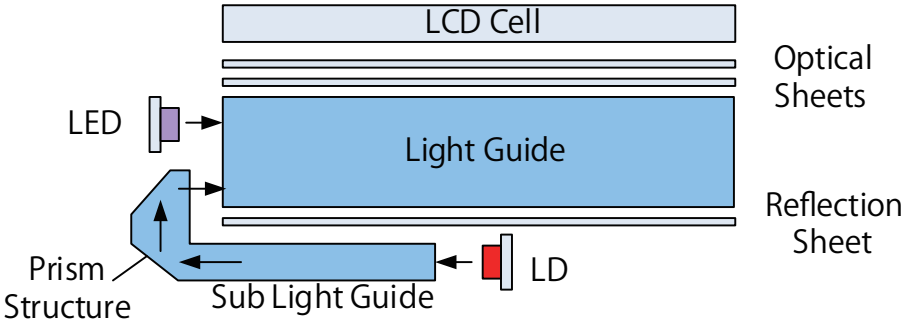


図 2.28: レーザーバックライト光学系断面イメージ図

パネル内側に配置された LD から出射された光は，補助導光板により一旦パネル端部に導かれた後，補助導光板端部に配置されたプリズム構造体により折り返され，導光板に導かれる．

図 2.27 は使用した LD 素子外観である．LD 素子は電力供給用のステムピンが光出射面の後方に突き出している．仮に助走距離を 67.4mm 以上確保した状態で LD をパネル端部に配置した場合，更に電気配線を行うための空間が必要になり，最終的にベゼル幅は 80mm 以上になる．これはデザイン面から好ましくない．

図 2.28 に今回採用した光学系配置のイメージ図を示す．助走距離が必要ない LED はパネルの短辺側端部に配置するが，長い助走距離が必要になる LD はパネルの内側に配置し，一旦外側に向けて出射させたレーザー光を，パネル短辺側端面に配置したプリズム構造体によって折り返す方式を採用した．

LD からパネル端面方向に出射された光は補助導光板により端部に配置されたプリズム構造体まで導光される．補助導光板内で十分に拡散された光はプリズム構造体によって折り返され，光は導光板に入射する．一方，パネル短辺側端部に配置されたシアン LED からの出射光はそのまま導光板に入射し，導光板内で赤色 LD からの光と結合される．

図 2.29: レーザーバックライト LCD-TV の外観

55 型レーザーバックライト液晶 TV 試作機の外観写真である．構造の最適化により，ベゼル幅約 40mm，筐体の厚み約 93mm と従来の 55 型 LCD-TV と同じ大きさの筐体に収めることが可能になった．

2.3.6 試作機の開発と評価

55 型レーザーバックライト液晶テレビ

図 2.29 はレーザーバックライトを組み込み，製作した 55 型液晶 TV 試作機の外観写真である．レーザーバックライトは従来の液晶パネルと比較して，レーザー光をパネル水平端で折り返す光学素子や，LD 冷却用のヒートシンクが追加になっているが，構造の最適化により，ベゼル幅約 40mm，筐体の厚み約 93mm と従来の 55 型 LCD-TV と同じ大きさの筐体に収めることが可能になった．

色域

図 2.30 はレーザーバックライト LCD-TV の色域測定結果であり，現在のメインストリームの放送規格である BT.709 および次世代スーパーハイビジョンの放送規格である BT.2020 の色域と比較して示してある．レーザーバックライト LCD-TV は赤色の光源に色純度の高い LD を用いたことで，従来の白色 LED を光源に用いた LCD-TV よりも赤色の色再現範囲が大幅に拡大していることが確認できる．

一般的な LCD で使われているカラーフィルタでは，図 2.25 に示したように緑のカラーフィルタの長波長側のカットオフ波長は 600nm を越える．また，YAG 蛍光体を用いた一般的な白色 LED は，図 2.31 に示すように緑色から赤色にかけてブロードなスペクトルを有するため，600nm 付近の黄色の光も緑のカラーフィルタを透過する．結果，緑色の色再現能力を落とす原因になっていた．

シアン LED は，緑色の蛍光体を青色 LED で励起する．図 2.32 に示したように，シアン LED のスペクトルは赤色付近の長波長側の成分が少なく，赤色 LD のスペクトルは緑色のカラーフィルタのカットオフ波長よりも長波長側の成分しか持たない．よって，レーザーバッ

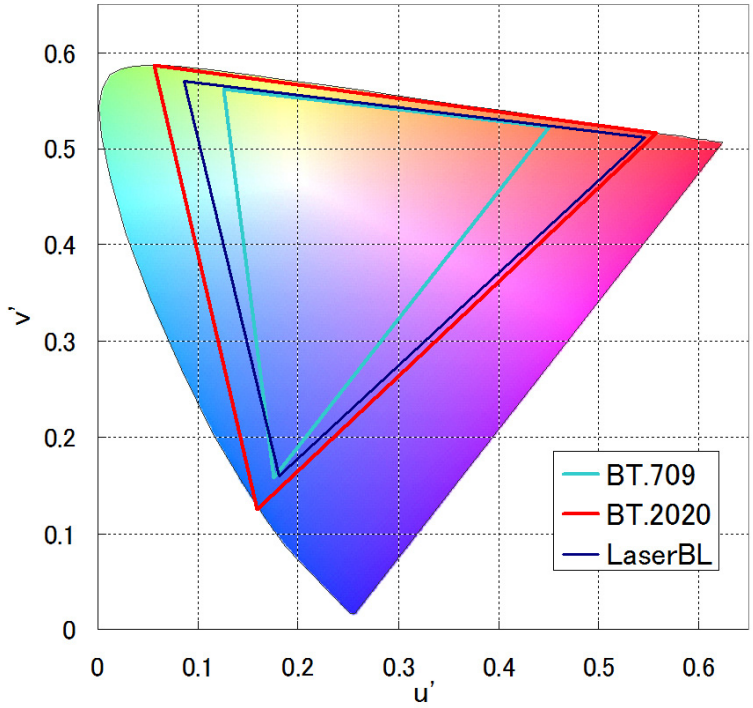


図 2.30: レーザーバックライトの色域

レーザーバックライトの色域を，CIE 1976 USC 色度図上で，BT.709 および BT.2020 の色域と比較した図である．

クライトでは緑色のカラーフィルタを赤色成分の光が通過しない．結果，レーザーバックライトでは緑色の色純度も改善される．

これらの結果より，55 型レーザーバックライト試作機は，CIE 1976 USC 色度座標上で BT.709 比 141.8%，BT.2020 比で 82.2%の色再現範囲を達成した．

2.3.7 まとめ

3 原色の色純度改善による広色域化手法の例として，はじめに光源に 3 原色の LD 用いた MD-PTV であるレーザー TV の詳細について述べた．レーザー TV は LD の高い単色性の効果により，BT.709 比 208%(u'v' 座標系）の色再現範囲を有することを確認した．また LD の WEP の高さにより，65 型の大画面でも定格 135W の低消費電力での駆動が可能になった．フィールドシーケンシャルカラー表示で問題になる色割れについては，LD と DMD の高速応答特性を利用し，色表示周波数を 1680Hz に高めることで解決した．

次に，光源素子に赤色 LD とシアン LED を用いた液晶向けエッジライト方式バックライトであるレーザーバックライトの詳細について述べた．バックライトの光源に色純度の高い赤色 LD と，シアン色の LED を用いたことで，液晶セルのカラーフィルタの特性を変えることなく，BT.709 比 141.8%の色再現範囲が得られることを確認した．

LD は色純度が高く消費電力も少ない事から，電子ディスプレイの広色域化には最適な光源の一つと言える．しかし光学的特性と熱的特性に起因した若干の使いにくさが存在するの

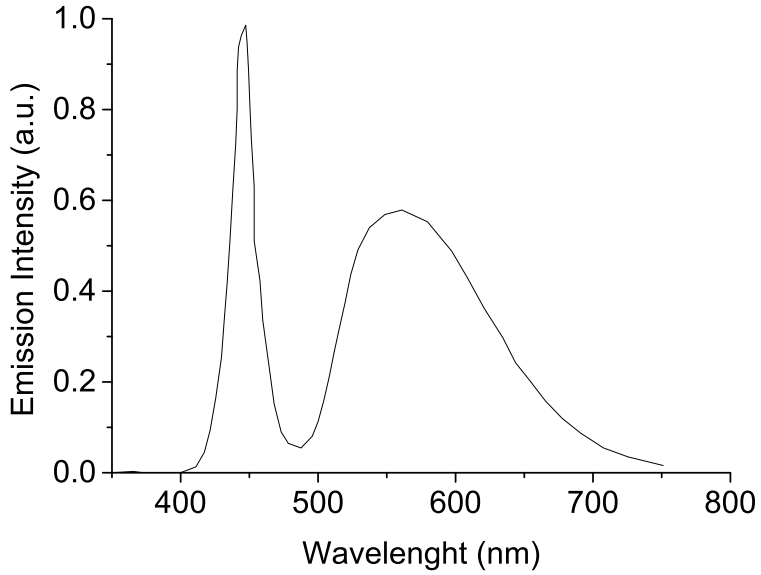


図 2.31: 白色 LED の分光放射スペクトル

YAG 蛍光体を用いた白色 LED の場合，青色は励起用青色 LED の影響で急峻なスペクトルになるが，緑から赤にかけてはブロードになる．

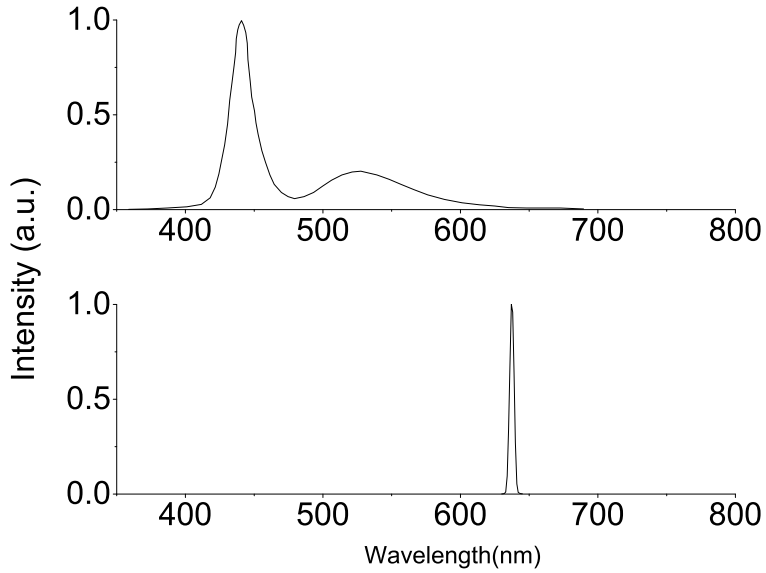


図 2.32: シアン LED と赤色 LD の分光放射スペクトル

上図はシアン LED の分光放射スペクトル，下図は赤色 LD の分光放射スペクトルを示す．LD の分光放射スペクトルは LED と比べて急峻なピークを持つ．

も事実であり，これまでLDを光源に用いた電子ディスプレイが普及しなかった一因にもなっていた．そこで次節において，電子ディスプレイにおけるLDの応用について検討を行う．

2.4 半導体レーザーのディスプレイ光源への応用

2.4.1 はじめに

近年，ワット級の光出力が可能な可視光レーザーが相次いで開発され [50][51]，表示デバイスの広色域化において，LDは有望な光源素子の一つとして注目を集めている．

LDは発光スペクトルが急峻であり，半値全幅 (FWHM: Full Width at Half Maximum) が数nm以下と色純度が極めて高いのが特徴である．また，LDはWEPが高く，省電力化の点でも期待されるデバイスである．一方で，光の直進性，高干渉性，熱特性の悪さと言った，映像表示においてはデメリットとなる特性も持ち合わせており，普及の足枷となっていた．そのため，ディスプレイの光源にLDを適用するためには多くの使いこなし技術が必要になる．

前節で述べたように，レーザーの光学特性については多くの研究が報告されているが，熱特性の悪さを補完するサーマルマネージメントや，高干渉性が原因となる過干渉ノイズ対策など，実際の製品化に必要となるLDの使いこなし技術に関しては多くは検討されてきていない．そこで本節では，LDを電子ディスプレイの光源に応用するための課題とその解決法について明らかにする．

2.4.2 シンチレーション

スペックルとシンチレーション

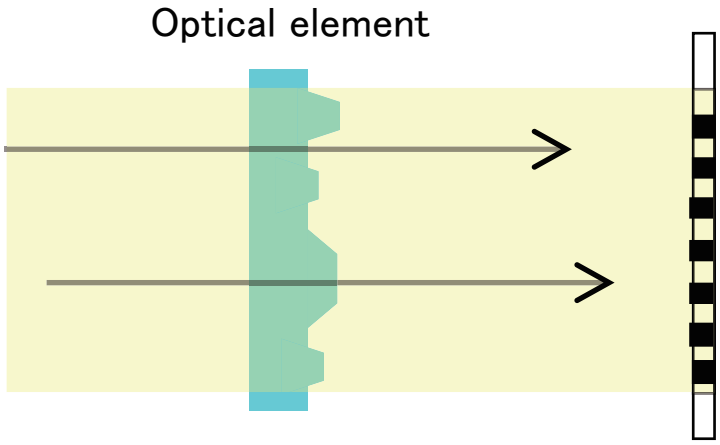
レーザーを電子ディスプレイの光源に用いる場合に問題になるのが，レーザー光のコヒーレンスの高さに起因するスペックルノイズである [52]．図 2.33(a) に示すようにスペックルノイズは主に光学系内で発生する干渉による，光の空間強度分布ムラである．一方，レーザーTVなどのようにスクリーンを有する電子ディスプレイでは，図 2.33(b) に示すようにスクリーンをレーザー光が通過する際に光の角度強度分布ムラが発生する．我々はこれをシンチレーションと呼んでいる．

図 2.34 に緑色レーザーを用いた場合のシンチレーションの様子を示す．シンチレーションは光源にUHPランプを用いたMD-PTV等でも原理的に発生するが，光源にレーザーを用いた場合は，レーザー光の高い干渉性により角度強度分布ムラが強く視認されるようになり，画質に対する悪影響が顕著になる．

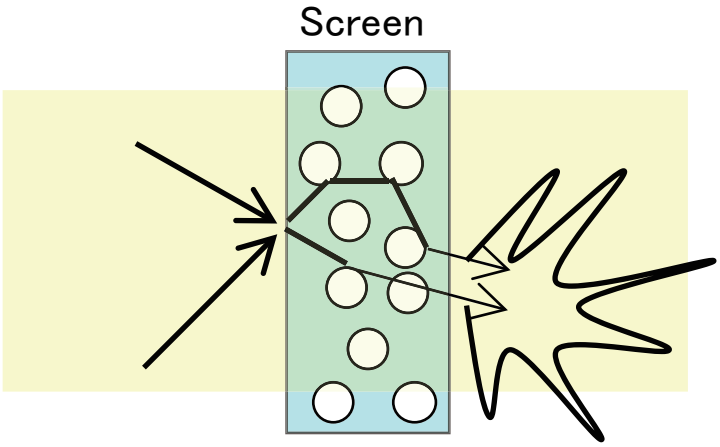
シンチレーション対策

シンチレーションを除去する有効な方法として，先に述べたマルチエミッタ光源を用いた角度多重以外にも，例えばスクリーンを揺動させる方法が古くから知られている [53]．レーザーTVではシンチレーション低減のために，この揺動方式のスクリーンを採用している．

65型のレーザーTV用のスクリーンの重量は，求められる剛性の高さから10kg近くになる．この重量のスクリーンを，電子ディスプレイに求められる長時間の耐久性を確保しつつ



(a) スペックルの発生原理



(b) シンチレーションの発生原理

図 2.33: スペックルとシンチレーション

スペックルは光学系内にて発生する干渉による空間強度の分布ムラである．シンチレーションはスクリーンで発生する干渉による角度強度分布ムラである．

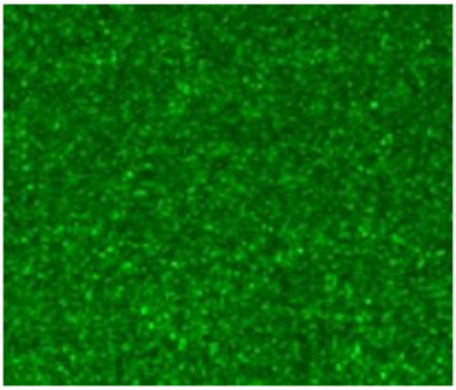


図 2.34: 緑色光源のシンチレーション

シンチレーションはスクリーンで発生する干渉による角度強度分布ムラにより発生するギラツキである．

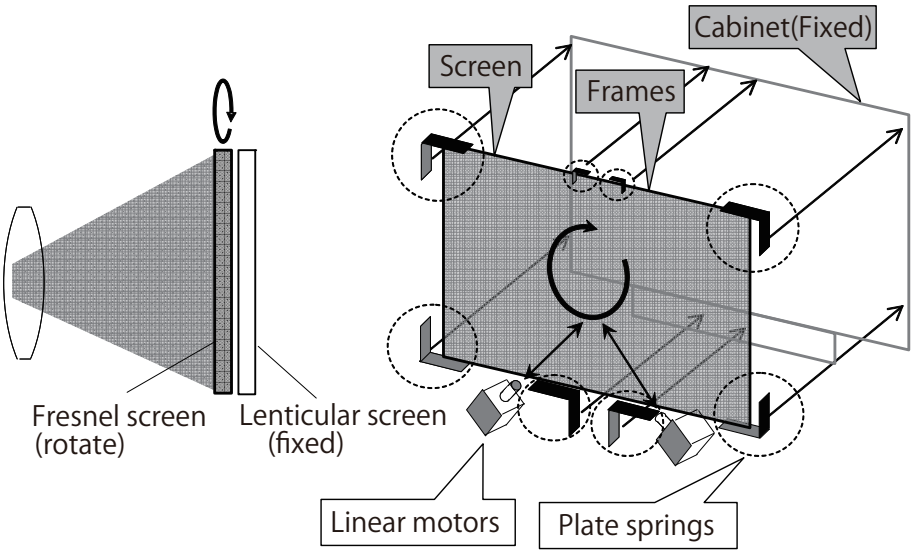


図 2.35: 揺動スクリーンの構造

レーザー TV の揺動スクリーンの構造を示す図である．複数の支持バネでスクリーンが筐体に接続されており，位相の異なる 2 つのリニアモータでスクリーンを揺動させる．

揺動させ，またレーザー TV の特徴である狭額縁スタイルに揺動機構を収めるためには，シンプルな駆動機構を導入する必要がある．そこで今回は，複数の支持バネによりスクリーンを筐体に接続するとともに，位相の異なる 2 つのリニアモータを使い，スクリーンを回転させる方式を採用した．

図 2.35 は，揺動スクリーンの概略構造を示す図である．レーザー TV のスクリーンは，フレネルスクリーン，レンチスクリーンの 2 枚で構成されており，内側のフレネルスクリーンのみを揺動させる．フレネルスクリーンはその周囲を金属製フレームで固定され，フレームは複数の L 字型のバネで筐体と繋げてある．

筐体下部には 2 つのリニアモータが設置されており，各々のリニアモータの動作方向はスクリーンの重心方向へ向いている．

時刻 t におけるリニアモータの軸方向の変位 $MA(t)$，$MB(t)$ は，リニアモータの振動振幅を C，周期を T，駆動位相差を γ とした場合，

$$\begin{cases} MA(t) = C\sin\left(\dfrac{2\pi t}{T}\right) \\ MB(t) = C\sin\left(\dfrac{2\pi t}{T} - \gamma\right) \end{cases} \tag{2.12}$$

ここで，2 つの振動軸間の角度である配置角度を α とすると，

$$\gamma = \pi - \alpha \tag{2.13}$$

時刻 t を消去し，xy 平面上における軌道軌跡を表すと，

$$x^2 + y^2 = C^2 \sin^2 \gamma \tag{2.14}$$

これは，任意の配置角度 α に応じた位相差 γ を与えて 2 つのリニアモータを駆動させると，スクリーンが駆動半径 $C\sin\gamma$ の円運動することを示している．

レーザー TV では，リニアモータの配置角度 α を約 50° とした．配置角度を 90° にした場合と比べて，約 25%の駆動損失が発生するが，外観のデザインを優先した結果である．また駆動仕様は，セットの加振力限界，スクリーンの固有周波数，そしてシンチレーションの評価結果を考慮して最適化を行った．結果，回転半径は約 0.3mm，駆動周波数は約 3Hz とした．

2.4.3 レーザーバックライトのサーマルマネージメント

サーマルマネージメントの必要性

電子ディスプレイにおいてサーマルマネージメントは非常に重要である．なぜならば，放熱性能が不十分だと，熱変形による画質劣化 [54] や，寿命の低下を引き起こす恐れがあるからである．特に光源に LED を用いた液晶のバックライトなどでは，LED 光源の高出力化と，表示デバイスの薄型化の影響で，光源周辺部の熱密度が高くなっており，放熱設計はよりセンシティブになっている [55].

レーザーバックライトに用いる LD の 1 素子あたりのエネルギー密度は LED よりも高い．つまり同じ光量を得ようとした場合，LD は LED より少ない素子数で足りる反面，1 素子あたりの発熱量は大きい．また，LED は比較的高温での使用に耐えるのに対し，LD は温度特性が悪く，特に赤色 LD は高温での使用には適さない．

レーザー TV のようなプロジェクタ型ディスプレイの光源の場合，図 2.21 に示すように，レーザー素子はレーザーモジュールとして一ヶ所に集約されている．その分，熱密度は高くなるが，狭い領域を集中して冷却出来れば良く，ペルティエ素子などの能動冷却素子を用いた冷却系を構成することにより，比較的容易に熱を外部に放出することが可能になる．

一方，液晶のバックライトでは，導光板内で均一な面光源を得るために，例えば図 1.9 に示すように，光源素子を分散配置させることが必要になる．ペルティエ素子などの高額な冷却素子を分散されている光源に合わせて配置するのはコスト的に困難である．つまり LD をバックライトの光源に用いる場合，LED を用いる場合と比較して放熱に関してより注意が必要になる．

LD と LED の温度特性

AlGaInP 系結晶を用いる赤色 LD は 640nm という比較的視感度の高い波長で発振が可能であるが，GaN 系結晶を用いる青色などの LD と比べ温度特性が劣る．

図 2.36 は 640nm 帯の横マルチモードで発振する赤色 LD の順方向電流に対する光出力の関係を，ケース温度 (Tc) 毎にパワーメータを用いて測定した結果である．ケース温度が室温程度であっても，Tc が 10K 上昇すると WPE は 20%程度低下する．また Tc が 70°C を超えると十分な光出力が得られない．

図 2.37 は Tc 毎に出力光のスペクトルのピーク波長を測定した結果を示す．Tc の上昇に伴いピーク波長は長波長側にシフトする．640nm 付近の赤色光は人の視感度が高い領域だが，図 2.22 に示すようにスペクトルのピークが長波長側にシフトするに従い視感度は急激に低下する．結果，Tc が上昇するに従い必要な画面輝度を得るためには，より多くの光束が必要になる．

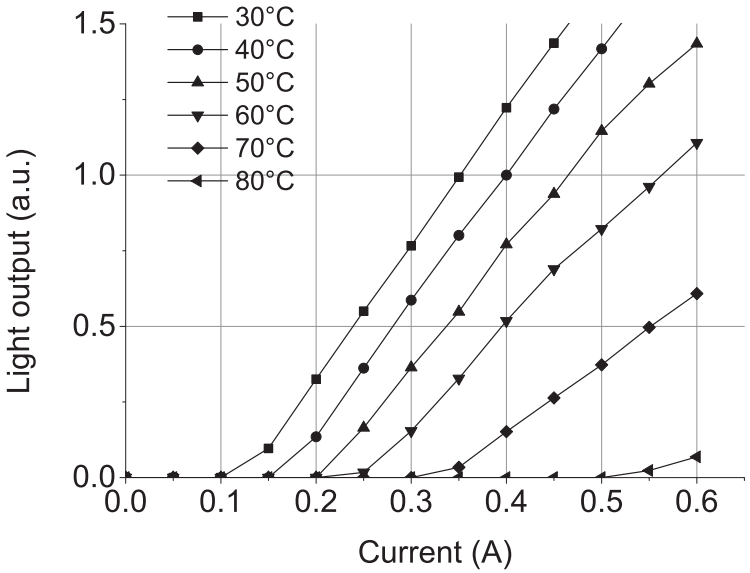


図 2.36: 赤色 LD の発光効率の温度依存性

赤色 LD の順方向電流と光出力の関係を Tc 毎にプロットした図である．温度が高くなるに従い発光効率は低下し，70°C を超えると十分な光出力が得られない．

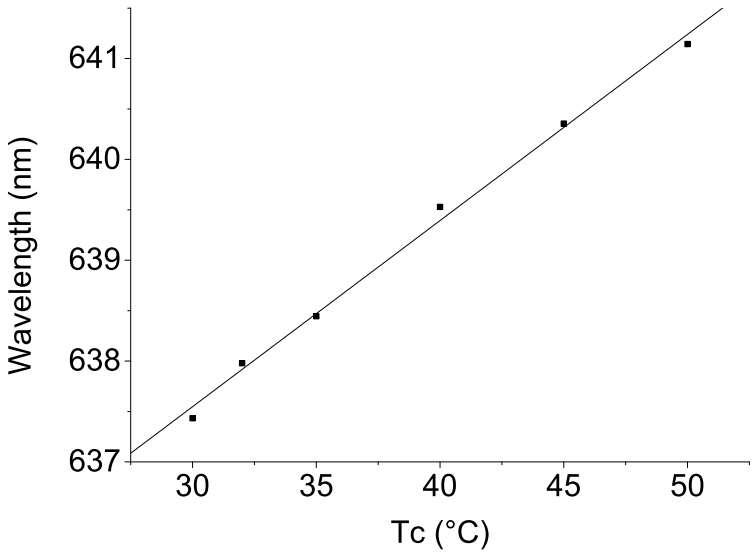


図 2.37: 赤色 LD の発振周波数の温度依存性

赤色 LD の順方向電流一定の条件下での Tc とスペクトルのピーク波長の関係を示したものである．素子温度上昇に伴いピーク波長は長波長側にシフトする．

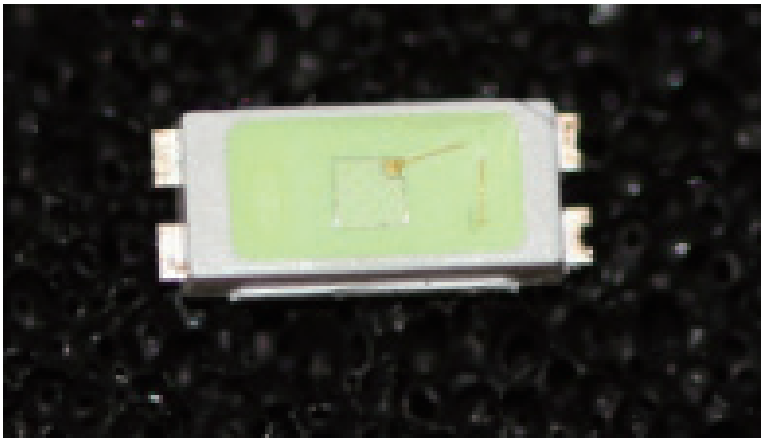


図 2.38: シアン LED の外観

シアン LED は 4.5×2mm 角のパッケージに収められ，緑色蛍光体を青色 LED で励起することでシアン色の光を得る．

また，Tc の上昇に伴い LD の活性層温度が高くなると，LD の故障モードの一つである緩慢劣化が加速される [56]．LD も他の半導体デバイスと同様にアレニウスの式 (Arrhenius equation) により故障の予測ができる．温度 T[K] での寿命を L とすると，

$$L \propto \exp\left(-\frac{Ea}{kT}\right) \tag{2.15}$$

ここで，Ea は活性化エネルギー [eV]，k はボルツマン定数である．

仮に赤色 LD の活性化エネルギー Ea が 0.2eV 程度であったとする [57]．このとき，活性層温度が 10K 上昇すると，寿命は約 80%になる．640nm 帯の赤色 LD は他の光源デバイスと比較して寿命特性が特別優れているわけではない．電子ディスプレイに求められる長時間の信頼性を確保する為には，LD の動作温度を低く保つことが不可欠と言える．

一方，シアン LED は図 2.38 に示すように, 青色 LED チップを備えたパッケージに青色の励起光を吸収して緑色の光を発光する蛍光体を充填したものである．LED の寿命は通常 50,000hr を越える [43]．また，LD の場合と同様に GaN 系結晶が用いられている青色 LED の温度特性は比較的優れている [55]．つまり，シアン LED は温度に対するロバスト性が高く，レーザーバックライトでは赤色 LD を効率よく冷却することが優先課題になる．

画面輝度と光源の発熱量

表示面積 S[m^2] のディスプレイにおいて，画面表面での光の発散角 2α で画面輝度 Y[cd/m^2] を得るために必要な光束は，ディスプレイの分光放射束を P_{panel}[W/m]，比視感度を V とすると，

$$683\int_{vis} P_{panel}(\lambda)\cdot V(\lambda)d\lambda = 2\pi SY(1-\cos\alpha) \tag{2.16}$$

と表すことができる．

液晶を含む光学系の光透過率を $\eta(\lambda)$，発光素子の構成数を N とすると，各発光素子の分光放射束 P_{source}[W/m] は次式を満たす．

$$P_{panel}(\lambda) = N\cdot\eta(\lambda)\cdot P_{source}(\lambda) \tag{2.17}$$

液晶セルの特性により異なるが，反射型偏向性フィルムなどの光学フィルム [58] を用いて，液晶セルに含まれる偏光板での光吸収量を最小限に抑えたとしても，光学系の光透過率 $\eta(\lambda)$ は 10%程度である．

簡単に考えるため全ての波長帯域での透過率が均一に 10%であると仮定すると，

$$\frac{683}{10}N\int_{vis}P_{source}(\lambda)\cdot V(\lambda)d\lambda \cong 2\pi SYG \tag{2.18}$$

ここで G は液晶の構造等により決まる定数であり，画面上で光が完全拡散している場合は 1 になる．

各光源の放射束を F_{source}[W]，正規化前の分光分布を f とすると，

$$P_{source}(\lambda) = F_{source}\frac{f(\lambda)}{\int_{vis}f(\lambda)d\lambda} \tag{2.19}$$

式 2.18 に代入すると，

$$\frac{683}{10}NF_{source}\int_{vis}\xi(\lambda)\cdot V(\lambda)d\lambda \cong 2\pi SYG \tag{2.20}$$

ここで，

$$\xi(\lambda) = \frac{f(\lambda)}{\int_{vis}f(\lambda)d\lambda} \tag{2.21}$$

よって，各光源の放射束 F_{source} は，

$$F_{source} \cong \frac{10}{683N}\frac{2\pi GSY}{\int_{vis}\xi(\lambda)\cdot V(\lambda)d\lambda} \tag{2.22}$$

これより，従来の液晶セルを用いる場合，例えば 55 型の LCD において白色 400cd/m^2 程度の輝度を得るためには，赤色 LD には合計で 10W 程度の放射束が要求される．また，シアン LED には合計で 30W 程度の放射束が要求される．

赤色 LD の WPE は，Tc が 25°C，光出力が 200mW の状態で 30%程度である [59]．WPE は素子温度の上昇に伴い低下するため，例えば，動作温度範囲での WPE の平均を 25%として考えると，32 個の LD を使い 10W の光出力を得るためには，合計 40W 程度の注入電力が必要になり，LD は合計で 30W の熱を発生する．

一方，LED は半田点温度 (Ts) が 25°C の条件下で 150mW 程度の光出力を出す場合，WPE は 48%程度である．30W の光出力を得るためには，198 個の LED に合計 62.5W 程度の注入電力が必要になり，LED は合計で 32.5W 程度の熱を発生すると推定できる．

目標温度と冷却方式

レーザーバックライトはコンシューマ向けの LCD に組み込むことを想定している．通常，コンシューマ向け LCD の動作温度は 0°C∼40°C 程度である．

赤色 LD の発光特性や素子寿命を考慮すると，LD の動作温度は低く抑えておくことが望ましい．しかし，光源が分散配置されるレーザーバックライトでは，ペルティエ素子などを

使い能動的に素子を冷却するのはコスト面から現実的ではない．そこで今回は，環境温度に対する LD の Tc 上昇幅 ΔT_{ac} を 10K 以下にすることを目標として冷却構造の検討を行った．

一方，LED は LD と比べると温度特性が良く素子寿命も十分に長い．よって，環境温度に対する LED の Ts 上昇幅 ΔT_{as} は 50K 以下にすることを目標にした．

$$\begin{cases} \Delta T_{ac} \leq 10\mathrm{K} \\ \Delta T_{as} \leq 50\mathrm{K} \end{cases} \tag{2.23}$$

バックライトや光学シート類，液晶セルを含む液晶パネル全体の放熱系を考える．液晶セルに使われるガラス材や導光板に使われる樹脂材は熱伝導率（熱拡散性）が低いこともあり，液晶パネルから外気への放熱は，金属である背面板金からの熱伝達，熱輻射が支配的になる．

固体内の熱伝導量は次式で表される．

$$Q_x = \frac{k}{\Delta x}(Ti - To)A \tag{2.24}$$

ここで，Ti，To は壁面温度 [°C]，A は熱伝達面の面積 [m^2]，k は熱伝導率 [W/m·K] である．

一方，固体表面から流体への熱移動量 Q_h[W] はニュートンの冷却の法則 (Newton's law of cooling) と呼ばれる次式で与えられる．

$$Q_h = hA(Tm - Ta) \tag{2.25}$$

ここで，A は伝熱面の表面積 [m^2]，Tm は壁面温度 [°C]，Ta は温度境界面から離れた流体の代表温度 [°C] である．h は熱伝達率 [W/m^2·K] であり，液晶パネルの背面板金 のような垂直面において，自然対流での流体（空気）への熱伝達率は 5W/m^2·K 程度であることが知られている [60]．

また，通常立てて使用する液晶パネルは，背面板金の全ての高さ位置で同じ温度 Ta の空気と熱交換が行えるわけではない．液晶パネルの上部では，下部で温められ自然対流で上昇してきた空気との間で熱交換を行うことになる．つまり，パネルの上部にいくに従い外気の温度は高くなり，背面板金と外気との間の熱交換効率は低下する．結果，パネル上部に配置された光源ほど素子温度は上昇する．

仮に，背面板金の温度 Tm と温度境界面から離れた気体の温度 Ta との差の平均が 5K であったとする．LD の発熱量 30W を温度差 5K で放熱させるために必要な放熱面積は，式 2.25 より約 1.2m^2 と求められる．これは 55 型の TV に用いられる大型の背面板金の全表面積を使っても足りない面積である．

実際には熱源である LD から背面板金の放熱面までの熱抵抗も考慮する必要がある．更に，近接して配置される LED の発熱量も加味する必要がある．これらを考慮すると，55 型の LCD に用いるレーザーバックライトでは，光源背面部には巨大なヒートシンクを配置し，加えてファンを用いた強制空冷も必須になると予想できる．

熱的制約

赤色 LD はシアン LED と比べて温度特性が劣ることは既に述べた．赤色 LD とシアン LED は同一の背面板金にマウントされる．そのためシアン LED と赤色 LD 間に温度勾配が生じている場合は，シアン LED で発生した熱の一部が赤色 LD に流入する．特に LED と LD の

光源間距離が短い場合には，熱伝達経路上から外気への放熱が十分に行われないまま，多くの熱がシアン LED から赤色 LD に流入する．結果，シアン LED が式 2.23 に示す目標温度を満足していても，赤色 LD の温度が目標を達成できない事態に陥る．

図 2.39 は 2 種類の光源を用いた液晶パネルの熱回路網である．既に述べたとおり，液晶セルに使われるガラス材や導光板に使われる樹脂材は熱伝導率（熱拡散性）が低いこともあり，液晶パネルから外気への放熱は金属である背面板金からの熱伝達，熱輻射が支配的になる．よってこの熱回路網モデルでは，外気への放熱経路である熱抵抗 R_{1A}，R_{1B}，R_{2C}，R_{3D}，R_{4E} は，背面板金の外側にだけに配置した．

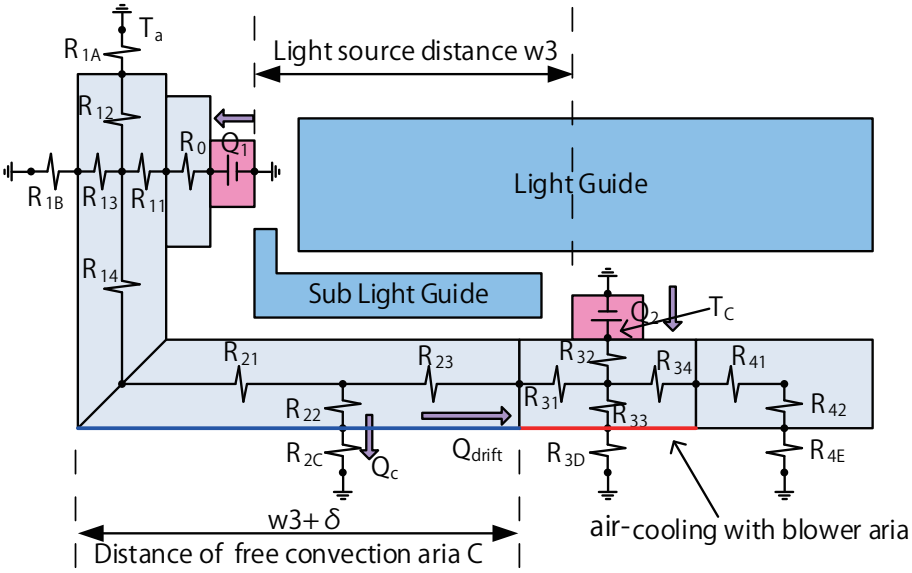


図 2.39: レーザーバックライトの熱回路網

2 種類の光源を有するレーザーバックライトの熱回路網を示した図である．液晶パネルから外気への放熱は金属である背面板金からの熱伝達，熱輻射が支配的になる．

パネル端面に配置された LED の発熱量を Q_1，背面板金に配置された LD の発熱量を Q_2 とする．また LED から LD に流れ込む熱量を Q_{drift} とすると，LD の温度 Tc は，

$$Tc = Ta + \left(R_{32} + \frac{R_D R_E}{R_D + R_E}\right) Q_2 + \frac{R_D R_E}{R_D + R_E} Q_{drift} \tag{2.26}$$

ここで，$R_D = R_{33} + R_{3D}$，$R_E = R_{34} + R_{41} + R_{42} + R_{4E}$ である．

LED で発生した熱量のうち自然対流領域 C から放出される熱量を Qc とすると，Q_{drift} は

$$Q_{drift} = \frac{R_A R_B}{R_F(R_A + R_B) + R_A R_B} Q_1 - \frac{(R_A + R_B)(R_F + R_C) + R_A R_B}{R_F(R_A + R_B) + R_A R_B} Q_C \tag{2.27}$$

また，Q_2 を用いて，

$$Q_{drift} = \frac{R_C(R_D + R_E)Q_C - R_D R_E Q_2}{(R_D + R_E)(R_{23} + R_{31}) + R_D R_E} \tag{2.28}$$

ここで $R_A = R_{1A} + R_{12}$，$R_B = R_{1B} + R_{13}$，$R_C = R_{2C} + R_{22}$，　$R_F = R_{14} + R_{21}$ である．

更に，LED 温度 Ts は

$$Ts = Ta + (R_0 + R_{11})Q_1 + R_F Q_{drift} + (R_F + R_C)Q_C \tag{2.29}$$

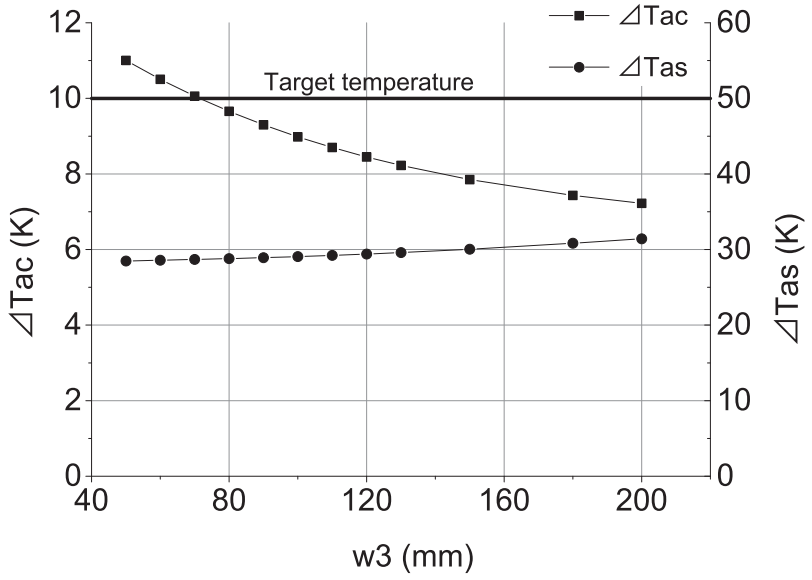


図 2.40: 2 種光源間距離と光源温度の関係

LD と LED の 2 種光源間距離 $w3$ と光源の環境温度に対する温度上昇量の関係を示す図である．$w3 \geqq 70$mm で目標とする $\Delta Tac \leq 10$K かつ $\Delta Tas \leq 50$K を満足する．

熱抵抗 R_F，R_C はそれぞれ自然対流領域 C の幅 $(w3+\delta)$ で表すことができる．光源ピッチ $d2$ あたりの熱抵抗は，背面板金の板厚さを $2t$，熱伝導率を κ とすると，

$$R_F(w3) = R_{14} + \frac{w3+\delta}{4\kappa t d2} \tag{2.30}$$

$$R_C(w3) = \frac{1}{w3+\delta}\left(\frac{2t}{\kappa d2} + \frac{1}{hd2}\right) \tag{2.31}$$

つまり LD ケース温度 Tc や LED の半田面温度 Ts は $w3$ の関数として求めることが出来る．

図 2.39 では説明を簡単にするため，背面板金形状を簡略化し，各ブロックの大きさを大きく示しているが，実際の設計では計算の精度を向上させるためにブロックの分割数を増やす必要がある．更に，ここでは各放熱面近傍の空気の温度は全て Ta としたが，計算する光源の位置によっては，別の光源からの廃熱で既に温められた外気と熱交換することになるため，温度の補正が必要になる．

図 2.40 は 2 種光源間距離 $w3$ に対する，最上部に配置される LD の温度 Tc および LED の温度 Ts の関係を，環境温度 Ta=30°C の条件下で 400cd/m^2 の輝度得る光出力を出した場合について計算した結果である．

ここで自然対流領域 C における空気への熱伝達率は一律 5W/m^2·K とした．また，強制空冷領域の熱伝達率は，幅 100mm，フィン高さ 30mm，フィン枚数 14 枚のヒートシンクを配置し，フィン間に風速 1m/s の風を送り込むことを想定し，下部に配置された LD によって上昇する冷却風温度も考慮して計算で求めた．更に，背面板金は板厚 1mm のアルミ材（熱伝導率：200W/m·K で計算）としたが，LED 基板と背面板金の間には，熱拡散を促す金属部材が配置されることを考慮し [61]，該当箇所の熱伝導率を部分的に調整した．

結果，図 2.40 で示すように，LED については距離に関係なく目標の $\Delta Tas \leq 50$K を達成できることが確認された．一方，LD については $w3$ が大きいほど温度が低くなり，$w3 \geqq 70$mm で目標とする $\Delta Tac \leq 10$K を狙えることが判明した．

薄型放熱構造

2 種光源間距離 w は，式 2.9，式 2.10 に示す光学的な制約距離 $w1$，$w2$ と熱的制約距離 $w3$ の全てを満足する必要がある．

$$w \geq \max\{w1, w2, w3\} \tag{2.32}$$

計算した 55 型のバックライトの構成では 2 種光源間距離 $w3$ は，光学的制約から求められる助走距離 $w1$, $w2$ よりも長い．つまり今回の構成では，熱的制約を最優先して光源配置を決めなくてはいけない．

液晶パネルの背面板金の中央部には通常，TCON(Timing controller) 基板が配置されている．加えて電源基板や画像処理回路基板なども背面板金上にマウントされることが多い．フィン高さ 30mm のヒートシンクは配置場所によってはこれら基板と干渉するため，2 種光源間距離 w を冗長に延ばすことはできない．そこで今回，2 種光源間距離を 100mm にした．

図 2.39 のモデルでは部品間の接触熱抵抗を考慮していないが，w =100mm にすることで計算上は接触熱抵抗による温度上昇を 1K まで許容する裕度設計が可能になる．

一方，LCD の筐体厚さはデザイン性の観点からベゼル幅と同様に少しでも薄くする要求が強い．フィン高さ 30mm のヒートシンクをそのまま LD 光源の背面に取り付けると，筐体厚さに対するインパクトが大きいため，ヒートシンクは LD 光源の背面にそのまま取り付けるのではなく，LD 光源から内側にオフセット配置させる構造を採用した．

図 2.41 はレーザーバックライトの光源周りの概略構造を示す液晶パネルの断面図である．ヒートシンクを LD からパネル内側にオフセットして配置したことで，ヒートシンクを LD 光源の背面に取り付ける場合と比較して，液晶ディスプレイの筐体厚さを 8mm 薄くすることが可能になった．ただし LD 光源からヒートシンクの放熱面までの熱抵抗が増すため，計算上 ΔTac が 2K 上昇する．

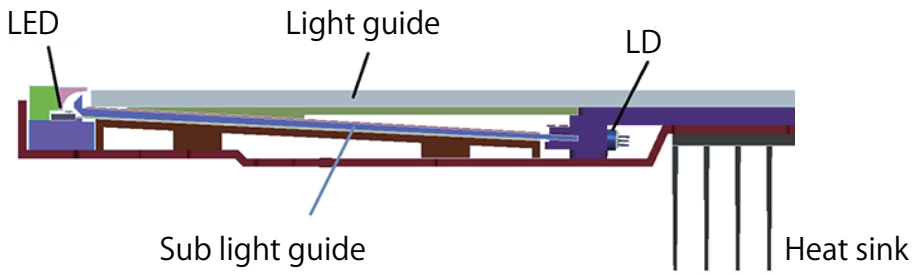


図 2.41: レーザーバックライト光学系の断面図

レーザーバックライトの光源部の概略構造を示す液晶パネルの断面図である．デザイン的な要求によりヒートシンクは LD 背面からパネル内側にオフセット配置されている．

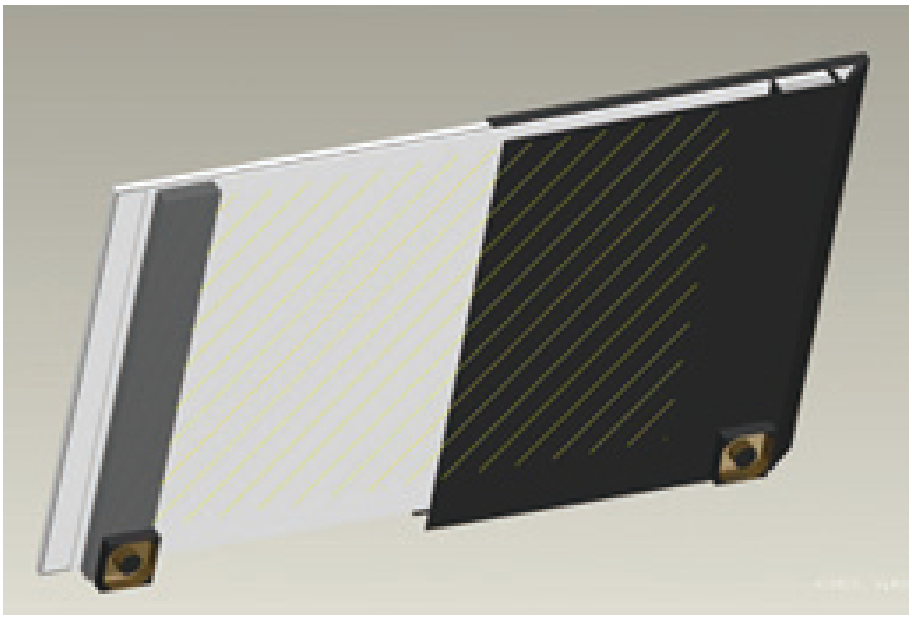


図 2.42: レーザーバックライトの液晶パネル背面図

右半分はダクトが有る状態，左半分はダクト部を外し，ヒートシンクが露出した状態を示している．幅 100mm，高さ 760mm のヒートシンクが背面板金の左右に配置され，背面カバーを使い風路を形成すると共に，下部には強制空冷用の軸流ファンが設置されている．

冷却風速と素子温度

図 2.42 はレーザーバックライトの放熱系をパネルの背面側から俯瞰した図である．幅 100mm，高さ 760mm の大きなヒートシンクが背面板金の左右に配置され，背面カバーを使い風路を形成すると共に，下部には強制空冷用の軸流ファンが設置されている．

強制空冷におけるダクト内の平均風速 u は，風路系の圧力損失 Δp と，風路断面積 A とを用いて次式で求められる．

$$A\Delta p = Ls\lambda'\frac{1}{2}\rho u^2 \tag{2.33}$$

ここで L は風路長さ，λ' は管摩擦係数，s は濡れ縁長さ，ρ は空気の密度である．

鉛直方向に配置された $L \simeq 0.76$m の長い冷却ダクト内に設置された櫛型ヒートシンクに風を送り込むためには静圧の高い軸流ファンが必要になる．今回，静音性も考慮し，最大静圧 21.5Pa，最大風量 0.96m^3/min，定格回転数が 2050rpm の 92mm 角軸流ファンを採用した．試作機での実測の結果，騒音 20dB 以下で平均 1.64m/s のヒートシンクフィン間風速が得られる事を確認した．

表 2.6 は光源出力を調整し，画面輝度 400cd/m^2 になるようにした場合の LED と LD の温度測定結果（環境温度との温度差）であり，鉛直方向に並べられた複数の光源素子のうち，最も温度が上昇する最上部に配置された素子の温度である．軸流ファンが定格回転数で回転している強制空冷状態と軸流ファンが停止している自然空冷状態を比較している．

LED の温度は，軸流ファンを停止させた状態でも目標の $\Delta Tas \leqq 50$K を達成できた．しかし，LD の温度は軸流ファンを停止させた場合は当然であるが，フィン間風速 1.64m/s の強制空冷条件下でも，式 2.23 に示す目標温度よりも 2K 程度高い結果になった．これは 2.4.3 節で述べた，ヒートシンクのオフセット配置の影響が大きいと思われる．

表 2.6: 400 cd/m^2 でのフィン間風速と光源素子の温度上昇量

フィン間風速		1.6m/s	自然対流
LD	ΔTac	11.9K	19.7K
LED	ΔTas	38.5K	44.5K

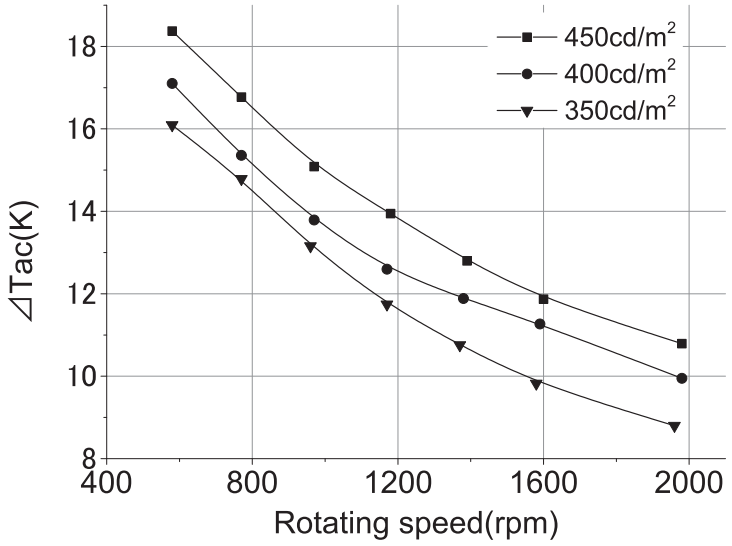


図 2.43: ファン回転数と光源の温度上昇量の関係

ファン回転数と光源の温度上昇量の関係を，画面輝度毎に示した図である．ファン回転数が 2000rpm 程度で LD 温度上昇量 $\Delta Tac \leqq$10K を満足.

そこで確認のため，ヒートシンクを LD の背面に付けたものを試作し再度温度測定を実施した．結果を図 2.43 に示す．横軸はファンの回転数，縦軸は LD 温度と外気温の差である．画面輝度が 400cd/m^2 の場合，ファン回転数が 2000rpm 程度でも目標の LD 温度上昇量 $\Delta Tac \leqq$ 10K を満足できることが確認できる．

次に，軸流ファンの回転数に対するパネルの上部と下部に配置された光源素子の温度差 $\Delta Tt{-}b$ を図 2.44 に示す．強制空冷を採用した冷却系は，光源からの発熱を自然対流のみで放熱させる場合と比較し冷却性に優れており，素子間の温度差は生じ難い．軸流ファンの回転数が 2000rpm 程度でも，LED の上下温度差は 0.5K，LD の上下温度差も 3.5K と高い温度の均一性が得られている．つまり，温度差に起因する色ずれなどは，ほぼ考慮する必要がない．

2.4.4 まとめ

スペクトルが急峻な LD は，電子ディスプレイの広色域化に有効な素子の一つである．しかしその光学特性や熱特性から，実際に光源として用いるには解決が必要な幾つかの課題があった．

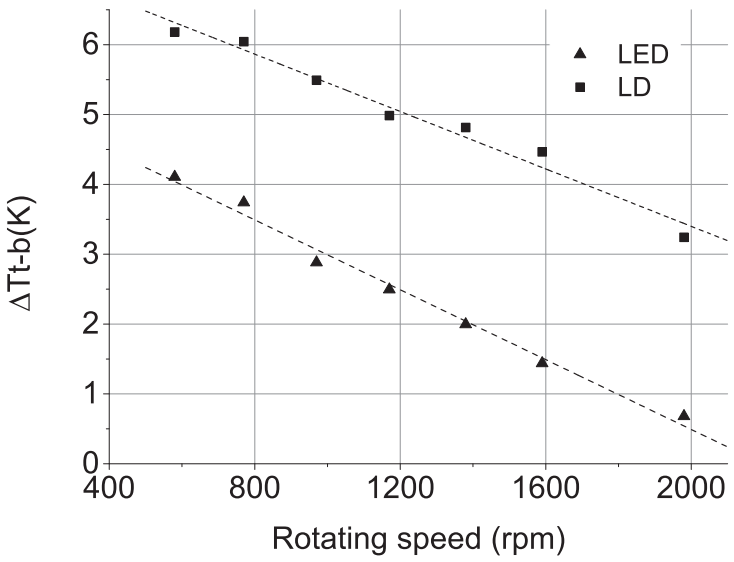


図 2.44: ファン回転数とパネル上下間温度差の関係

ファン回転数とパネル上下間での光源素子の温度差を示した図である．ファンの回転数が 2000rpm 程度でも，LED の上下温度差は 0.5K，LD の上下温度差も 3.5K と温度差は小さい．

本節ではそれら課題のうち，プロジェクション方式の電子ディスプレイの光源にレーザーを用いた場合に問題となるシンチレーションの低減方法と，熱特性の悪い LD の信頼性確保の上で必要になる，光源のサーマルマネージメントについて検討を行った．

シンチレーションの低減手法としてはスクリーンを揺動させる方法が知られているが，レーザー TV のような大画面ディスプレイでは，大型スクリーンを長期間安定して揺動させることが課題であった．今回，支持バネによる保持構造と 2 つのリニアモータによって，レーザー TV の大画面スクリーンを安定して揺動させる構造を提案．回転半径 0.3mm，駆動周波数 3Hz でスクリーンを回転運動させることでシンチレーションが視認されなくなることを確認した．

また，レーザーバックライトのサーマルマネージメントでは，LD と LED 間の熱移動量に着目して熱回路網を構築し，LD と LED 間距離と光源温度の関係を明確化．光学的制約と熱的制約を共に満足する LD と LED の配置の最適化手法を開示した．さらに，光源配置の検討結果をもとに 55 型のレーザーバックライト液晶テレビを試作し，色ムラやスペックルノイズなどが認められないことを確認すると共に，騒音が問題にならない低速回転の軸流ファンを用いることで，光源素子の温度が電子ディスプレイの品質を維持するために求められる温度範囲内に保持可能なことを示した．

2.5 結言

電子ディスプレイにおける色域補完手法として，多原色化と原色の色純度向上という 2 種の異なる手法を示し，それぞれの色域改善効果について検討を行った．

図 2.5 に示したように，物体色の多くは sRGB 色域外にも存在するが，BT.2020 ほど広い色再現範囲を必要とする映像は多くないかもしれない．しかし，南国のエメラルドグリーンの海の色や鮮やかな花の色など，従来の電子ディスプレイでは忠実に再現できなかった色が，高規格の映像信号と，レーザー TV をはじめとする広色域ディスプレイが揃うことによって表示させることが可能になる．

また，Helmholtz-Kohlrausch 効果として知られているように，人は高彩度の色を明るいと認識する [62]．つまり広色域ディスプレイに表示された高彩度映像は，色鮮やかに見えるだけでなく，コントラストも高く視認される．結果として，広色域ディスプレイは映像をより印象的に魅せることができるのである．

しかし，現時点では究極の広色域ディスプレイと言えるレーザー TV でさえ，人が認識できる色をすべて表示できるわけではない．本研究成果である色域補完技術をもとに，今後も映像信号の高規格化と共に更なる電子ディスプレイの広色域化の研究が進められることを期待する．

参考文献

[1] “IEC 61966-2-4 first edition, Multimedia systems and equipment — colour measurement and management — part 2-4: Colour management — extended-gamut YCC colour space for video applications — xvYCC,” Jan. 2006.

[2] “ITU-R BT.2020, Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange,” Aug. 2012.

[3] 矢島亮一，金澤　勝，境田慎一，“テレビジョンの色再現範囲拡大に関する検討,” テレビジョン学会年次大会，第 30 巻，pp.355–356，July 1994.

[4] H. Sugiura, H. Kaneko, S. Kagawa, J. Someya, and H. Tanizoe, “Six-primary-color LCD monitor using six-color LEDs with an accurate calibration system,” Proc. of SPIE 6058, Color Imaging XI: Processing, Hardcopy, and Applications, vol.6058, pp.508–511, Jan. 2006.

[5] K. Miyachi, Y. Yamada, N. Kimura, and S.Mizushima, “The UV2A technology for large size LCD-TV panels,” Proc. IDW’10, pp.13–16, Dec. 2010.

[6] Y. Sano, R. Nonaka, and M. Baba, “Wide gamut LCD using local dimmable four-primary-color LED backlight,” Journal of the Society for Information Display, vol.20, no.9, pp.539–546, Sept. 2012.

[7] M. Teragawa, “Four primary color (RGB+Y) display :The latest technologies and advantages,” Proc. IDW’10, pp.1353–1356, Dec. 2010.

[8] H.-C. Chuan, I. B.-David, and S.-T. Wu, “Five-primary- color LCDs,” Journal of Display Technology, vol.6, no.1, pp.13–16, Jan. 2010.

[9] H. Moench, G. Derra, E. Fischer, and X. Riederer, “Arc stabilisation for short arc projection lamps,” SID Symposium Digest, vol.31, pp.84–87, May 2000.

[10] R.G. Fielding, M.L. Burton, and T.A. Bartlett, “Colorimetry performance of a high-brighsystem DMD™-based optical system,” Journal of the Society for Information Display, vol.5, no.1, pp.19–22, Jan. 1997.

[11] S. Iwata, A. Kagotani, Y. Igarashi, and T. Abe, “A super-fine-pitch screen for rear-projection TV,” Journal of the Society for Information Display, vol.14, no.2, pp.193–197, Feb. 2006.

[12] 森　峰生，畑田豊彦，石川和夫，最勝寺俊大，和田　修，中村旬一，寺島信義，“単板継時混色型プロジェクタにおけるカラーブレイクアップの解析,” 映像情報メディア学会誌，vol.53，no.8，pp.1129–1135，Aug. 1999.

[13] 平井経太，鳥毛奈保子，堀内 隆彦昌治，澁谷竹志，長谷川史裕，能勢将樹，“知覚画像シミュレーションに基づく DLP®プロジェクタの色割れ評価,” 電子情報通信学会技術研究報告，vol.14，no.248，pp.9–12，Oct. 2014.

[14] L. Arend, J. KLubin, J. Gille, and J. Larimer, “Color breakup in sequentially scanned LCDs,” SID Symposium Digest, pp.201–204, June 1994.

[15] D.L. Post, A.L. Nagy, and P. Monnier, “Predicting color breakup on field-sequential display: Part 2,” SID Symposium Digest, vol.29, pp.1037–1040, May 1998.

[16] P. Janssen, J.A. Shimizu, J. Dean, and R. Albu, “Design aspects of a scrolling color LCoS display,” Displays, vol.23, no.3, pp.99–108, June 2002.

[17] 岡本成継，杉野道幸，向殿充浩，“フィールド・シーケンシャル・カラー表示における色割れと観視者視力および色表示周波数の関係,” 映像情報メディア学会技術報告，vol.25，no.8，pp.73–78，Jan. 2001.

[18] I. Miettinen, R. Nasanen, and J. Hakkinen, “Effects of saccade length and target luminance on the refresh frequency threshold for the visibility of color break-up,” Journal of Display Technology, vol.4, no.1, pp.81–85, March 2008.

[19] P.F.V. Kessel, L.J. Hornbeck, R.E. Meier, and M.R. Douglass, “A MEMS-based projection display,” Proceedings of the IEEE, vol.86, no.8, pp.1687–1704, Aug. 1998.

[20] A. Nagase, S. Kagawa, J. Someya, M. Kuwata, T. Sasagawa, and H. Sugiura, “Development of PTV using six-primary-color display technology,” SID Symposium Digest, vol.40, pp.27–30, May 2007.

[21] A. Nagase, Y. Okuno, J. Someya, and H. Sugiura, “The contour correction method using scaling technique,” International Workshop on Advanced Image Technology, pp.S11–1, Jan. 2006.

[22] 並木亮介，長瀬章裕，染谷　潤，杉浦博明，“PTV における鮮鋭度改善技術の開発,” 2007 年映像情報メディア学会冬季大会，pp.1–6，Nov. 2007.

[23] H. Sugiura, H. Kaneko, S. Kagawa, M. Ozawa, J. Someya, H. Tanizoe, H. Ueno, and T. Kimura, “Improved six-primary-color 23- in WXGA LCD using six-color LEDs,” SID Symposium Digest, vol.37, pp.1126–1129, June 2006.

[24] S. Shikama, H. Suzuki, T. Endo, and K. Teramoto, “Refractive-reflective optical system for realizing an ultra-thin rear projector,” Journal of the Society for Information Display, vol.11, no.4, pp.677–683, April 2003.

[25] 久保俊明，守谷正太郎，奥田悟崇，山中　聡，南　浩次，杉浦博明，“投写型ディスプレイにおける歪補正処理に関する一検討,” 映像情報メディア学会年次大会予稿集，pp.1–4–1，Aug. 2009.

[26] K. Ohara and A. Kunzman, “Video processing techique for multimedia HDTV with digigtal micro-mirror array,” IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol.45, no.3, pp.604–610, Aug. 1999.

[27] C.J. Bartleson, “Momory color of familiar objects,” Journal of the Optical Society of America, vol.50, no.1, pp.73–77, Jan. 1960.

[28] E.H.A. Langendijk, S. Swinkels, D. Eliav, and M. Ben-Chorin, “Suppression of color breakup in color-sequential multi-primary projection displays,” Journal of the Society for Information Display, vol.14, no.3, pp.325–329, March 2006.

[29] 窪田　悟，嶋田　淳，岡田　想，中村芳知，城戸恵美子，“家庭におけるテレビの観視条件,” 映像情報メディア学会誌，vol.60，no.4，pp.597–603，April 2006.

[30] 吉田育弘，山本洋一，“明環境下に設置した液晶ディスプレイのカラーマネージメント,” 電子情報通信学会論文誌 A，vol.J85-A，no.7，pp.793–805，July 2002.

[31] R.N. Hall, G.E. Fenner, J.D. Kingsley, T.J. Soltys, and R.O. Carlson, “Coherent light emission from GaAs junctions,” Physical Review Letters, vol.9, no.9, pp.366–369, Sept. 1962.

[32] T. Yag, H. Nishiguchi, Y. Yoshida, M. Miyashita, M. Sasaki, Y. Sakamoto, K. Ono, and Y. Mitsui, “High-power high-efficiency 660-nm laser diodes for DVD-R/RW,” IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, vol.9, no.5, pp.1260–1264, Sept. 2003.

[33] M.A. Haase, J. Qiu, J.M. DePuydt, and H. Cheng, “Blue-green laser diodes,” Applied Physics Letters, vol.59, no.11, p.1272, Sept. 1991.

[34] S. Nakamura, M. Senoh, and T. Mukai, “P-GaN/N-InGaN/N-GaN double-heterostructure bluediodes-emitting diodes,” Japan Journal of Applied Physics, vol.32, no.2, pp.L8–L11, Jan. 1993.

[35] C.E. Baker, “Laser display technology,” IEEE Spectrum, vol.5, no.12, pp.39–50, Dec. 1968.

[36] H. Sugiura, T. Sasagawa, A. Michimori, E. Toide, T. Yanagisawa, S. Yamamoto, Y. Hirano, M. Usui, S. Teramatsu, and J. Someya, “65-inch, super slim, laser TV with newly developed laser light sources,” SID Symposium Digest, vol.39, pp.854–857, May 2008.

[37] 長瀬章裕，桑田宗晴，岡垣　覚，道盛厚司，染谷　潤，平野嘉仁，中村　聡，都出英一，吉原　徹，寺松滋則，杉浦博明，“可視光レーザー光源を用いたレーザー TV の開発,” レーザー研究，vol.39，no.6，pp.24–27，June 2011.

[38] M. Kuwata, H. Sugiura, T. Sasagawa, A. Michimori, E. Toide, T. Yanagisawa, S. Yamamoto, Y. Hirano, M. Usui, S. Teramatsu, and junSomeya, “A 65-in. slim (255-mm depth) laser TV with wide-angle projection optical system,” Journal of the Society for Information Display, vol.17, no.11, pp.875–882, Dec. 2009.

[39] “SMPTE 170M–2004, Composite analog video signal – NTSC for studio applications,” Jan. 2004.

[40] “ITU-R BT.1700, Characteristics of composite video signals for conventional analogue television systems,” Feb. 2005.

[41] Y. Hirano, T. Yanagisawa, S. Yamamoto, Y. Koyata, M. Okano, T. Hamaguchi, A. Nakamura, T. Yagi, and H. Sugiura, “Planar-waveguide green laser for laser TV,” SID Symposium Digest, vol.39, pp.972–974, May 2008.

[42] 黒田和男，山本和久，栗村直編，“解説 レーザーディスプレイ,” p.186，オプトロニクス社，Feb. 2010.

[43] M. Anandan, “Progress of LED backlights for LCDs,” Journal of the Society for Information Display, vol.16, no.2, pp.289–310, Feb. 2008.

[44] E. Niikura, R. Murase, S. Kagawa, N. Nakano, A. Nagase, H. Sakamoto, T. Sasagawa, K. Minami, H. Sugiura, K. Shimizu, and M. Hanai, “Development of laser backlighting LCD television,” Proc. IDW/AD’12, pp.287–288, Dec. 2012.

[45] Y. Inaba, K. Imai, I. Fujieda, and I. Onishi, “A backlight based on a laser diode and its design considerations,” SID Symposium Digest, vol.39, pp.1564–1567, May 2008.

[46] J. Kinoshita, Y. Kawasaki, Y. Takeda, and M.Ueno, “New light-bar emitting phosphor-converted white line light pumped by InGaN/Gan laser diode for edge-lit backlight unit applications,” SID Symposium Digest, vol.42, pp.781–784, June 2011.

[47] K.Fujisawa, I.Onishi, and Y.Fujiwara, “Edge-light backlight unit using optically patterned film with plural light-emitting diode placed on side as light source,” The Japan Society of Applied Physics, vol.46, no.38, pp.L933–L935, Oct. 2007.

[48] P. d.Greef, H.G. Hulze, J. Stessen, H.V. Mourik, and S. Sluyterman, “Adaptive scanning, 1-D dimming, and boosting backlight for LCD-TV systems,” Journal of the Society for Information Display, vol.14, no.12, pp.1103–1110, Dec. 2006.

[49] G-E.Onac, I. Vogels, M. Bartula, A. Hoevenaars, and H.K. Louwsma, “Scanning backlight for motion-blur reduction on mobile display,” Journal of the Society for Information Display, vol.16, no.2, pp.337–341, Feb. 2008.

[50] K. Kuramoto, T. Nishida, S. Abe, M. Miyashita, M. Mori, and T. Yagi, “High power AlGaInP red laser diode for display applications,” Proc. IDW’14, pp.1064–1067, Dec. 2014.

[51] S. Masui, T. Miyoshi, T. Yamamoto, and S. ichiNagahama, “Blue and green laser diodes for large laser display,” The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, pp.SA1–3, June 2013.

[52] 黒田和男，“レーザースペックルノイズ,” レーザー研究，vol.39，no.6，pp.390–394，Jan. 2011.

[53] S. Lowenthal and D. Joyeux, “Speckle removal by a slowly moving diffuser associated with a motionless diffuser,” Journal of the Optical Society of America, vol.71, no.7, pp.847–851, July 1971.

[54] C.-Y. Chu and M.-C. Pan, “Thermal-deformation characterization of the panel of a TFT-LCD TV. PartII: Solutions to thermal-induced extrusion degrading image quality,” Journal of the Society for Information Display, vol.18, no.5, pp.357–367, May 2010.

[55] G.A. Luiten and B.J.W. terWeeme, “Thermal management of LED-LCD TV display,” Journal of the Society for Information Display, vol.19, no.12, pp.931–942, Dec. 2011.

[56] T.Nishida, N. Shimada, K. Ono, T. Yagi, and A. Shima, “637-639nm red high-power LDs for display,” Proc. of SPIE, vol.7583, pp.758303(1–9), Feb. 2010.

[57] T. Yagi, H. Mitsuyama, T. Nishida, and K. Kadoiwa, “Reliability study on high power 638 nm broad stripe LD with a window-mirror structure,” Proc. IDW’13, pp.1267–1270, Dec. 2013.

[58] M.F. Weber, C.A. Stover, L.R. Gilbert, T.J. Nevitt, and A.J. Ouderkirk, “Giant birefringent optics in multilayer polymer mirrors,” SCIENCE, vol.287, no.31, pp.2451–2456, March 2000.

[59] N. Shimada, M. Yukawa, K. Shibata, K. Ono, T. Yagi, and A. Shima, “640-nm laser diode for small laser display,” Proc. of SPIE, vol.7198, pp.719806(1–8), Jan. 2009.

[60] J.P. Holman, “Heat transfer tenth edition,” p.11, McGraw-Hill companies, Jan. 2009.

[61] S.K.Kim, J. Kang, W.Y. Kan, and S.H.Kim, “Thermal characteristics of edge-illumination type LED backlight system in a thin flat panel display,” 2010 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, pp.1–5, June 2010.

[62] T. Shizume, G. Ohashi, H. Takamatsu, and Y. Shimodaira, “Estimation of the Helmholts-Kohlrausch Effect in natural image using gaze tracking data,” Proc. IDW’14, pp.970–973, Dec. 2014.

第3章　解像度補完技術

3.1　緒言

電子ディスプレイの主役が CRT から LCD，PDP などの FPD に置き替って以降，表示デバイスの高解像度化が進んでいる．SD アナログ放送から HD デジタル放送への移行期であった 2000 年代前半，まだ NTSC[1] のような低解像度コンテンツも多く残っている状況にもかかわらず，市場を流通している TV は 720p と呼ばれる 1280×720 画素の解像度や，1366×768 画素の解像度を有するものであった．更に電子ディスプレイの価格下落と共に，上位機種であったフルスペックハイビジョンと呼ばれる 1920×1080 画素の解像度を有する TV が急速に普及していった．

例えば HD 解像度の LCD や PDP に 1280×720 画素の映像信号を表示させる場合，映像信号の解像度のまま表示させると，映像は画面の一部に小さく表示される．逆に 4K 解像度の映像信号をそのまま表示させると，映像の一部しか画面に表示させることができない．つまり表示させたいデジタル映像信号と表示デバイスの解像度に不整合がある場合，画像処理によって映像を拡大または縮小させた後に表示させることが求められる．

サンプリング処理によってデジタル化してある映像信号の解像度を変更する場合，欠落している位相のデータを推定し補間する必要がある．この際，高周波数成分が失われたり，近隣画素との相関が低下することで，画質の劣化を招くことがある．

我が国では 2012 年に地上デジタル放送への移行が完了し，HD 解像度の映像コンテンツが一般化した．しかし，電子ディスプレイの製造メーカは新たな需要を喚起するため，フラッグシップモデルとして 4K やそれ以上の解像度の電子ディスプレイを前面に押し出し，高精細化を謳い文句に販売活動を開始している．

しかし現状では，4K 以上の解像度を有する映像コンテンツは市場にはほとんど出回っておらず，4K 以上の解像度を有する電子ディスプレイでは多くの映像コンテンツで解像度変換が必要になる．当然，解像度変換によって生じる画質劣化の補完が求められる．

本章では，電子ディスプレイにおける画像拡大・縮小処理 (スケーリング処理) に用いられる画素補間手法を紹介するとともに，スケーリング処理時に発生する画質劣化の改善方法について提案し，その効果を検証する．

3.2　デジタル画像のスケーリング処理

デジタル画像の拡大・縮小処理は昔から多くの手法が研究されてきた．例えば，榎並らはこれら手法のうちデジタル画像のスケーリング処理で広く用いられる最近接零次補間，4 点線形補間，16 点標本化関数補間などの補間特性を調べている [2]．隣接画素の階調情報のみか

ら注目画素の階調を推定し，補間するこれらの方法は計算規模が比較的少なく，ハードウェアへの実装を考えた場合には今なお有効な手法といえる．以下にこれら手法の概要を纏める．

最近接零次補間　最近接零次補間はニアレストネイバー法とも呼ばれ，求める画素から距離的に最も近い画素を参照する．

求める画素を $Q(x,y)$，元の画素を $P(x,y)$ とすると，

$$Q(x,y) = P([x+0.5],[y+0.5]) \tag{3.1}$$

ここで [　] はガウスの記号である．

最近接零次補間は画像の縮小率が大きい場合は有効な方式であるが，画像の拡大に用いると最大で ± 0.5 画素の誤差が生じるため，ジャギーの発生が問題になる．

そこで高橋らは線形補間や最近接零次補間で発生する斜め線部のジャギーを低減する方法として，はじめに斜め線を検出し，検出された斜め領域には斜め方向にフィルタを適用する適応処理を提案している [3]．ただし，この手法ではジャギーの低減は可能であるが，画像拡大によって失われる高周波数成分は補正できない．

4 点線形補間　バイリニア補間とも呼ばれる 4 点線形補間は，図 3.1 に示すように求める画素 $Q(x,y)$ の近傍 4 点から，線形補間によって注目画素の階調を求める手法である．

$$\begin{aligned} Q(x,y) = \alpha(1-\beta)P([x],[y]) \quad &+ \quad \alpha\beta P([x+1],[y]) \\ &+ \quad (1-\alpha)(1-\beta)P([x],[y+1]) + (1-\alpha)\beta P([x+1],[y+1]) \end{aligned} \tag{3.2}$$

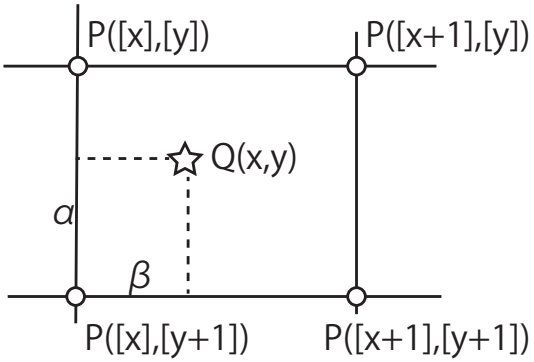


図 3.1: 4 点線形補間での画素位置関係

4 点線形補間では，求める画素 $Q(x,y)$ の近傍 4 点から，線形補間によって注目画素の階調を求める．

この手法では線形補間を用いて平滑化を行うため，最近接零次補間と比べてジャギーの程度は抑えられる．しかし，平滑化処理によって映像信号が持っていた高周波数成分が失われるため，全体的にぼやけた画像になる．

そこで，例えば四角らはエネルギーの平均値を考慮した線形補間方法により，ぼやけを低減する手法を提案している [4]．

16 点標本化関数補間　周波数特性の劣化を抑えつつ画素補間を行う方法に，sinc 関数を用いたフィルタリング処理がある．sinc 関数は理想的なローパスフィルタである矩形関数 $\mathrm{rect}(t)$ をフーリエ変換することで得られる関数であり，sinc 関数を用いたフィルタリング処理は線形演算などで補間するよりも周波数特性に優れる．

$$\mathrm{sinc(x)} = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{rect(t)e^{-j\omega t}dt} = \frac{\sin \pi \mathrm{x}}{\pi \mathrm{x}} \tag{3.3}$$

sinc 関数を用いる場合，本来は無限の標本点を準備する必要があるが，ハードウェア化を考えると現実的には有限の標本点から計算を行うことになる．そこで，ハニング窓やハミング窓といった窓関数を利用し，標本点を減らしつつも許容可能な透過域特性を有するフィルタが得られるようにする．

図 3.2 は sinc 関数を用いる画像補間の標本点の例を示したものであり，バイキュービック法とも呼ばる 16 点標本化関数補間の標本点を示している．

この補間方法は三角関数を含む演算が必要になるため，一般的には計算量が増大するが，入力する映像信号のフォーマットと表示デバイスの画素数が予め分かっている場合は，その拡大率に応じて補間に用いる係数を予め決めることができる．よって，既知の係数をルックアップテーブルに値を保持させておくことでハードウェア化に際しても計算量が問題になることはない．

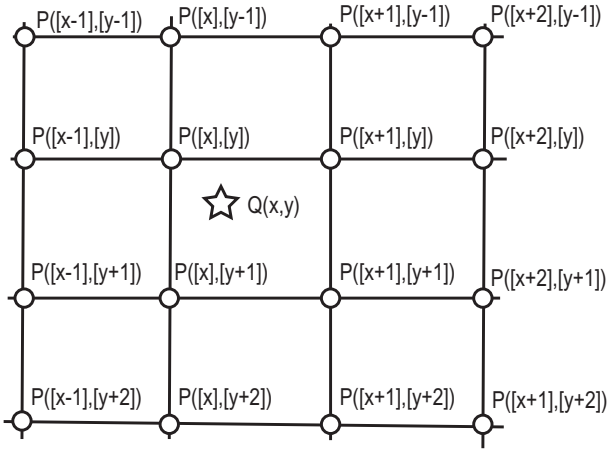


図 3.2: 16 点標本化関数補間での画素位置関係

バイキュービック法とも呼ばる 16 点標本化関数補間での画素位置関係を示した図である．sinc 関数等のフィルタを用いることで，注目画素の階調を算出する．

3.3　デジタル画像のスケーリング処理における問題

標本化定理に従うと，標本化周波数 ω_s で標本化された映像信号ではナイキスト周波数 ω_f を超える周波数成分は再現できない．

$$\omega_f = \frac{\omega_s}{2} \tag{3.4}$$

デジタル画像のスケーリング処理において，画像縮小はサンプリング周波数を低くすることと等価であり，理論的には画像の解像感を維持することが可能である．一方，画像拡大は，

サンプリング周波数を高くすることと等価であり，原画像で失われている高周波成分を推定する必要がある．結果，2 倍以上の拡大倍率では周波数特性の劣化は避けられない．

実際にデジタル画像のスケーリング処理では，多くの場合において画像の鮮鋭度が劣化するという問題が伴う．そこで，劣化した鮮鋭度を向上させるために，別途鮮鋭度を補完する処理が必要になる．

3.4 画像の拡大縮小技術を用いた輪郭補正技術

3.4.1 はじめに

画像の鮮鋭度を改善する古くから使われている方法として，ラプラシアンフィルタを用いた輪郭強調がある [5]．入力画像 f の 2 次微分であるラプラシアンの整数倍を，入力画像から差し引くこの方法は，入力画像にはないこぶ（オーバシュート）とくぼみ（アンダシュート）を生成することで輪郭部分の階調変化を強調する．

$$F = f - k\nabla^2 f \tag{3.5}$$

$$\text{where,} \quad k > 0$$

デジタル画像においては，ラプラシアンの離散値近似は加減算のみで求めることができる．

$$\nabla^2 f(i,j) = [f(i+\tau,j) + f(i-\tau,j) + f(i,j+\tau) + f(i,j-\tau)] - 4f(i,j) \tag{3.6}$$

$$\text{where,} \quad \tau \in \{1, 2, ...\}$$

ラプラシアンフィルタは演算量が少なく，ハードウェア化が極めて容易という特徴を有する．しかし，微分フィルタの特性上，空間周波数の高い輪郭を強調するのには適するが，空間周波数の低い輪郭に適用すると幅の広いオーバシュート・アンダシュートが生成され，不自然さが目立つという課題があった．また，ノイズ成分の多い画像に適用すると，輪郭部以外のノイズも強調されてしまう．

これら課題を克服する方法として，例えば Lu らは，ウェーブレット変換により得られる各種解像度の映像に対して，重み付けをしたラプラシアンフィルタ処理を行い，処理後画像を逆変換することで輪郭を強調した画像を得る手法を報告している [6]．また小寺らは，複数のフィルタを輪郭部の空間周波数に対して適応的に用いる方法を提案している [7]．また，中静らはウェーブレット変換を用いてノイズ成分を分離することで，ノイズ部分を強調することなくフィルタ処理を行う方法を報告している [8, 9]．

さらに，周波数特性が劣化しないデジタル画像のスケーリング方法として，例えば高橋らはラプラシアンピラミッド階層表現を利用した画像拡大法を提案している [10]．低解像度のラプラシアン成分から高解像度のラプラシアン成分を推定するこの手法は，不要なアーティファクトは発生し難いが，線形フィルタによる 3 次たたみ込み内挿演算の 2 倍以上の計算が必要になるデメリットがある．

昨今の高性能な計算機は，映像信号をフーリエ変換し，周波数空間において画像処理を行う手法を一般化した．しかし，民生向け画像表示装置に組込まれるような画像処理 ASIC では，多くの演算量が必要な周波数空間への変換処理を実装することはコスト的に困難である．

そこで今回，一般的な電子ディスプレイで用いられる，画像の拡大縮小技術 (スケーリング技術) を応用した輪郭補正方法を提案する [11, 12, 13, 14, 15]．この輪郭補正方法は，検出した輪郭部分に対して局部的にスケーリングを施し，輪郭部分の傾斜を大きく（輪郭の幅を狭く）することで画像の鮮鋭度を改善させるものである．スケーリングは多くの画像処理システムに搭載されている演算回路であり，従来の回路に若干の検出機能を付加することで構成可能な本手法は，ハードウェア化に優れた輪郭補正技術といえる．

3.4.2 システムの構成と動作

図 3.3 は，本輪郭補正回路のシステム構成図である．本システムは，従来のスケーリング回路に輪郭検出回路と倍率制御回路を加えて構成される．

輪郭検出回路は，輪郭の有無，輪郭幅および輪郭の中心位置を検出する．倍率制御回路は，検出された輪郭の中心位置および輪郭幅に基づき，輪郭部分の目標倍率を局部的に増減させスケーリング倍率を求める．スケーリング回路は，スケーリング倍率に基づいた画像のスケーリングを行うことで局部的に画像を拡大縮小する．

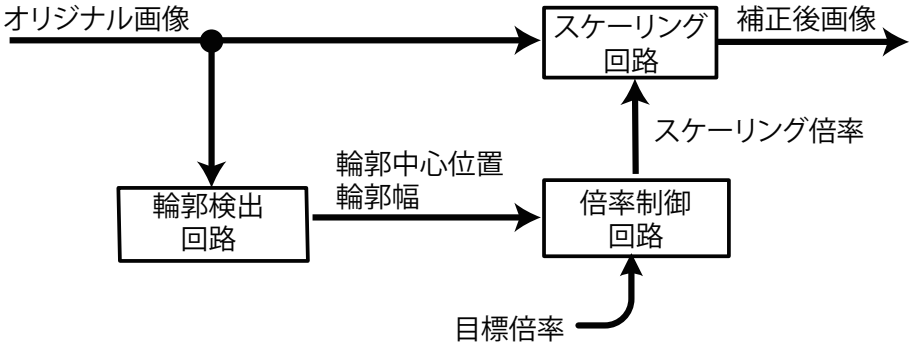


図 3.3: 輪郭補正回路の構成図

画像の拡大縮小技術を用いた輪郭補正回路の構成図である．従来のスケーリング回路に輪郭検出回路と倍率制御回路を加えることで構成される．

輪郭検出回路

輪郭検出回路は，検出したい輪郭の幅（空間周波数）毎に，予め用意した階調の遷移パターンと入力画素を比較することにより補正対象の輪郭部を検出する．図 3.4 および図 3.5 に遷移パターンの例を示す．

図 3.4 に示す遷移パターンは，連続する 3 区間（A, B, C）が単調増加もしくは単調減少し，かつ輪郭中央部 B の階調差 b が輪郭周辺部 A，C の階調差 a，c よりも大きい．これを輪郭幅 3（CW=3）の遷移パターンと呼ぶ．

$$b > a, c \tag{3.7}$$

輪郭検出回路において，入力画素がこの CW=3 の遷移パターンに整合すると CW=3 の輪郭が検出される．

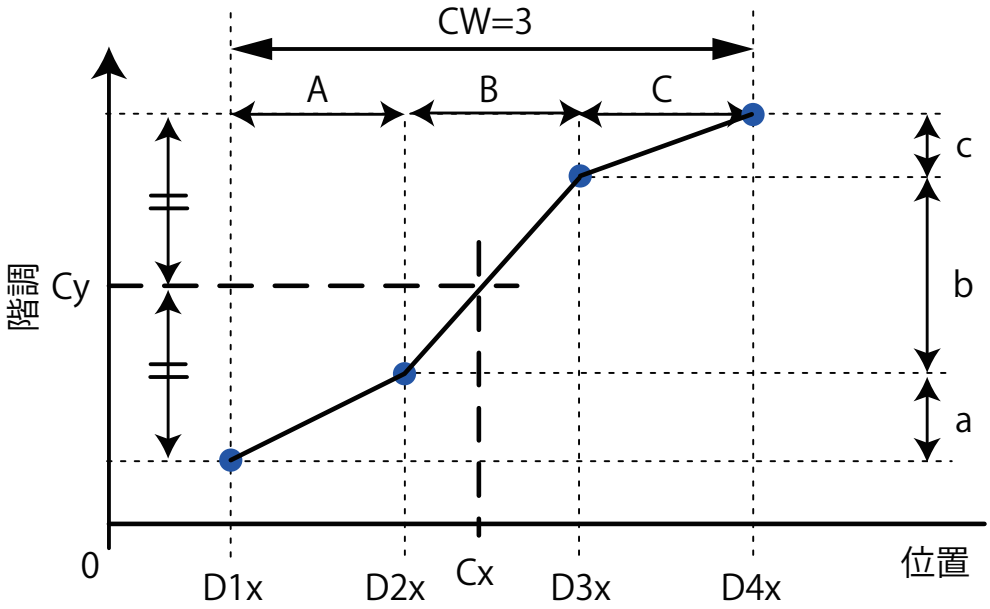


図 3.4: 輪郭幅 3 の遷移パターン

連続する 3 区間（A, B, C）が単調増加もしくは単調減少し，かつ輪郭中央部 B の階調差 b が輪郭周辺部 A，C の階調差 a，c よりも大きい．

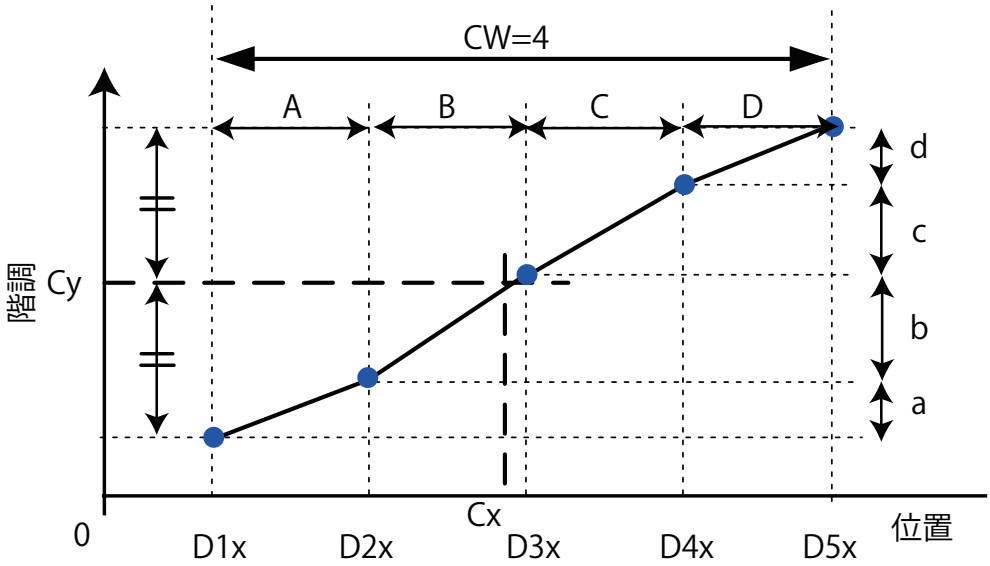


図 3.5: 輪郭幅 4 の遷移パターン

連続する 4 区間（A，B，C，D）が単調増加もしくは単調減少し，かつ輪郭中央部 B，C の階調差 b，c が輪郭周辺部 A，D の階調差 a，d よりも大きい．

輪郭を検出した場合，輪郭検出回路では，さらに検出した輪郭幅 CW の階調変化量の中間値 Cy を求め，その位置座標 Cx を輪郭中心位置として出力する．

一方，図 3.5 に示す遷移パターンは連続する 4 区間（A，B，C，D）が単調増加もしくは単調減少し，かつ輪郭中央部 B，C の階調差 b，c が輪郭周辺部 A，D の階調差 a，d よりも大きい．

$$b, c > a, d \tag{3.8}$$

これを輪郭幅 4（CW=4）の遷移パターンと呼ぶ．

ハードウェア化を考えると回路規模を小さく抑えることが重要であり，輪郭検出に用いる遷移パターンは表示デバイスの画素ピッチや想定される視距離に応じて最適なものを数種類用意して使用する．

経験的には，0.35mm 程度の画素ピッチの表示デバイスが用いられている 25 型程度の電子ディスプレイでは，CW=3 や CW=4 の遷移パターンを用いて検出される空間周波数帯の輪郭に対して本輪郭補正を行うのが効果的である．また，画素ピッチが狭い場合や視距離が近くなる場合は，より輪郭幅の広い遷移パターンを用いるのが良い．

倍率制御回路とスケーリング回路

図 3.6 は，検出した輪郭部に局部的に施す拡大縮小の処理方法を概念的に示す図である．図 3.6(a) は，入力画像の輪郭部分を示す図である．図 3.6(b) は，倍率制御回路が生成するスケーリング倍率を示す図である．図 3.6(c) は，輪郭補正後の画像を示した図である．輪郭中央部は縮小し，輪郭前縁部と後縁部は拡大することで輪郭の遷移幅を狭くする．

具体的には，輪郭幅 CW 毎に予め決めておいた倍率制御パターン g に従い，倍率制御回路において目標倍率 χ を増減する．ここで目標倍率 χ とは，画面全体のスケーリング倍率を指す．つまり $\chi = 1$ の場合は画面全体が拡大縮小されることはなく，補正対象の輪郭部分のみが局部的にスケーリングされる．

倍率制御パターン g は画素位置を x とするとき，補正後の画像に画素欠損が発生しないために次式を満足する必要がある．

$$\int (\chi - g) dx = 0 \tag{3.9}$$

また，補正後の輪郭部が歪まないようにするため，

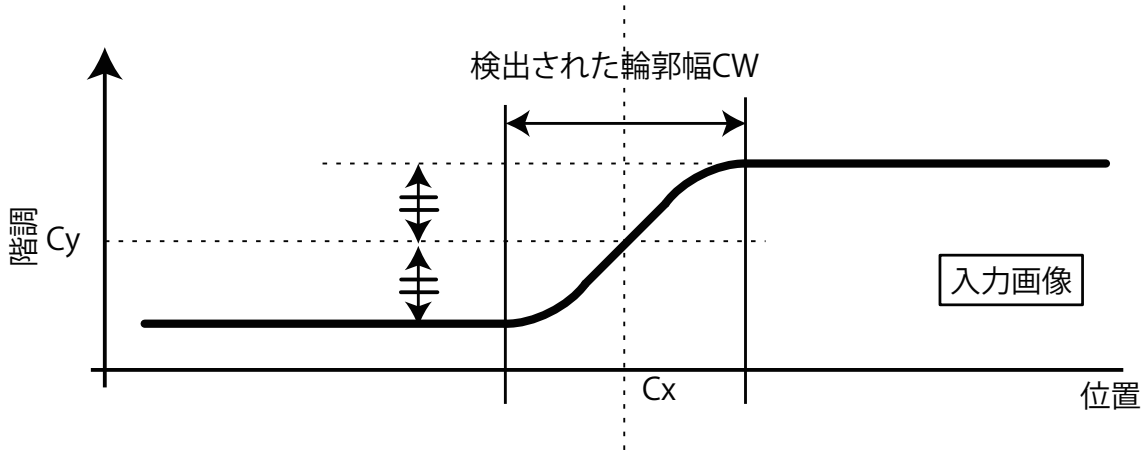
$$g(Cx+\alpha) = g(Cx-\alpha) \tag{3.10}$$

$$\text{where,} \quad 2\alpha \leq \text{CW}$$

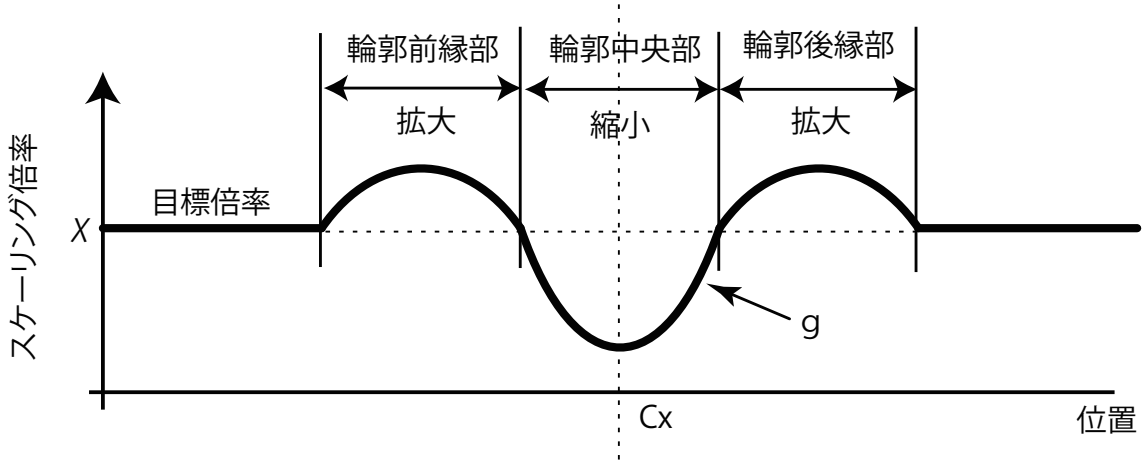
も満足する必要がある．さらに，倍率補正パターン g は輪郭前縁部および輪郭後縁部では上に凸， 輪郭中央部では下に凸となる形状にする．

この倍率制御パターン g に従い，目標倍率 χ を増減させると，輪郭前縁部では目標倍率 χ より大きく（拡大），輪郭の中央部では目標倍率 χ より小さく（縮小），輪郭後縁部では目標倍率 χ より大きい（拡大）スケーリング倍率が生成される．

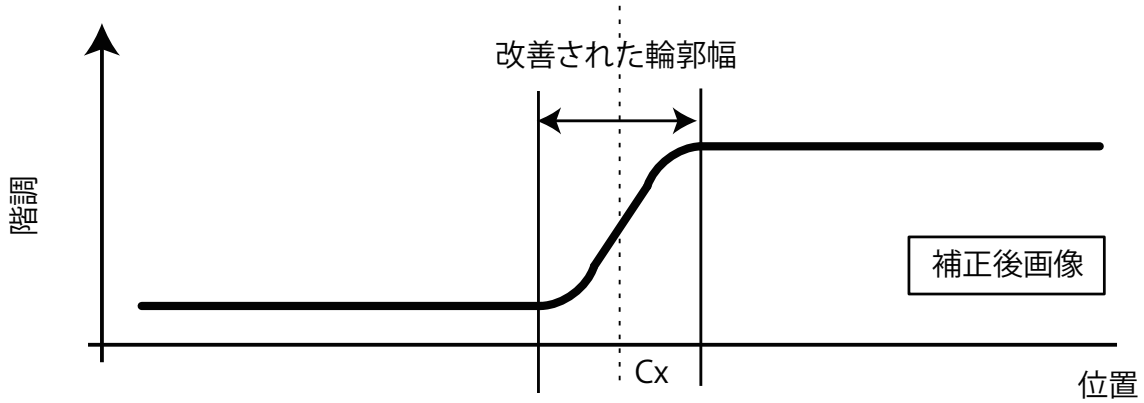
スケーリング回路では倍率制御回路で生成されたスケーリング倍率に基づいて画像の拡大縮小を行う．階調の変化が平坦な輪郭前縁部と輪郭後縁部では目標倍率 χ よりも画像が拡大され，階調が大きく変化している輪郭中央部では，目標倍率 χ よりも画像が縮小されるため，図 3.6 下段に示すように輪郭部分の傾斜を大きく（輪郭の遷移幅を狭く）することが可能になる．



(a) 入力画像の輪郭部分



(b) スケーリング倍率



(c) 輪郭補正後の画像

図 3.6: 拡大縮小処理方法の概念図

検出した輪郭部に局部的に施すスケーリング処理の処理方法を概念的に示した図である．輪郭中央部は縮小し，輪郭前縁部と後縁部は拡大することで輪郭の遷移幅を狭くする．

3.4.3 輪郭の誤検出対策

輪郭の誤検出による不具合

図 3.7 は，画像シミュレーションに用いた原画像である．輪郭検出に用いる遷移パターンと輪郭補正後の周波数特性の関係を明確にするために，コントラストの異なる 2 種のスイープ画像を用いた．

図 3.8 は原画像に対して CW=3 の遷移パターンを用いて輪郭の補正を行った結果であり，図 3.9 は CW=4 の遷移パターンを用いて輪郭の補正を行った結果である．図中に示す領域 M3 および M4 は，それぞれ輪郭補正による鮮鋭度の改善効果が得られている空間周波数領域である．図 3.10 に M3 領域の拡大図を示す．原画像と比較して輪郭部の鮮鋭度が向上していることが確認できる．

一方，領域 M3，M4 よりも低い空間周波数領域の L3，L4 と高い空間周波数領域の H3，H4 の一部では，図 3.11 や図 3.12 に拡大して示すように“ ざらつき ”や“ ぼやけ ”といったアーティファクトが発生している．

L3 や L4 の領域の“ ざらつき ”は，CW=3 や CW=4 で定義される輪郭幅よりも広い区間にわたり階調が単調変化しているにも拘わらず，幅の広い輪郭の一部を CW=3 や CW=4 の輪郭として誤検出してしまうことが原因である．

また，H3 や H4 の領域の“ ぼやけ ”は，画像が CW=3 や CW=4 で定義される輪郭幅より狭い周期で変化しているに拘わらず，階調が変化する周期の位相とサンプリング周波数の関係により，本来ならば隣の輪郭に属する画素を，誤って注目している輪郭内の画素として検出してしまうことが原因である．

倍率制御パターン g は補正ターゲットの空間周波数帯に最適化してるため，補正ターゲットの空間周波数領域より，低い空間周波数帯や高い空間周波数帯で輪郭を誤検出した場合，隣接する輪郭を拡大することによる“ ぼやけ ”や，輪郭の一部をスケーリングすることによる“ ざらつき ”といった不具合が現れるのである．

輪郭外部の平坦度

“ ぼやけ ”や“ ざらつき ”の原因である輪郭の誤検出をなくすため，検出したい輪郭の外部の平坦度（以下，FOC と呼ぶ）を求める処理を追加した．図 3.13 に FOC の定義を示す．

輪郭検出に用いた遷移パターンの輪郭幅 CW に含まれる画素区間を“ 輪郭内部 ”，また“ 輪郭内部 ”に隣接する画素区間を“ 輪郭外部 ”と定義したとき，FOC は輪郭内部の階調変化量 $diff_in$ と，“ 輪郭外部 ”の階調変化量 $diff_ex$ より次式にて定める．

$$\mathrm{FOC} = \frac{diff_ex - diff_in}{diff_in} \tag{3.11}$$

ここで輪郭外部は，輪郭内部に隣接する画素区間と定義したが，輪郭幅 CW が広いときにはそれに伴い参照する画素区間を広げるのが望ましい．

図 3.14 は，CW=3 の輪郭における FOC の例を示した図である．左図に示す $\mathrm{FOC} > 0$ の場合は，検出された輪郭が領域 L3 や L4 で示される低空間周波数領域に属していることを示す．逆に右図に示す $\mathrm{FOC} < 0$ の場合は領域 H3 や H4 で示される高空間周波数領域に属していることを示す．また $\mathrm{FOC} = 0$ の場合は輪郭外部が平坦であることを示す．

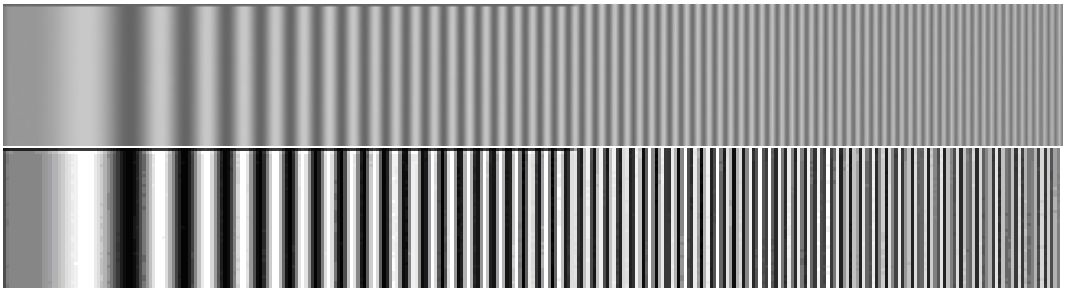


図 3.7: 画像シミュレーションの原画像

原画像にはコントラストの異なる 2 種のスイープ画像を用いた.

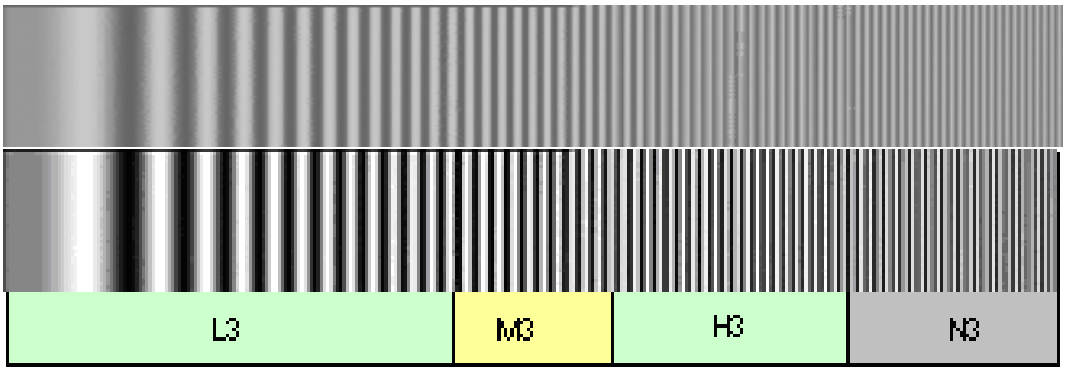


図 3.8: CW=3 のシミュレーション結果

輪郭幅 CW=3 の遷移パターンを用いた画像シミュレーション結果を示す図である．領域 M3 が郭補正による鮮鋭度の改善効果が得られている空間周波数領域である.

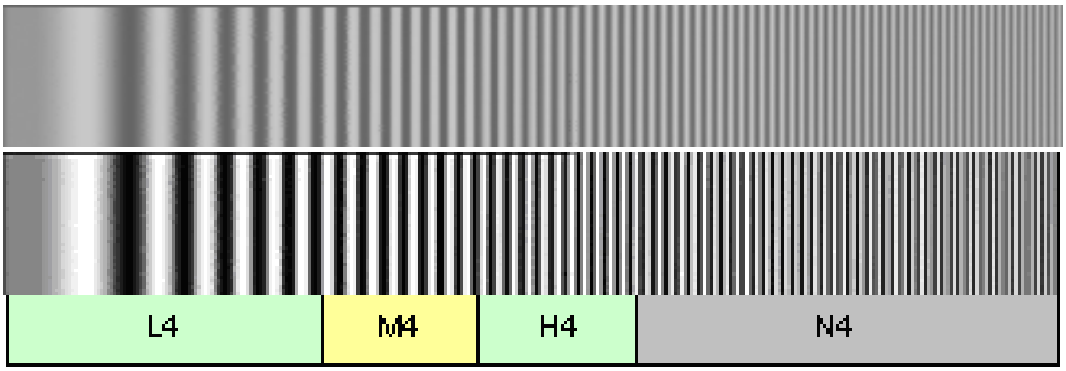


図 3.9: CW=4 のシミュレーション結果

輪郭幅 CW=4 の遷移パターンを用いた画像シミュレーション結果を示す図である．領域 M4 が郭補正による鮮鋭度の改善効果が得られている空間周波数領域である.

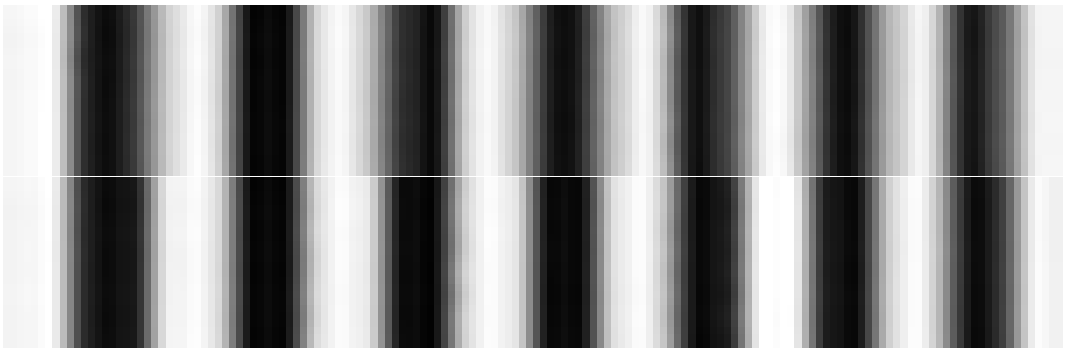


図 3.10: M3 部拡大図

上が図 3.7 に示す原画像の M3 部に相当する空間周波数領域の拡大図，下が図 3.8 の CW=3 シミュレーション結果における M3 部の拡大図である．

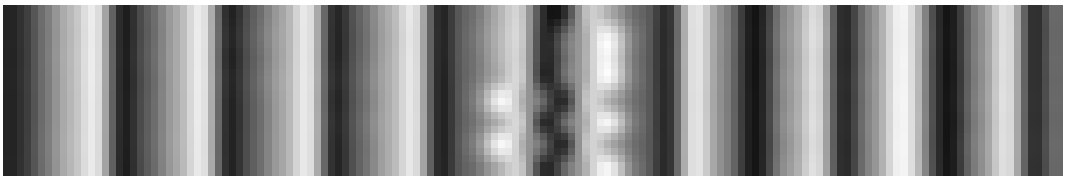


図 3.11: L3 部拡大図

図 3.8 の CW=3 シミュレーション結果における L3 部の拡大図である．階調遷移部の一部に“ ざらつき ”が認められる．

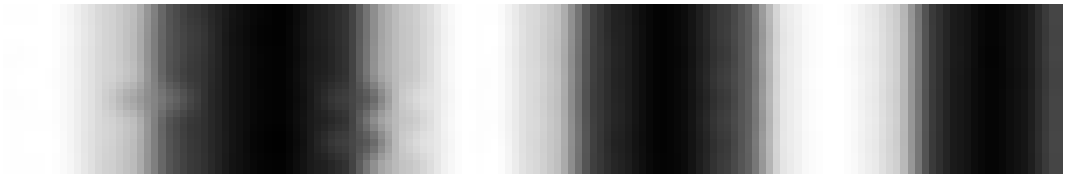


図 3.12: H3 部拡大図

図 3.8 の CW=3 シミュレーション結果における H3 部の拡大図である．階調遷移部の一部に“ ぼやけ ”が認められる．

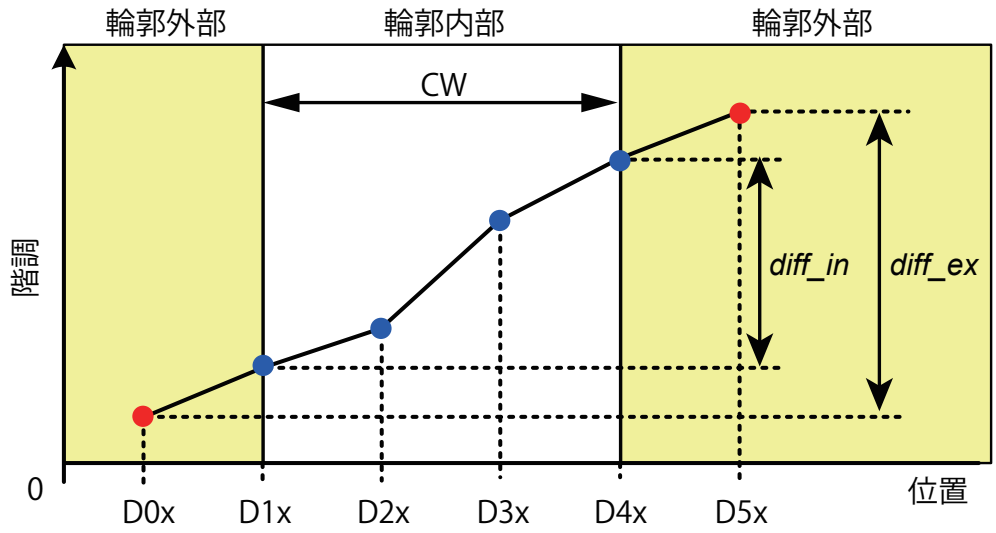


図 3.13: 輪郭外部の平坦度 FOC の定義

FOC では図に示すように，輪郭内部の階調変化量を $diff_in$,“ 輪郭外部 ”の階調変化量を $diff_ex$ と定める．

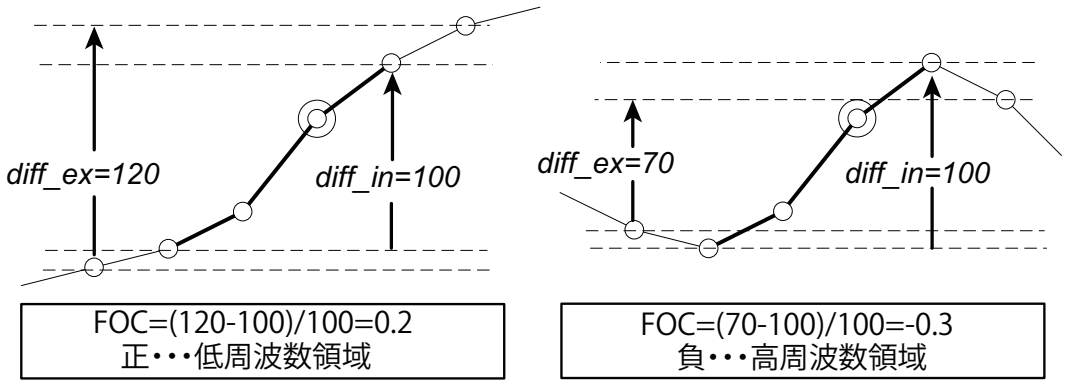


図 3.14: FOC の計算例

CW=3 の場合の FOC の計算例を示す図である．FOC が正の場合，低周波数領域であることを示し，FOC が負の場合は高周波数領域であることを示している．

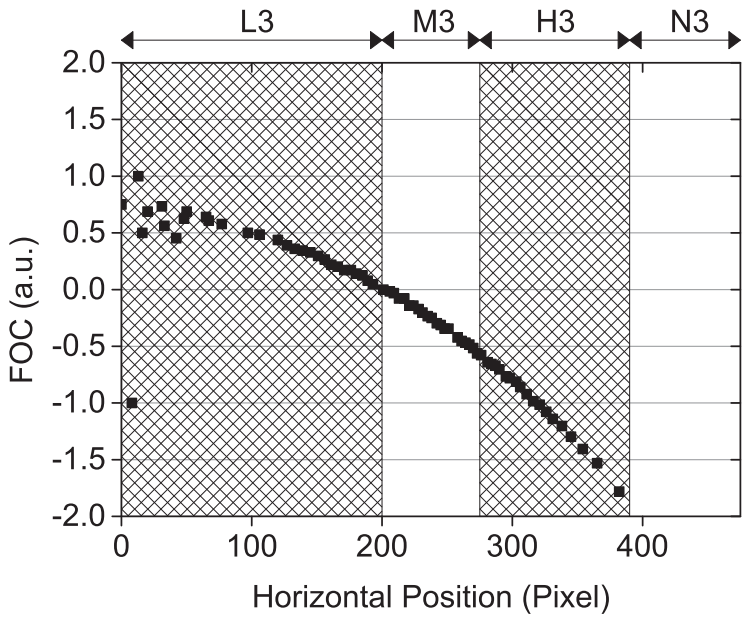


図 3.15: FOC の計算結果 (CW=3)

図 3.7 に示す原画像において，輪郭幅 CW=3 の FOC を計算した結果であり，誤検出が発生する空間周波数帯 L3，H3 を併せて示してある．

図 3.15 および図 3.16 は，原画像において輪郭の誤検出が発生する領域と FOC の関係を示したものである．横軸は水平位置を示し，縦軸は FOC を示している．また網掛けの領域は誤検出の発生する領域 L3，L4 および領域 H3，H4 を示している．

ここで FOC は，空間周波数成分に対して単調な変化を示しており，“ ざらつき ”が発生している領域 L3，L4 では FOC が高く，“ ぼやけ ”が発生する領域 H3，H4 では FOC が低くなる．

FOC は空間周波数に対して単調変化を示すため，適切な閾値を設定することで誤検出の発生する領域 L3，L4 および領域 H3，H4 を判別することが可能になる．よって，誤検出が発生する領域において，輪郭補正処理を抑制すべくスケーリング倍率を制御することで画像の乱れの発生を抑制できる．

FOC 導入の効果

図 3.17 に CW=3 の遷移パターンを用いた場合のシミュレーション結果を示す．ここで

$$\mathrm{FOC} < -0.5 \ \cup \ 0 < \mathrm{FOC} \tag{3.12}$$

の領域では輪郭補正を行っていない．つまり目標倍率 χ を増減させていない．

同様に図 3.18 に CW=4 の遷移パターンを用いたシミュレーション結果を示す．ここでも

$$\mathrm{FOC} < -0.3 \ \cup \ 0.2 < \mathrm{FOC} \tag{3.13}$$

の領域では輪郭補正を行っていない．

画像シミュレーション結果より，FOC を用いることで領域 L3，L4 の“ ざらつき ”や領域 H3，H4 の“ ぼやけ ”がそれぞれ改善可能であることが示された．

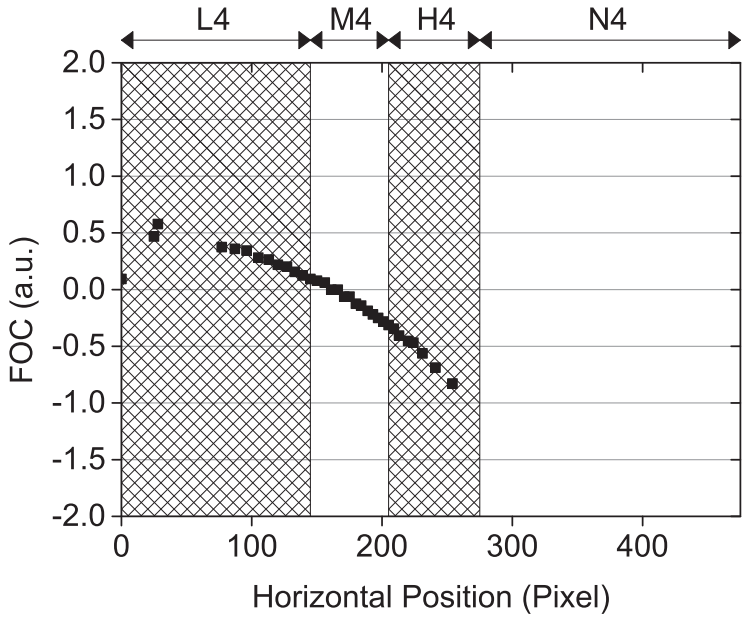


図 3.16: FOC の計算結果 (CW=4)

図 3.7 に示す原画像において，輪郭幅 CW=4 の FOC を計算した結果であり，誤検出が発生する空間周波数帯 L4，H4 を併せて示してある．

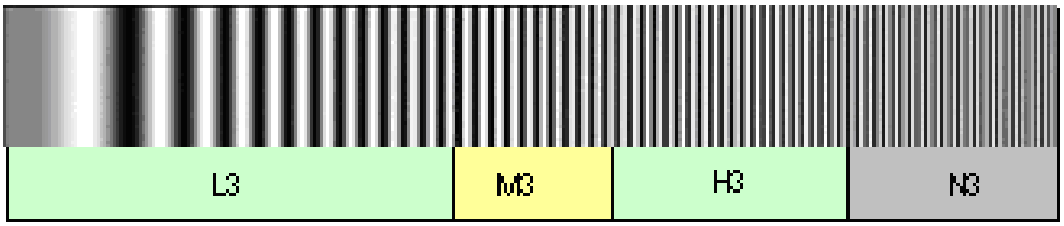


図 3.17: FOC を用いた CW=3 におけるシミュレーション結果

FOC を用いた CW=3 におけるシミュレーション結果を示す図である．領域 L3 の“ ざらつき ”や領域 H3 の“ ぼやけ ”が改善している．

複数の遷移パターンを用いた輪郭検出

1 種類の遷移パターンだけを用いて輪郭検出を行った場合，補正可能な空間周波数帯は自ずと限られる．そのため輪郭補正処理を行う空間周波数帯を広くしたい場合には，複数の異なる遷移パターンを用いた輪郭検出を行う必要がある．

図 3.19 は原画像に対して，CW=3 と CW=4 の遷移パターンを両方用いて輪郭補正を行った結果である．(但し，FOC を用いた輪郭の誤検出の分離は行っていない)．

ここでは，複数の遷移パターンを用いることに起因する輪郭の重複検出を避けるため，まず CW=4 の遷移パターンによる輪郭検出を行った後，CW=4 の遷移パターンに適合しなかった画素に対してのみ，CW=3 の遷移パターンによる輪郭検出を行った．

結果，図 3.8 や図 3.9 に示す 1 種類の遷移パターンのみで輪郭検出した場合と比べ，補正対象となる空間周波数領域 M の幅が広がり，より広い空間周波数帯に対して輪郭補正を行うことが可能になった．

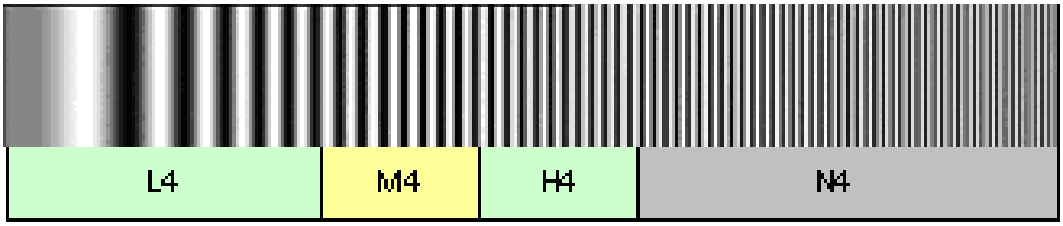


図 3.18: FOC を用いた CW=4 におけるシミュレーション結果

FOC を用いた CW=4 におけるシミュレーション結果を示す図である．領域 L4 の“ ざらつき ”や領域 H4 の“ ぼやけ ”が改善している．

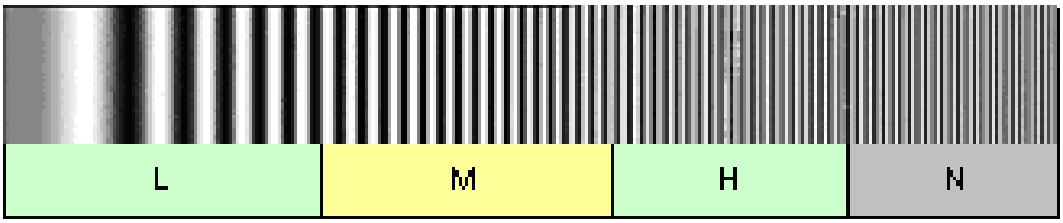


図 3.19: CW=3 と CW=4 を併用した場合のシミュレーション結果

CW=3 と CW=4 を併用した場合の画像シミュレーション結果を示す図である．但し，FOC を用いた輪郭補正の制御は行っていない．

輪郭の誤検出　図 3.19 に示す輪郭補正結果では，1 種類の遷移パターンを用いた輪郭検出と同様に，輪郭補正の効果が得られる領域 M よりも低い空間周波数領域 L と，高い空間周波数領域 H の一部に，“ ざらつき ”や“ ぼやけ ”といったアーティファクトが発生している．

図 3.20 は，CW=3 と CW=4 の遷移パターンを用いて輪郭検出を行ったときの FOC の値を画素毎に求めた結果である．輪郭補正の効果が得られる領域 M は $-0.8 < \mathrm{FOC} < 0.1$ の範囲に収まる．そこで，次の範囲に輪郭補正の閾値を設ける．

$$\mathrm{FOC} < -0.8 \ \cup \ 0.1 < \mathrm{FOC} \tag{3.14}$$

この場合，領域 L では $\mathrm{FOC} > 0.1$ の範囲で輪郭補正を抑制することで“ ざらつき ”の発生を抑制できる．

一方，領域 H は，$\mathrm{FOC} < -0.8$ の範囲の輪郭補正を抑制するだけでは，領域 K で示される空間周波数領域が $\mathrm{FOC} < -0.8$ の範囲に含まれるてしまうため，“ ぼやけ ”を完全に除去しきれない．

このように，複数の遷移パターンを用いて輪郭検出を行った場合，FOC のみでは輪郭の誤検出が発生する領域を完全に分離することは出来ない．

隣接する輪郭の間隔　領域 K で発生するアーティファクトは，本来ならば隣接する輪郭に属する画素を，誤って注目している輪郭内の画素として検出してしまう際に起きる．そこで隣接する輪郭との間隔 (以下，SAC と呼ぶ) を検出し，輪郭誤検出領域の分離に供する．

図 3.21 は SAC の定義を示す図である．SAC は隣接する輪郭の中心位置 Cx 間の距離として次式で定義する．

$$\mathrm{SAC} = Cx(m+1) - Cx(m) \tag{3.15}$$

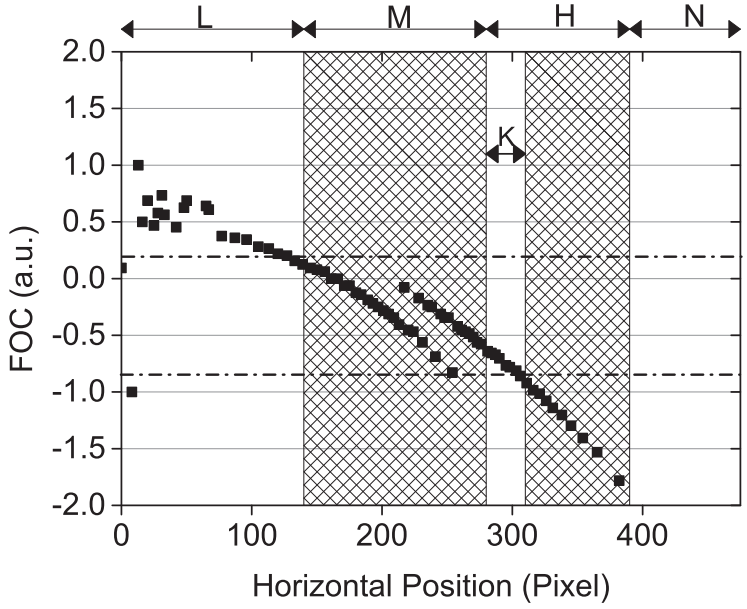


図 3.20: FOC と誤検出発生領域の関係

FOC と誤検出発生領域の関係を示した図である．領域 K の値域が領域 M の値域と重なってしまうため，誤検出発生領域である領域 K を分離できない．

$$\text{where,} \quad m \in \{1, 2, ...\}$$

図 3.22 は図 3.7 の原画像において SAC を計算した結果である．

FOC のみでは誤検出の発生を分離できなかった領域 K において，SAC は単調な変化を示す．SAC は領域 K よりも高い空間周波数側で急激に値が大きくなるが，これは輪郭の空間周波数が高くなったことで，原画像の画素単位のサンプリングでは輪郭周期のナイキスト周波数を超えてしまい，輪郭を正しく検出できなくなるためである．しかし，SAC の値が急激に変化する領域は分離したい領域 K とは空間周波数帯が異なるため，SAC に対して適切な閾値を予め設けておくことで，誤検出が発生する領域 K を分離することが可能になると考える．

SAC 導入の効果　図 3.23 の上図は，図 3.7 に示す原画像に対して，CW=3 と CW=4 の遷移パターンを用いて輪郭検出を行い，$-0.8 < \mathrm{FOC} < 0.1$ の場合のみ輪郭補正を行ったものである．楕円で囲まれている領域に，輪郭の誤検出によるアーティファクトが発生している．

一方，図 3.23 の下図は，輪郭補正抑制の条件として $3 \leq \mathrm{SAC}$ を追加した結果である．楕円で囲まれている領域で発生していた輪郭の誤検出に起因する“ ぼやけ ”が改善されているのが確認できる．

つまり，複数の遷移パターンを用いて検出した輪郭に対しては，FOC と共に SAC を用いて輪郭の誤検出を分離させた後にスケーリング倍率を生成することで，輪郭補正による画像の乱れを抑制することが可能になるのである．

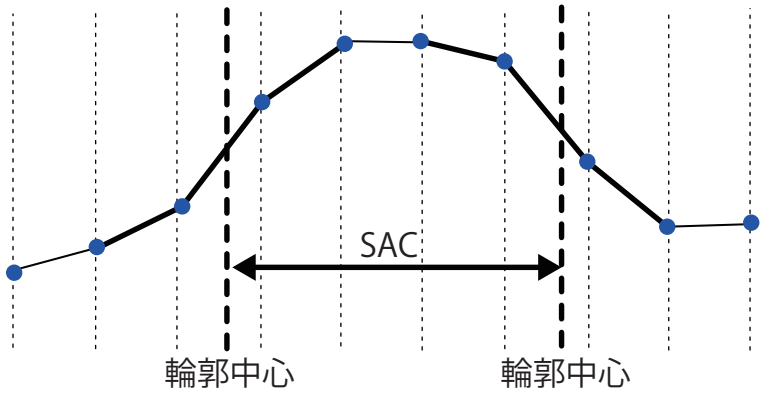


図 3.21: SAC の定義

注目している輪郭と，隣接する輪郭との輪郭中心間の距離を SAC として定義する．

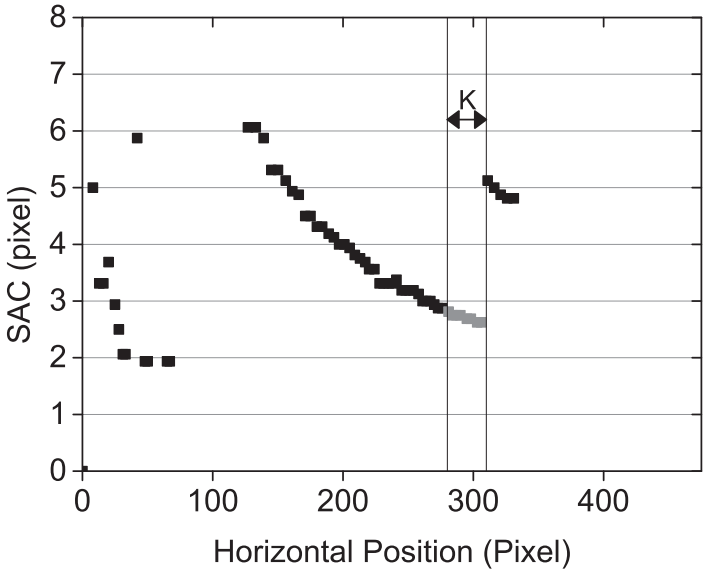


図 3.22: SAC の計算結果

図 3.7 に示す原画像において，SAC を計算した結果である．領域 K において SAC は単調な変化を示す．

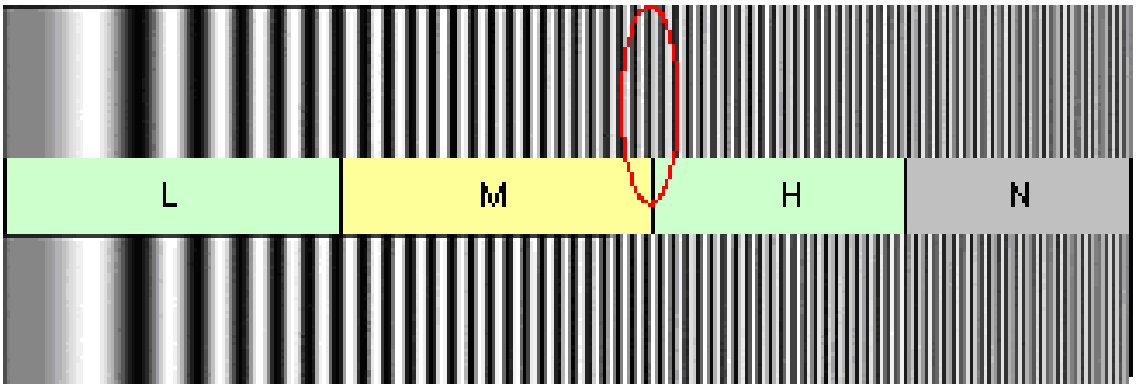


図 3.23: SAC 使用の効果

SAC による輪郭後検出対策を使わない場合（上段）と使う場合（下段）の違いを比較した図である．SAC を使うことで，領域 M と領域 H の境界領域（領域 K）に認められたアーティファクトが改善している．

3.4.4 ラプラシアンフィルタとの組み合わせ

輪郭部分を局部的にスケーリングし，輪郭の遷移する幅を狭くする本手法は，擬似的に輪郭の空間周波数を高くする役割を果たす．

そのため，従来はラプラシアンフィルタでの輪郭強調に不向きであった比較的低い周波数帯域に属する輪郭においても，本輪郭補正方法を利用して輪郭部の空間周波数を高めた後，ラプラシアンフィルタを印加することで，比較的低い周波数帯域に不自然さのない輪郭強調補正を行うことが可能になる．

スイープ画像でのシミュレーション結果　図 3.24 は本輪郭補正の有無によるラプラシアンフィルタの輪郭強調の効果を比較した図である．上段は原画像であり，中段は原画像に標本点間隔 1 画素 (タップ幅 $\tau=1$) のラプラシアンフィルタを用いて輪郭強調処理を行ったもの，下段は CW=4 の輪郭検出を用いた輪郭補正を行った後に同じく $\tau=1$ のラプラシアンフィルタを用いた輪郭強調処理を行った結果である．

輪郭幅を補正後にラプラシアンフィルタによる輪郭強調処理を行うことで，ラプラシアンフィルタが作用する原画像の空間周波数帯域が広くなっているのが確認できる．

自然画でのシミュレーション結果

図 3.25 に自然画での画像シミュレーションの結果を示す．左上図は原画像であり，右上図は従来技術であるラプラシアンフィルタを用いた補正結果である．

解像度が低く，動きの速い映像を表示する場合などは，右上図に示すような幅広のオーバシュートやアンダシュートを輪郭縁部に付加した映像のほうが，鮮鋭感が向上したように感じる．しかし静止画や動きの遅い映像での評価においては，幅広なオーバシュートやアンダシュートは不自然さが際立ってしまう．

左下図は今回提案した輪郭補正処理によって輪郭の遷移幅が狭くなるように補正した後の画像である．左上図の原画像と比較して，花弁などの輪郭部分で鮮鋭度が増しているのがわ

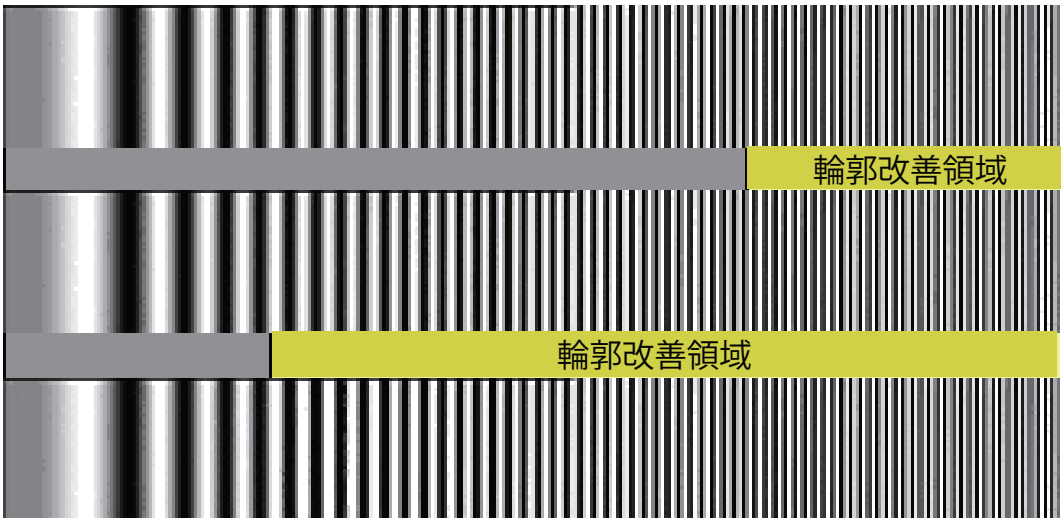


図 3.24: ラプラシアンフィルタを用いた輪郭強調結果

ラプラシアンフィルタを用いた輪郭強調と組み合わせて使用することの効果を示した図である．上段は原画像，中段は 1 タップのラプラシアンフィルタのみを用いた結果，下段は CW=4 の輪郭補正後に 1 タップのラプラシアンフィルタ処理を行った結果である．

図 3.25: 自然画でのシミュレーション結果

左上図は原画像，右上図はラプラシアンフィルタによる輪郭強調結果，左下図は輪郭幅補正結果，右下図は輪郭幅補正+ラプラシアンフィルタによる輪郭強調の結果である．原画像は ITE 標準動画像 No.2 花かごを使用．

かる．動きの速い動画に適用した場合は，右上図に示す輪郭強調画像と比べると，鮮鋭感の点で引けをとるが，静止画での評価では幅広なオーバシュートやアンダシュートが発生していない分不自然さは感じない．

右下図は，左下図に示す輪郭補正後の画像にラプラシアンフィルタを用いた輪郭強調処理を施したものである．輪郭幅補正により予め輪郭部の空間周波数を高めてあるため，タップ数 τ の少ないラプラシアンフィルタを用いても画面全域にわたり適切なオーバシュートやアンダシュートをつけることが可能になった．つまり，予め輪郭部の空間周波数を高めることで，ラプラシアンフィルタの欠点であった，幅広のオーバシュートやアンダシュートが生成されなくなり，不自然さが目立つことはない．右下の画像は，左下に示す輪郭幅補正のみを施した画像と比較しても鮮鋭度が増しているのは言うまでもなく，急峻なオーバシュートとアンダシュートが付加できたことで画像のコントラストも増しており，動きの速い動画での評価においても，右上図に示す従来のラプラシアン処理画像と比べても，鮮鋭度の点で引けをとるものではない．

3.4.5 まとめ

解像度変換に付随して発生する画像ぼやけを低減させる一つの手法として，スケーリング技術を応用した輪郭補正方法について述べた．これは従来の電子ディスプレイでよく用いられていた輪郭強調処理のように，入力画像に幅広のオーバシュートやアンダシュートをつけるのではなく，検出した輪郭部分の階調の変化を適応的に急峻にすることで，画像の鮮鋭度を改善させるものである．

映像信号の拡大率や表示デバイスの種類によっては，必ずしも今回提案した輪郭幅補正が最適な方法ではないかもしれない．しかし，高解像度の表示デバイスに高精細な静止画を表示するような場合，不自然な幅広のオーバシュートやアンダシュートを生成しない本方式は，既存のスケーリング回路に輪郭検出回路と倍率制御回路を追加するだけで構成が可能であり，ハードウェア化の際の演算量インパクトが少ないことを考えると有益な手法であるといえる．これは超解像などの演算量の大きい画像処理が多用されつつある昨今でも，同様の新しい研究成果 [16] が報告されつづけていることが如実に物語っている．

3.5 画素ずらし方式による画素数補正

3.5.1 はじめに

大画面ディスプレイとして用いられる事が多い MD-PTV の場合，LCD ほどスペック競争は激化しておらず，メインストリームの映像信号に対して冗長な画素数の光変調素子が用いられることはない．しかし，映像信号規格が高解像度化した場合には，それに見合った画素数の光変調素子が求められるのは当然である．

表 3.1 は光変調素子の一つである DMD の画素数とチップサイズ，素子ピッチの関係を纏めたものである．DMD のように既に画素ピッチが狭い光変調素子では，光利用効率の点からも更なる高密度化を進めることは困難であり，映像信号の高規格化に応じて画素数を増すような場合，デバイスサイズを大きくすることで対応することになる．しかしデバイスサイズを大きくすることは製造コストの上昇に直結する．

このような場合に，見かけの画素数を倍増させて表示する方法として，例えば高速応答性を有する表示デバイスの特性を利用して，インターレース信号の偶数フィールドと奇数フィールドで表示領域をシフト（画素ずらし）して表示させる，ウォブリングと呼ばれる方法が提案されている [17][18].

また，マイクロディスプレイを用いた高解像度の表示デバイスを開発するような場合，新たに空間光変調素子を製作するとなると，コストと時間の面で極めて困難な状況に陥る．そこで，既存のデバイスを組み合わせて解像度を得ることが求められ，たとえば日下部らは UHDTV の高精細表示システムを新たに開発するために，緑色用に 2 つの液晶素子型の空間光変調素子を用意し，それぞれの空間的な相対位置を斜めに半画素ずらしてスクリーンに表示されるように配置した，斜め画素ずらし方式のプロジェクタを開発している [19].

ただし，このような斜め画素ずらしの高解像度化手法では，比較的容易に高解像度映像が得られる半面，画面表示サイズや視距離によって偽色などのアーティファクトが認められることがあった [20].

表 3.1: DMD チップの特性 (TI 社 HP 掲載資料より抜粋)

Part Number	Chip Size (inch)	Micromirror Array Size	Micromirror Pitch(μm)
DLP3000	0.3	608× 684	7.6
DLP4500	0.45	912× 1140	7.6
DLP5500	0.55	1024× 768	10.8
DLP6500FL	0.65	1920× 1080	7.6
DLP9000	0.90	2560× 1600	7.6

一方，単板の DMD を用いた MD-PTV の高解像度化手法として，Yang-Ho らは映像信号の半分の画素数の DMD と位相を変調する反射板 (以下，スムースピクチャと呼ぶ) を組み合わせた画素ずらし方式を提案している [21].

図 3.26 は，スムースピクチャを用いた MD-PTV の構造を模式的に示したものである．映像信号の解像度に対し，垂直方向の画素数が半分に減らされた，マイクロミラーが千鳥格子状に配置された DMD と，画素ずらし用にボイスコイルモータで駆動させるスムースピクチャモジュールが配置されている．

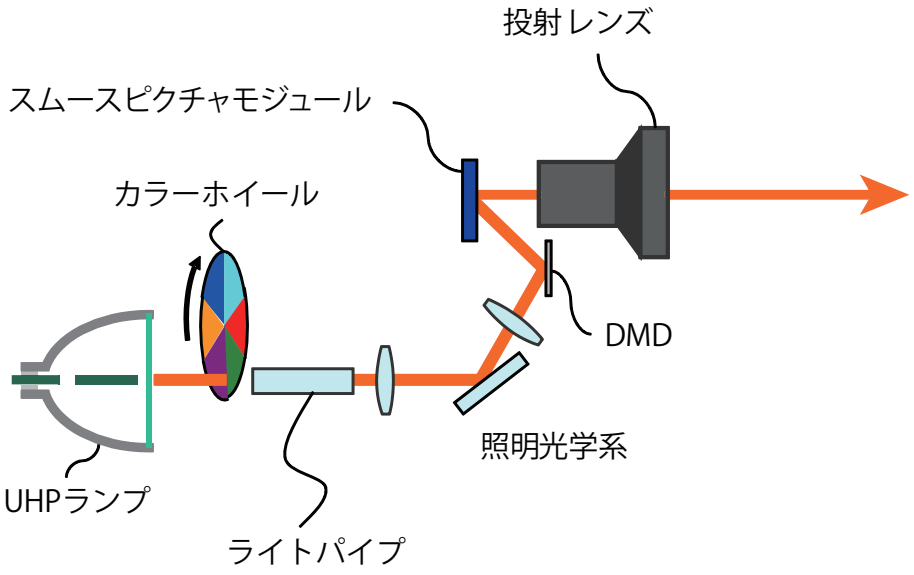


図 3.26: スムースピクチャMD-PTV の構造

通常よりも画素数が半分に減られた DMD の後段に配置されたスムースピクチャモジュールにより，サブフィールド毎にスクリーンへの投射位置が半画素ずらされる．

図 3.27 はスムースピクチャによりスクリーンに表示される画素位置をサブフィールド毎に示したものである．液晶素子などで用いられた斜め方向の画素ずらしとは異なり，サブフィールド毎に上下方向に半ライン分画素が移動することが特徴である．

3.5.2 スムースピクチャの問題点

DMD 上に形成されたマイクロミラーは，表示画素と同じように正方格子に配置されているタイプ以外に，菱形のマイクロミラーが千鳥格子状に配置されたものがある．これらマイクロミラーの並べ方は，照明光学系の光路配置などを考慮して最適なものが選ばれるのだが，MD-PTV 向けの DMD では，主に菱形のミラーを千鳥格子配置させたタイプが採用されている．

菱形千鳥格子配置のマイクロミラーで空間変調された光を，スムースピクチャによってサブフィード周期で上下半画素ずらしてスクリーンに投写する場合，黒い縦線が細く視認されてしまうという問題が生じる．

図 3.28 は，サブフィールド周期で上下に画素が移動して表示することで，黒い縦線が細く見えてしまう様子を概念的に示した図である．

菱形千鳥格子配置のマイクロミラーの形状により黒い縦線を表示させた場合，縦線の外側が白黒交互に表示される．サブフレーム毎に表示位置が画素が上下に半画素ずれるため，サブフィールド毎に白と黒が交互に表示される縦線の外側は，人の目には灰色に映り，結果として黒い縦線が細く視認されてしまうのである．

そこで，スムースピクチャによって解像度を補完する際に発生する黒線の細りを改善するために，簡便な画像処理によって黒領域を拡張する手法 [22] を提案する．

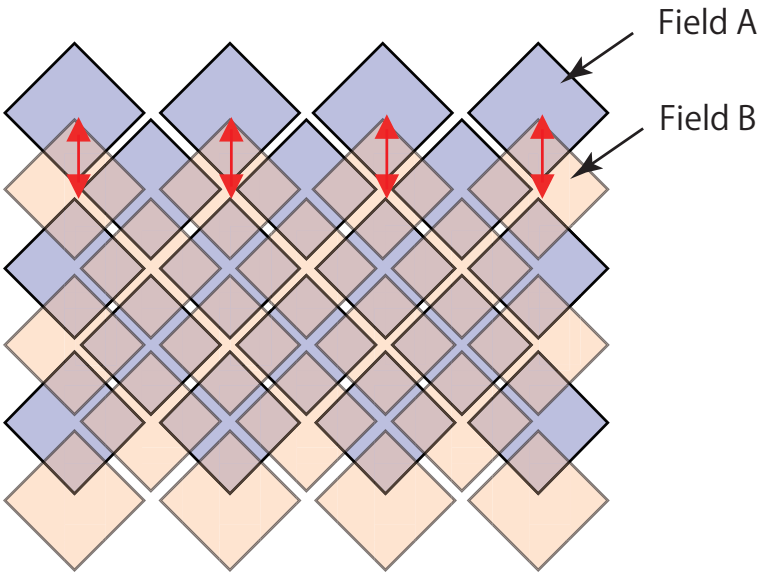


図 3.27: スムースピクチャよる画素ずらし

MD-PTV の画素ずらしでは，サブフィールド毎に上下方向に半ライン分画素が移動する．

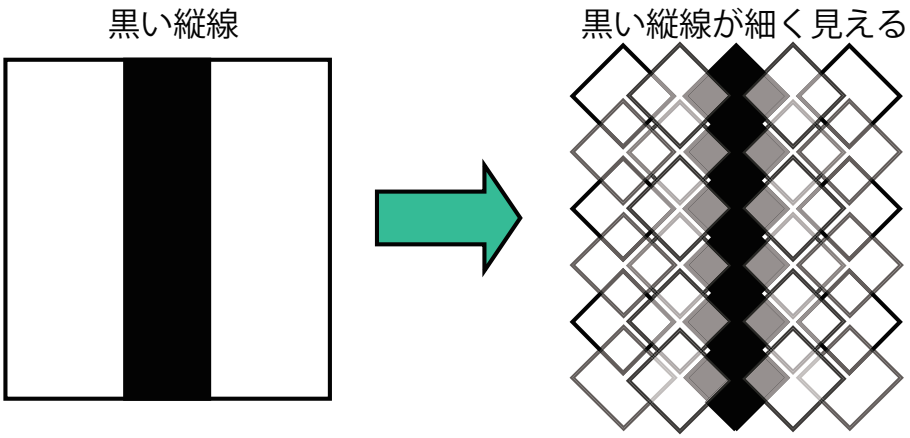


図 3.28: スムースピクチャによる黒線の細り

菱形千鳥格子配置のマイクロミラーの形状により黒い縦線は外側が白黒交互に表示される．サブフィールド毎に白と黒が交互に表示される縦線の外側は，人の目には灰色に映り，結果として黒い縦線が細く視認されてしまう．

3.5.3 黒領域拡張アルゴリズム

基本アルゴリズム

図 3.29 に黒領域拡張アルゴリズムの概念図を示す．スムースピクチャで発生する黒線の細り対策として，黒色から白色，もしくは白色から黒色へ変化しているエッジを検出し，黒領域が広がるように補正を行う．

その際，黒領域側画素は変化させないことを基本とし，隣接する 2 画素間で高階調側画素 (白側画素) を，低階調側画素 (黒側画素) に階調値が近づくよう位相変調させる．このとき，位相変調量は最大でも 1 画素幅以内とする．

具体的には，注目画素を $Y(m)$ とした場合，はじめに隣接画素間の階調差 $dY(m+1)$ および $dY(m-1)$ を算出する．

$$dY(n) = Y(n) - Y(m) \tag{3.16}$$

$$\text{where,} \quad n \in \{m+1, m-1\}$$

ここで，階調差 $dY(n)$ が閾値 $th1(> 0)$ よりも大きい場合，注目画素は輪郭部であると判定する．次に，輪郭部と判定された階調遷移領域の低階調側の階調が，閾値 $th2$ よりも小さい場合，そこは補正すべき黒領域の境界部であると判定する．

$$Y(m) < th2 \tag{3.17}$$

よって，式 3.16 および式 3.17 を満たす場合に処理対象の輪郭と判断し，次式に従い位相変調処理を行う．

$$Y'(n) = aY(m) + (1-a)Y(n) \tag{3.18}$$

$$\text{where,} \quad 0 \leq a \leq 1$$

問題点と対策

式 3.18 で示す位相変調処理は，ハードウェア化した場合にも計算量が少なくて済むという利点があるが，図 3.30 に示すように 2 画素幅以下の細い縦白線が消えてしまう問題が発生する．そのため，線幅が細い縦白線部に対しては黒領域拡張を行わない適応処理が求められる．

図 3.31 は今回用いた適応処理の制御ブロック図である．白線ブレーキ，輝度差ブレーキ，黒レベルブレーキの 3 種類の制御パラメータを用い，位相変調量を制御している．

白線ブレーキは，縦白線を検出した場合に黒領域拡張を抑制するものである．縦白線の検出アルゴリズムでは，はじめに注目画素 $Y(n)$ とその隣接画素 $\{Y(n+1),\ Y(n-1)\}$ との差分を求め，差分量の少ない側を隣接画素差分 $D1h$ として抽出する．

$$D1h = \min\{|Y(n)-Y(n+1)|, |Y(n)-Y(n-1)|\} \tag{3.19}$$

このとき，$D1h > 0$ ならば，注目画素は隣接画素に対して高階調側に属しており，$D1h$ の値が大きい場合，注目画素は隣接画素とコントラスト差の大きい画素幅 1 の縦白線であると

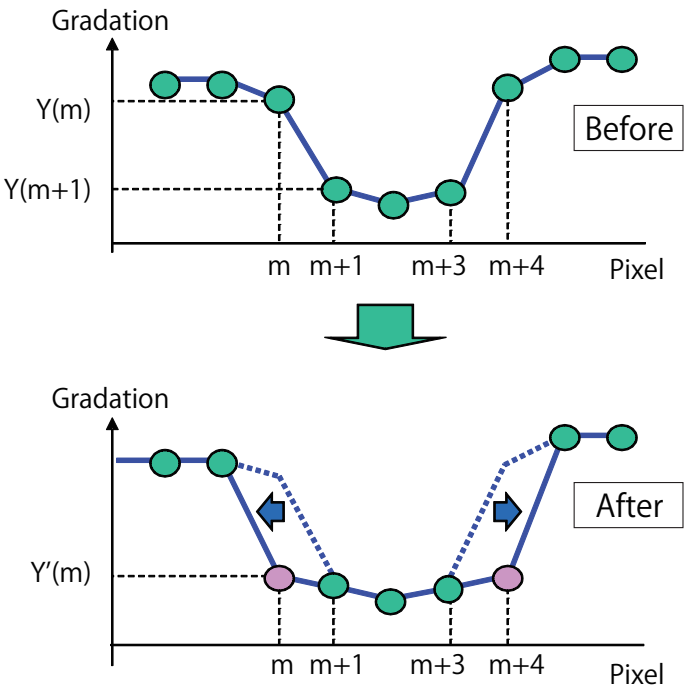


図 3.29: 黒領域拡張アルゴリズムの概念

黒領域拡張アルゴリズムは，黒色から白色，もしくは白色から黒色へ変化しているエッジを検出し，黒領域が広がるように補正を行う．

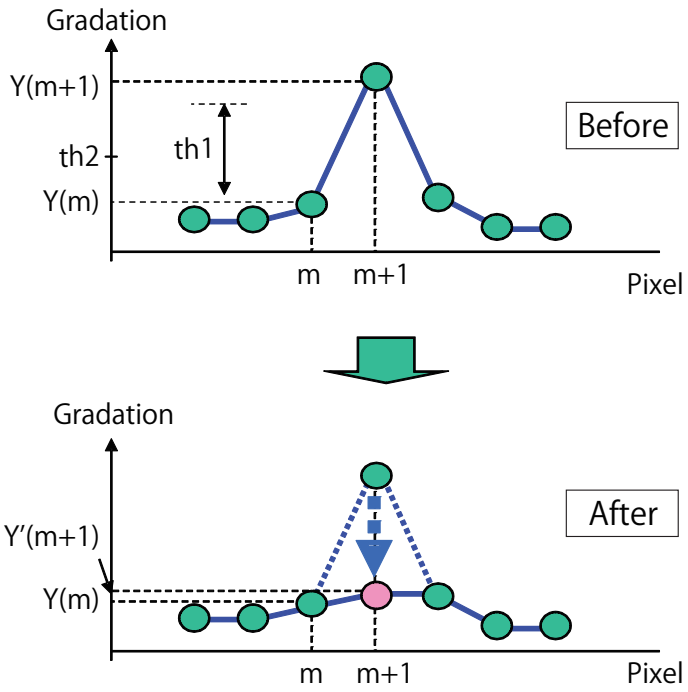


図 3.30: 黒領域拡張の不具合

黒領域拡張処理では，2 画素幅以下の線幅の狭い白線が消滅してしまうという問題が発生する．

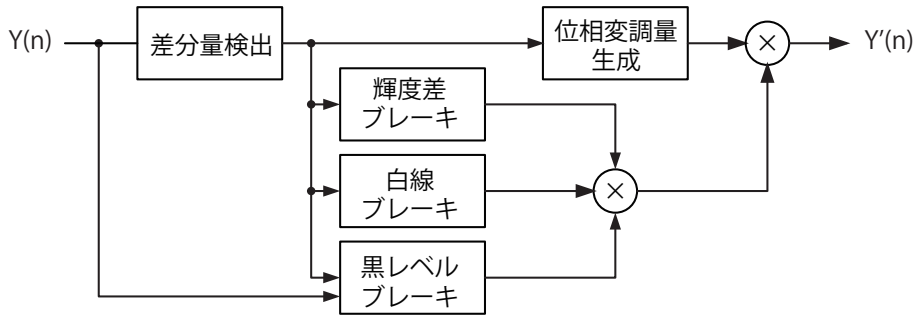


図 3.31: 位相変調量補正処理

発生する不具合対策として，白線ブレーキ，輝度差ブレーキ，黒レベルブレーキの 3 種類の制御パラメータを用い，位相変調量を制御している．

判定する．一方，$D1h \leq 0$ の場合，注目画素は少なくともどちらかの隣接画素よりも低階調側に属しているため，2 画素幅以上の縦白線の一部と判定する．

縦白線の検出アルゴリズムでは 1 画素幅白線強度 $D1H$ を次式で定義する．

$$D1H = \begin{cases} D1h & \text{, when} \quad D1h > 0 \\ 0 & \text{, else} \end{cases} \tag{3.20}$$

次に注目画素 $Y(n)$ とその隣々接画素 $\{Y(n{+}2),\ Y(n{-}2)\}$ との差分のうち，差分量の少ない側を隣接画素差分 $D2h$ として抽出する．

$$D2h = \min\{Y(n){-}Y(n{+}2), Y(n){-}Y(n{-}2)\} \tag{3.21}$$

$D2h < 0$ の場合は注目画素よりも隣々接画素の方が高階調側に属していることを示している．そこで $D1H$ の定義と同様に値を 0 にクリップすることで，2 画素幅白線強度 $D2H$ を次式で定義する．

$$D2H = \begin{cases} D2h & \text{, when} \quad D2h > 0 \\ 0 & \text{, else} \end{cases} \tag{3.22}$$

$D2H$ が $D1H$ に近い場合，検出された白線は 1 画素幅である可能性が高く，$D1H$ と比べて $D2H$ が大きい程，検出された白線は 2 画素に近いと判断できる．

そこで 2 画素幅以下の縦白線らしさを示す指標 WG を，$D1H$ と $D2H$ を組み合わせることで定義した．

$$WG = D1H + D2H \tag{3.23}$$

図 3.32 は WG を用いた白線ブレーキゲインの定義を示している．WG が小さい場合には白線ブレーキゲインを大きくし，黒領域拡張を抑制する．逆に WG が大きい場合は黒領域拡張を妨げるブレーキは掛けない．

一方，輝度差ブレーキおよび黒レベルブレーキは基本アルゴリズムに含まれる閾値処理によって発生する画面のちらつきを抑えるための制御パラメータである．

輝度差ブレーキは式 3.16 に示す注目画素と隣接画素との輝度差 $dY(n)$ を基に，図 3.33 に示す輝度差ブレーキゲインを生成し，黒領域拡張を抑制する．

黒レベルブレーキは，図 3.34 に示すように注目画素 $Y(m)$ の階調が低い場合に黒領域拡張が抑制されるように制御することで，式 3.17 で示される黒領域検出の閾値処理が原因で発生するアーティファクトを低減する．

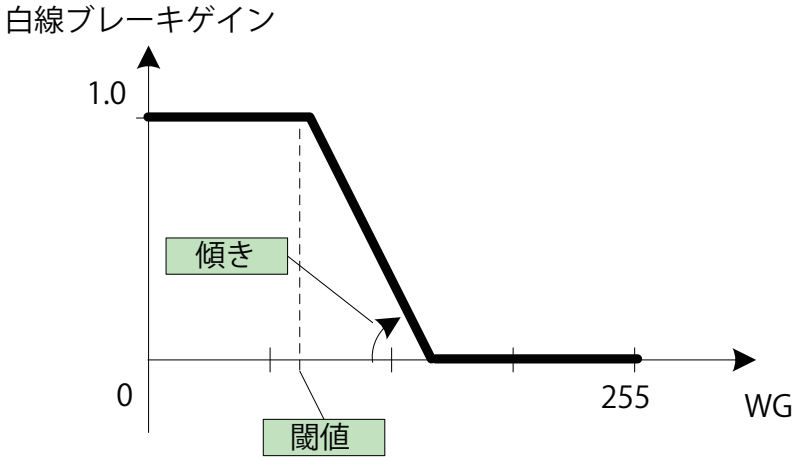


図 3.32: 白線ブレーキゲインの定義

白線ブレーキでは，WG が小さい場合には白線ブレーキゲインを大きくし，黒領域拡張を抑制する．逆に WG が大きい場合は黒領域拡張を妨げるブレーキは掛けない．

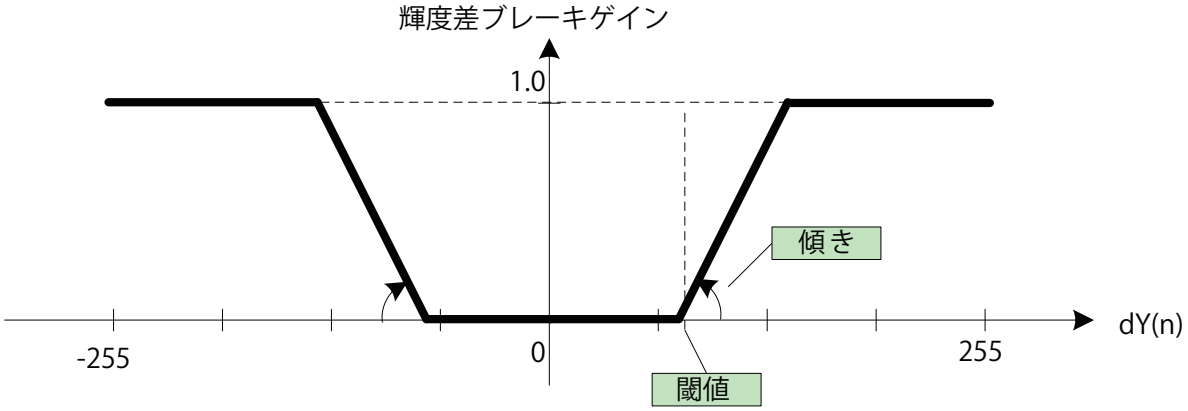


図 3.33: 輝度差ブレーキゲインの定義

輝度差ブレーキゲインでは，検出された輝度差に基づき黒領域拡張を抑制する．

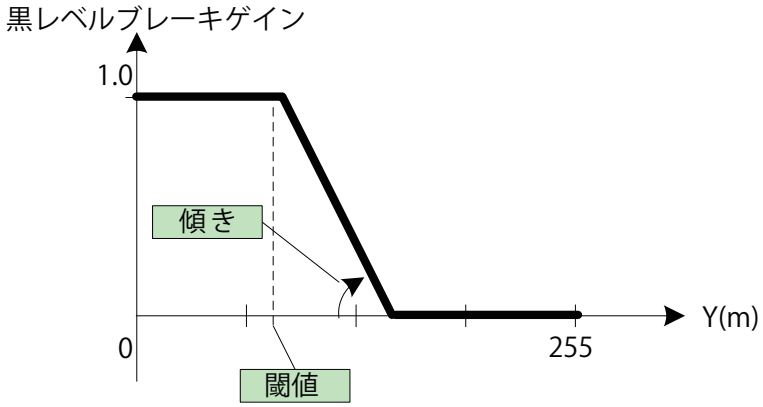
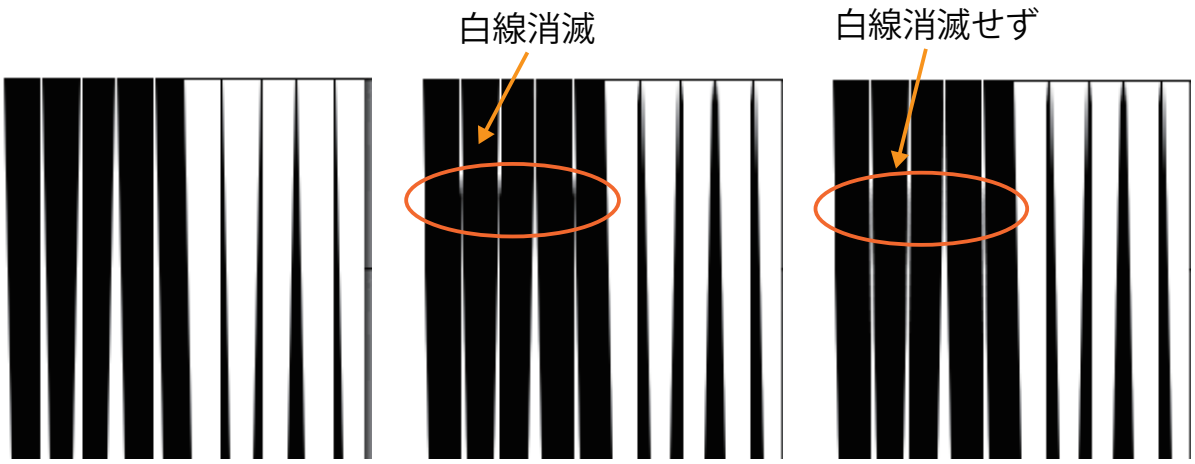


図 3.34: 黒レベルブレーキゲインの定義

黒レベルブレーキゲインでは，注目画素の階調値に基づき黒領域拡張を抑制する．

画像シミュレーション

図 3.35 は黒領域拡張アルゴリズムの画像シミュレーション結果を示したものであり，画像シミュレーションに用いた原画像と解析後の結果を併せて示したものである．原画像には図の上から下に向かって細い白線および細い黒線が線幅を徐々に変化させながら太くなっていく幾何学パターンを用いた．



(a) 原画像　(b) 白線検出なし　(c) 白線検出あり

図 3.35: シミュレーション結果

黒領域拡張時の白線消滅不具合の対策効果を，画像シミュレーションにて確認した結果である．(a) は原画像，(b) は白線検出なしの場合，(c) は白線検出ありの場合である．白線検出アルゴリズムを用いることで白線が消滅しなくなることが確認できる．

白線の検出なしに黒領域拡張を行った場合，細い黒線は太くなる一方，白線の一部は消滅してしまう．しかし白線の検出を行い適応的に黒領域拡張を行うことで，細い白線を消すことなく，細い黒線を太くできることが確認できた．

3.5.4 まとめ

画素ずらしによる解像度変換は，安価に高解像度表示デバイスを得ることを可能にする手法であり，急激に高解像度化が進む高規格映像信号に対応する有効な解像度補完手法の一つと言える．

DMD を空間光変調素子に使用している MD-PTV 向けに開発されたスムースピクチャは，サブフィールド周期で位相変調用ミラーを駆動させ，表示画素位置をずらすことで，高価な DMD 素子の解像度を半減させることを可能にするが，光学特性上，縦方向の黒線が細く視認されてしまうという弊害を有していた．

今回，回路規模インパクトが少ない簡易なアルゴリズムによって，黒線の細りを軽減する手法が提案できたことで，スムースピクチャの解像度補完技術としての有用性を高めることが出来た．

3.6 結言

映像信号の高規格化が進み，複数の異なる解像度の映像コンテンツが混在する現状において，映像信号と電子ディスプレイの解像度の不整合を補完する解像度変換は，重要な画像表示技術の一つである．しかし，サンプリング処理によってデジタル化してある映像信号の解像度を変更する場合，欠落している位相のデータを推定し補間する必要があり画質劣化の要因になっている．そのため画像の鮮鋭化を含めた解像度補完技術の確立が求められてる．

今回ハードウェア化を想定し，回路規模インパクトの少ない，画像の拡大縮小技術を応用した輪郭補正手法と，画素ずらしによる解像度補完の際に発生する黒線の細りに対して，黒色領域を適応的に拡張する手法を提案し，その効果を検証した．

近年 LSI の集積度が高まったこともあり，ハイエンドの電子ディスプレイでは超解像を用いた解像度変換も盛んに行われている [23]．超解像は複数の画像フレームを参照するために多くのメモリが必要であったが，最近では 1 枚の入力画像フレームから，そのフレームの高解像度画像を生成するフレーム内超解像の研究もおこなわれ実用化されている [24][25]．

しかし，それでも比較的多くの演算回路が必要になる超解像処理は，普及型の電子ディスプレイに用いることは未だコスト的に厳しく，従来同様に少ない計算，少ないメモリ量で実現可能な鮮鋭化処理を含んだ解像度補完技術は今後も重要な高画質化技術の一つであり続けると思われる．

参考文献

[1] “ITU-R BT.1700, Characteristics of composite video signals for conventional analogue television systems,” Feb. 2005.

[2] 榎並和雅，八巻英明，八木伸行，村上敬之助，“画像信号の幾何学的変換のための補間フィルタと画質に関する一考察,” 電子情報通信学会論文誌 D，vol.J69-D，no.11，pp.1617–1623，Nov. 1986.

[3] 高橋利至，吉田雅之，小野文孝，“画像拡大処理におけるジャギー低減方法,” 電子情報通信学会総合大会，p.120，March 1999.

[4] 四角英孝，陳　謙，千原國宏，“既存の低解像度画像から高解像度画像の合成技術,” 電子情報通信学会技術研究報告. IE, 画像工学，vol.97，no.409，pp.19–24，Nov. 1997.

[5] P.C.Goldmark and J.M.Hollywood, “A new technique for improving the sharpness of television pictures,” Proceedings of the IRE, vol.39, no.10, pp.1314–1322, Oct. 1951.

[6] J.Lu and D.M.Healy Jr, “Contrast enhanccement via multiscale gradient transformation,” Image Processing, 1994. Proceedings ICIP-94, vol.2, pp.482–486, Dec. 1994.

[7] K. Kotera, Y. Yamada, and K. Shimo, “Adaptive edge sharpening by multiple gaussian filters,” NIP16: International Conference on Digital Printing Technologies, pp.814–817, Nov. 2000.

[8] 岡崎秀俊，中　寛信，中静　真，“ウェーブレット極大値に基づく画像のエッジ協調と画像拡大への応用,” 電子情報通信学会論文誌 A，vol.J86-A，no.4，pp.410–426，April 2003.

[9] M. Nakashizuka, K. Aoki, and T. Nitta, “A simple edge-weighted image enhancement filter using wavelet scale products,” The 47th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, pp.I–285–8, July 2004.

[10] 高橋靖正，田口　亮，“ラプラシアンピラミッド階層表現に基づくディジタル画像の一拡大法,” 電子情報通信学会論文誌 A，vol.82，no.11，pp.1731–1740，Nov. 1999.

[11] Y.Okuno and J.Someya, “A new image scaling technology with preserving extracted contour’s transition,” Conference Record of the 23th International Display Reserch Conference, pp.250–2251, Sept. 2003.

[12] 長瀬章裕，奥野好章，染谷　潤，“スケーリング技術を応用した輪郭補正方法,” 2005 年映像情報メディア学会年次大会，pp.13–4，Aug. 2005.

[13] 長瀬章裕，奥野好章，染谷　潤，杉浦博明，“スケーリング技術を応用した輪郭補正における輪郭検出方法,” 2005 年映像情報メディア学会冬季大会，pp.2–2，Nov. 2005.

[14] A. Nagase, Y. Okuno, J. Someya, and H. Sugiura, “The contour correction method using scaling technique,” International Workshop on Advanced Image Technology, pp.S11–1, Jan. 2006.

[15] 長瀬章裕，奥野好章，染谷　潤，杉浦博明，“スケーリング技術を応用した輪郭補正方法,” 映像情報メディア学会誌，vol.60，no.10，pp.1689–1695，Oct. 2006.

[16] A. Nasonava and A. Krylov, “Deblurred iimage post-processing by poisson warping,” IEEE Signal Processing Letters, vol.22, no.4, pp.417–420, April 2015.

[17] 安田章夫，高梨英彦，松居恵理子，片岡延江，仁藤敬一，城地義樹，“高解像度プロジェクタ用強誘電性液晶ウォブリング素子,” テレビジョン学会誌，vol.50，no.5，pp.556–562，May 1996.

[18] 降旗　隆，“マルチメディア対応画像表示方式の一考察,” 電子情報通信学会論文誌 A，vol.J82-A，no.3，pp.436–444，March 1999.

[19] 日下部裕一，金澤　勝，岡野文男，“超高精細映像表示システムのコンバーゼンス誤差と表示位置調整の自動化,” 映像情報メディア学会誌，vol.60，no.2，pp.234–241，Feb. 2006.

[20] 堀内隆彦，福田雄太，富永昌治，“斜め画素ずらし投影による解像感向上のための観察条件の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告. EID, 電子ディスプレイ，vol.111，no.238，pp.21–24，Oct. 2011.

[21] M. Yang-Ho, W. Ki-Suk, K. Chang-Sung, L. Chil-Sung, C. Dong-Won, K. Jae-Kyung, and P. Kyoung-Shin, “P-211: Vibration system design of smooth picture actuator for DLP projection TV,” SID Symposium Digest, vol.37, pp.1023–1026, July 2006.

[22] 並木亮介，長瀬章裕，染谷　潤，杉浦博明，“PTV における鮮鋭度改善技術の開発,” 2007 年映像情報メディア学会冬季大会，pp.1–6，Nov. 2007.

[23] 奥富正敏，田中正行，竹島秀則，松本信幸，“画像超解像処理技術の最新動向,” 電子情報通信学会誌，vol.93，no.8，pp.693–698，Aug. 2010.

[24] 松本信幸，井田　孝，“画像のエッジ部の自己合同性を利用した再構成型超解像 (画像・映像処理),” 電子情報通信学会論文誌 D，vol.93，no.2，pp.118–126，Feb. 2010.

[25] J. Lu and D. Wu, “Single-image super-resolution with joint-optimization of TV regulatization and sparse representation,” Optik, vol.125, no.11, pp.2497–2504, Jan. 2014.

第4章　階調補完技術

4.1　緒言

近年，電子ディスプレイの高輝度，広色域化が進んでいる．2000 年頃 LCD の輝度は高々 200cd/m^2 程度であった．しかし最近では 500cd/m^2 を超える高輝度の LCD も珍しくはない．また，30 型を超えるような大画面 LCD-TV においても，300cd/m^2 を超えた輝度が一般的になっている [1].

色域に関しても，例えば光源に 3 原色の LED を使用した広色域 LCD-TV では BT.709 比 133%[2]，光源にスペクトルが急峻な LD を用いたレーザー TV では BT.709 比 208%の広色域を達成している [3].

表示デバイスの HDR 化が進むにつれ問題になるのが，低ビット深度映像信号を表示させた場合の偽輪郭である．例えば従来の 8bit/ch. 以下の量子化数でデジタル化された映像データを最近の HDR 表示デバイスに表示させる場合，映像信号の 1 階調あたりの輝度や色度の変化は相対的に大きくなり，特に緩やかな階調変化で再現される空や人肌などの画像において 1 階調あたりの差分が弁別され，偽輪郭として視認されてしまうのである．

更に低ビット深度の映像信号に対して，昨今の複雑な積和演算を含む高画質化処理や符号化処理を行うと，演算時に生じる丸め誤差が階調の不連続性（階調とび）を生む原因になる．当然これら階調の不連続部も偽輪郭として視認されるリスクが高い．

HDR 表示デバイスにおいて，偽輪郭やノイズの影響の少ない滑らかな映像を再現するためには，12bit/ch. 以上の精度での映像信号処理が必要であるという研究報告がある [4, 5]．実際，近年普及している HDMI や Display Port[6] といったデジタル映像信号伝送系は，RGB 各色最大で 16bit までの伝送に対応している．また，次世代の高規格の放送規格である BT.2020 でも最大 12bit/ch. の量子化まで考慮されている．

しかし，現在のハイビジョン放送の規格である BT.709 の量子化数は 8bit であり，今後暫くの間は，8bit/ch. 以下の量子化数で記録されたデジタルコンテンツや，8bit/ch. 程度の規格で設計された映像伝送系機器が多く残存する．よって，これら低ビット深度で量子化数された映像信号を HDR 表示デバイスに表示させた際にも，偽輪郭等のアーティファクトを低減させ，滑らかな映像を再現するために，低ビット深度の映像信号から 12bit/ch. あるいはそれ以上の映像信号を復元する階調補完手法が求められる．

入力する映像がアナログ信号の場合，A/D 変換での量子化数を増すことで容易に高ビット深度信号を得ることが可能である．しかし，入力する映像が低ビット深度のデジタル信号の場合，量子化によって既に失われてしまっている映像信号を復元する必要がある．

4.2 超階調

4.2.1 はじめに

デジタル映像信号の量子化数を増す手法は，これまでにも多くの研究がなされてきた．

最も簡単な手法の一つは入力信号の最下位ビットへのゼロ詰めであり，これは回路規模的に最もインパクトが少ない方法である．また Robert らは，伸張させたいビット数分，入力信号の上位ビットを下位ビットに付け加える Bit replication という方法を提案している [7]．さらに Dely らは，人間の視覚特性を利用したディザリング処理を応用した方法を提案している [8]．これらの手法も回路規模へのインパクトは少ない．しかし演算時の丸め誤差に起因する偽輪郭等のアーティファクトを効果的に補正できるものではなかった．

偽輪郭を効果的に補正しつつ入力信号を高ビット深度化する方法には平滑化フィルタを用いた方法があるが，フィルタリングによって画像の輪郭部の鮮鋭感まで劣化させてしまう恐れがある．そこで Au らのグループでは，階調の変化量を考慮し，平坦領域とエッジ領域に対して適応的にフィルタ強度が変化する空間変調フィルタとローパスフィルタ (LPF: Low Pass Filter) を組み合わせて用いる方法などを提案している [9][10]．

また，久保らはエッジ保存型の平滑化フィルタである ε フィルタやバイラテラルフィルタを用いることでビット深度を増す検討を行っている [11]．これらエッジ保存型の平滑化フィルタを用いる場合，平坦領域とエッジ領域の分類を行う必要は無くなるが，ビットの伸張量に応じて平滑化フィルタのフィルタ長が長くなるため，ビット深度を大きく増やす場合には回路規模の点では不利になる．

さらに，奥野らは小さな階調変化の発生頻度に応じてテクスチャ領域とグラデーション領域を識別し，平滑化を制御させる方式を提案している [12]．ただしこの手法では，映像信号にノイズが重畳されている場合には領域の誤判定が懸念される．

平滑化フィルタを用いる方法に共通する課題は，回路をハードウェア化する際，多ビット数のデータ同士の積和演算と，フィルタ長に応じて必要となる多くのデータ遅延量により，回路規模が大きくなってしまう点である．特に画像の垂直方向にフィルタ処理を適用する場合には，データ遅延に多くのラインメモリが必要になる．近年，半導体プロセスの微細化が進み，数百万ゲートの回路規模を有する ASIC や，それに準じるロジック規模の FPGA(Field Programmable Gate Array) も珍しくはなくなった．しかしビット深度を高めるためだけに多くの回路規模 (コスト) を消費するのは好ましくない．

そこで，ハードウェア化を前提に，従来手法と比較して計算量が少なく，かつ画像の鮮鋭度劣化が少ない階調表現力向上の手法 (以下，超階調と呼ぶ) について検討を行った [13]．

超階調は Cheng らが提案するアルゴリズム [14] と同様に，画像の平坦領域の幅と遷移部での階調変化量から補正の傾きを求めるロジックが基本になる．カウンタや加減算といった簡単なロジックのみで回路が構成できるためハードウェア化が容易であり，ビットの伸張量が増えても大きく回路規模が変わらない特徴を有する．また，孤立点検出機能をあわせ持ち，ノイズに対して平滑化処理を施さないため，画像の鮮鋭度を劣化させることがない．更に，補正量の算出に予測型アルゴリズムを用いたことで，画像の垂直方向に対して高ビット深度化処理を施す場合でも多くのラインメモリを必要としない．

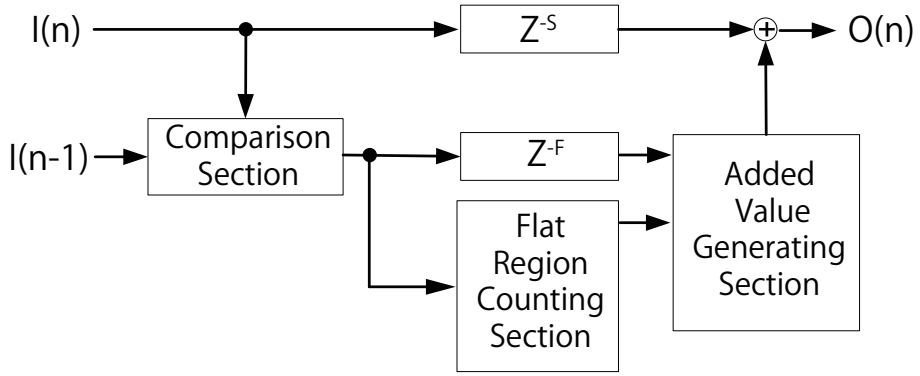


図 4.1: 超階調の基本ブロック構成図

超階調は比較部，平坦領域カウント部，付加値生成部および遅延補償部で構成されている．ハードウェア化を前提に，回路規模の少ないカウンタや加減算を中心にロジックを構成している．

4.2.2 高ビット深度化処理

基本構成

図 4.1 は超階調の基本的なブロック構成図である．$I(n)$ は入力信号，$O(n)$ は出力信号であり，比較部，平坦領域カウント部，付加値生成部および遅延補償部で構成されている．

ここで，Z は z 変換を示し，Z^{-S} は比較部と平坦カウント部および付加値生成部での遅延量の総和を示している．また Z^{-F} は平坦領域カウント部での遅延量を示している．

比較部では n 番目の入力画素 $I(n)$ とその隣接画素 $I(n-1)$ 間の階調変化量 $d(n)$ を計算する．

$$d(n) = I(n) - I(n-1) \tag{4.1}$$

平坦領域カウント部では，階調変化量 $d(n)$ が閾値 d_{lmt} より大きい場合は輪郭部と分類し，小さい場合は平坦領域と分類する．その後，カウンタを用いて平坦領域の連続性をカウントすることで平坦領域の画素幅 W を算出する．

$$W = \begin{cases} W+1 & \text{, when} \quad d(n) \leq d_{lmt} \\ 0 & \text{, else} \end{cases} \tag{4.2}$$

付加値生成部では，階調変化量 $d(n)$ をもとに注目画素が遷移部であると判定した場合，平坦領域カウント部でカウントした平坦領域の画素幅 W と，遷移部における階調変化量 $d(n)$ を元に遷移部の階調変化が緩やかになるように付加値を生成し，入力信号 $I(n)$ に加算する．

$$O(n-a) = \frac{d(n)}{W}(W-a) + I(n-a) \tag{4.3}$$

$$\text{where,} \quad a \in \{1, 2, ..., W-1\}$$

図 4.2 は本方式を概念的に示した図であり，検出された平坦領域の画素幅 W が，映像信号の遅延幅 Z^{-F} よりも狭かった場合の例を示している．検出可能な平坦領域の画素幅 W が広

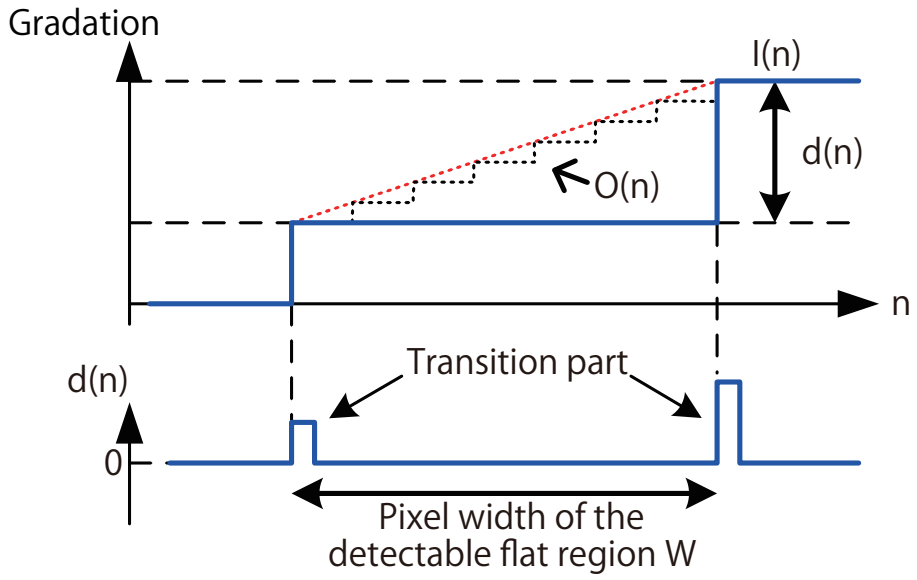


図 4.2: 超階調の高ビット深度伸張化処理

超階調の基本アルゴリズムは平坦領域の連続性をカウントし，階調変化部の変化量と平坦部の連続性から付加値を生成する．

いほど，より緩やかな階調変化に対応できるが，それに応じて多くのデータ遅延量が必要になる．演算に必要となる検出可能な平坦領域の画素幅 W は，入力信号の質に依存するが，解像度が HD 程度であれば，検出可能な平坦領域の幅 W は 256 画素程度で良い．

超階調は，カウンタを主体にした計算量の少ないアルゴリズムを採用しているため，多少遅延量が増えても，複雑な積和演算を利用する他方式と比べて回路規模インパクトを少なく抑えることが可能である．

処理閾値

式 4.3 に示すように，超階調では検出された遷移部における階調変化量 $d(n)$ と平坦領域の画素幅 W に基づいて生成した付加値を，入力信号 $I(n)$ の平坦領域に加算していく．この時，付加値を生成する際の除算で生じる少数値を含めて平坦領域の信号レベルに加算することで，入力信号のビット深度を伸張する．

図 4.3 は，ビット深度 Q_{in} ビットの入力信号 $I(n)$ から，超階調によるビット深度伸張によって Q_{out} ビットの出力信号 $O(n)$ を得る場合の入出力信号の関係を示している．

入力信号 $I(n)$ に加算する付加値の量子化数 Q_c は，入力信号に対して平滑化の補正を行う階調数を t ビットとした場合，

$$Q_c = (Q_{out} - Q_{in}) + t \tag{4.4}$$

入力信号 $I(n)$ の量子化数が 8bit 程度なら補正を行う階調数 t は 2bit 程度で良いが，t を不必要に大きく設定すると，階調変化が急峻な輪郭部に対しても平滑化を行ってしまい，入力画像の鮮鋭度を劣化させる原因になる．

そこで階調変化量 $d(n)$ が予め与えておいた閾値 $T1$ よりも大きい場合は，比較部は階調変化量 $d(n)$ として $T1$ を出力し，階調変化量 $d(n)$ が閾値 $T1$ よりも小さい場合は，比較部は階

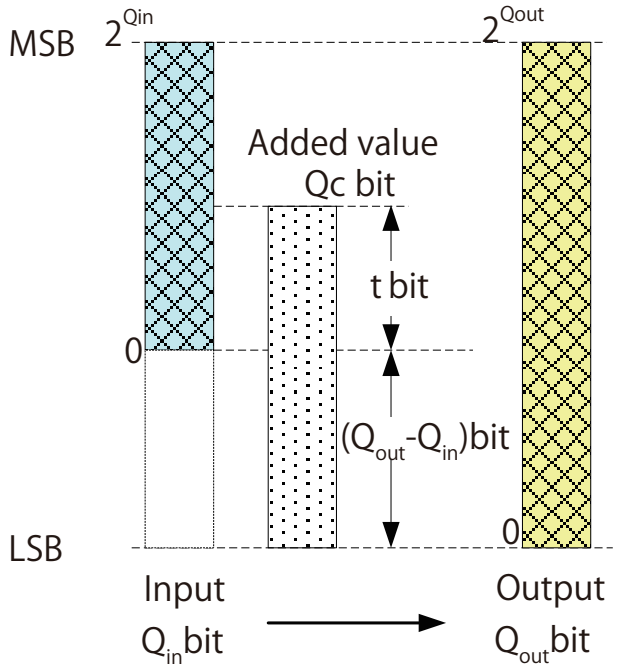


図 4.3: 入力信号と出力信号の階調数の関係

入力信号に，伸張したいビット数 $Q_{out} - Q_{in}$ に平滑化処理を行うビット数 t を加えた Q_c ビットの付加値を加算し，出力信号を得る．

調変化量 $d(n)$ をそのまま出力する閾値処理を導入した．

$$d(n) = \begin{cases} I(n) - I(n-1) & \text{, when} \quad I(n) - I(n-1) \leq T1 \\ T1 & \text{, else} \end{cases} \tag{4.5}$$

図 4.4 は閾値処理を加えたアルゴリズムにおける輪郭部での階調補正を概念的に示した図である．遷移部における階調変化量 $I(n)-I(n-1)$ が閾値 $T1$ よりも大きい場合，付加値生成部は画素幅 W と閾値 $T1$ をもとに付加値を生成し，入力信号に加算する．

入力信号の低階調側のみを適応的に伸張させる閾値処理アルゴリズムでは，付加値の量子化数を小さくできるため回路規模を小さくできるメリットがある反面，量子化の非線形性を増すことになる．

しかし表示デバイスの γ 特性 [15] の非線形性や，式 4.6 に示すヴェーバーの法則 (Waber's low) が示すように，人の視覚は映像 V_I が暗いときほど弁別可能な階調差 ΔV_I は小さく，明るい映像になるに従い弁別可能な階調差は大きくなるという特性を有する．つまり，ビット深度伸張補正を低階調側に特化しても，階調の不連続性などを改善させる十分な効果が得られる．

$$\frac{\Delta V_I}{V_I} = \text{const.} \tag{4.6}$$

平坦部検出における孤立点除去

超階調は平坦領域の画素幅 W と遷移部の階調変化量 $d(n)$ に基づいて付加値を生成する．よって，アナログの信号等に散見される入力信号 $I(n)$ にノイズが重畳されている場合は，平

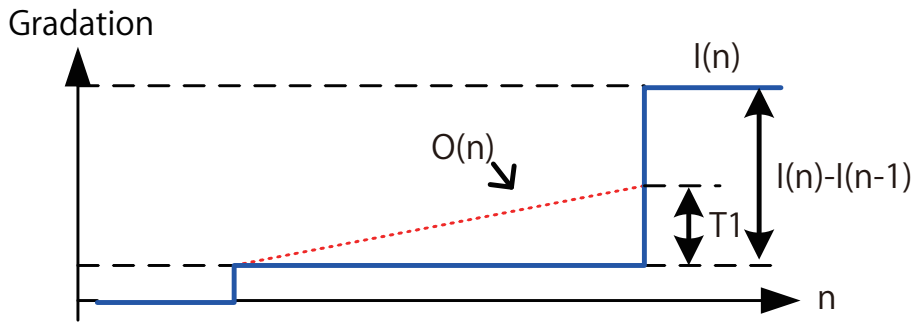


図 4.4: 閾値処理の概念

階調変化量 $I(n)-I(n-1)$ が閾値 $T1$ よりも大きい場合，付加値生成部は画素幅 W と閾値 $T1$ をもとに付加値を生成し，入力信号に加算する．

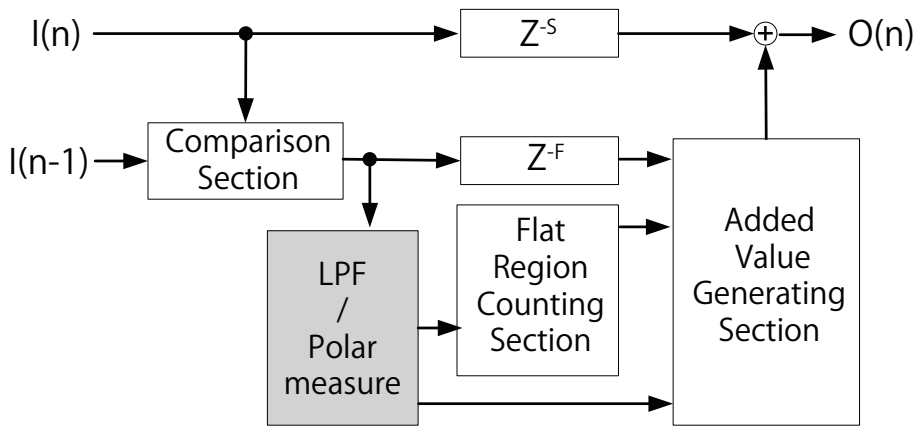


図 4.5: LPF の配置位置

LPF は平坦領域カウント部の前段に配置され，比較部から出力される差分量 $d(n)$ に対し平滑化を行う．

坦領域の画素幅 W を正しく検出できず，付加値を正しく生成できなくなる恐れがある．また，入力画像に含まれる本来補正したい遷移部と同様に，重畳されているノイズに対しても平滑化を施してしまい，画像全体の鮮鋭感を損なう可能性がある．

多くの画像処理システムでは各種ノイズリダクション処理機能を有する．超階調をこのようなノイズリダクション処理後に使用する限り，原信号にノイズが重畳されていても大きな問題は発生しない．しかし超階調を画像処理システムの入力段 (ノイズリダクション処理機能の前) に配置するような場合，遷移部の検出過程における誤検出を減らすために，比較部から出力される差分量 $d(n)$ に対し，図 4.5 に示すように LPF で簡易的に平滑化を行うことが望ましい．

今回は超階調の画面垂直方向への適応も想定し，フィルタ処理におけるタップ数を少なくすることを目的に，LPF に 1 次の IIR(Infinite Impulse Response) フィルタを用いた．

図 4.6 に IIR フィルタの構成図を示す．

ここで Z^{-1} は 1 画素遅延を表す．

比較部から出力される差分量 $d(n)$ に LPF を印加した後の差分量を $dI_{lpf}(x)$ としたときの

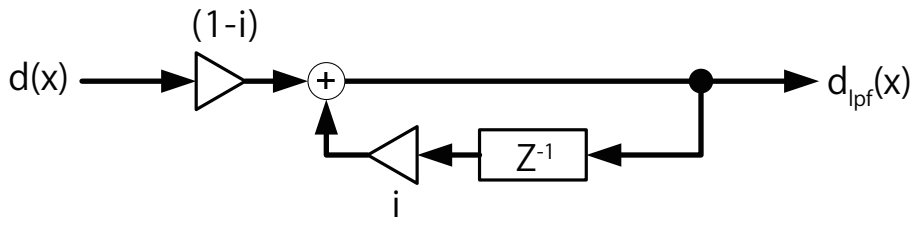


図 4.6: IIR フィルタの構成

ここで用いる LPF は，注目画素に近いほど寄与率が大きくなる加重移動平均タイプである．

フィルタ関数を式 4.7 に示す．

$$d_{lpf}(x) = i \cdot d_{lpf}(x-1) + (1-i) \cdot d(x) \tag{4.7}$$

$$= (1-i)\left[d(x) + \sum_{n=1}^{\infty} i^n d(x-n)\right] \tag{4.8}$$

$$\text{where, } 0 \leq i < 1$$

入力信号に重畳されているノイズは，平坦領域の画素幅 W の誤検出の原因になる一方で，画像の鮮鋭感を確保するに必要なアーティファクトでもある．具体的には LPF で除去し切れないような比較的階調変化量の大きいインパルスノイズは，輪郭部に存在すると画像の鮮鋭度を劣化させるが，テクスチャ部に存在する場合は画像の鮮鋭感を増加させる効果がある [16]．

そこで，入力信号に重畳されているノイズに対して一様に平滑化処理を行うのではなく，LPF と共に孤立点除去のシーケンスを併用することで，ビット深度伸張による鮮鋭感低下を防ぐ．

図 4.7 は孤立点除去の概念を示す図である．

孤立点は比較部で求めた差分量 $d(x)$ の極性を用いて判定し，差分量 $d(x)$ が次式を満足する場合，$I(x)$ は孤立点であると判定する．

$$d(x) \cdot d(x+1) < 0 \tag{4.9}$$

LPF で平滑化されるようなノイズ成分はもちろん，階調変化量の大きな遷移部についても孤立点と判断された場合には輪郭補正を行わない．検出された遷移部が孤立点と判断された場合，平坦領域カウント部では平坦領域の画素幅 W のカウントを継続する．

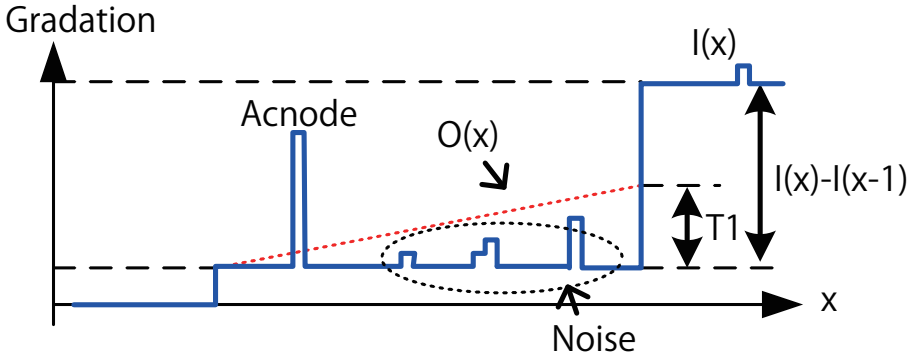


図 4.7: 孤立点除去の概念図

平坦領域内の孤立点を検出した場合，孤立点は平坦領域の一部と判定することでノイズ部に対しても一様に不価値が加算され，ノイズ感を残しつつ偽輪郭のような階調とびが補正される．

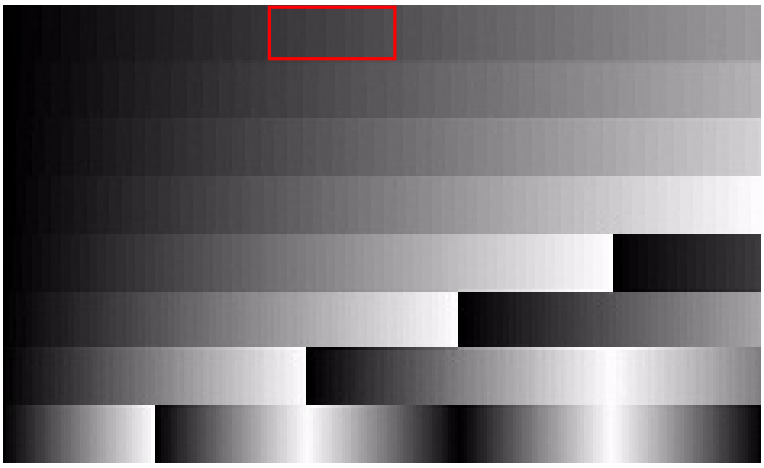


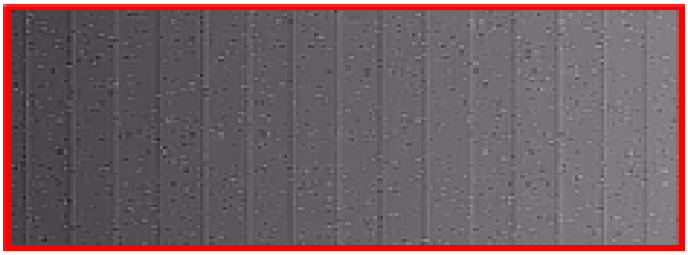
図 4.8: 画像シミュレーションの原画像

6bit のグレースケール画像（760×480 画素）に最大 5 階調のランダムノイズを重畳してある．

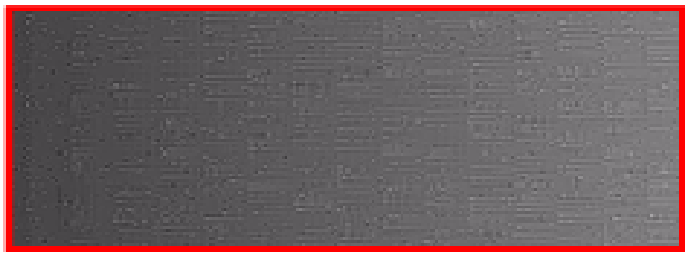
画像シミュレーション結果

図 4.8 は画像シミュレーションに使用した原画像である．画像サイズは 760×480 画素，6bit(64 階調) のグレースケール画像であり最大 5 階調のランダムノイズを重畳してある．

図 4.9(a) は図 4.8 の最上段に示す四角で囲った部位を拡大した図であり，水平方向に 32 画素ごとに 1 階調のステップを有している．図 4.9(b) にその画像シミュレーション結果を示す．ここでの処理は，水平方向のみに超階調処理を行い，最大検出幅 W は 256 画素，処理閾値 $T1$ は 2bit(4 階調) とした．結果に示すように，入力信号にノイズが重畳された画像に対しても，偽輪郭が無くなり，階調の表現力が向上しているのが確認できる．



(a) 入力画像の拡大図



(b) 階調拡張処理 (LPF 有り) 後画像の拡大図

図 4.9: 画像シミュレーション結果

ノイズが重畳された画像でも，超階調処理により偽輪郭が無くなり，階調性が改善されている．

図 4.10 は高精細カラーディジタル標準画像データ (ISO/JIS-SCID) より抜粋した画像 [ISO 12640，JIS X9210-1995 N5 (resolution: ISO 400)] に，階調拡張処理を施した結果を示している．図 4.9 に示す入力画像と同様に，原画像は 6bit まで階調を落としたものを使用した．結果，輪郭部は平滑化されなく，画像の鮮鋭感は劣化しないことが確認できる．

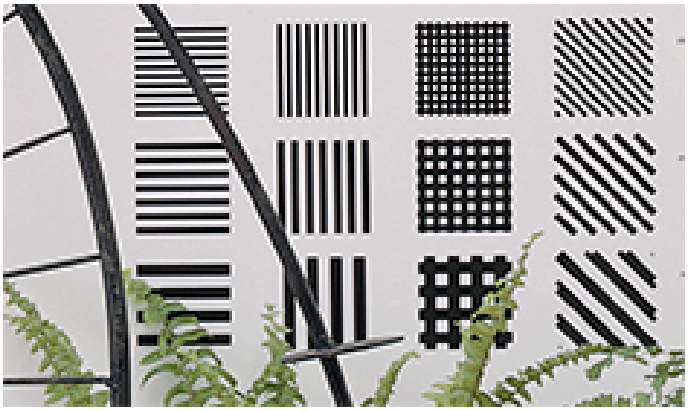
4.2.3 ハードウェア化と回路規模削減

回路規模削減の必要性

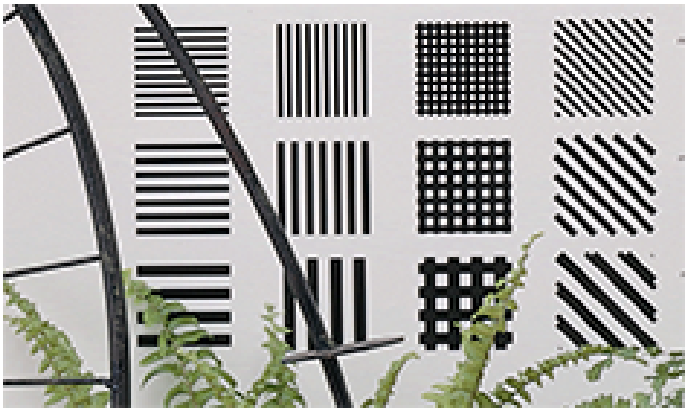
前節に示したアルゴリズムは，付加値生成の過程において平坦領域の画素幅 W を用いる．そのため，階調がステップ状に緩やかに変化する映像の階調遷移に適用させるためには，長い平坦領域の画素幅 W を検出可能な大きなカウンタが必要になる．加えて，検出可能な最大画素数に応じた遅延レジスタが必要になる．

例えば $W = 256$ 画素ごとに 1 階調変化をするグラデーション領域を有する画像を補正したいとする．前節までに検討した平坦領域検出手法の場合，映像信号が回路に入力してから実際に画像処理が行われるまでに，少なくとも入力映像信号を 256 クロック以上遅延させる必要が生じる．

今回，超階調を用いて 10bit/ch. の HD 解像度の映像信号を 16bit/ch. までビット深度を伸張させる回路を設計し FPGA に実装した．FPGA は内部の動作周波数の制約により，画素クロックが 150MHz の HD 解像度の映像信号はそのままでは通すことが出来ない．そこで FPGA 内部では 2 並列処理の回路とし，入出力のインターフェースをそれぞれ 6 チャンネル化した．



(a) 原画像 (6bit/ch.)



(b) 超階調処理後画像 (8bit/ch.)

図 4.10: SCID 画像を用いた画像シミュレーション

(a) 原画像は高精細カラーディジタル標準画像データ (ISO/JIS-SCID) より抜粋した画像 [ISO 12640，JIS X9210-1995 N5 (resolution: ISO 400)] を 6bit まで階調を落として使用. (b) は超階調処理を施したものであり，画像の鮮鋭感は劣化しない.

RTL(Register Transfer Level) はハードウェア記述言語の一つである VHDL(Very-high-speed-integrated-circuit Hardware Description Language)[17] で記述し，FPGA ベンダの供給する論理合成ツール（Xilinx ISE Desigin Suite）を用いて論理合成した.

回路を論理合成した結果を表 4.1 に示す．この回路の DFF(D-latch or Flip-Flop) 数は 8569 であった．これは過去の合成実績から ASIC のゲート数に換算すると約 90K ゲートの回路規模になると推定される.

この回路のように，水平方向の階調変化に対してのみ超階調処理を行うならば，入力映像信号のチャンネル数 × ビット深度のデータ幅を持つラインメモリを 1 本用意すれば，データ遅延に必要な DFF 数を削減することも可能である．しかし，垂直方向の階調変化に対しても超階調処理を適用させようとすると，例えばデータ遅延に 256 本のラインメモリが必要になってしまい，コスト面から現実的ではなくなる.

そこでハードウェア化を行うにあたり，回路規模を小さくできる予測型処理の検討を行った.

表 4.1: 8bit/ch. から 16bit/ch. へのビット深度伸張回路の FPGA 論理合成結果 (水平方向の超階調処理のみ)

Device	Xilinx 5vlx330ff1760-2
Input signal	60bit(10bit×6ch.)
Output signal	96bit(16bit×6ch.)
Max. horizontal length W	256 pixel
Number of slice LUTs	7206
Number of DFF	8569

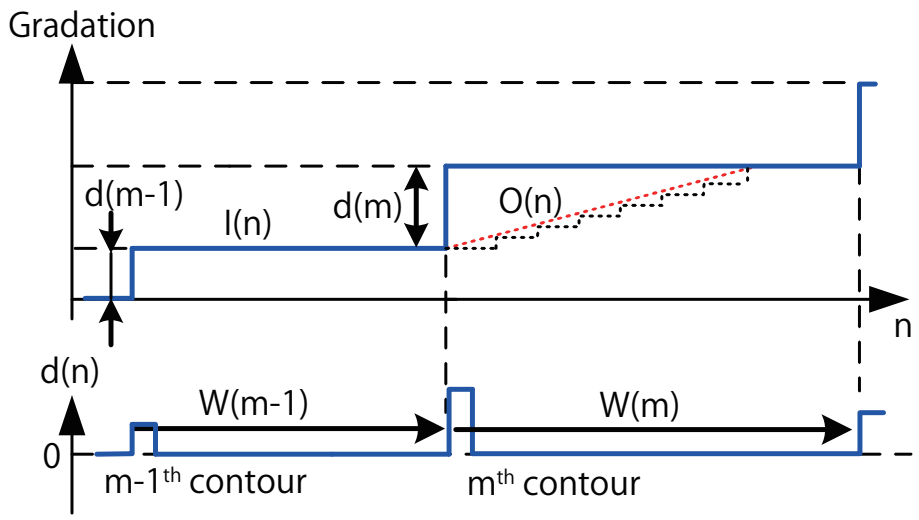


図 4.11: 予測型グラデーション検出アルゴリズム

予測型グラデーション検出アルゴリズムでは，m 番目の輪郭部から始まる平坦領域の画素幅 W ではなく，$m-1$ 番目の輪郭部から m 番目の輪郭部の間に位置する平坦領域の幅 W' を用いて付加値を算出する．

予測型グラデーション検出アルゴリズム

図 4.11 に予測型グラデーション検出アルゴリズムの概念図を示す．図 4.2 に示す従来の方式と異なる点は，計算に使用する平坦領域の画素幅 W と階調変化量 $d(n)$ の関係である．予測型グラデーション検出アルゴリズムでは，m 番目の輪郭部から始まる平坦領域の画素幅 W ではなく，$m-1$ 番目の輪郭部から m 番目の輪郭部の間に位置する平坦領域の幅 W' を用いて付加値を算出する．m 番目の輪郭部では W' 画素分の入力信号 $I(n)$ を保持しておく必要が無くなり，カウンタで検出可能な平坦領域の画素幅 W' だけを保持しておけばよい．結果，回路規模の削減を図ることが可能になる．

$$O(n+b) = I(n+b) - \frac{d(m)}{W(m-1)}(W' - b) \tag{4.10}$$

$$\text{where,} \quad b \in \{1, 2, \ldots, W(m-1)\} \leq W(m)$$

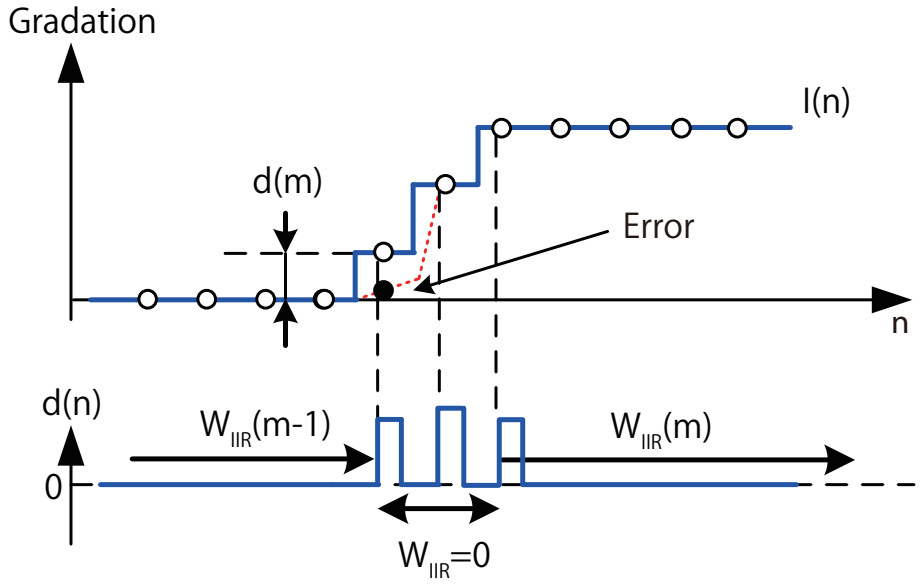


図 4.12: 予測型処理における誤変換

予測型処理では連続して階調変化がある領域において，2 画素目以降の階調変化では遷移幅 $d(n)$ は検知されるが平坦領域の幅 W がゼロと判定されるため，正しく付加値を生成することが出来ない．

但し，このような予測型グラデーション検出アルゴリズムが正しく機能するためには，階調変化が一様であることが前提条件になる．その為，自然画のように階調変化が一様でない画像の場合，補正したい平坦領域の画素幅 $W(m)$ と補正量計算に用いる隣接平坦領域の幅 $W(m-1)$ が大きく異なってしまい，不自然な補正になってしまう場合がある．

そこで測型グラデーション検出アルゴリズムでは，式 4.7 に示す LPF と同様に，付加値の計算にも IIR フィルタを用いた．

$$W_{IIR}(m) = j \cdot W_{IIR}(m-1) + (1-j) \cdot W(m) \tag{4.11}$$

$$= (1-j)\left[W(m) + \sum_k j^k W(m-k)\right] \tag{4.12}$$

付加値生成

付加値生成部では，式 4.5 に示す遷移幅 $d(n)$ および式 4.12 に示す平坦領域の幅 W_{IIR} を元に，式 4.10 に示す補正を行えるように付加値を算出する．

但し，予測型処理では図 4.12 に示すように，連続して階調変化がある領域において問題を生じる．具体的には，階調変化が始まる画素位置では，階調変化を滑らかにする処理が行われる．しかし，2 画素目以降では遷移幅 $d(n)$ は検知されるが，平坦領域の幅 W がゼロと判定されるため，正しく付加値を生成することが出来ず階調補正が行われない．

結果，階調変化の開始画素と 2 画素目間の階調変化量を逆に大きくしてしまう誤変換が発生し，広げられた階調差が偽輪郭として認識されてしまう場合がある．

そのため，超階調の付加値生成部では，連続して階調が変化する領域に対しては付加値を生成しない．

図 4.13: シミュレーションの原画像

ISO 12640-2:2003(E) Standard colour image data(N1 Woman with glass)(JIS-sRGB).

画像シミュレーション結果

人の顔のように緩やかな階調変化を有する画像は，偽輪郭が最も視認されやすい画像の一つである．そこで標準画像から図 4.13 に示す人物画を選び画像シミュレーションを実施した．

図 4.14 は超階調を用いた場合の画像シミュレーション結果であり，図 4.13 の四角で囲ってある頬の部位を拡大したものである．

図 4.14(a) は入力画像であり，ビット深度伸張の効果をより分かり易くするため，画像を 6bit/ch.(64 階調) に変換してある．階調数が少なくなっているため，グラデーション部分に偽輪郭が認められる．図 4.14(b) は水平方向のみ超階調処理を施し，6bit/ch. 画像を 8bit/ch. 画像にビット深度伸張した結果である．また，図 4.14(c) は水平と垂直両方向で超階調処理を行いビット深度伸張を施した結果である．

水平方向のみの超階調処理では偽輪郭の補正が不十分であったが，垂直方向にも処理を施すことで効果的に偽輪郭を補正出来ることが確認された．また予測型アルゴリズムで懸念された誤変換の発生は認められない．

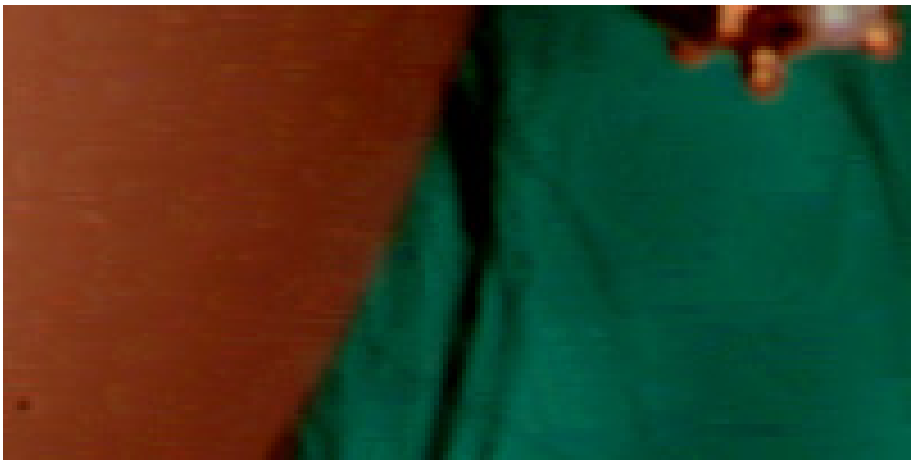
動画評価装置および回路規模

予測型処理を用いた超階調処理の回路規模確認と共に，動画における性能評価を行うため，回路を FPGA に実装して電子ディスプレイ実機による評価を実施した．

図 4.15 は評価に用いた装置の概略を示すものである．FPGA 評価ボードは 10bit のデュアルリンクの DVI と，DRAM を備えているものを用いた．

現在，TV 等のコンシューマ向け電子ディスプレイでの映像処理精度は 14bit/ch. 程度のものまで普及している．そこで今回実装した超階調では従来の性能を上回る 16bit/ch. 化処理が行えるようにした．

(a) 原画像 (6bit/ch.)



(b) 水平方向のみ処理 (8bit/ch.)

(c) 水平，垂直両方向処理 (8bit/ch.)

図 4.14: 画像シミュレーション結果

図 4.13 の原画像に示す四角で囲って部位の超階調の画像シミュレーション結果である．図 (b) の水平方向のみの超階調処理では偽輪郭の補正が不十分であったが，図 (c) の垂直方向にも処理を施すことで効果的に偽輪郭を補正出来ることが確認できる．また予測型アルゴリズムで懸念された誤変換の発生は認められない．

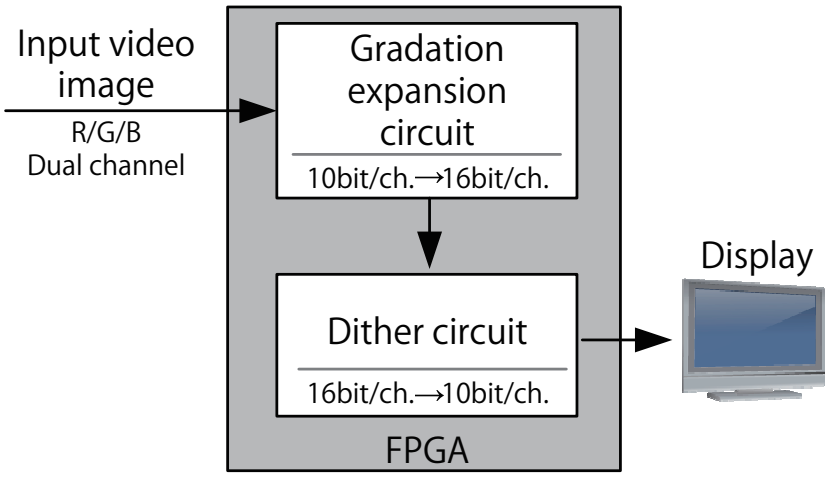


図 4.15: FPGA 評価装置の概要

10bit のデュアルリンク DVI と，DRAM を備えている FPGA 評価ボードを製作し，実機の電子ディスプレイ (LCD) を用いた評価を行った．

16bit/ch. は HDR 表示デバイスに求められるビット深度 (12bit/ch.) を十分に満足する階調数である．当然一般的な表示デバイスの階調数は 10bit 程度であり，16bit/ch. の映像信号はそのまま表示デバイスに表示させることは出来ないが，複雑な画像処理ロジックの前段にて一旦映像信号を高ビット深度化しておき，演算の丸め誤差を軽減させることの高画質化に対するメリットは大きい．

評価装置では超階調で一旦 16bit/ch. 化された映像信号を，システムの後段に配置されたディザ回路によって表示デバイスで表示可能な 10bit/ch. までビット深度を圧縮し，電子ディスプレイの画面に出力させるようにした．

図 4.16 に処理の流れとビット深度の推移を示す．ここでは，水平方向に加えて垂直方向の超階調処理も行うようにしてある．

超階調に入力した 10bit/ch. の映像信号に対して，最大検出可能な平坦領域幅 W_H を 1024 画素とし，10bit の付加値 ($t=4$) を用いて水平方向の超階調処理を行い映像信号を 16bit まで伸張する．次に，最大検出可能な平坦領域幅 W_V を 256 ラインとし，8bit の付加値 ($t=2$) を用いて垂直方向の超階調処理（ここではビット深度伸張は行わず，主に垂直方向のアーティファクト除去が行われる）を行う．

超階調を出力した 16bit/ch. の映像信号はディザ回路において 8bit のディザ処理が行われ，最終的に 10bit/ch. の映像信号が電子ディスプレイ (LCD) に出力される．

図 4.17 は 10 ビット入力画像の階調変化と，超階調を用いて 16 ビットに伸張した後の階調変化を示している．超階調処理によって入力画像に見られた 60 から 65 画素間の急峻な傾きは平滑化されている．一方で 66 から 70 画素間の連続する階調変化や 70 画素以降の輪郭部は平滑化されていないことが確認できる．

表 4.2 はこの評価用の超階調回路の論理合成結果である．水平超階調処理に加えて垂直超階調処理も含まれているが，予測型グラデーション検出アルゴリズムを用いたことで，6 チャンネル各 10bit の映像信号のビット深度を 6bit 増やす構成でも，回路規模は 180k ゲート，SRAM 使用量は 558kB に収まることを確認した．

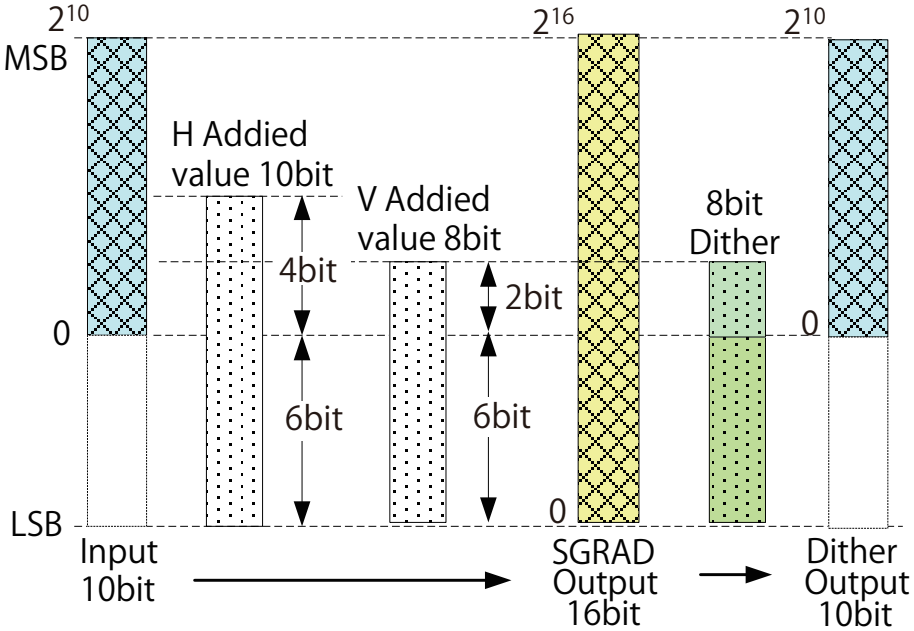


図 4.16: 入力信号と出力信号のビット深度の関係

10 ビットの入力信号を，水平方向の超階調および垂直方向の超階調により 16 ビットにビット伸張後，8 ビットのディザにより 10 ビットに戻して電子ディスプレイに出力.

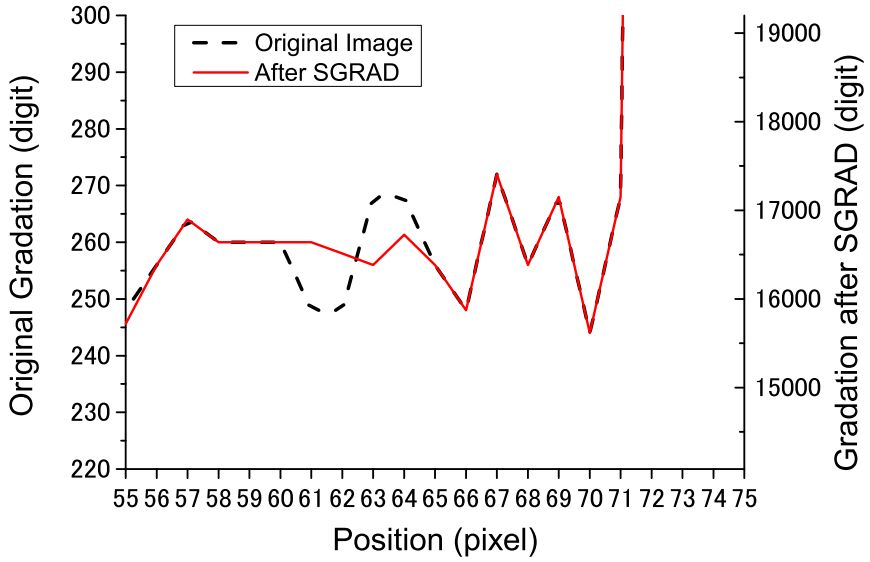


図 4.17: 超階調処理の結果

超階調を使ったビット深度伸張結果を示す図である．適応処理により輪郭部等を平滑化してしまうことはない.

表 4.2: 超階調評価回路の FPGA 論理合成結果

Device	Xilinx 5vlx330ff1760-2
Input signal	60bit(10bit×6ch.)
Output signal	96bit(16bit×6ch.)
Max. horizontal length W_H	1024 pixel
Max. vertical length W_V	256 line
Number of slice LUTs	12177
Number of DFF	14640
Embedded SRAM	558kB

動画評価結果

標準動画像などを用いて，超階調処理により鮮鋭度の劣化などの副作用が生じないことを確認すると共に，意図的にノイズが含まれた映像を用いて，映像に含まれるアーティファクトの低減効果を確認した．

図 4.18 は，動画評価において超階調のアーティファクトの低減効果が最も顕著に確認された MPEG 映像信号における，処理前後のイメージ画像を比較して示したものである．紙面に掲載する都合上 10 bit のビット深度の映像を使えないため，映像信号をキャプチャした 10 bit/ch. の画像を 6bit/ch. に変換した画像シミュレーションの原画像を図 4.18(a) に，図 4.18(a) の画像を超階調によって 8bit/ch. にビット深度伸張させた結果を図 4.18(b) に示す．

ここでのシミュレーション結果と同様に，図 4.15 に示す評価装置を用いた検証でも，簡易なノイズフィルタでは除去することが困難な MPEG ノイズが含まれた映像に対して，超階調は良好な画質改善効果が得られることを確認した．

4.2.4 まとめ

低ビット深度の映像信号を HDR 表示デバイスに表示させた場合の偽輪郭対策として，少ない回路規模でハードウェア化が可能なビット深度伸張手法である超階調を開発した．

従来の平滑化フィルタを用いた高ビット深度化手法とは異なり，超階調は積和演算を多用することなく，カウンタを効果的に用いることで回路規模の削減を図った．結果，画像シミュレーションでビット伸張の効果を確認すると共に，回路を FPGA に実装したことで，水平方向の階調処理のみであれば，およそ 90k ゲートの回路規模に収まることを確認した．また，IIR フィルタを用いた予測型グラデーション検出アルゴリズムを採用したことで，垂直方向の階調処理を行う場合にも多くのラインメモリを必要とせず，偽輪郭や MPEG ノイズ等のアーティファクトを効果的に除去可能であることを確認した．

(a) 原画像 (6bit/ch.)

(b) 超階調処理後画像 (8bit/ch.)

図 4.18: 動画評価結果イメージ図

MPEG ノイズ重畳画像の動画評価結果のイメージを示す図である．紙面に掲載する都合上，10 bit のビット深度の映像を使えないため，映像信号をキャプチャした 10 bit/ch. の画像を 6bit/ch. に変換した画像シミュレーションの原画像を図 (a) とし，超階調の画像シミュレーションにより 8bit/ch. にビット深度伸張させた結果を図 (b) に示す．

4.3 結言

現在多くのデジタル映像コンテンツは 8bit で量子化されたものであり，表示デバイスの HDR 化に応じて，映像信号のビット深度を伸張する階調補完が，今まで以上に重要な技術になることは疑う余地がない．

2020 年の東京オリンピックを目標に実用化が進められている 8K 放送では，非圧縮の状態では 24Gbps の信号帯域が必要になり，画像の圧縮伝送は不可欠となる．加えて，画像処理を行う際にも回路規模を小さくするために，高圧縮率で圧縮された映像信号を画像処理する [18] 場面が増えると予想される．つまり，MPEG ノイズのような画像処理に付随して発生するアーティファクトが今まで以上に問題になると予想される．

超階調のような階調補完技術は，表示デバイスの HDR 化に対応することはもちろん，高規格化が進む映像信号を電子ディスプレイにおいて高画質表示させるためには欠くことのできない技術であると言える．

参考文献

[1] T. Yamamoto, M. Kurozumi, M. Yamamoto, O. Tamaru, H. Arata, N. Otsubo, E. Nakasu, K. Ishii, T. Kurita, K. Minomo, and T. Kikkawa, "Measurements of brightness and moving image characteristics of recent flat panel displays," Proc. IDW'07, pp.2291–2294, Dec. 2007.

[2] H. Kaneko, S. Kagawa, J. Someya, H. Tanizoe, and H. Sugiura, "Wide color gamut and high brightness WUXGA LCD monitor with color calibrators(⟨special section⟩ electronic displays)," IEICE Transactions on Electronics, vol.88, no.11, pp.2118–2123, Dec. 2005.

[3] M. Kuwata, H. Sugiura, T. Sasagawa, A. Michimori, E. Toide, T. Yanagisawa, S. Yamamoto, Y. Hirano, M. Usui, S. Teramatsu, and junSomeya, "A 65-in. slim (255-mm depth) laser TV with wide-angle projection optical system," Journal of the Society for Information Display, vol.17, no.11, pp.875–882, Dec. 2009.

[4] T. Fujine, T. Kanda, T. Yoshida, M. Sugino, M. Teragawa, Y. Yamamoto, and N. Ohta, "Bit depth needed for high image quality TV-evaluation using color distribution index," Journal of Display Technology, vol.4, no.3, pp.340–347, Sept. 2008.

[5] R.L. Heckaman and M.D. Fairchild, "Beyond the locus of pure spectral color and the promise of HDR display technology," Information Display, vol.23, no.7, pp.22–26, July 2007.

[6] "VESA DisplayPort Standard version 1, revision2," Jan. 2010.

[7] R. Ulichney and S. Cheung, "Pixel bit-depth increase by bit replication," Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy, and Graphic Arts III, Proc. SPIE, pp.232–241, Jan. 1998.

[8] S. Daly and X. Feng, "Bit-depth extension: Overcoming LCD-driver limitations by using models of the equivalent imput noise of the visutal system," Journal of the Society for Information Display, vol.13, no.1, pp.51–66, Jan. 2005.

[9] O.C. Au, M.S. Fu, P.H.W. Wong, J.W.C. Wong, and Z. Guo, "Hybrid inverse halftoning using adaptive filtering," Proc. of IEEE inst. Sym. on Circuits and System, vol.4, pp.259–262, July 1999.

[10] C.H. Liu, O.C. Au, P.H.W. Wong, M.C. Kung, and S.C. Chao, "Bit-depth expansion by adaptive filter," Circuits and Systems, 2008. ISCAS 2008. IEEE International Symposium on, pp.496–499, May 2008.

[11] 久保俊明，山中　聡，南　浩次，杉浦博明，"ディスプレイ向け階調数拡大技術の開発，" 映像情報メディア学会技術報告，vol.33，no.1，pp.23–26，Jan. 2009.

[12] Y. Okuno, T. Nakano, M. Yoshiyama, and J. Asano, "Gradation quality enhancement without degradation in texture areas," Proc. IDW'08, pp.1175–1178, Dec. 2008.

[13] A. Nagase, N. Nakano, M. Asamura, J. Someya, and G. Ohashi, “Study of reducing circuit scale associated with bit depth expansion using predictive gradation detection algorithm,” IEICE Transactions, vol.E97-D, no.5, pp.1283–1292, May 2014.

[14] C.-H. Cheng, O.C. Au, C.-H. Liuiu, and K.-Y. Yip, “Bit-depth expansion by contour region reconstruction,” Circuits and Systems, 2009. ISCAS 2009. IEEE International Symposium on, pp.944–947, May 2009.

[15] Y. Shimodaira, T. Muraoka, S. Mizushina, H. Washio, Y. Yamane, and K. Awane, “Acceptable limits of gamma for a TFT-liquid crystal display on subjective evaluation of picture quality,” IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol.41, no.3, pp.550–554, Aug. 1995.

[16] T. Kurihara, N. Aoki, and H. Kobayashi, “Analysis of sharpness increase by image noise,” Journal of Imageing Science and Technology, vol.55, no.3, pp.30504–1–30504–7, May 2011.

[17] “IEEE Standard VHDL Language Reference Manual,” Jan. 2009.

[18] 長瀬章裕，奥田悟崇，染谷　潤，中西邦文，杉浦博明，“1/6 圧縮フィードフォワード駆動法の開発,” 映像情報メディア学会誌，vol.63，no.7，pp.984–990，July 2009.

第5章　結論

本研究は，電子ディスプレイ向け光源としては課題が多く広く未だ普及していない LD の活用や，ハードウェア化を念頭に置いた画像処理技術の検討により，高規格化が進む映像信号規格と電子ディスプレイ性能の間に存在する不整合を解消する手法を確立し，電子ディスプレイの更なる高画質化を目指すことを目的に進められた．

以下に本研究の成果を要約すると共に，今後の課題を明らかにして本論文の結論とする．

第 2 章では，映像信号における色域と電子ディスプレイの色再現能力の差異について考察を行い，表示デバイスの色域拡大の必要性を明らかにすると共に，異なる 2 種の色域補完手法を開示した．また，色純度の高い光源素子として注目を集めている LD を実際に電子ディスプレイ用光源として用いる際に課題となる過干渉ノイズ対策と温度管理についての検討を行った．

具体的には，6 原色カラーホイールと 6 色対応カラーマネージメント技術を用いた多原色 MD-PTV，MD-PTV の光源に色純度の高い LD を用いたレーザー TV，LD を液晶ディスプレイの光源に用いたレーザーバックライト等，新しい広色域表示デバイスを開発し，その色再現性について検証を行った．

スペクトルが急峻で色純度の高い光が出射される LD は，電気光変換効率が高いということもあり，今後，電子ディスプレイの広色域化を図るには不可欠なデバイスであることは疑う余地がない．しかし，その光学特性や温度特性に起因して，電子ディスプレイで使用するには課題も多いデバイスであった．

今回，LD を電子ディスプレイに用いるのに必要となる，光学設計やサーマルマネージメントと言った基礎的な検討から，シンチレーションや色割れなどの視認性改善方法に至るまで詳細に検討を行い，最終的に電子ディスプレイとしての画像表示性能を示すことができた．このことは，今後の更なる電子ディスプレイの広色域化に向けて非常に意義深いことであったと考える．

第 3 章では，映像信号の解像度変換の際に生じる画質劣化の問題について考察し，その改善方法の一例を示した．

映像コンテンツは映像信号の高規格化に伴い年々高解像度化が進んでおり，数年前まで主流であった SD 解像度のコンテンツは市場から淘汰され，今では HD 解像度のコンテンツが一般的になっている．また近い将来，放送信号は 4K や 8K といった超高解像度の信号に進化していくことが既に決まっている．しかしながら，過去に製作された低解像度の映像コンテンツも貴重な資産であり．廃棄されることは無い．つまり，更なる高解像度化が進む電子ディスプレイにおいて，異なる解像度規格の映像信号を綺麗に表示させるため，解像度変換の重要性は高まる一方であり，解像度変換によって生じる画質劣化の改善手法を含んだ解像度補完技術の確立が急務になっている．

近年の半導体集積率の向上は，超解像をはじめ演算量が多い画像処理をリアルタイムで行うことを可能にした．しかし価格破壊の進む電子ディスプレイにおいて，少ない演算量で高い効果が得られる画像処理アルゴリズムに対する需要は多い．

今回提案したスケーリング技術を応用した輪郭改善手法や，画素ずらし表示に対応した黒線領域拡張処理は，実際に多くの電子ディスプレイに組み込み，映像信号の解像度変換の際に生じるアーティファクトを効率よく除去できる補完技術であることを実証することができた．

第 4 章では，HDR 化が著しく進む電子ディスプレイにおいて，低ビット深度の映像コンテンツを表示させた場合に問題になる階調とびについて考察を行い，新たにハードウェア化が容易な階調補完手法を提案した．

少ない演算量でビット深度を伸張する本方式は，画像処理システム内に容易に組み込むことが可能であり，レーザー TV をはじめとする多くの HDR ディスプレイの画像処理システムに搭載され，高画質化に効果を発揮している．

また，階調変化の激しい箇所を抽出し，適応的に平滑化処理を行う本方式は，MPEG ノイズなどの符号化処理に付随して発生するブロックノイズをも効果的に除去できることを併せて示した．

今後映像信号の高解像度化がますます進むのに伴い，信号圧縮処理が今まで以上に多くの場面で使われることが予想される．計算量が少ない本手法は，多くの場面で活用され得る技術と言える．

以上述べたように，本研究では高規格化が進む映像信号と電子ディスプレイの性能の不整合による画質劣化因子から，特に問題となる色域，解像度，階調を取り上げ，それぞれの不整合解消に必要となる新たな補完技術を開示した．

人々が電子ディスプレイに求める性能が臨場感や忠実再現であるならば，NHK が主体となって開発を進めている 8K スーパーハイビジョンは，今後目指すべき映像表示システムの一つの解であることに相違ない．物体色 (Pointer's color) の 99.9% を包絡する色域と，人の誘導視野に相当する画角 100 度の大画面は，22.2ch のサラウンド音響システムと組み合わせることで，今までの電子ディスプレイの概念を大きく超えた高い臨場感が得られることであろう．しかし，この極めて高規格な映像信号と表示性能が整合する電子ディスプレイを実際に作り上げるためには，解決すべき技術課題が多いのも事実である．

本研究の成果として示した色域補完技術は，現状では不足している電子ディスプレイの色域を，BT.2020 が求める色域まで拡大することを可能にする．BT.2020 の 12bit 映像信号は，HDR 化が進む電子ディスプレイにおいても偽輪郭が視認されない十分な階調数である．しかし，圧縮された映像信号の復号化やガンマ補正など，表示デバイス毎に最適化が必要な高画質化処理を施すことで，例え 12bit の映像信号であっても演算誤差に起因する階調とびは発生してしまう．つまり，超階調のような回路規模インパクトの少ない階調補完技術は，高規格な BT.2020 の映像信号を扱う場合でも，信号に見合う高画質な映像を得るためには欠くことが出来ない技術なのである．加えて，スーパーハイビジョンの目指す没入感が得られる程の大画面ディスプレイは，FPD では高コストになってしまうため，普及を考えるとより安価に製造ができるプロジェクション型ディスプレイも選択肢の一つになる．その際，よりコスト競争力のある製品にするためには，画素ずらし等の解像度補完技術が必要になる．つま

り本研究で明らかにした各補完技術は，臨場感向上，忠実再現の基盤技術なのである．

また本研究で開示した各補完技術は，専用映像表示装置の高画質化にも応用することができる．例えば研究開発が進む遠隔医療の分野では，遠隔画像診断において電子ディスプレイが必要になるが，色域補完技術によるディスプレイの色域拡大や階調補完による質感の向上は，医師が病変部位を詳しく観察するために重要であり，診察の精度向上に役立てることができる．

他にも，学校に設置される教育用のディスプレイや博物館のデジタルアーカイブ表示用のディスプレイなどでは，本物を知る上で忠実再現は必要になる．また，各種フォーマットで蓄積されてきた多くの映像資産をも表示をさせることを考えると，色域補完，解像度補完，階調補完の各技術はまさに必要とされる技術と考える．

このように，本研究で開示した 3 つの不整合因子の補完技術は，現在の電子ディスプレイの高画質化に必要な技術であるのは勿論のこと，今後さらに進化する映像技術にとっても欠くことのできない重要な技術であり，映像技術の進化に貢献する基盤技術なのである．

人々が電子ディスプレイに求める高性能化の欲求は尽きることはない．映像信号は国際標準の枠組みで決められ進化を続けていくが，競争原理の中に置かれる電子ディスプレイの開発では，常に一歩先を行く性能が求められる．つまり，未来永劫，映像信号と電子ディスプレイ間の性能の不整合はなくなることは無く，今回開示したような両者の差異を補完する技術は重要であり続けるといえる．

最後に，我が国の電子ディスプレイ関連事業は電子ディスプレイ市場のグローバル化と，製品のコモディティ化の影響により新興国の追い上げを受け苦しい状況にある．しかし今後も映像信号規格と電子ディスプレイの画質性能が切磋琢磨して進化していくことで，世界最高水準の映像技術力を維持し続けていけることを願う．

謝辞

本論文を結ぶにあたり，貴重な時間を割いて論文審査をして頂くと共に，論文充実化のための有益なご指導を賜りました，静岡大学創造科学技術大学院　佐治斉教授，青木徹教授，中井孝芳教授に感謝いたします.

また，私を研究室に受け入れてくださり，指導教員として多大なるご指導，ご高配を賜りました静岡大学創造科学技術大学院　大橋剛介准教授に深く感謝いたします．また大橋研究室の皆様とは学会や報告会等で多くの有意義な議論をさせていただき，本研究を進める上での大きな励みになりました．感謝いたします.

研究を進めるにあたり三菱電機株式会社の皆様には有益なご意見，ご指導を賜りましたこと感謝いたします．特に三菱電機株式会社 冷熱システム製作所 制御システム部 次長　染谷潤博士には画像信号処理全般に関して多くのご意見，ご指導を賜りましたこと深く感謝いたします．また三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 熱流体システム技術部 主席研究員 永安哲也氏には不慣れであった熱解析の分野で丁寧なご指導を賜りましたこと感謝いたします.

最後に社会人として大学院博士課程入学を目指すにあたり，なかなか最後の一歩を踏み出せないでいた優柔不断な男の背中を押してくださった，静岡大学 イノベーション社会連携推進機構 下平美文特任教授，三菱電機株式会社 デザイン研究所 所長 杉浦博明博士に深く感謝いたします.

本論文に関する発表論文

論文

[1] A. Nagase, N. Nakano, M. Asamura, J. Someya and G. Ohashi, “Study of reducing circuit scale associated with bit depth expansion using predictive gradation detection algorithm”,IEICE Transactions, vol.E97-D, no.5, pp.1283-1292, May 2014.

[2] A. Nagase, E. Niikura, M. Shinozaki, T. Nagayasu, T. Kondo and G. Ohashi, “Thermal management of edge-lit wide color gamut backlight for LCD using red laser diodes and cyan LEDs”, Journal of the Society for Information Display, Vol.21, no.7, pp.295-304, July 2013.

[3] 長瀬章裕，桑田宗晴，岡垣　覚，道盛厚司，染谷　潤，平野嘉仁，中村　聡，都出英一，吉原　徹，寺松滋則，杉浦博明，“可視光レーザー光源を用いたレーザー TV の開発,” レーザー研究，vol.39，no.6，pp.24–27，June 2011.

[4] 長瀬章裕，奥野好章，染谷　潤，杉浦博明，“スケーリング技術を応用した輪郭補正方法,” 映像情報メディア学会誌，vol.60，no.10，pp.1689–1695，Oct. 2006.

国際会議

[1] N. Nakano, E. Niikura, R. Murase, A. Nagase, H. Sakamoto, T. Sasagawa, K. Minami, M. Hanai, and K. Shimizu, “Development of laser backlight LCD TV,” Technical Digest of 18th Microoptics Conference (MOC’13), Tokyo, Japan, p.36, Oct. 2013.

[2] A. Nagase, E. Niikura, M. Shinozaki, T. Nagayasu and T. Kondo, “Heat Dissipation Performance of Laser Backlight for Liquid Crystal Television Displays”, SID Symposium Digest,Spetial issue: Proceedings: EuroDisplay 2013, Vol.44, no.S1, pp.197-201, Sept. 2013.

[3] N. Nakano, E. Niikura, R. Murase, A. Nagase, T. Sasagawa, K. Minami, and M. Hanai, “Development of the backlight using the laser light source for LCD,” The 2nd Laser Display Conference, pp.LDC10–3, April 2013.

[4] N. Nakano, E. Niikura, R. Murase, A. Nagase, M. Hanai, T. Sasagawa, and K. Minami, “Laser backlighting LCD TV,” The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, pp.SA2–5, June 2013.

[5] E. Niikura, R. Murase, S. Kagawa, N. Nakano, A. Nagase, H. Sakamoto, T. Sasagawa, K. Minami, H. Sugiura, K. Shimizu, and M. Hanai, “Development of laser backlighting LCD television,” Proc. IDW/AD’12, pp.287–288, Dec. 2012.

[6] N. Nakano, A. Nagase, M. Asamura, J. Someya, and H. Sugiura, “Study of improving the gradation quality of displays receiving noise-added signal,” Proc. IDW’09, pp.499–502, Dec. 2009.

[7] H. Sugiura, T. Sasagawaa, A. Michimori, M. Kuwata, A. Nagase, E. Toide, T. Yanagisawa, S. Yamamoto, Y. Hirano, M. Usui, S. Teramatsu, and J. Someya, “Super-slim laser TV with newly developed laser light sources,” Proc. IDW’08, pp.189–190, Dec. 2008.

[8] A. Nagase, S. Kagawa, J. Someya, M. Kuwata, T. Sasagawa and H. Sugiura, “Development of PTV Using Six-Primary-Color Display Technology”, SID Symposium Digest, Vol.40, pp.27-30, May 2007.

[9] H. Sugiura, M. Kuwata, Y. Inoue, T. Sasagawa, A. Nagase, S. Kagawa, N. Watanabe, and J. Someya, “Laser TV - ultra wide color gamut in conformity with xvYCC,” SID Symposium Digest, vol.40, pp.12–15, May 2007.

[10] A. Nagase, Y. Okuno, J. Someya and H. Sugiura, “The Contour Correction Method using Scaling Technique”, International Workshop on Advanced Image Technology, pp.S11-1, Jan. 2006.

寄稿

[1] 新倉栄二，村瀬令奈，中野菜美，長瀬章裕，坂本浩隆，花井昌章，志水浩二，“レーザーバックライト液晶テレビ「REAL LASERVUE」の開発，” 映像情報メディア学会誌，vol.68，no.1，pp.J30–J33，Jan. 2014.

[2] 新倉栄二，村瀬令奈，中野菜美，長瀬章裕，笹川智広，“レーザーバックライト液晶 TV「REAL LASERVUE」，” 月刊 OPTRONICS，vol.32，no.4，pp.149–152，オプトロニクス社，April 2013．月刊オプトロニクス．

国内口頭発表

[1] 新倉，村瀬，香川，中野，長瀬，笹川，南，花井，杉浦，“レーザーバックライト液晶TV,” Optics & Photonics Japan 2012，p.25pBS5，Oct. 2012.

[2] 新倉，村瀬，中野，長瀬，笹川，“レーザーバックライト液晶TVの開発,” (独）日本学術振興会「光電相互変換第125委員会」本委員会(第219回) 研究会，pp.24–27，Dec. 2012.

[3] 新倉栄二，村瀬令奈，中野菜美，笹川智広，長瀬章裕，“レーザーバックライト液晶TV -REAL LASERVUE-,” 第60回応用物理学会春季学術講演会，pp.05–033，March 2013.

[4] 新倉栄二，村瀬令奈，中野菜美，長瀬章裕，笹川智広，“レーザーバックライト液晶TV,” 日本光学会第11回レーザーディスプレイ技術研究会，pp.27–29，Jan. 2013.

[5] 正岡顕一郎，大村耕平，西田幸博，菅原正幸，野尻裕司，中須英輔，香川周一，長瀬章裕，久野徹也，杉浦博明，“スーパーハイビジョン広色域表色系画像の表示実験,” 2010年映像情報メディア学会年次大会，pp.6–2，Aug. 2010.

[6] 中野菜美，長瀬章裕，浅村まさ子，染谷　潤，杉浦博明，“ディスプレイにおける階調表現力向上手法の開発,” 映情学技報，vol.33，no.40，pp.29–32，Oct. 2009.

[7] 長瀬章裕，“最先端広色域ディスプレイ技術,” 最先端ディスプレイ技術，pp.1–1–1–7，平成18年度専門講習会，電子情報通信学会，Feb. 2007.

[8] 長瀬章裕，奥野好章，染谷　潤，“スケーリング技術を応用した輪郭補正方法,” 2005年映像情報メディア学会年次大会，pp.13–4，Aug. 2005.

[9] 長瀬章裕，奥野好章，染谷　潤，杉浦博明，“スケーリング技術を応用した輪郭補正における輪郭検出方法,” 2005年映像情報メディア学会冬季大会，pp.2–2，Nov. 2005.

[10] 長瀬章裕，香川周一，染谷　潤，桑田宗晴，笹川智広，杉浦博明，“6原色表示技術を用いた広色域PTVの開発,” 映情学技報，vol.31，no.46，pp.21–24，Oct. 2007.

[11] 長瀬章裕，香川周一，染谷　潤，杉浦博明，“6原色表示技術による広色域プロジェクションTVの開発,” 2007年映像情報メディア学会年次大会，pp.3–2，Aug. 2007.

[12] 長瀬章裕，新倉英二，篠崎　健，永安哲也，杉浦博明，近藤泰治，“液晶ディスプレイ向け2種光源バックライトの放熱構造,” 2012年映像情報メディア学会年次大会，pp.15–9，Aug. 2012.

[13] 長瀬章裕，浅村まさ子，染谷　潤，杉浦博明，“ディスプレイの階調表現力向上に関する検討,” 2008年映像情報メディア学会年次大会，pp.14–1，Aug. 2008.

[14] 並木亮介，長瀬章裕，染谷　潤，杉浦博明，“PTVにおける鮮鋭度改善技術の開発,” 2007年映像情報メディア学会冬季大会，pp.1–6，Nov. 2007.

表彰

[1] 映像情報メディア学会, 平成 20 年度, 第 5 回船井賞技術賞, 長瀬章裕，香川周一，染谷潤，桑田宗晴，笹川智広，杉浦博明，宮田彰久，“6 原色表示技術を用いた広色域 PTV の開発,”.

[2] 映像情報メディア学会, 研究奨励賞，平成 20 年度, 第 11 回優秀研究発表賞, 長瀬章裕，“6 原色表示技術を用いた広色域 PTV の開発,”

[3] 京都府発等功労者表彰, 平成 27 年度, 第 59 回発明考案功労者優秀賞, 西谷令奈, 笹川智広, 新倉栄二, 小島邦子, 長瀬章裕，“液晶表示装置 (特許第 5132819 号),”

用語解説

- ASIC: Application Specific Integrated Circuit, 特定用途向けに設計された半導体集積回路.
- ARIB: Association of Radio Industries and Businesses, 一般社団法人 電波産業会の呼称.
- BD: Blu-ray Disc，光ディスクの規格の一つ．青紫色 LD を用いた第三世代光学ドライブ.
- BS: Broadcasting Satellite, 東経 110 度の放送衛星を用いて放送されるテレビやラジオの放送.
- CCFL: Cold Cathode Fluorescent Lamp, 冷陰極蛍光管．一般的な蛍光ランプと異なり，陰極を加熱することなく電子放出させ，電子の衝突によって生成された紫外線により蛍光体を励起する.
- CD: Compact Disc, 光ディスクの規格の一つ.
- CIE：Commission International de i'Éclairage, 国際照明委員会.
- CMOS: Complementary Metal-Oxide Semiconductor，相補型金属酸化膜半導体.
- COD: Catastrophic Optical Damage, LD の故障モードの一つ．LD の光出力端面が溶解し，レーザーの発振が停止する現象.
- CRT: Cathode Ray Tube, ドイツの Karl Ferdinand Braun が発明した画像を表示する陰極線管．ブラウン管.
- CS: Communication Satellite, 通信衛星を通じて放送される衛星多チャンネル放送.
- DFF: D-latch or Flip-Flop, 非同期 ED フリップフロップと同期型 D フリップフロップの総称.
- DMD: Digital Micromirror Device, アレイ状に配置されたマイクロミラーを用いて空間変調を行うマイクロディスプレイデバイス．Texas Instruments 社が開発.
- DSC: Digital Still Camera，主に静止画を撮影することができるデジタルカメラ.
- DTP: Desktop Publishing，出版物の原稿作成や編集作業をコンピュータ上で行うこと.

- DVD: Digital Versatile Disk, 光ディスクの規格の一つ．SD 画質の映像信号を 2 時間分録画可能な円盤状の記憶媒体.
- DVI: Digital Visual Interface, デジタルディスプレイ向けの映像インターフェース規格の一つ.
- EDID: Extended Display Identification Data, 周波数や解像度などのディスプレイ固有の情報を収めたメタファイル.
- FPD: Flat Panel Display，液晶ディスプレイやプラズマディスプレイなど, 画面が平坦で厚みも薄い電子ディスプレイの通称.
- FPGA: Field Programmable Gate Array，書き換え可能なゲートアレイ.
- FSC: Field Sequential Color, 色を時間分割で表示する画像の表示方式 (フィールド色順次方式).
- FWHM: Full Width at Half Maximum, スペクトル分布において，相対放射強度がピーク値の 50%になる波長の幅.
- GUI: Graphical User Interface，画像や図形を用いた直観的な操作を提供するユーザインターフェース.
- HD: High Definition，ハイビジョンと呼ばれている，垂直画素数が 1080 本や 720 本ある映像信号規格の総称．現在の地上デジタル放送や BS デジタル放送がこれにあたる.
- HDMI: High-Definition Multimedia Interface，デジタル家電向けのインターフェースの一つ．非圧縮デジタルの音声と映像を一つのケーブルで伝送.
- HDR: High Dynamic Range, 明度差を広く取れること．ハイダイナミックレンジ.
- HMD: Had-Mounted Display, 頭部装着型の画像表示装置.
- HUD: Head-Up Display, 人間の視野に直接情報を映し出す画像表示装置．戦闘機のコックピット等で用いられている.
- IIR: Infinite Impulse Response，無限インパルス応答.
- LBS: Laser Beam Scanning, レーザー走査型ディスプレイ.
- LCD: Liquid Crystal Display，液晶を用いた平板薄型の画像表示装置.
- LD: Laser diode, 半導体レーザー
- LED: Light Emitting Diode，発光ダイオード
- LPF: Low Pass Filter, 低い周波数帯を通過させるフィルタ．ローパスフィルタ.
- LSI: Large Scale Integration, 半導体集積回路.

- MD-PTV: Micro Display Projection Television，空間光変調素子にマイクロディスプレイを用いた投写型映像装置.
- MEMS: Micro Electro Mechanical Systems, 機械，電気，光などの多様な機能を集積化した微細デバイス.
- MPEG: Moving Picture Experts Group，映像データの圧縮方法の一つ．動画の動く部分を検出し保存する等の手法で圧縮を行う.
- MUSE: Multiple Sub-Nyquist-Sampling Encoding System，1982 年に開発されたアナログハイビジョンの放送方式で，デジタル圧縮を行った映像信号を放送衛星のトランスポンダ 1 波の伝送帯域でアナログ伝送させる放送方式.
- NCM: Natural Color Matrix, 三菱電機が開発したカラーマネージメント回路の呼称.
- NTSC: National Television System Committee，全米テレビジョン放送方式標準化委員会の略称．また，同委員会が 1953 年に制定した放送方式の名称.
- OCB: Optically Compensated Bend, 分子が弓形に配向しているのが特徴の液晶．高速応答性を有する.
- OLED: Organic Electro-Luminescence Diode/Organic Electro-Luminescence Display, 発光材料に有機化合物を用いた発光ダイオード，またその発光原理を応用してつくられた電子ディスプレイ.
- PC: Personal Computer，主に個人向けに開発・販売されている汎用的なコンピュータ．パソコン.
- PDP: Plasma Display Panel，薄型ディスプレイ装置の一つで，ガラスの板の間に封入した高圧の希ガス (Ne, Xe) に高い電圧を印加すると発生するプラズマ放電を利用して蛍光体を励起させる方式の画像表示装置.
- PTV: Rear-Projection TV, 背面投写型のテレビジョン.
- RTL: Register Transfer Level, 論理回路をハードウェア記述言語で記述する際の手法.
- SD: Standard Definition，テレビなどの画質，解像度の水準を示す用語の一つ．旧来の NTSC 放送相当のもの.
- SRAM: Static Random Access Memory，データを一時的に保持するための揮発性メモリの一種.
- TCON: Timing Controller, 液晶モジュールの動作に必要となるタイミング信号を生成し供給する基板.
- TFT: Thin Film Transistor, 薄膜トランジスタ.
- TV: Television，主に放送信号を受信して表示させる汎用画像表示装置の一つ．テレビ.

- UHDTV: Ultra High Definition TV，国際電気通信連合 (ITU) が勧告する放送規格の一つで，HD を超える 4K や 8K といった高解像度テレビ放送の規格.
- UHP: Ultra High Performance Lamp, 高圧水銀ランプ.
- VESA: Video Electronics Standards Association, 映像周辺機器に関する標準化団体の一つ.
- VHDL: Very-High-Speed-Integrated-Circuit Hardware Description Language，ハードウェア記述言語の一つ．1980 年代に米国国防総省主導で開発された.
- WPE: Wall-Plug Efficiency, 電気光変換効率．電気入力に対する光出力の割合.
- xvYCC: Extended Video YCC, 2006 年に標準化された動画向けの拡張色空間の 1 つ．正式名称は IEC61966-2-4.
- YAG: Yittrium-Aluminium-Garnate，イットリウムとアルミニウムの複合酸化物からなるガーネット構造の結晶．白色 LED の蛍光体などに用いられる.