

超高精細映像コンテンツ制作の高度化に関する研究

愛媛大学大学院理工学研究科

山下 誉行

2018年3月

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成と概要	1
第 2 章 スーパーハイビジョン映像パラメータの検討	3
2.1 はじめに	3
2.2 SHV 映像パラメータ	4
2.3 空間解像度	4
2.4 時間分解能	7
2.5 階調再現	9
2.6 カラリメトリ (測色)	11
2.7 まとめ	12
参考文献	13
第 3 章 830 万画素 4 板式による 8K (走査線 4,000 本級) カメラシステムの検討	14
3.1 はじめに	14
3.2 4,000 本級映像システム	14
3.3 4 板撮像一表示方式による高画質化要素の検討	18
3.4 試作カメラの諸特性	24
3.5 まとめ	25
参考文献	28
第 4 章 3,300 万画素 3 板式によるフル解像度 8K カメラシステムの検討	29
4.1. はじめに	29
4.2. カメラの要求条件と課題	29
4.3. カメラ設計	30
4.4 カメラの撮像実験	36
4.5 まとめ	41
参考文献	42

第 5 章	4 板式による HDR 映像撮影システムの検討	43
5.1	はじめに	43
5.2	4 板式による HDR 映像撮影システムの概要	44
5.3	シミュレーション	49
5.4	まとめ	55
	参考文献	56
第 6 章	結論	57
	謝辞	59
	研究業績	60

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

信号伝送分野におけるデジタル化の恩恵により、圧縮技術の活用や伝送速度の高速化が進み、これまで以上に高度な情報提示サービスが可能となっている。また映像システムの中心となる撮像および表示分野においても、近年、小型化、低消費電力化、さらには高精細化など性能向上がめざましい。

このような状況を背景として、従来のハイビジョン解像度を超える超高精細映像による放送・通信サービスが実用化される時期を迎えようとしている。このサービスの一つとして、一般に「8Kスーパーハイビジョン」と呼ばれる放送サービスは、超高精細映像をベースに、色再現域の拡大や信号ダイナミックレンジの拡大、一秒あたりの表示フレーム数(フレームレート)の増大、さらには3次元音響の導入により、実世界に近い体験を視聴者に与えることを目的としている。

このサービスに適したコンテンツ制作を行うためには、十分な性能を有する制作機器の開発が重要である。超高精細映像の名称が示すように、これまでは改善結果が顕著に現れる、解像度を優先した研究開発が先行してきた。その一方で、闇雲に一方の性能を追求すれば、他の性能担保が困難になることがある。その例として、小型でかつ多画素の撮像素子では、画素サイズが極小となることから、入射光量が非常に小さくなることやレンズに対する要求条件が厳しくなること、また撮像素子のフレームレートをあげた場合、単位時間あたりの光量が少なくなるとSN比が劣化するため、感度向上も必要になることなどが挙げられる。実用に供する機器開発のためには、これらをバランス良く向上させていく必要があるが、その判断材料の一つとして実際の映像を受け取る側の映像に対する主観評価に依るところが大きい。

本論文では、超高精細映像コンテンツ制作の高度化のため、まず超高精細映像システムとしてのスーパーハイビジョンのシステムパラメータの最適値の導出について述べる。そのシステム実現のための8K撮像システムについて検討する。さらには撮像素子性能をシステムとして補う、4板式による高ダイナミックレンジ撮像システムを提案し、今後すべての映像パラメータを実現するフルスペック化に向けた道程を示す。

1.2 本論文の構成と概要

以下、本論文の構成について述べる。本論文は6章から構成される。

はじめに、第1章において、本研究の背景と目的を述べ、本研究の位置づけを示す。

第2章では、本論文の対象となる超高精細映像システムの一つである、スーパーハイビジョンシステムについて、その映像パラメータの検討を行った。対象としたパラメータは空間解像度(画素数)、時間解像度(フレームレート)、色再現域(表色系)、トーン(ビット階調)であ

る。これらについて、主観評価をもとづいた導出結果について述べる。

第3章では、4K映像用830万画素撮像素子を用いて、8K映像を取得するための撮像装置の試作結果について述べる。撮像装置の構成法として、撮像素子4枚を用いた4板方式を導入した。本方式ではプリズムによって、入射光を赤、青、緑に分光し、さらに緑についてはハーフミラーにて2分配する。それぞれを単色撮像素子で撮像する際に、緑用の2つの撮像素子のみ、斜め方向に配置をずらすことで、画像空間上のサンプリング位置が水平、垂直とも2倍となるため、8K相当の映像が取得可能になるものである。本章では4板映像の信号処理を行う際、帯域を増やすことなく処理を実行するための信号処理技術と、その際に課題となる輪郭補償処理について、新たな手法を提案し、実装した結果について述べる。

第4章では、新たに8K映像が直接撮影できる3300万画素撮像素子の開発と、その撮像素子を用いた3板式カメラの開発について述べる。さきに述べたように、撮像素子開発に当たっては最適な画素サイズと撮像素子サイズが重要であるため、この導出について検討した結果を述べる。またレンズの高解像度化を追求する際的设计難度を低減するため、倍率色収差の信号処理的な補正方法を提案する。その構成法と実装結果について述べる。

第5章では、超高精細映像パラメータのうち、高ダイナミックレンジ化に適した撮像システムを提案する。撮像素子単体のダイナミックレンジを向上させるためには、ノイズレベルの低減と飽和電荷量の向上の二つを同時に実現する必要があるが、両立のための難度は非常に高い。このため、システムとしてダイナミックレンジを向上するための方法として、第3章でも用いた4板方式により、特に高輝度域においてコントラスト感度が鈍ることを利用した撮像システムを提案する。4板のうち、3板は単色の撮像素子による通常の3板カメラと同様の構成、残り1板には単板でカラー映像が取得可能な単板カラー撮像素子を用いる。分光プリズムによってそれぞれへの入射光量を違え、3板からと単板からとの出力信号を合成すれば、高ダイナミックレンジ映像が取得可能である。本章では撮像装置の構成法と信号処理部のシミュレーション結果を示し、システムの有効性について述べる。

最後に第6章にて、本研究を総括し、得られた成果をまとめるとともに、今後の研究課題と展望について述べる。

第2章 スーパーハイビジョン映像パラメータの検討

2.1 はじめに

既存システムを超えた視聴体験を提供するプロジェクトの一環として、スーパーハイビジョン (SHV) システムの研究を進めてきた。映像システムは最終的に何らかの手段で制作し、視聴者に送り届ける必要がある。この目的を達成するために、映像と音響の主要なパラメータを特定し、撮影、收音から、データストレージ、圧縮、伝送、表示までの完全なエンドツーエンドソリューションの開発が必要である。

SHV において、ハイビジョン (HDTV) を超える品質、および HDTV との共通性、互換性、相互運用性を担保すること、さらに近い将来に技術的に実現可能であることであった。そこで、いくつかの主観評価実験を通じて、視聴者に対する影響について検討したうえで、空間分解能、時間分解能、階調再現および色表現といった映像パラメータの最適値を求めた。

2.2 SHV 映像パラメータ

SHV 映像パラメータ値について、表 2.1 に示す。これらのパラメータ値は国内外で標準化され、実際に運用が開始されている。ここに記載のないパラメータについては、システムの互換性を維持するため、現在の HDTV のシステムパラメータを継承している。

以降の節において SHV 映像パラメータに関する検討について述べる。

表 2.1 スーパーハイビジョンの映像パラメータ

Parameters	Values
Spatial sampling points	Horizontal: 7680 Vertical: 4320
Frame frequency	120 Hz
Opto-electric transfer function(SDR)	$E' = \begin{cases} 4.5E & 0 \leq E < \beta \\ \alpha E^{0.45} - (\alpha - 1) & \beta \leq E \leq 1 \end{cases}$ $\alpha = 1.0993, \beta = 0.0181$
Opto-electric transfer function(HDR)	$E' = \begin{cases} \sqrt{E}/2 & 0 \leq E < 1 \\ a \cdot \ln(E - b) + c & 1 \leq E \end{cases}$ $a = 0.17883277, b = 0.28466892, \\ c = 0.55991073$
Bit depth	12 bit
Color primaries (CIE 1931)	R 0.708 0.292 G 0.170 0.797 B 0.131 0.046
Reference white (CIE 1931)	D65 0.3127 0.3290

2.3 空間解像度

SHVは“あたかもその場にいるような感覚”を強調するような設計がされている。これには、視角 (Field of View, FOV) および FOV 1 度あたりのピクセル数で表される角解像度によって決定される、より高い空間解像度が必要である。“あたかもその場にいるような感覚”にはさまざまな主観的要因が関与する可能性があるが、その中に臨場感と実物感は、SHV を既存のシステムと区別するための要素として同定されている。

2.3.1 臨場感

我々は、60° のカメラ画角で撮影された 4 つの画像を、5 つの異なる水平方向の FOV にて参加者に提示して主観評価を行った。各参加者は、0 (全くなし) から 10 (非常に臨場感がある) までの連続的なスケールで画像から受ける臨場感の程度を評価した。実験は合計 200 人の参加者を 40 人ずつ 5 つのグループに分けて行った。各グループは、FOV 角度の 1 つについて評価を行った。

図 2.1 に示されるように、より広い FOV がより強い感覚をもたらすことを確認している[1]。図から、臨場感は FOV と共に増加するが、約 80° ~100° の FOV で飽和することがわかる。カメラの角度が 100° で得られた画像を用いて同じ研究で行われた別の類似の実験は、同様の結果を示されている。

そこで、SHV の目標 FOV は約 80~100° に設定した。これは、正常な視力を有する人がピクセル構造を識別できない距離で換算すれば、画像の高さの 0.75~1 倍の視距離に相当する。

2.3.2 実物感

実際の物体と共に提示された 6 つの異なる角度分解能の画像による一対比較法を用いて実験を行った。参加者は、より実物に近いと認識したイメージを選択することとした。実験設定は、結果に対する解像度以外の要因 (例えば、両眼視差、画像サイズ、パースペクティブ、輝度、および色) の影響が最小限になるようにした。

結果は図 2.2 のように、空間解像度が実物感または視覚的忠実度の要因となることを示した [2]。つまり、観視者が実際の物体とイメージを区別できるかどうかの判断は、角解像度が高いほど、実物感が大きくなる。その感覚は約 60cpd 付近から緩やかに飽和する傾向を示している。

2.3.3 スーパーハイビジョンの空間サンプリングパラメータ

SHV の空間サンプリング点、つまり画素数は 7,680×4,320 に設定されている。水平方向と垂直方向の両方でそれぞれ HDTV の 4 倍である。臨場感と FOV の範囲や視聴の現実感の観点から、2K システム (HDTV)、4K システム、8K システム (SHV) の 3 つの異なる空間解像度を持つビデオシステムを比較した。図 2.3 に示されているように、距離が離れていることがわかる。前述したとおり、臨場感は FOV の影響を受けている。しかし、FOV だけでなく解像度によっても影響を受ける実物感は、広い FOV の低解像度システムでは低くなることになる。

実物感は 3 つのビデオシステムによって異なる。図では、角解像度が異なる空間分解能の

FOV または視距離に変換されている (付録参照).

SHV は、幅広い FOV または視距離のために臨場感と実物感の両方に強い感覚を与えることができる。SHV のこの特徴は、さまざまな視聴環境および大型、中型、および小型ディスプレイにおいて効果的に使用されることが期待される。これは、限定された観視条件下でのみ有効な 4K および 2K システムとは対照的である。

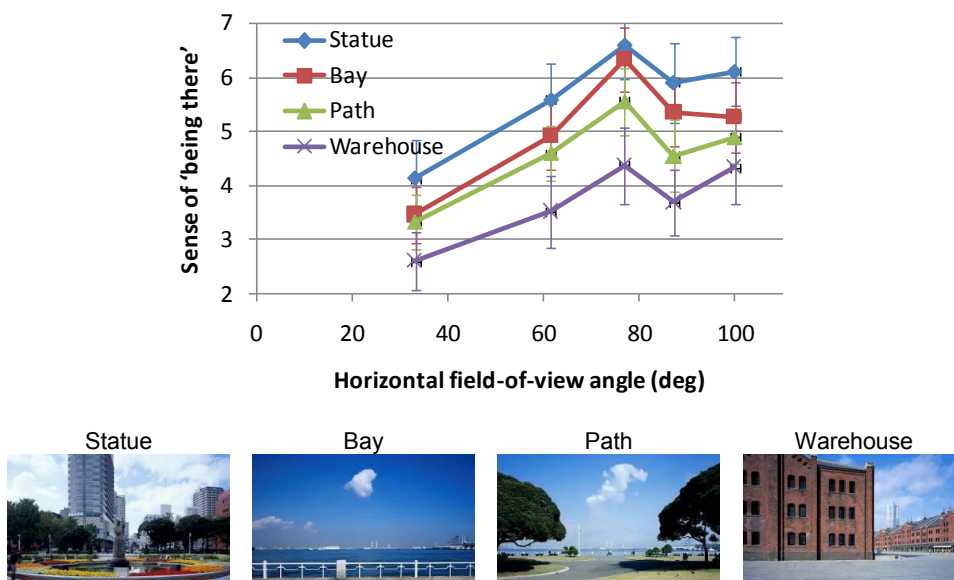


図 2.1 水平視角と臨場感との関係

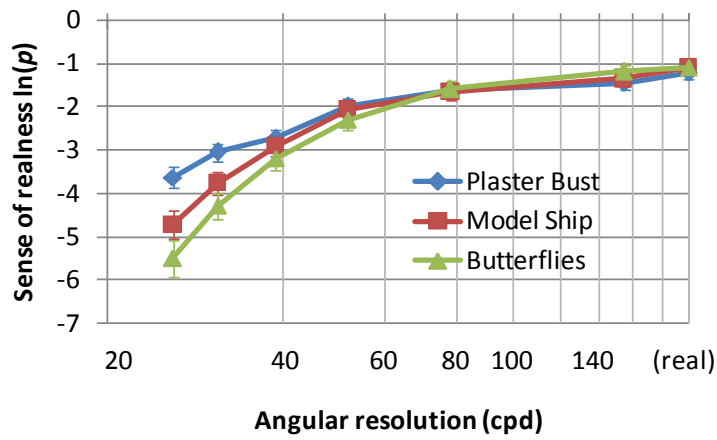


図 2.2 角解像度と実物感

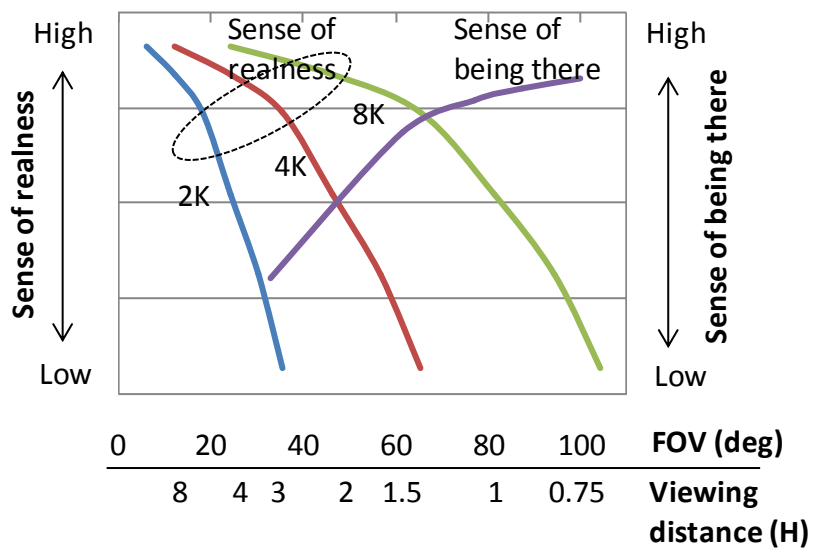


図 2.3 実物感と臨場感の観点での各映像システム比較

2.4 時間分解能

動画の動きの特性は、モーションブラー、ストロボ効果、およびフリッカーの認識によって特徴付けられる。これらの要因は、時間アパーチャおよびフレーム周波数を含む時間的な映像パラメータの影響を受ける。動画内の動く物体の速度も動き描写に影響する。

2.4.1 モーションブラー

動きのぼやけは、カメラまたは走査および保持型ディスプレイにおける光の蓄積によって引き起こされ、これは眼の動き追従にも関連する。時間開口または積分時間は空間周波数応答（動的応答）を決定し、これは高い運動速度で減少する。動的応答を改善するために、カメラとディスプレイの両方で短時間のアパーチャにすることが必要である。

モーションブラーと時間アパーチャとの関係を理解するためにいくつかの実験が行われている。我々は、異なる時間アパーチャと被写体速度の組み合わせに対する静止画質および動画質を決定するための実験を行った[3]。図 2.4 に示すように、HDTV 番組での被写体速度分布の検討[4]から、被写体速度の上限を 30° /秒と仮定すると、時間アパーチャは $1/200$ から $1/300$ 秒の範囲内にある必要がある。

2.4.2 ストロボ効果

時間開口は、フレーム周波数を増加させることによって短くすることができる。あるいは、カメラのシャッターを使用するか、またはフレーム周波数を変えずに黒いフレームをディスプレイに挿入することによっても同じことが達成できる。しかしながら、これらの技術は、画質の劣化（ストロボ効果またはジャーキネスと呼ばれる）をもたらし、動きがスナップショットの一群のように見える可能性がある。

私たちは、 $1/240$ 秒の時間アパーチャに対して、異なるフレーム周波数に対するストロボ効果の存在下での主観評価を行った。図 2.5 に示すように、結果は、 100Hz を超えるフレーム周波数であれば、許容可能（評価値 3.5 以上）となることを示唆している。

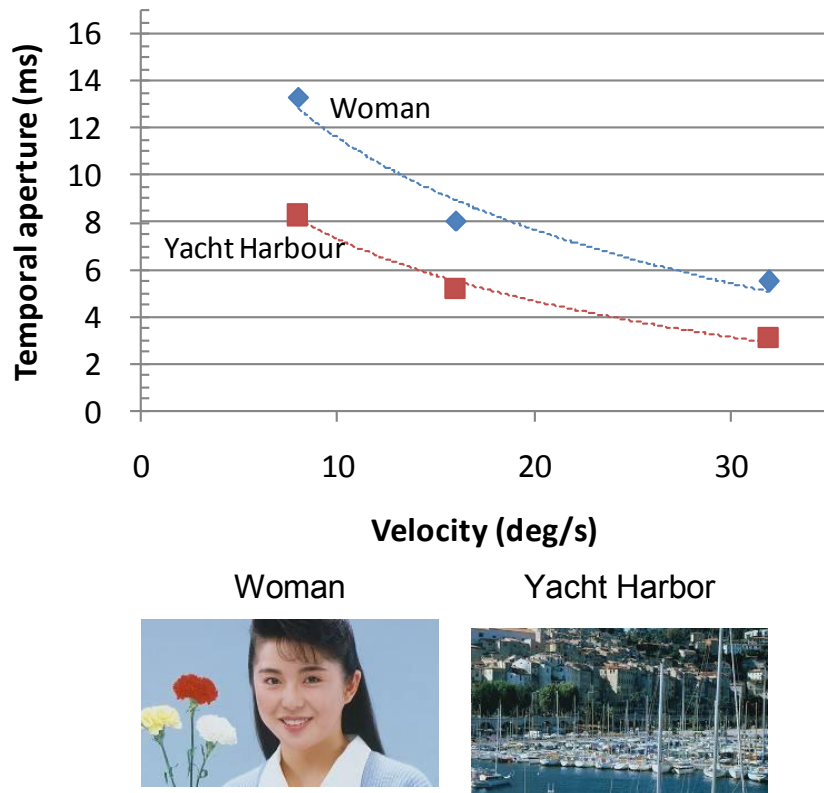


図 2.4 動きぼやけの許容限を与える被写体速度と時間開口の関係

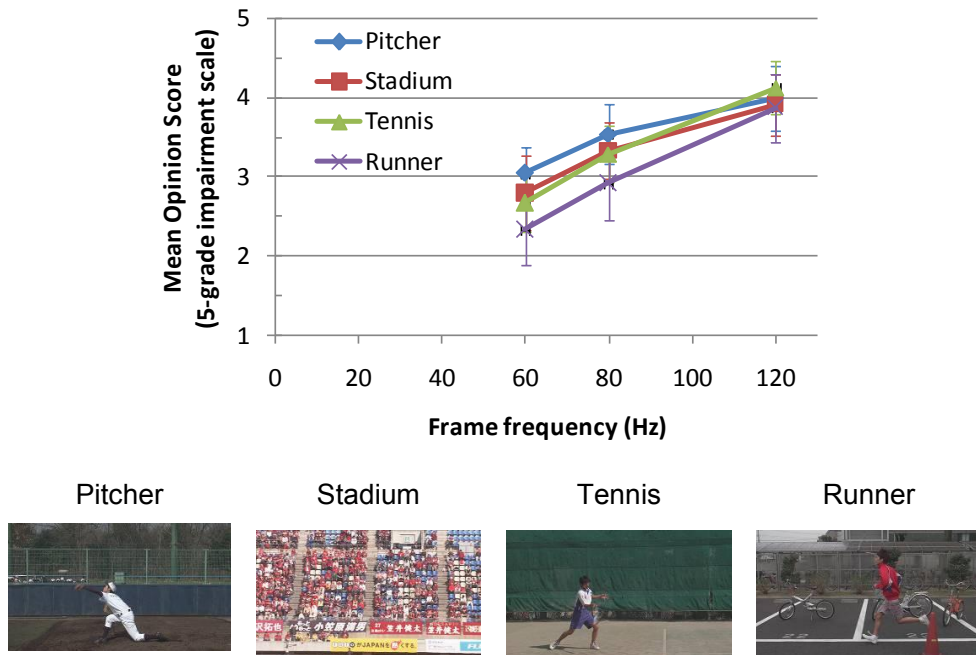


図 2.5 異なるフレーム周波数ごとのストロボ効果に関する画質評価

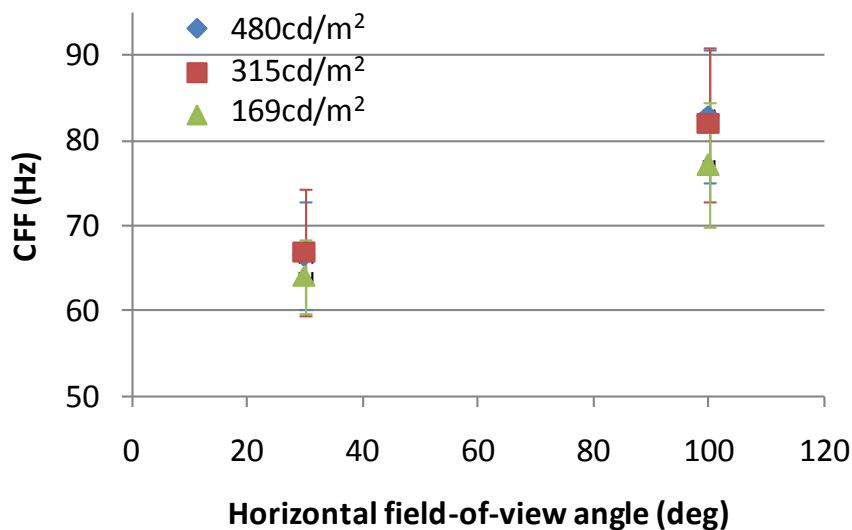


図 2.6 フリッカを知覚するフレーム周波数

2.4.4 フリッカー（ちらつき）

フリッカーは、動画の画質劣化の一つである。人間の目は周辺視でのちらつきに対してより敏感であるので、大画面による広い FOV はちらつきの知覚を増加させる。ホールド型ディスプレイの短いホールド時間も、フリッカーの知覚を増加させる可能性がある。図 2.6 に、時間アパーチャ 30%にて、2つの異なる FOV (30° と 100°) に対する臨界融合周波数 (CFF : Critical Fusion Frequency) の実験結果を示す。このグラフは、SHV のような広い FOV システムには 80Hz を超えるフレーム周波数が必要であることを示している。

2.4.5 スーパーハイビジョンの時間サンプリングパラメータ

上記の結果をまとめると、SHV の動画質改善のためには、SHV のフレーム周波数が少なくとも 100Hz でなければならないことを示唆している。当然ながら、フレーム周波数が高くなるほど品質は向上するが、その程度は飽和する傾向にある。

2.5 階調再現

2.5.1 標準ダイナミックレンジでの検討

輪郭のアーティファクトとして通常発生する階調再現の不連続性は避けるべきである。これは、量子化特性、特にビット深度を、隣接する画像領域間の 1LSB の差が検知できないように設定すべきであることを意味する。図 2.7 に示すように、薄明環境 (ディスプレイの白輝度の 10%~30%の輝度環境) でコントラスト感度と、10 ビット、11 ビット、12 ビットの深度の冪関数の表示伝達特性の関係を算出した。コントラスト感度は Barten の式[7]に基づいている。これはデジタルシネマの配給マスター映像のビット深度を決定するために使用されている[8]。11 ビットおよび 12 ビットであれば、輝度範囲全体に於いて弁別限より低く、輪郭線の不連続

が検知をされないことを示している。

2.5.2 高ダイナミックレンジ (HDR) での検討

図 2.8 に HDR の OETF 特性を示す。上述より、標準ダイナミックレンジで想定される輝度領域では量子化は 11 ビット以上であれば問題ないことがわかる。HDR の場合、さらに高い輝度域での弁別限について考える必要がある。同図から、輝度が高くなるほど量子化ビット数は少なくとも良いという傾向がある。このため、11 ビット相当が従来表現に相当する標準ダイナミックレンジ域に割り当たるような伝達関数とすることで、同様に輪郭線の不連続性が検知されないことになる。

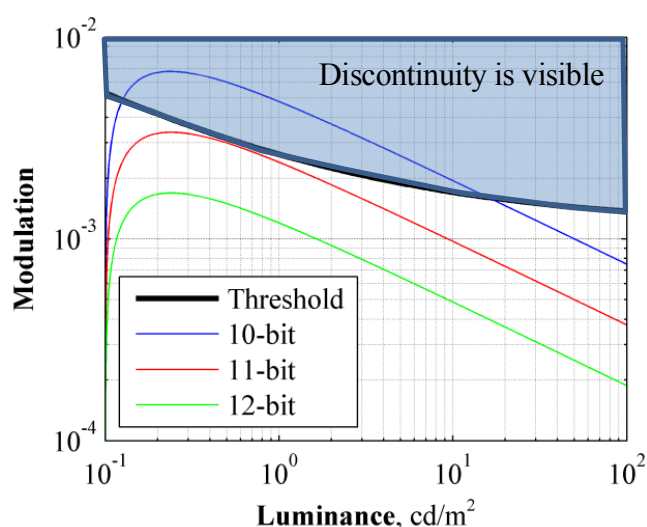


図 2.7 量子化ビット階調と表示伝達関数の関係

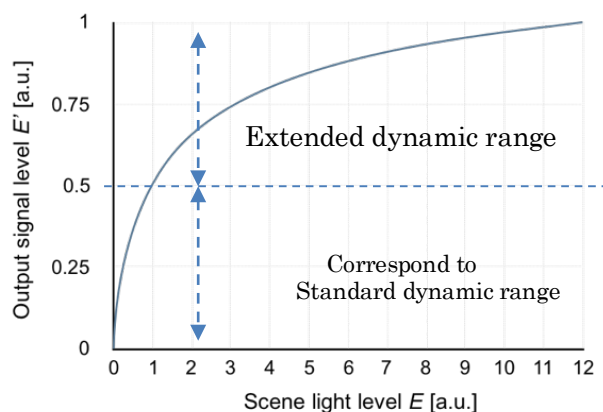


図 2.8 HDR(Hybrid Log-Gamma) OETF 特性

2.6 カラリメトリ（測色）

実空間における物体には、HDTVの色域を超えた色を持つものがある。一方で、市販レベルのフラットパネルディスプレイでも、より広範囲の色を再現することができるようになってきている。実際、一部の放送以外の映像システムでは既に広い色域を扱っているものが存在する。そこで、SHVが対象とすべき色域と表現方法およびテレビジョン用としての要求条件を検討し、広色域表色系を設計した。

HDTVの色域のほか、デジタルシネマなど主要な映像システムの色域も包含し、実在する物体色をできるだけ包含することをSHVの色域の要求条件とした。さらに、テレビジョン用としてコストパフォーマンスに優れ、基準ディスプレイとシステム表色系の原色を共通にすることを考慮して、スペクトル軌跡上のレーザー等の単波長光源に相当する色度点がRGB三原色となる広色域表色系を設計した[9]。図2.9に、ポインターカラーと共に、SHV, HDTV, デジタルシネマ基準プロジェクター, Adobe RGBの三原色をCIE xy色度図(CIE 1931)に示す。表2.2に示すように、SHVの表色系によるポインターカラーの包含率は99.9%である。

広色域画像の撮影及び表示に関する実験により、カラリメトリの妥当性を確認した。オブジェクトのテクスチャと、実際のオブジェクトのものに近い、高度に飽和したカラーがよく再現される[10]。

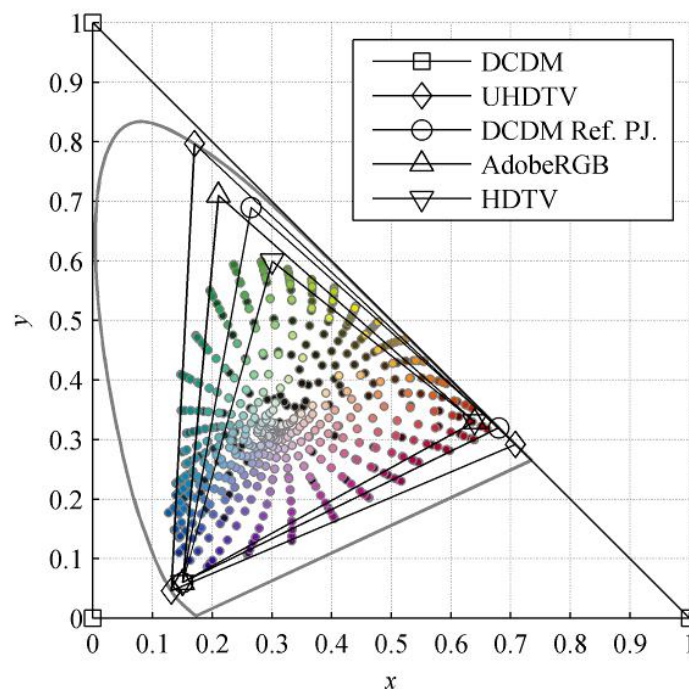


図 2.9 ポインターカラーと各映像システムの原色点

表 2.2 各映像システムのポインターカラー包含率

	Pointer's gamut	Optimal colour
HDTV	74.4%	35.9%
Adobe RGB	90.3%	52.1%
D-Cinema	91.4%	53.6%
Super Hi-Vision	99.9%	75.8%

2.7 まとめ

SHV の映像パラメータのデザイン手法について検討し、実際のパラメータを提示した。さまざまな環境の視聴者に、従来よりも優れた視聴体験を提供する目的で設定されたこれらのパラメータのうち、いくつかは臨場感と実物感に寄与し、他のものは動きの描写および色調再現におけるアーティファクトを排除するために設定され、高画質化に寄与する。また、実現可能性もパラメータ値を決定する重要な要素である。

〈付録〉

視距離 D (H) と FOV θ (deg.) は,

$$D = 1 / V \tan\left(\frac{1}{2}R\right)$$

$$\theta = 2 \tan^{-1}\left(\frac{8}{9}D\right)$$

ここで V は垂直ピクセルの数であり、 R (cpd) はアスペクト比が 16 : 9 の画面中央の角度分解能である。

参考文献

- [1] K. Masaoka, M. Emoto, M. Sugawara, and Y. Nojiri: “Contrast effect in evaluating the sense of presence for wide displays,” *Journal of the SID*. 14. pp. 785-791 (2006)
- [2] 正岡, 西田, 菅原, 中須: “実物との比較による高解像度画像の実物感,” 映像情報メディア学会技術報告. HI2011-62. pp. 133-135(2010)
- [3] 大村, 菅原, 野尻: “静止画との比較による動画蓄積ぼやけの評価,” 2008年電子情報通信学会全国大会, DS-3-3, pp. S-5-6 (2008)
- [4] T. Fujine, Y. Kikuchi, M. Sugino and Y. Yoshida: “Real-Life In-Home Viewing Conditions for Flat Panel Displays and Statistical Characteristics of Broadcast Video Signal”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 46-3B, pp.1358-1362(2007)
- [5] 大村, 菅原, 野尻: “撮像のフレーム周波数・開口率をパラメーターとしたジャーキネスの主観評価,” 映情学技報, HI2009-3, pp.7-11 (2009)
- [6] 江本, 菅原, 日下部, 大村: “高フレームレート撮像テレビジョンシステムの動画質改善効果,” 映像情報メディア学会誌, Vol.65, No.8, pp.1208-1214(2009)
- [7] P. G. J. Barten: “Contrast sensitivity of the human eye and its effects on Image quality,” SPIE Optical Engineering Press, Washington, USA(1999)
- [8] M. Cowan, G. Kennel, T. Maier, and B. Walker: “Contrast sensitivity experiment to determine the bit depth for digital cinema,” *SMPTE Motion Imaging Journal*. 113, pp. 281-292(2004)
- [9] K. Masaoka, Y. Nishida, M. Sugawara, and E. Nakasu: “Design of primaries for a wide-gamut television colorimetry,” *IEEE Transactions on Broadcasting*. 56, pp. 452-457(2010)
- [10] 正岡, 大村, 西田, 野尻, 中須, 香川, 長瀬, 久野, 杉浦: “スーパーハイビジョン広色域表色系画像の表示実験”, 映像情報メディア学会年次大会, 6-2-1-6-2-2(2010)

第3章 830万画素4板式による8K(走査線4,000本級)カメラシステムの検討

3.1 はじめに

第2章において述べた以外にも、大画面・広画角、精細度が、映像による臨場感を高める上で有効な手段であることは報告されている[1]。これら報告に基づき、8Kスーパーハイビジョンシステムの開発を進める目的で、超高精細・大画面映像を組合せたシステムの研究を進めた[2]。まず映像システムの基礎となる8K解像度(以下文中では走査線4000本級と称す)を実現するためのカメラ開発が必要である。そこで高解像度化を実現するために従来から検討されてきた4板画素ずらし方式による撮像-表示(以下、4板式撮像-表示法と呼ぶ)により8K相当のカラー映像システムを構築した。

ここでは、本システムの特徴である4板式撮像-表示法において、高画質化に影響を及ぼす撮像素子の貼り合せ精度の測定法および輪郭補償法について新たな手法の提案と実験を行い、それぞれの有効性について示す。最後に、解像度特性などの諸特性を提示し、初号機として開発された4000本級動画カメラの性能を明らかにする。

3.2 4,000本級映像システム

3.2.1 4板式撮像-表示法

約3,300万画素(水平7680画素×垂直4320ライン)、60フレーム/秒の動画像が撮影・表示できる撮像素子および表示素子の開発は困難であったため、過去に4K(走査線2000本級)カメラシステム[3]にて開発した830万画素CCD(Charge Coupled Device)[3][4]を用いて4板画素ずらし方式によって4,000本級映像を取得できるカメラシステムを実現した。表示についても、830万画素LCD(Liquid Crystal Display)を用いた4板画素ずらし方式により、4000本級映像の表示を可能にした[5]。4板撮像-表示法における画素の空間サンプリング位置を図3.1に示す。撮像系、表示系のそれぞれにおいて、Gチャンネルに2枚、R・Bチャンネルに1枚ずつの素子を用いる。光学像に対して、2つのGチャンネル素子を1/2画素分斜め方向に互いにずらして配置することにより、システムの持つ水平・垂直方向のナイキスト周波数を素子の持つナイキスト周波数の2倍に向上させる。Gチャンネルは画像の輝度成分への貢献がもっとも大きいいため、少ない画素数でシステムの輝度信号帯域を効果的に拡大することができる[6]。

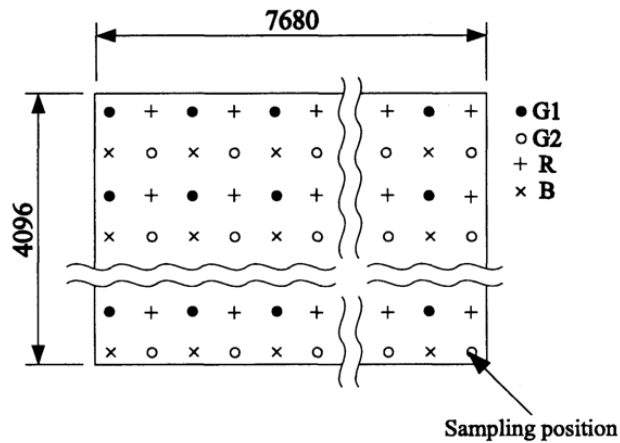


図 3.1 4 板撮像-表示法における空間サンプリング配置

3.2.2 試作システム構成

試作した 4000 本級映像システムのブロック図を図 3.2 に示す。本試作システムは撮像部、記録再生部、表示部の三つのブロックから構成されている。このうち撮像部の構成について詳しく述べる。図 3.3 に撮像部の構成を示す。以下カメラヘッド部と CCU 部に分けて説明する。

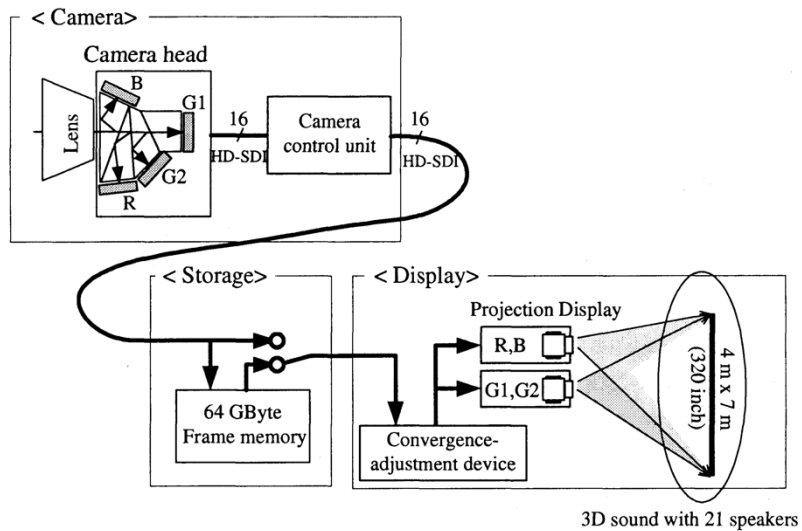


図 3.2 4000 本級映像システムのブロック

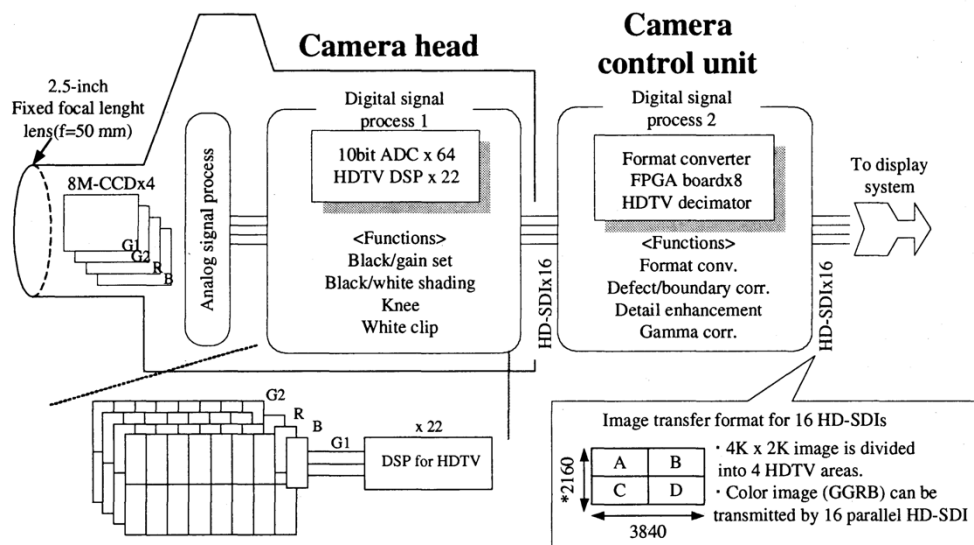


図 3.3 カメラシステムブロック図

3.2.3 カメラヘッド部

カメラヘッド部の外観を図 3.3 に示す。2.5 インチ単焦点レンズ、および 4 板式色分解プリズムにより、G1, G2, R, B に分解された光学像をそれぞれ 830 万画素 CCD で撮影する。CCD は 1 出力端子構造の場合、クロック周波数が 594MHz となり、駆動することが困難になる。これを解決するため、垂直 2 ブロック×水平 8 ブロックの計 16 ブロックに分割後、各領域ごとに出力端子を設けることで帯域を抑えた。また、ハイビジョンの信号処理デバイスを利用できるよう、クロック周波数をハイビジョンの基本クロック(74.25MHz)の 1/2 である 37.125MHz とした。

これら 4 枚の CCD の空間的位置関係は図 2 に示すように配置した。4 枚の CCD の画素配列が光学像に対して、原色ベイヤー配列と等価となるように CCD をプリズムに固着し、水平、垂直方向の信号帯域を拡大した。アナログ信号処理回路では、DC クランプ処理およびゲインを補正する。この後 AD 変換され、デジタル信号処理回路にて、再び高精度の黒レベル設定、ゲイン補正を行う。さらに、ハイビジョンカメラ用に開発された DSP を 22 個使い、各出力信号に高精度の黒および白レベルのシェーディング補正を施すことにより、CCD から分割並列出力される映像信号の特性差を抑圧し、領域間のつながりが滑らかになるよう工夫した。これらは、ハードウェア規模を抑制するため、各色チャネルごとに処理される。それぞれの単チャネル映像信号は最終的に四つのハイビジョンサイズ(水平 1920 画素×垂直 1080 ライン)の信号に分割され、4 本の HD-SDI を用いて出力される。したがって、全映像データは計 16 本(4 領域×4ch(G1,G2,R,B))の HD-SDI にてカメラヘッドから CCU 部に送られる。



図 3.4 カメラヘッド部 外観

3.2.4 CCU 部

CCU 部の機能は、フォーマット変換，映像補正，縮小画像出力に大別できる。カメラヘッド部から出力された信号は，分割前の CCD 上での位置によって走査方向が異なっている。このため，フォーマット変換部において走査方向を統一し，後段の装置での信号処理を容易にする。またこの部にて，それぞれ領域境界に隣接する画像の一部を付加し，フィルタリングの際，境界部の正確なフィルタ値を算出できるようにした。

映像補正部の構成について図 3.5 に示す。映像補正部では CCD の画素欠陥や分割領域のつなぎ目補正を行った後，第 3.3.2 節で述べる輪郭補償およびガンマ補正を行い，後段の表示部や縮小画像出力部に出力する。

縮小画像出力部ではビューファインダへの送り返し映像や画質調整のために用いるハイビジョンサイズの縮小画像生成を行う。画像生成は走査線 2,000 本相当の画像に水平垂直とも 5 タップの間引きフィルタを施し，垂直フィルタの中心となるラインを，奇数フレームと偶数フレームでずらすことにより，順次-飛越走査変換処理を行っている。

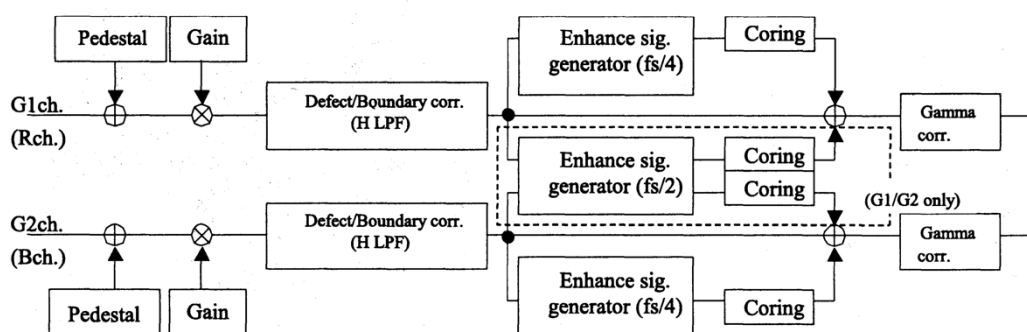


図 3.5 映像補正部の構成

3.3 4板撮像—表示方式による高画質化要素の検討

3.3.1 撮像素子の貼り合わせ精度

(1)測定手法の検討

4板式撮像法において高解像度化を達成するためには、二つのGチャンネル用CCDの相対位置が重要となる。ここでは、それぞれのCCDの出力映像信号から相対的な位置関係を検出する方法を提案する。

図3.6のように、任意の光学像に対し、二つのCCD(画素間隔は T 画素、画素数を $2N+1$ と仮定)が1次元的に距離 d (ただし $0 \leq d < T$)だけシフトしているとき、これらのCCDからの出力信号 $g_1(x)$ 、 $g_2(x)$ は、インパルス関数を $\delta(x)$ とおけば下記のように表現できる。

$$g_1(x) = g(x) \cdot \sum_{n=-N}^N \delta(x - nT) \quad (1)$$

$$g_2(x) = g(x + d) \cdot \sum_{n=-N}^N \delta(x - nT) \quad (2)$$

ここで周波数 f を持つ正弦波パターンの光学像を仮定すると、

$$g(x) = \cos(2\pi f x + \phi) \quad (3)$$

(ただし $0 < f \leq 1/(2T)$)

となる。 ϕ は $g(x)$ の位相項である。式(3)を式(1)、(2)に代入するとCCD出力信号はそれぞれ下記のように変形できる。

$$g_1(x) = \sum_{n=-N}^N \cos(\phi + 2\pi n f T) \quad (4)$$

$$g_2(x) = \sum_{n=-N}^N \cos(\phi + 2\pi n f T + 2\pi f d) \quad (5)$$

上記二つの式は、 ϕ を変数としてみた場合、 ϕ 軸方向に正弦波パターンとなって出力され、二つのCCDの相対的位置関係はこの正弦波の位相差で検出できることを示している。

また位相差は $2\pi f d$ であるから、検出感度は f に比例し、撮像素子のナイキスト周波数 $1/(2T)$ で最大となる。このとき $g_1(x)$ 、 $g_2(x)$ はそれぞれ、

$$g_1(x) = \sum_{n=-N}^N (-1)^n \cos(\phi) \quad (6)$$

$$g_2(x) = \sum_{n=-N}^N (-1)^n \cos\left(\phi + \frac{\pi d}{T}\right) \quad (7)$$

と表せる。

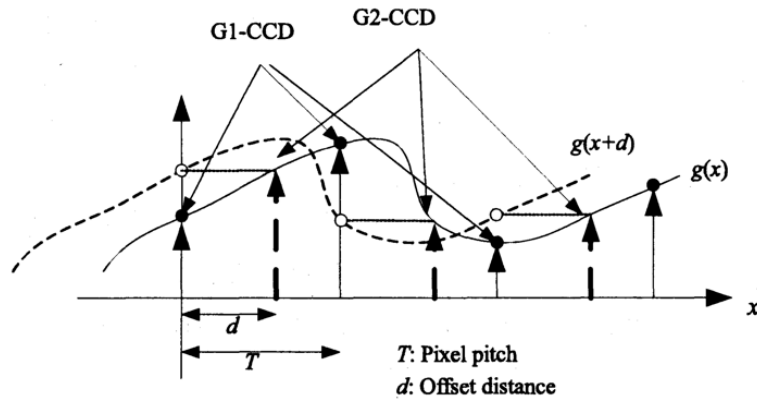


図 3.6 4 板式撮像法における 2 つの CCD からの出力信号モデル

(2) 試作カメラにおける貼り合わせ精度実測

実際に図 3.7 のように垂直方向に正弦波($f = 1/(2T)$), 水平方向にはこの正弦波の位相が変化するようなパターンを作成し, 上述の方法により, 試作カメラの二つの G-CCD の垂直方向の相対位置の検出を試みた. その結果を図 3.8(a)に示す.

波形のピーク値から実測したところ, 位相差は約 $(0.6 + m)\pi$ であった. 画素のシフト量 d は式(5)から,

$$\frac{\pi d}{T} = (0.6 + m)\pi \quad (8)$$

$0 \leq d < T$ より, $d = 0.6T$ と計算できる. つまり, d が画素ずらし方式でのシフト量の基準となる 0.5 画素を超えていることから, G2-CCD はより下方にシフトしていることがわかった.

同様に, 水平方向に正弦波, 垂直方向にこの正弦波の位相が変化するパターンを用い, 水平方向のシフト量を測定したのが図 9(b)である. 位相差は約 $(1/2 + m)\pi$ となり, 先程と同様に式(5)より, $d = 0.5T$ と算出される. 今回, $2\pi/9(40^\circ)$ ずつ位相が変化するパターンを用いたため, その測定値は画素ピッチの $\pm 10\%$ 程度の誤差を持つが, その精度以内で貼り合わせが実現できていることが確認できた.

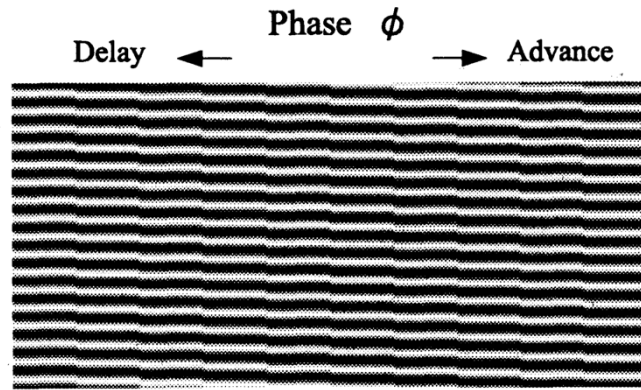


図 3.7 垂直方向の相対位置検出用パターン

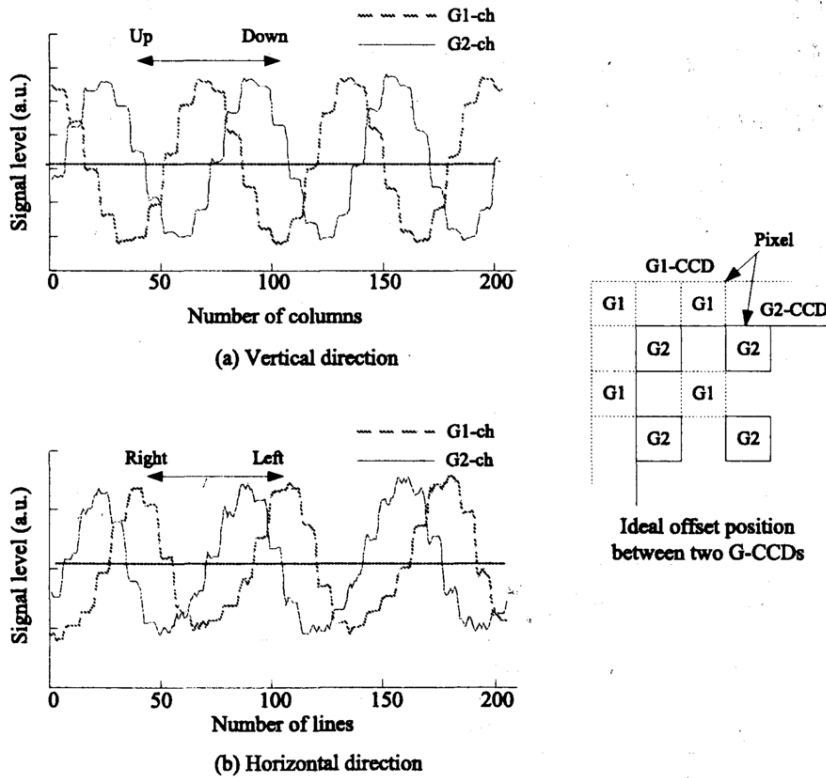


図 3.8 G チャンネル CCD のシフト量算出結果

3.3.2 輪郭補償法

(1)本システムにおける輪郭補償の考え方

映像信号処理は撮像、表示ともに4板方式を用いているため、ハードウェア規模の抑制を考慮し、各色チャンネル単位、走査線2,000本級であるサブサンプル画像のまま行っている。このため、輪郭補償に関して、撮像素子の解像度である2,000TV本までの帯域では、各色ともカラ

一バランスを保った"周波数補償"を行い、画素ずらしにより実現する 2,000~4,000TV 本帯域の輪郭信号は、G チャンネルでしか得られないため、画像の鮮鋭度をより高める"輪郭強調"と意味付けた。

このとき、2,000~4,000TV 本域の輪郭強調成分は G チャンネルにのみ付加され、サンプル点の少ない R, B には付加できないため、レベル方向の非線形処理の影響が着色となって表れるという問題が生じる。非線形処理として、ホワイトクリップ処理を例にその原理を図 3.9 に示す。

同図は G チャンネルにおける"輪郭強調"について図示したものである。輪郭強調を行ったとき、強調後のレベルがクリップレベルを下回っていれば(図 3.9(a))、正負の輪郭成分が同レベルとなるため、元信号の直流成分に変化はない(同図(b))と言える。しかし同図(c)のように輝度成分の変化が激しく、輪郭強調により高い信号レベルでクリップが生じた場合、輪郭成分の正負が同レベルとならず(同図(d))、元信号の直流成分が低下する。つまりマゼンタ調に見えることになる。逆に低い信号レベルでクリップがおきれば緑色に着色する。

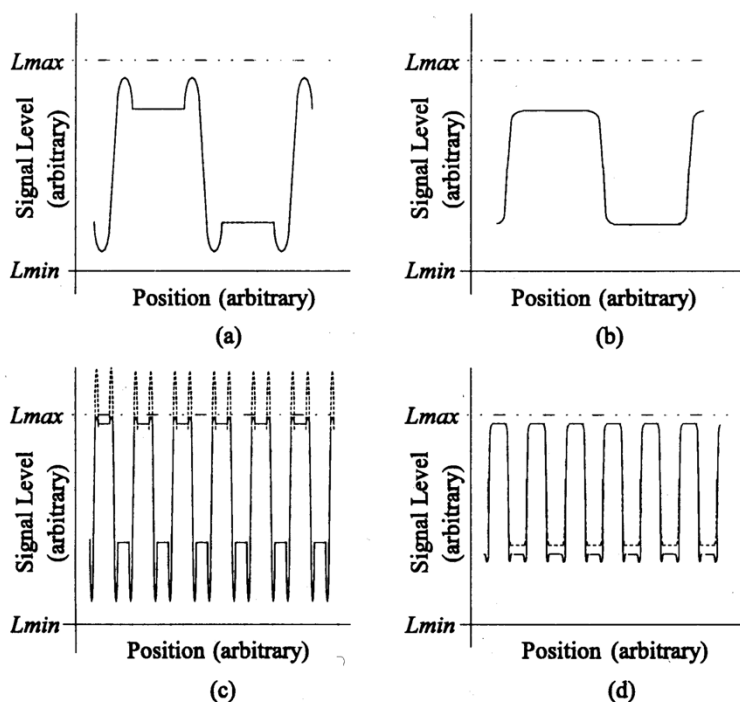


図 3.9 非線形処理による着色の例

(2) 仮想非線形回路を有する輪郭補償法

単チャンネルごとの信号処理における前述のような問題について、信号の入力レベルにより輪郭補償量を制御する方法などが考えられるが、非線形信号処理を含む場合、対応が困難である。そこで、輪郭信号をより最適に制御できるように、表示系も含めた全体システムの非線形処理の模擬系(以下、仮想非線形回路と称す)を含んだ輪郭強調法を考案した。図 3.10 にその構成を示

す。まず試行輪郭強調部により入力信号に非線形処理を模擬した処理を施す。その結果生じる歪みを検出し、その結果に従い、遅延回路を経た入力信号に施す実際の輪郭量の制御を行う。

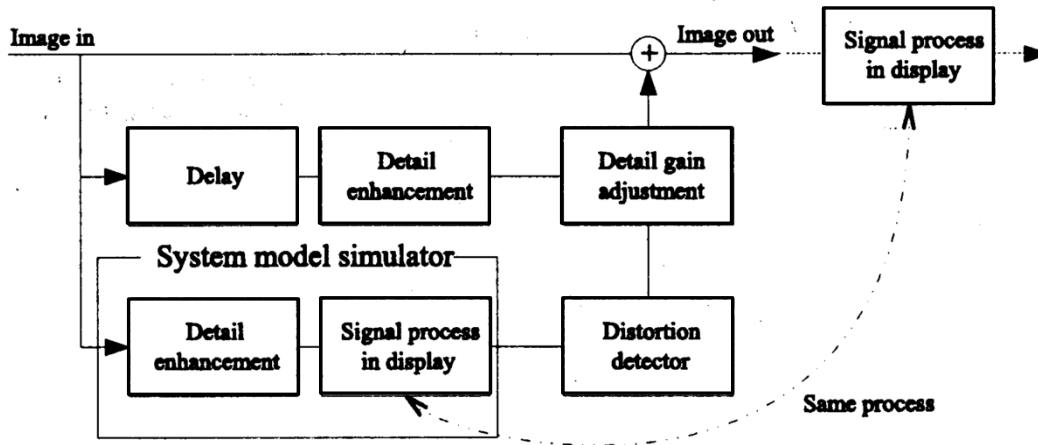


図 3.10 輪郭補償部の構成

複数のディスプレイに対応するためには、この機能はディスプレイ側に組み込むことが望ましい。しかし、今回はディスプレイが特定されることや、ディスプレイへのデジタル伝送前に所期のレベルにクリップ処理が施されることから、カメラ信号処理部に組み込むことが適当である。

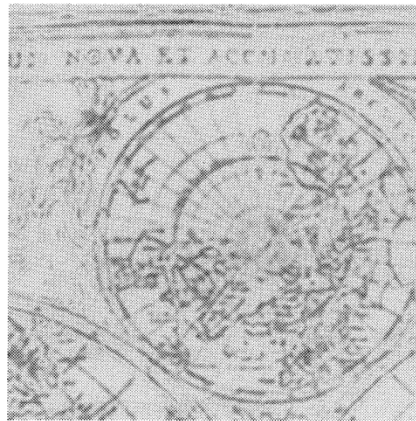
今回の試作機では、非線形処理として特に大きな影響を与えるホワイトおよびブラッククリップによる着色を避けることを目的とし、非線形模擬部にはこれらのクリップ回路を配した。歪み検出部および輪郭量の制御の具体的な中身に関しては付録にて説明した。提案手法の効果を検証すべく、提案手法をハードウェアにより実現し、実写による実験を行った。これを図 3.11 に示す。

同図(a)は入力画像である 4,000 本級画像の一部を表している。これに対し、2,000~4,000TV 本域輪郭を付加しクリップが生じている画像(以下、クリップ画像と称す)と今回の輪郭強調法による画像(以下、提案処理画像と称す)とを生成した。クリップ画像と提案処理画像において、低域での着色の有無を以下の手順で検出した。まず、これら三つの画像にローパスフィルタを施すことで、輪郭強調信号を平坦化した。その後、入力画像とそれぞれの処理後の画像との絶対差分を取った。この差分値が大きい場合、入力画像とは異なる着色が生じていることになる。

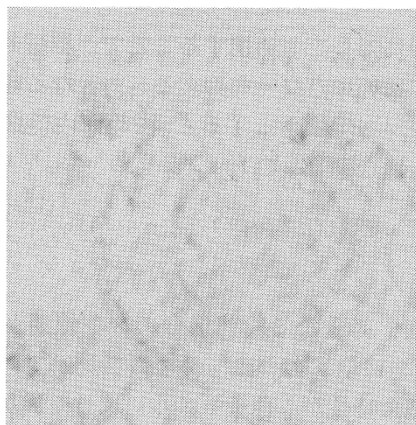
図 3.12(b)にクリップ画像と入力画像との差分、同図(c)に提案処理画像と入力画像との差分を示す。同図において、濃度が差分値を示している。同図(b)では、差分値が多数残っていることから、クリップ画像に着色が生じていることがわかる。同図(c)においてはこれが改善され、差分値は少なくなっている。よって提案処理により、ほぼ着色が見られなくなったことがわかる。



(a) 入力画像 (一部)



(b) クリップ画像と入力画像との比較 (絶対差分)



(c) 提案処理画像と入力画像との比較 (絶対差分)

図 3.11 提案手法による効果

3.4 試作カメラの諸特性

3.4.1 諸元および性能

今回試作したカメラの諸元および性能を表 3.2 に示す。感度は 2,000 lux, F2.8 に設定した。このときの G チャネルの S/N をハイビジョンサイズに分割した映像で評価すると約 50dB であった。本システムのような広視野映像では、視野の中心部分だけでなく、周辺部分にも映像が投影される。したがって、視野の中心部だけでなく周辺視野でのノイズの見え方についても、今後検討する必要がある。

表 3.2 カメラ諸元および性能

Items	Values
System	60 frames/sec., 4K-line progressive scanning
Optical format	2.5 inches
Lens	Fixed focal lens (f : 50mm)
Imaging method	4-chip imaging (Dual Green format)
Image sensor	8M-pixel CCD
S/N on HDTV format	Approx. 50dB
Sensitivity	2000 lux, F 2.8
Dynamic Range	200 %
Power consumption (Camera head)	600 W
Weight (Camera head)	76 kg (including lens)

3.4.2 解像度特性

最後に図 3.12 にカメラシステムの解像度特性を示す。本カメラに用いたレンズは、光学的な性能を追求するため、単焦点レンズ(焦点距離:50mm)とし、解像度の評価は G チャネルのみを対象とした。図中では光学系の設計値に基づいた解像度特性を点線で、CCD の開口特性を細実線で、また、これらの二つの特性を考慮したカメラの解像度特性(計算値)を実線で示す。レンズの設計値から判断すると F2.8~5.6 では 4,000TV 本でも十分な応答特性が得られると予想できる。また、CCD の開口率は 89% であり、その開口特性は 4,000TV 本付近で変調度がほぼ零となる。これらを総合すると 4 板式撮像法の理想的な画素ずらしが実現できれば、水平、垂直ともに約 4,000TV 本の限界解像度が期待できる。正弦波パターンを用いて試作カメラの解像度特性を実測した結果を同図に水平▲、垂直○で示す。G1-CCD, G2-CCD 間での画素ずらし効果により、単板での限界解像度 2048TV 本を越え、水平、垂直ともに 2,700TV 本で約 15% 程度の応答特性が得られた。しかし、高い周波数領域では理想特性に比べ、応答特性が低下している

ことが判明した. この点については, 先述した測定では計測できない, 光軸方向への G1-CCD, G2-CCD の貼り合せ位置ずれや, アナログ信号処理系での信号のクロストークなどが原因であると考えている. 貼り合わせ位置の精度と解像度劣化の関係については, 参考文献 7 において検討している.

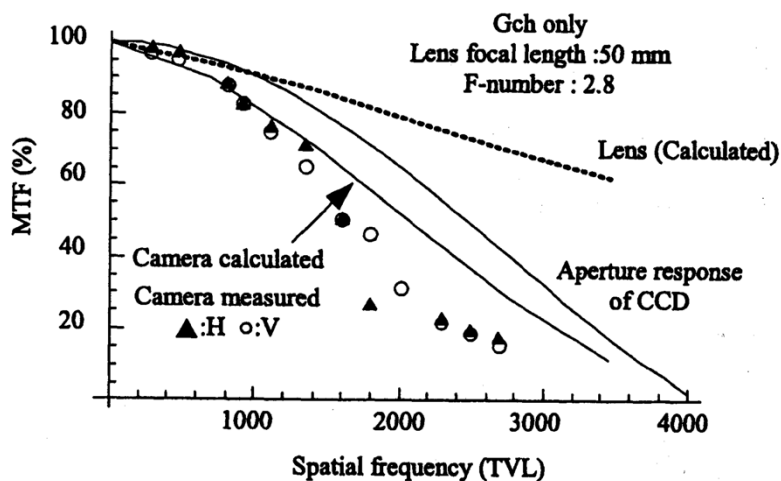


図 3.12 試作カメラシステムの解像度特性

3.5 まとめ

830 万画素 CCD 4 枚を用いた 4 板式撮像法による 4,000 本級カメラシステムについて検討した. 水平, 垂直の限界解像度として約 2,700TV 本以上を達成した. また, 映像信号処理について, 特徴的な輪郭補償部の構成について述べた. 非線形処理による着色という課題を解決する処理法を提案し, ホワイト・ブラッククリップ処理に対して, 実写画像を用いた実験によりその有効性を確認した.

この試作ののち, さらに小型のイメージセンサーを用いた 4 板式によるカメラ試作[7]を行い, 素子貼り合せ精度の向上法の検討[8]などを進め, 限界解像度は 3,200TV 本までを達成している.

〈付録〉

A.輪郭補償模擬部および制御部のアルゴリズム

原信号の映像レベル $g(n)$ ，輪郭信号を $h(n)$ ，輪郭信号の利得を $a(\geq 1)$ とすると輪郭強調後の映像信号 $y(n)$ は次式のように表される(付・図 1).

$$y(n) = a \cdot h(n) + g(n) \quad (\text{付} \cdot 1)$$

本文中で問題としたクリップによる着色を避けるため，輪郭の利得を制御する．この制御信号量 $c(n)$ とすると，式(付・1)は以下のように書き換えられる．

$$y'(n) = a \cdot c(n) \cdot h(n) + g(n) \quad (\text{付} \cdot 2)$$

制御信号 $c(n)$ は以下のようにして求める．まず， n 点において $y(n)$ がクリップしない補正信号量 $e(n)$ を算出する．

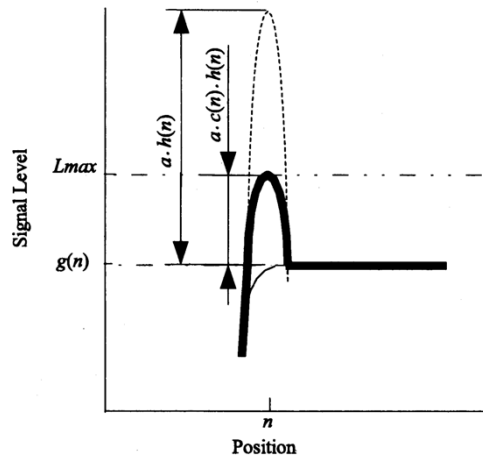
$$e(n) = \begin{cases} L_{max} - g(n)/(a \cdot h(n)) & \text{if } y(n) \leq L_{max} \\ L_{min} - g(n)/(a \cdot h(n)) & \text{if } y(n) \geq L_{min} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{付} \cdot 3)$$

この補正信号 $e(n)$ をクリップした輪郭信号の対となる輪郭信号に対しても適用することで，原信号のレベル変化なしに輪郭のパワーを抑える．対となる輪郭の存在範囲を $[-r, +r]$ (画素)とすると，同範囲内で最小となる $e(n)$ を $c(n)$ とすればよい．つまり，

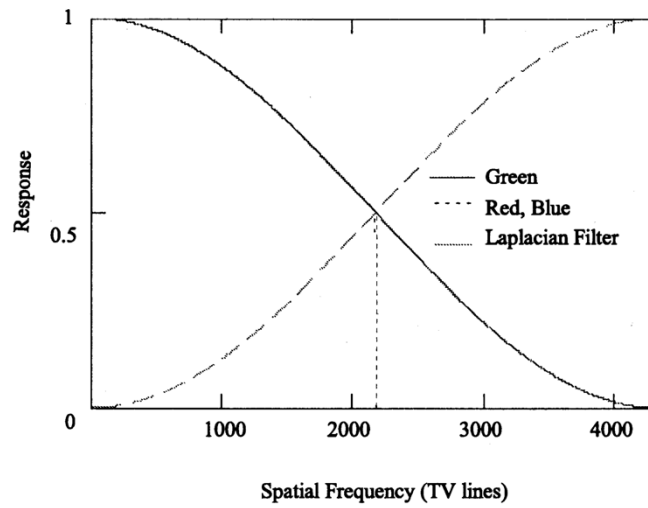
$$c(n) = \min \{e(n-r), e(n-r+1), \dots, e(n+r)\} \quad (\text{付} \cdot 4)$$

となる．

このとき，対となる輪郭信号の存在範囲が問題となる．付・図 2 に示すように，ディスプレイで再現できる信号の周波数特性が，色チャンネルによって異なることから着色現象を生じる．また，G チャンネルの輪郭抽出に用いた，3 タップのラプラシアンフィルタの特性は，同図に示すように R，B チャンネルの再現帯域を超えた帯域を強調する特性となっている．したがって，輪郭強調信号のうち，2000TV 本以上の高帯域の輪郭信号のみ上記の信号処理を行うことで，着色現象は大部分抑圧できると考え，対象とする範囲を注目画素の ± 2 画素とした．



付・図1 輪郭強調箇所モデル化



付・図2 4000本級ディスプレイの周波数特性

参考文献

- [1] 成田ほか: “超高精細・大画面映像の鑑賞に適した画面サイズと観視距離に関する考察”, 映像情報メディア学会誌, Vol.55, No.5, pp.773-780 (2002)
- [2] 菅原ほか: “走査線 4000 本級超高精細映像システム”, 映像情報メディア学会技報, Vol.26, No.73, pp.53-56 (2002)
- [3] K. Mitani et. al.: “Experimental Ultrahigh-Definition Color Camera System with Three 8M-pixelCCDs”, SMPTE Motion Imaging Journal., Vol.111, No.2 (2002)
- [4] C. Smith et. al.: “An 8M-CCD for an Ultra High Definition TV Camera”, IEEE Workshop on CCD and Advanced Image Sensors Nagano, Japan(1999)
- [5] K. Hamada et. al.: “A wide-screen projector of 4k x 8k pixels”, Proceedings of SID'02, 46.3 (2002)
- [6] 菅原ほか: “4 板撮像方式における画素ずらし効果についての検討”, テレビ誌, 49, 2, pp.212-218 (1995)
- [7] T. Yamashita and K. Mitani: “8K extremely-high-resolution camera systems,” Proceedings of the IEEE, Vol.101, No.1, pp.74-88(2013)
- [8] T. Yamashita, K. Mitani, H. Shimamoto, M. Shirakawa and F. Okano: “A new sensor alignment method for an 8k x 4k-pixel ultrahigh-definition camera with four imagers,” Proceedings of the Electronic Imaging 2004, Vol. 5301, pp. 76-86 (2004)

第4章 3,300万画素3板式によるフル解像度8Kカメラシステムの検討

4.1 はじめに

3章において、走査線4,000本級のカメラシステムについて、4板画素ずらし方式で撮像装置を試作した。4板画素ずらし方式は4枚の撮像素子の画素の合計で3,300万画素の画像を撮影する方式のため、限界解像度が3,200本程度に留まり、8Kシステムの本来の解像度(4,320TV本)には達していなかった。映像システムとしての評価と機器開発検討を進めるために、SHVシステム本来の解像度を有するフル解像度映像とそれを撮影する装置が必須となり、SHVフル解像度映像が撮影可能なカメラシステムを開発した。

本章では、カメラシステムの要件と、システムを実現するために解決しなければならない課題を提示する。次に、この課題を解決するために採用されたカメラ設計と構成について述べ、試作したカメラの撮像実験について述べたあと、実験結果に基づき今回の試作システムの有効性を示す。

4.2. カメラの要求条件と課題

SHVシステムの評価が可能なテスト映像素材を撮影するためのカメラを試作することを目的とし、その要求条件を

- a. カメラはR, G, Bの各色が3,300万画素の解像度を達成
- b. カメラは、従来の4板画素ずらし方式撮像システムと同じ感度と信号対雑音比(S/N)の維持すること
- c. カメラは、屋外撮影に必要な移動性と操作性を有する大きさであること

と設定した。

この要求条件a.を実現するためには、まず、撮像素子の試作が必要である。3,300万画素、60fps(frames per second)で動作する動画用撮像素子はこれまで存在せず、試作の歩留まりについても十分に配慮する必要がある。

多画素化に伴って画素サイズを小さくする必要があるが、それに見合った光学像を結像させるためのレンズに要求される解像度特性は厳しくなる。また、レンズ絞りでの回折に起因する変調度の低下も無視できなくなるので、画素サイズをある程度の大きさにする必要がある。また、解像度が劣化する要因として、倍率色収差の影響もある。多画素化によってこれまで以上に倍率色収差は顕著となるので、その抑圧を考慮する必要がある。

要求条件b.の感度・S/Nを高く維持するためには撮像素子の飽和電荷量を大きくし、ランダムノイズを十分に抑圧することが重要である。また、光学像を光電変換する撮像素子は微小なアナログ信号を取り扱うので、ノイズに対する耐性を考慮した信号出力形式とする必要がある。

要求条件 c.の屋外での撮影に必要な映像モニターや記録装置などを含む撮影システム全体を考えると、中継車と撮影先をケーブルで接続するスタイルが現実的である。機動性を確保するためにはカメラヘッドやレンズは小型である方が望ましい。また、ケーブルを通してカメラヘッドへの電源供給を実現するためには消費電力の抑制も重要である。更に、カメラと中継車間のインターフェースは従来の中継制作と同様の運用性と信頼性を確保することが求められる。ハイビジョン撮影現場で広く用いられるハイビジョン用光カメラケーブルを使って SHV 映像(データレート:72Gbps)が伝送できれば、運用面および経済面で効果的である。

4.3. カメラ設計

4.3.1 撮像素子

図 4.1 にカメラシステムのブロック図を示す。カメラの試作に関する課題を整理すると a.撮像素子の歩留まりの確保、画素サイズの決定、データ出力手段、b.カメラヘッドの小型化・省電力化、c.広帯域信号伝送インターフェース、d.色収差補正方式の 4 点である。

以下、同図に示すカメラシステムのブロック構成に従って構成要素について述べ、上記の課題を解決する手段を併せて示す。

撮像素子の設計仕様を表 4.1 に示す。撮像素子の歩留まりを確保するために、素子構造をランダムノイズの抑圧に有効な埋め込みフォトダイオード構造ではなく、試作実績のある CMOS プロセスによる 3 トランジスタ構造とした。そのため、画素サイズを検討する際には飽和電荷量を多くすることを優先する。カメラの S/N については 800 万画素級 CMOS 撮像素子[1]を用いた従来の 4 板式撮像方式(デュアルグリーン(DG)方式と称す)カメラの S/N 値 45dB[2]を設計目標とし、解像度についてはナイキスト周波数での変調度を 20%以上と設定したうえで、目標値を達成しうる画素サイズの検討を行った。飽和信号電荷量と画素サイズとの関係に関する近年の論文および研究発表の結果をまとめて図 4.2 に示す。同図から画素サイズが $4\mu\text{m}$ 角程度以上であれば飽和信号電荷量として 25,000 エレクトロン(e^-)以上が得られることがわかる。今回の試作素子と同じ 3 トランジスタ画素構造を採用した 830 万画素 CMOS 撮像素子の設計値から暗時ランダムノイズをほぼ同じ値の $24e^-$ と見込めば、ダイナミックレンジは 60dB 以上となり、目標の S/N 値を達成することができる。次に、ナイキスト周波数での変調度 20%を達成するための画素サイズを検討する。図 4.3 に受光領域を一定としたときの画素サイズとそのナイキスト周波数における変調度特性の計算値を示す。レンズは無収差理想レンズを想定している。同図から画素サイズが $3.8\mu\text{m}$ 角以上であれば、絞り値 F を 8 まで大きくした場合においてもナイキスト周波数において 20%以上の変調度を維持できることがわかる。すなわち、画素サイズが $3.8\mu\text{m}$ 角であれば、設計目標の画質の達成が可能である。この画素サイズから算出される受光面サイズは水平 29.8mm×垂直 16.4mm であり、35mm フィルムに準ずる大きさである。素子からのデータ出力手段については、ノイズに対する耐性や後段のデジタル信号

処理回路との整合性を考慮し、撮像素子からアナログ信号を外部には出力せず、素子内でデジタル信号に変換することとした。また、高データレート撮像を実現する方法として有効なマルチ出力端子を有する素子構造とすることで1本当たりの出力クロックを抑制した。並列出力数を16とし、1出力当たりのクロック周波数を250.56 MHzとした。更に、出力信号形式に差動タイプのLVDS(Low Voltage Differential Signaling)を使用し、高速デジタル信号のノイズに対する耐性を確保した。

試作した撮像素子の外観を図4.4に示す。

表 4.1 撮像素子 設計仕様

画素サイズ	3.8 μ m \times 3.8 μ m	
画素構造	CMOS 3 トランジスタ	
有効面サイズ	水平	29.8mm
	垂直	16.4mm
画素数	水平	有効 7680 (総数 7840)
	垂直	有効 4320 (総数 4360)
信号出力数	12-bit 幅 16 出力	
出力クロック周波数	250.56 MHz	
信号出力方式	LVDS	
走査方式	順次走査 (プログレッシブ)	

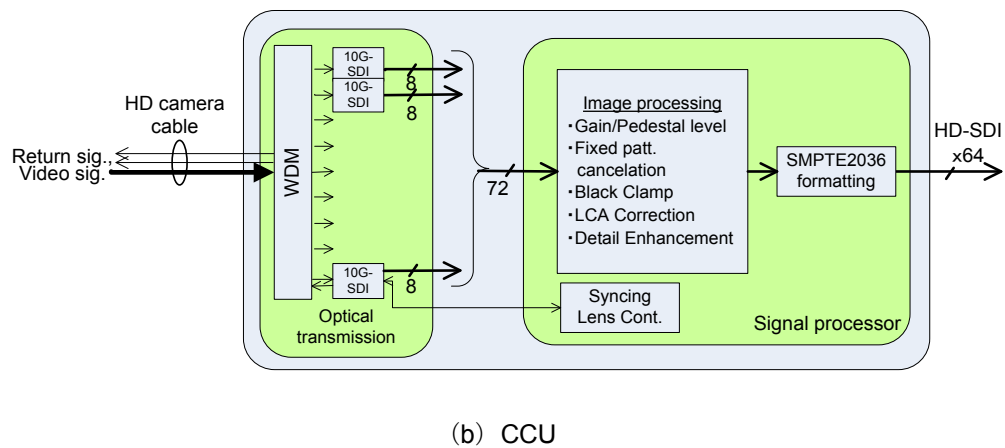
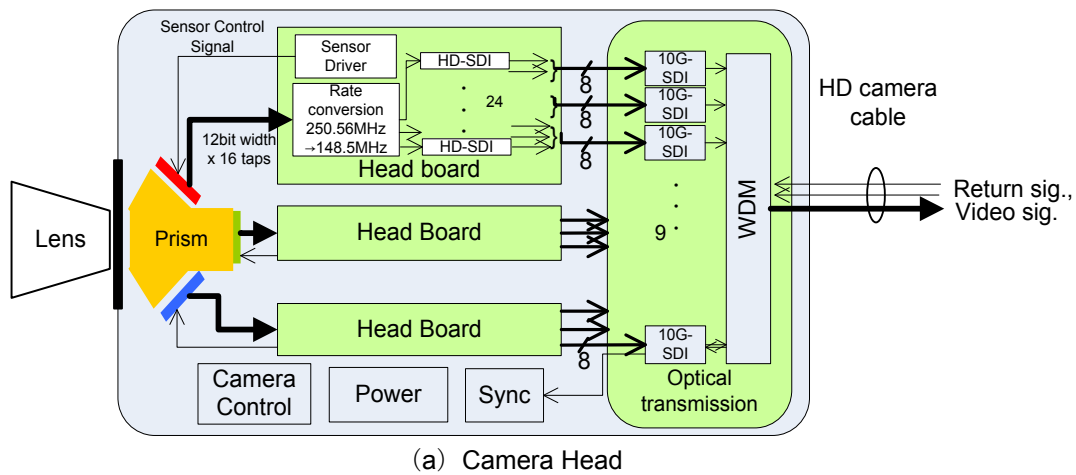


図 4.1 カメラシステムのブロック

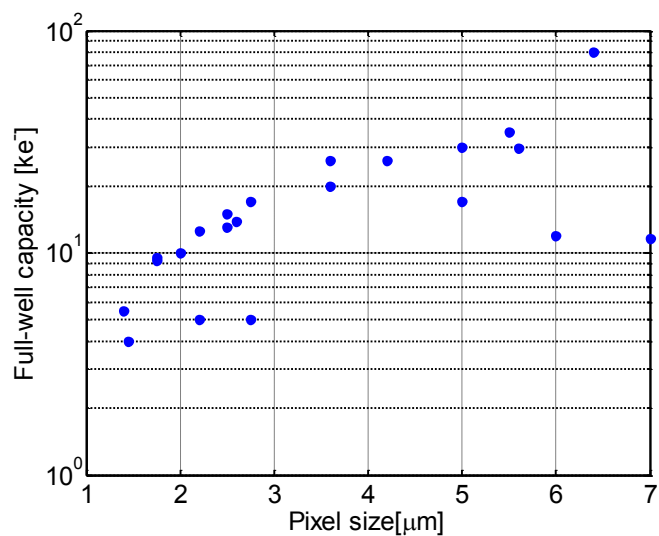


図 4.2 飽和電荷量と画素サイズの関係

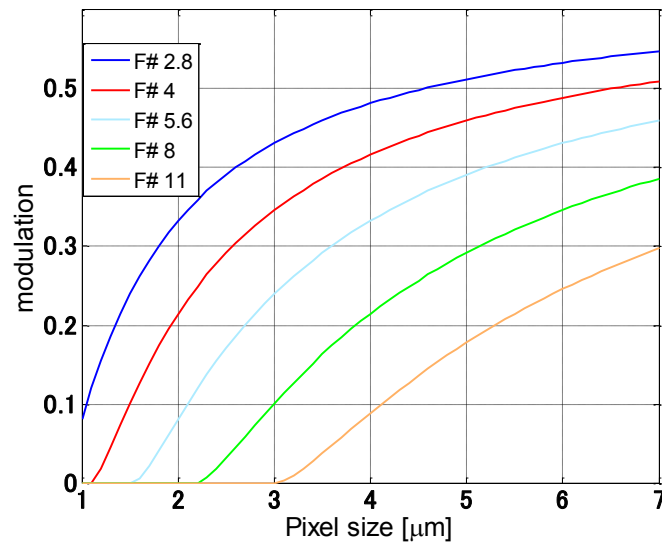


図 4.3 カメラの受光領域を一定としたときの画素サイズとそのナイキスト周波数における変調特性

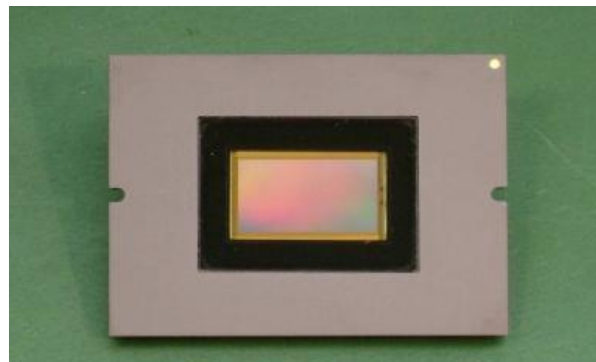


図 4.4 試作撮像素子 外観

4.3.2 カメラヘッド

カメラヘッドを小型化・省電力化するために、カメラヘッドの構成は撮像素子の駆動と素子からの出力を受けるヘッド基板と信号伝送インターフェースなど CCU(Camera Control Unit)へのデータ伝送が行えるだけの最小限の構成とした。ヘッド基板内での信号処理では素子駆動周波数(250.56 MHz)からハイビジョン互換周波数(148.35MHz)へのデータレート変換と HD-SDI(High Definition・Serial Digital Interface)エンコードだけを行う。1色当たり HD-SDI 24本、3色で計 72本の映像信号を信号伝送インターフェースに入力する。

4.3.3 カメラヘッド-CCU間 信号伝送インターフェース

カメラヘッドと CCU 間の信号伝送インターフェースではハイビジョン用インターフェースと同等の伝送距離とエラーレートを実現する必要がある。そのため、動画用インターフェース

として開発され、上記の性能が保証されている 10G-SDI[3]の複数リンクにより、所要のデータレートを確保した。

今回用いた 10G-SDI ユニットは HD-SDI×8 本分の有効領域の画像データを 10G-SDI×1 本の光信号に変換する。このユニット 9 式を用いてヘッド基板から出力される HD-SDI×72 本分に相当する SHV 信号を、10G-SDI×9 本の光信号に変換する。高密度波長多重 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing)を用いてこれらの光信号を多重し、ハイビジョンカメラ用光ケーブル 1 芯により CCU へ伝送する。光 1 芯にすることで消費電力を抑制し、運用時の利便性を確保した。

4.3.4 CCU

CCU ではカメラケーブルで伝送された SHV 信号を、再度、HD-SDI×72 本に戻して信号処理部に入力する。信号処理部では、ブロック図に示した一般的なカメラ信号処理を行うとともに、ピントのあった領域をビューファインダー上に表示するフォーカス補助信号の生成のほか、色収差補正処理を行う。色収差補正はレンズ内で行う光学的な補正が一般的であるが、レンズ径の増大や補正用レンズの挿入などでレンズ寸法が大きくなるので、信号処理で行い高精度の補正とレンズの小型化の両立を実現する。以下、色収差補正処理について述べる。

(1) 色収差補正信号処理の概要

ズーム、アイリス、フォーカスの 3 種のレンズパラメーターに対応した色収差補正方式を導入し、補正の高精度化を目指した。色収差補正処理のブロック図を図 4.5 に示す。G 信号を基準として R および B の色信号の色ずれ量からあらかじめ補正プレーンを算出し、信号処理装置上のメモリーに記録する。これを記録プレーンと呼び、ズーム、アイリス、フォーカスの各カメラパラメーターの代表値に対応する補正データを記録しておく。撮影時には、記録プレーンのデータを用いてレンズパラメーターに対応した補正プレーンを補間処理で生成し、更に、画素単位の補正量を補間処理で生成し、その補正量に基づいて R,B の画像を幾何学変換して G に対する色ずれを抑圧する。

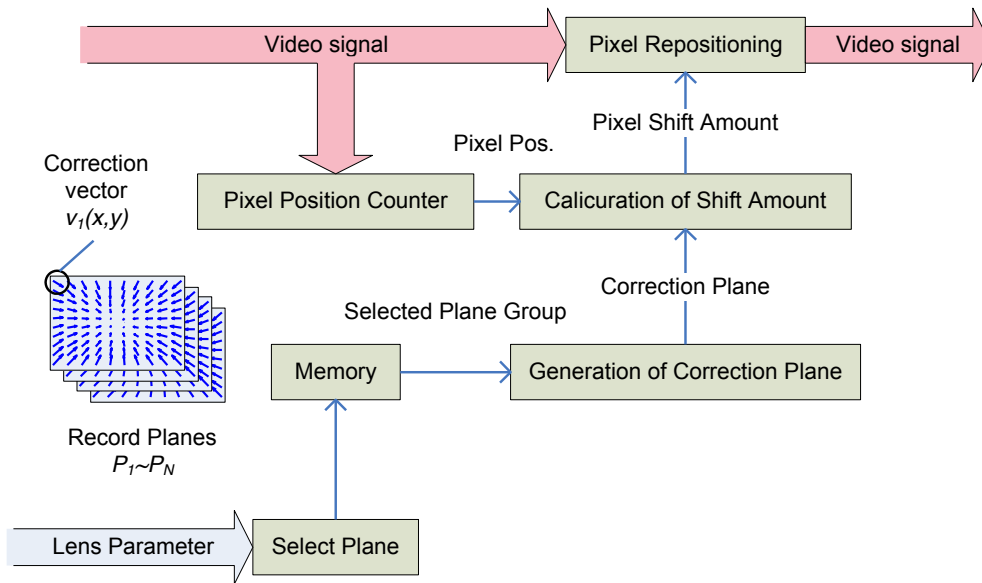


図 4.5 色収差補正処理 ブロックダイアグラム

(2) データ量削減のための間引き手段[4]

本補正方式では、記録プレーン数はカメラパラメーターの代表値の数だけ必要であり、細かい間隔で代表値を設定すればそれだけ数が多くなる。できるだけ少ない記録プレーン数で、補間処理で生成した補正プレーンに含まれる誤差が最小になることを目指して、最適な記録プレーンを決定する方法について検討した。ここでは説明を簡略にするために、パラメーターを1種とする。

あらかじめ取得した補正プレーン数を N 、 m 枚目の記録プレーンにおける測定画素サンプル点 (x, y) での補正ベクトルを $v_m(x, y)$ とする。ここで、 $x = 1, 2, \dots, X_{max}$ 、 $y = 1, 2, \dots, Y_{max}$ である。 $m = 1$ と $m = N$ のプレーンは必須とし、それ以外のプレーンから p 枚の間引く場合を考える。間引きプレーンの組 $d = \{d_1, d_2, \dots, d_p\}$ の i 番目のプレーン d_i について、他のプレーンのデータから補間処理して生成した補正ベクトルを $v'_{di}(x, y)$ としたとき、 d_i の誤差平均値 $diff(d_i)$ は(1)式で与えられる。

$$diff(d_i) = \frac{1}{X_{max} \cdot Y_{max}} \sum_y \sum_x |v_{di}(x, y) - v'_{di}(x, y)| \quad (1)$$

$diff(d_i)$ の最大値を間引きプレーンの組 d における評価値とする。 d の取りうるすべての組み合わせ集合 S のうち、この評価値が最小となる d を選択することで、 p 枚のプレーンの間引いた場合の補正データの誤差平均の最大値を最も小さくすることができる。その値を $E_v(p)$ とすれば、

$$E_v(p) = \min_{d \in S} \left\{ \max_{d_i \in d} \text{diff}(d_i) \right\} \quad (2)$$

と表すことができる． $E_v(p)$ が許容される最大色ずれ量以下となる p を求め，そのときの組み合わせ d を間引くことで最適な記録プレーンの組み合わせが得られる．

4.4 カメラの撮像実験

試作カメラの諸元を表 4.2 に，試作したカメラヘッドの外観を図 4.6 に示す．カメラヘッドの重量はレンズ込みで 65kg であり，屋外撮影が十分可能なサイズである．また，消費電力は光伝送装置を含めて 300W であり，カメラケーブルを用いた送電も可能である．光伝送装置の消費電力が全体の 60%を占めているので，将来，光伝送装置の省電力化が進めば，カメラヘッドの更なる省電力化が可能である．

試作カメラを用いて撮像実験を行った．撮影画像の例を図 4.7 に示す．カメラの最短撮影距離と画角に対応する測定チャートは無いので，全画面の 1/4 に相当するチャートを作成した．従って，チャート内の解像度に関する数値の 2 倍がカメラの性能になる．中心部の拡大図である図 4.6 (b)から，2,000TV 本(換算値で 4,000TV 本)まで解像できていることがわかる．

表 4.2 試作カメラシステムの仕様

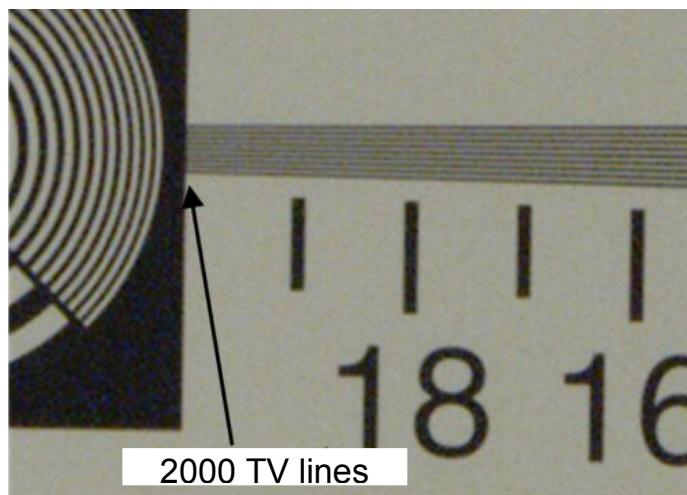
光学フォーマット	2.5 インチ	
焦点距離	31mm(固定)	
撮影画角	水平	50°
	垂直	29°
最至近撮影距離 (M.O.D.)	1 m	
カメラヘッド重量 (レンズ込)	65 kg	
消費電力 (カメラヘッド)	300 W	



図 4.6 試作カメラヘッドの外観



(a) 画像全体



(b) 中心部拡大

図 4.7 試作カメラでの撮影画像

図 4.8 は、プロトタイプフル解像度カメラおよび従来の DG 撮像カメラの変調伝達関数 (MTF) 特性を示す。プロトタイプカメラの MTF 特性は、ナイキスト周波数までの全周波数範囲で DG 撮像カメラの MTF 特性を上回っていることがわかる。また、ナイキスト周波数での変調度も 20% の目標を上回っている。理想レンズの特性と画素開口サイズから計算された値も同図に破線で示されている。試作カメラの測定値は計算値より 0.05 ポイント低い。これは、レンズの実際の特性が理想特性から低下するためである。

次に、色収差補正の効果を検証した。プロトタイプカメラを用いて一般的な物体を撮影した画像をテスト画像とした。倍率色収差補正前後の G チャネルと R チャネル、および B チャネルとの色ずれ量について、ブロックマッチング法により測定した。図 4.9 と図 4.10 はそれぞれの色ずれ量の例を示している (条件: F2.8, 焦点距離 2.5 m)。補正前では、R-G で最大 3.6 ピクセル、B-G では、最大 3 ピクセルの色ずれが生じている。補正後、各色の色ずれは 1 画素未満となっており、補正が有効に機能していることがわかる。

また、カメラの S/N についても測定値したところ、48 dB (感度設定: 2,000 lux; F 2.8) となり、目標値である DG 撮像システムの S/N よりも優れた値を示した。

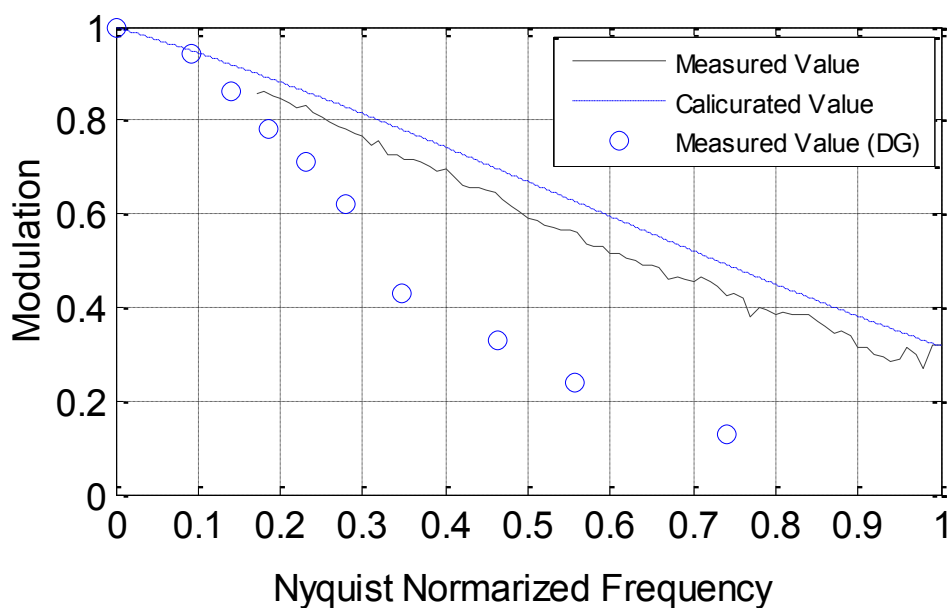
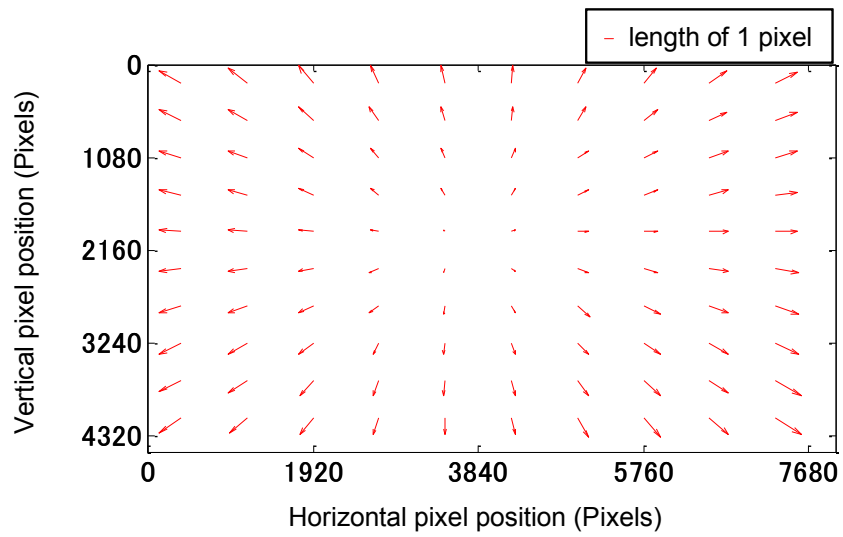
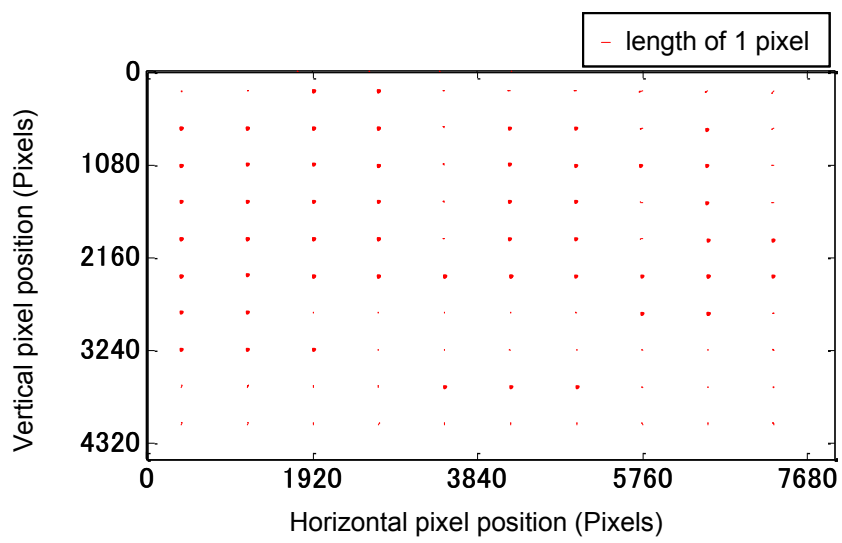


図 4.8 変調伝達関数 (MTF) 特性の比較 (F5.6, 垂直方向)

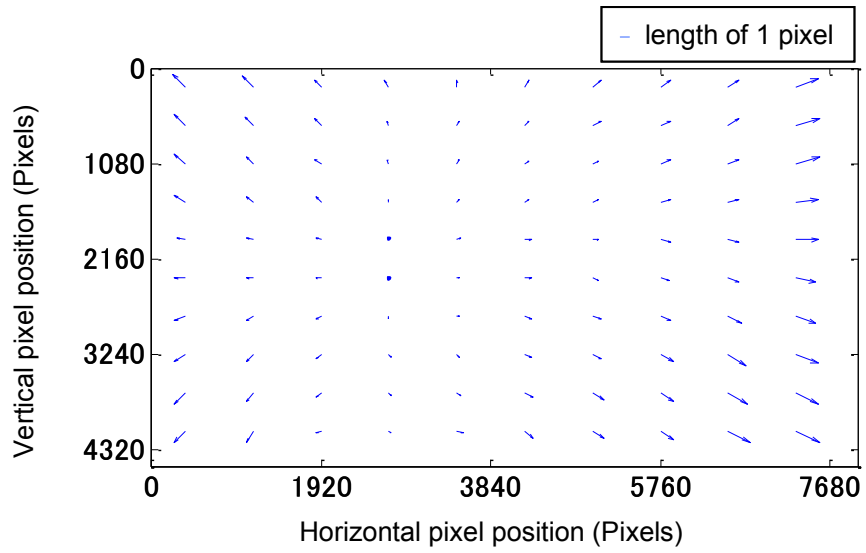


(b) 色収差補正処理前

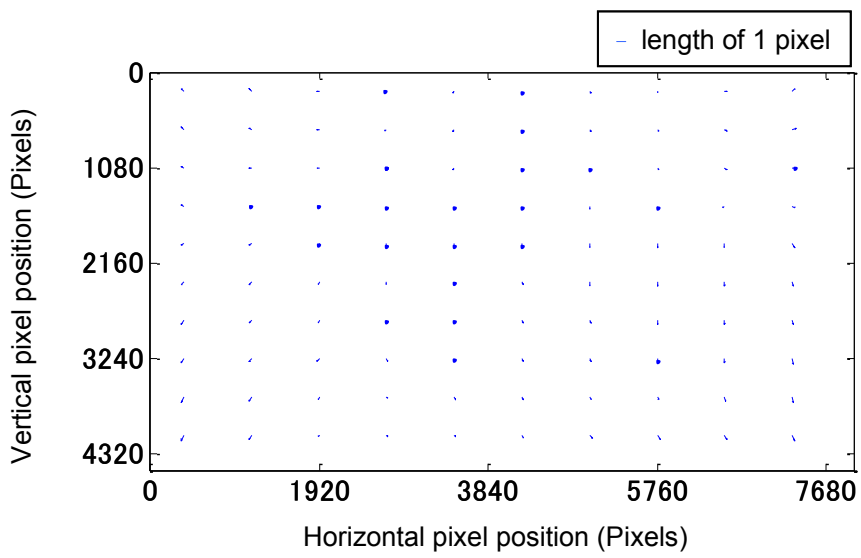


(b) 色収差補正処理後

図 4.2 赤チャンネルと緑チャンネルの色ずれ量の変化



(a) 色収差補正処理前



(b) 色収差補正処理後

図 4.2 青チャンネルと緑チャンネルの色ずれ量の変化

4.5 まとめ

3,300万画素のCMOS撮像素子を用いたSHVフル解像度カメラを試作し、撮像実験を行った。その結果、MTF特性は従来のDG撮像方式を大きく上回り、SHVシステムのナイキスト周波数である4,320TV本において20%以上の変調度を達成した。

信号処理部には色収差補正部を持ち、この補正パラメータ増大を抑制するため、データの間引き法について提案した。実際の試作装置において、画像周辺に生じる倍率色収差を1画素以下の精度で補正できていることを確認した。

参考文献

- [1] I. Takayanagi, M. Shirakawa, K. Mitani, M. Sugawara, S. Iversen, J. Moholt, J. Nakamura and E. R. Fossum: “A 1.25-inch 60-frames/s 8.3-M-pixel digital-output CMOS image sensor,” IEEE J. Solid-State Circuits, Vol.40, No.11, pp. 2305-2314(2005)
- [2] H. Shimamoto, T. Yamashita, N. Koga, K. Mitani, M. Sugawara, F. Okano, M. Matsuoka, J. Shimura, I. Yamamoto, T. Tsukamoto and S. Yahagi: “An Ultrahigh-Definition Color Video Camera With 1.25-inch Optics and 8k x 4k Pixels,” SMPTE Motion Imaging Journal, pp.260-268(2005)
- [3] SMPTE ST 435-1:2012, “10 Gb/s Serial Signal/Data Interface — Part 1: Basic Stream Derivation” (2012)
- [4] 山下, 船津, 三谷, 野尻, 中須: “信号処理による色収差補正における補正データ生成に関する検討”, 電子情報通信学会総合大会、Vol.2010, p.110(2010)

第5章 4板式によるHDR映像撮影システムの検討

5.1 はじめに

スーパーハイビジョンシステムでは超高精細 (Ultrahigh definition) だけでなく HDR (High Dynamic Range) が規格に含まれている。HDR 規格の一つである Hybrid Log-Gamma (HLG) を用いた放送システムでは、ダイナミックレンジは従来の Standard Dynamic Range (SDR) の 1200% となる。これはダイナミックレンジ拡大のためにリニア領域でさらに 3.59bits が必要となることを意味しており、SDR で 12bit 階調を実現しているシステムであれば、15 ストップ以上のカメラシステムが必要となる。加えて、SDR と同等以上の SN 比を実現することが求められる。

しかし、現行の UHDTV 用カメラではそれらを満足することは難しい。それは同サイズの HDTV カメラと比較して、カメラに用いられる撮像素子の画素サイズが小さくなるため、飽和電荷量が少なくなること起因している。これらの問題に対処するために、多くの方法が提案されている。一つの方法はイメージセンサ自体のダイナミックレンジを拡大する方法である。このアプローチは、MOSFET のサブスレッショルド特性[1]～[3]における対数圧縮を利用する方法を含む。

そのほかの方法は、異なる露光信号を得た後、後段の信号処理回路でこれらを合成し、ダイナミックレンジ拡大した信号を得る方法である。この手法はアクティブピクセルセンサの非破壊読み出し機能を使用し、短露光信号と長露光信号を出力、これらを利用する方法[4]を含む。

前者の方法では、イメージセンサからは非線形信号が出力されるため、カメラシステムの信号処理に必要な線形信号に容易に変換することができない。後者では、短露光信号と長露光信号を同じタップから順次出力するため、1 つのフレーム期間で両方の信号を得るためには、通常のイメージセンサの 2 倍の速さで出力する必要がある。別の問題は、異なる露光時間の信号を合成した結果として、特に動きの速い被写体を撮影した際に合成した HDR 信号にエラーが生じる可能性があることである。

露光時間が同一で、かつ露光量の異なる信号を、通常のセンサと同じ出力速度で同時に取得することができれば、有効な手法であることは予想される。そこで、 $m : 1$ の分光比を持つプリズムと放送アプリケーションで一般に使用される、光の利用効率が高い 3 板式撮像素子と、コンパクトな構成でカラー信号を取得することができる単板カラー式撮像素子を組み合わせた、4 板撮像による HDR システムを提案する。

本章では、提案する撮像システムについて、光学系と HDR 映像の合成方法についての詳細を検討する。次に、合成した映像のノイズを計算して映像の像質を分析し、合成に必要なパラメータの最適値を導出する。最後にシミュレーションにより、本手法の有効性について確認する。

5.2.4 板式による HDR 映像撮影システムの概要

5.2.1 光学系

カラーカメラの中でも、特に放送アプリケーションのような高画質が要求されるカラーカメラでは、フィリップス型プリズムの出現以来、主に 3 板式カラー撮像を利用してきた。この方法にはいくつかの利点がある。まず、入射光の損失が少ないため、通常、非常に高感度である。3 色（赤、緑、青）のそれぞれにイメージセンサが割り当てられているため、解像度が高くなる。そして、最適な分光特性によりテレビジョン規格に適した良好な色再現性を得ることができる。

異なる露光量を有する 2 つの映像を得る場合でも、高画質が要求される 3 板式を用いることが望ましい。これらの 2 つの映像を得るために時分割を用いることもできるが、前述のとおり、この方法で取得した映像から生成された HDR 映像は動画質が悪く、放送には適さない。理想的な画質の 2 つの映像を得るためには、2 対の 3 板式光学系を使用することであるが、この手法は光学系を過度に複雑にする。

提案手法では、3 板式撮像系と単板式カラー撮像系とを組み合わせることによって、この問題に対する解決策を提供する。本手法に用いた光学ブロックについて図 5.1 に示す。入射光がプリズム部を通過する際、単板カラーイメージセンサに到達する前に、第 1 のプリズム面で反射される（反射量 $1/(m+1)$ 、 m は露光比）。残りの量 $m/(m+1)$ は、第 2 および第 3 の面がプリズムブロックを通過して進むにつれてさらに反射され、それぞれのイメージセンサに達する前に赤、青、および緑に分割される。この部分は 3 板式撮像系に相当する光学系が構成されている。 m を 1 より大きい値に設定することで、3 板式のほうへ低照度側、つまり高露光に相当する光が導かれる。前述のとおり、3 板式撮像によって撮影された画像は空間解像度が高く、また高い S/N を有するが、単板カラーによって撮影された画像の画質は、一般に”デモザイク”と言われる信号処理を必要とするため、3 板式と比較すれば高画質とはいえない。このため、一般の撮影において被写体が集中すると思われる高露光量側に 3 板式を配置した。

4 板式による光学的な劣化については、過去の 4 板式撮像システム[6]の検討において、最小 F 値はわずかに大きくなるが、3 板式撮像システムとほぼ同じ光路長と色再現性を備えることがわかっている。

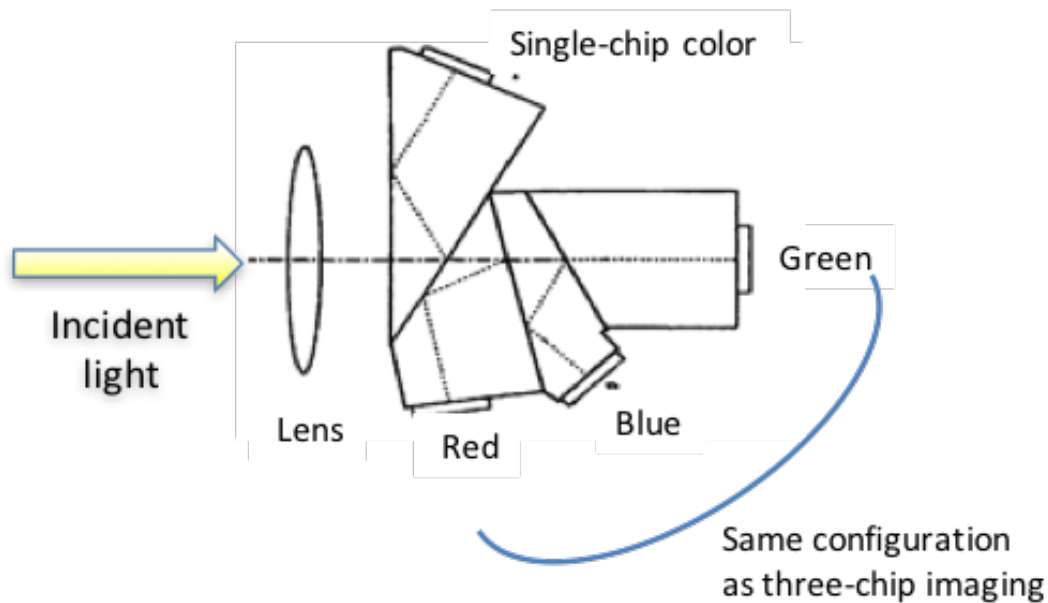


図 5.1 提案システムにおける光学ブロック

5.2.2 画像合成手法

大部分が低輝度の光を含み、一部分が高輝度の光となっているシーンを考える。画像合成の原理は、3板カラー画像から得られた高品質画像の飽和ハイライト部分を、単板カラー画像の高輝度光画像に置き換えることである。2つの画像を合成するために、これらの画像のスイッチングポイントは、基準白色レベルに近い高輝度光領域に設定される。

ここでは、単板カラーイメージセンサの各画素が、3板式撮像系の各イメージセンサと同じ飽和電荷量を有すると仮定する。さらに、カラーフィルタアレイとポストフィルタリング（デモザイキングや色補正信号処理）からなる単板カラー系のスペクトル特性は、3板プリズムのスペクトル特性と同じであると仮定する。

図 5.2 は入射光のレベルを L_{in} 、高露光側の出力レベルを L_H 、低露光側の出力レベルを L_L としたときの入出力特性を示している。入出力変換ゲインが 1 の場合、 L_H と L_L は次のようになる。

$$L_H = \frac{m}{m+1} L_{in} \quad (1)$$

$$L_L = \frac{1}{m+1} L_{in} \quad (2)$$

元の結像系が飽和する入射光レベルを L_S とし、 L_H が飽和する高露光側の入射光量を $(1 +$

$1/m)L_S$ とすると、分離後の入射光は $m/(m+1)$ となる。(1). 同様に、 L_L が飽和する入射光量は $(m+1)L_S$ で与えられる。2枚の画像を合成するには、 L_H の飽和点で高露光画像から低露光画像に切り替える前に、増幅率「 $1+1/m$ 」と「 $m+1$ 」とをそれぞれ乗算する。このようにして、入射光は $(m+1)L_S$ まで線形のままであり、 $(m+1)$ 倍のダイナミックレンジを生じる。ダイナミックレンジの拡大率は、露出の比 m で増加する。

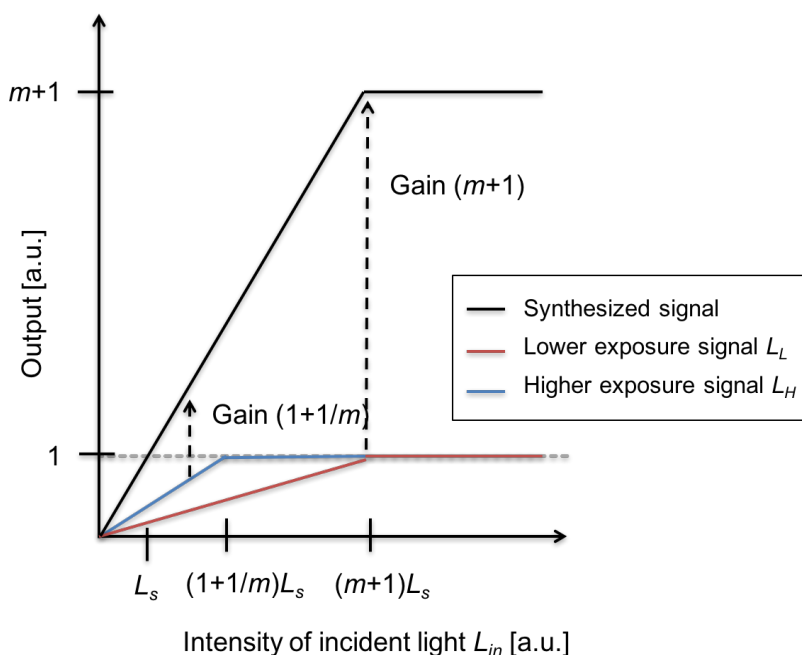


図 5.2 システムの入出力特性

ここで既存の HDR 標準規格に目を向けると、Perceptual Quantization (PQ) [7]と Hybrid Log-Gamma (HLG) [8]の2つがあることが知られている。いずれの規格も ITU-R における国際プログラム交換フォーマット勧告[9]に含まれている。PQ の特徴は、デジタルコードが表示輝度の絶対値に関して関連していることである。一方、HLG 規格では、デジタルコードはイメージセンサ出力の相対的なレベルに関して関連している。HLG の伝達関数の設計は、現在のテレビジョンシステムの標準ダイナミックレンジ (SDR) を引き継いでいる。

ITU-R 勧告 BT.2100 における HLG の光・電子伝達関数 (OETF) は以下のように表され、これを図示すれば図 5.3 のようになる。

$$E' = \begin{cases} \sqrt{E}/2, & 0 \leq E < 1 \\ a \cdot \ln(E - b) + c, & 1 \leq E \end{cases} \quad (3)$$

($a=0.17883277$, $b=0.28466892$, $c=0.55991073$),

ここで、 E は、シーン線形光に比例し、カメラ露出によってスケールされ、範囲[0:12]に正規化された各色成分の信号である。 E' は[0:1]の範囲内の非線形信号である。この式から、

最大ダイナミックレンジは 1200 %であることがわかる。このため、リニアドメインにおいて、拡張ダイナミックレンジに対して 3.59 ビット以上が必要であることから、SDR ビデオレベルに 12 ビット深度を割り当てるカメラでは、15f-stop を超えるダイナミックレンジが必要であることがわかる。

提案方式では $m + 1$ のダイナミックレンジを得ることができることから、HLG に適用する場合は m の値は 11 でよいことがわかる。この際、システムのダイナミックレンジは、それぞれの撮像系に 12 ビット出力のイメージセンサを使用することにより、15f stop を超えることができる。

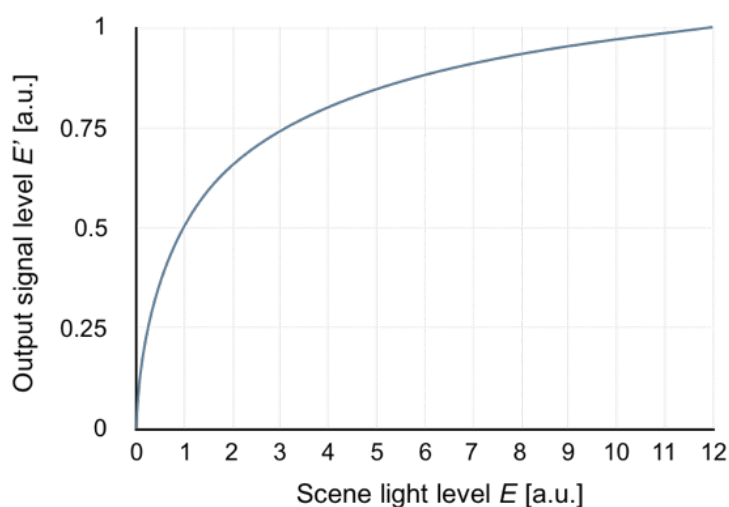


図 5.3 Hybrid Log-Gamma OETF 特性

5.2.3 スイッチング点におけるノイズ変化の解析

m の値が大きくなるにつれて、カメラのダイナミックレンジは広がるが、低露出信号が増幅されるので SN 比が低下することが想定される。この問題をさらに理解するために、ダークノイズ（入射光に依存しない部分）と低露光信号のフォトンショットノイズから、スイッチングポイントでのノイズについて計算する。

以下の説明では、 N_{dk} および N_{st} は、それぞれ、1つのイメージャでのダークノイズおよびフォトンショットノイズを表す。入射光を $m:1$ に分割すると、低露光側のダークノイズ N_{ldk} とフォトンショットノイズ N_{lst} は、

$$N_{ldk} = N_{dk} \quad (4)$$

$$N_{lst} = \frac{1}{\sqrt{m+1}} N_{st} \quad (5)$$

入射光が $1/(m+1)$ のとき、フォトンショットノイズはその平方根に比例して劣化し、式(5)が得られる。入射光は、画像が合成されるとき $(m+1)$ 倍に増幅され、式(4)および(5)が次のようになることを意味する。

$$N'_{ldk} = (m+1)N_{ldk} = (m+1)N_{dk} \quad (6)$$

$$N'_{lst} = (m+1)N_{lst} = \sqrt{m+1}N_{st} \quad (7)$$

ダークノイズは $m+1$ に比例して増加し、フォトンショットノイズは $\sqrt{m+1}$ に比例して増加することがわかる。これらの2つのノイズを組み合わせることにより、低露出信号のノイズの総量を次のように得られる。

$$\begin{aligned} N_{Total_low} &= \sqrt{N'_{ldk}{}^2 + N'_{lst}{}^2} \\ &= \sqrt{\{(m+1)N_{dk}\}^2 + (m+1)N_{st}{}^2} \end{aligned} \quad (8)$$

同じように、高露出信号のノイズの総量を計算することができる。

$$N_{Total_high} = \sqrt{\left(\frac{m+1}{m}N_{dk}\right)^2 + \frac{m+1}{m}N_{st}{}^2} \quad (9)$$

スイッチングポイントにおけるノイズ劣化 Nd は、(8)及び(9)から、

$$\begin{aligned} Nd &= \frac{N_{Total_low}}{N_{Total_high}} \\ &= \frac{\sqrt{\{(m+1)N_{dk}\}^2 + (m+1)N_{st}{}^2}}{\sqrt{\left(\frac{m+1}{m}N_{dk}\right)^2 + \frac{m+1}{m}N_{st}{}^2}} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 N_{st} は、入射光の強度に依存して変化する。図5.4は、式10において、 N_{st} の変化に応じて Nd がどのように変化するかを示している。

なお、 N_{st} は入射光量の平方根に比例する。スイッチングポイントにおける入射光の強度が十分である場合、 $N_{st} \gg N_{dk}$ と仮定すると、

$$Nd|_{N_{st} \gg N_{dk}} \cong \frac{\sqrt{(m+1)N_{st}{}^2}}{\sqrt{\frac{m+1}{m}N_{st}{}^2}} = \sqrt{m} \quad (11)$$

上記の式から、 $m=11$ のとき、 Nd は10dBになる。合成によって生成された視覚的影響については、参考文献[10]で議論した。それによれば、12ビット出力のイメージセンサをこのシステムに使用すると、S/Nの劣化は認識できない。

この劣化による視覚的影響をさらに低減するためには、高露光信号と低露光信号とを重み付けして合成し、切り替え時にオーバーラップ期間を設けることが有効である。

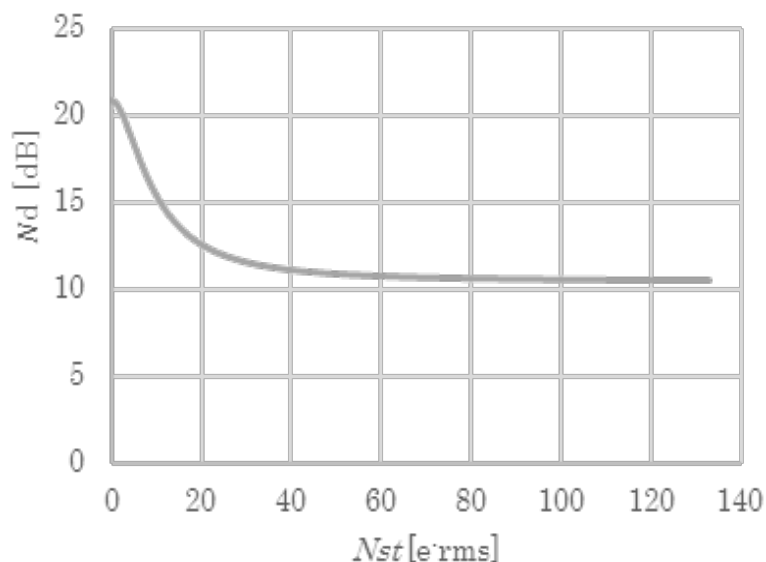


図 5.4 スイッチング点におけるノイズ劣化
($m = 11$, $N_{dk} = 5$)

5.2.4 合成におけるその他の検討事項

ビデオ画像を合成する際には、3板撮像と単板カラー撮像の結果を合成するため、これらの違いを吸収する必要がある。ここでは、これらの方法について検討する。

(1) スペクトル応答の違い

3板式はプリズムを用いて色を分離するが、単板方法はチップ上に色素を有するカラーフィルターの透過特性が色分離に関連する。それぞれの着色方法について理想的な分光特性が明らかにされているが[11]、これらのスペクトル特性が異なるため、カメラ間の一般的な色合わせ方法と同じ色補正が必要である。3D ルックアップテーブルやリニアマトリックス処理を使用して単板または3板の出力に補正を適用するとその差が吸収される。

(2) MTF の違い

単板カラー方式では、ベイヤーピクセル配列から各ピクセルの情報を補間するためのデモザイク処理が必要である。デモザイク処理方法に依存するが、空間周波数がナイキスト周波数に向かうにつれて、MTF の応答は減少する傾向がある。提案方式では、低露出側がローパス特性しか持たないため、高露出側の特性がコントラストの高いシーン画像に寄与する。これにより、合成画像において周波数特性が改善される。

5.3 シミュレーション

図 5.5 は、提案システムをシミュレートするための撮像部のモデルである。ノイズが加えら

れ、低露光側が単板撮像に対応するのでベイヤー処理が加えられる。一方、合成部のモデルを
図 5.6 に示す。デモザイク処理された低露光画像及び高露光側画像それぞれにゲインを適用す
 る。低露光側と高露光側との切り替えポイントは高露光側が飽和するレベルとし、合成画像が
 出力される。

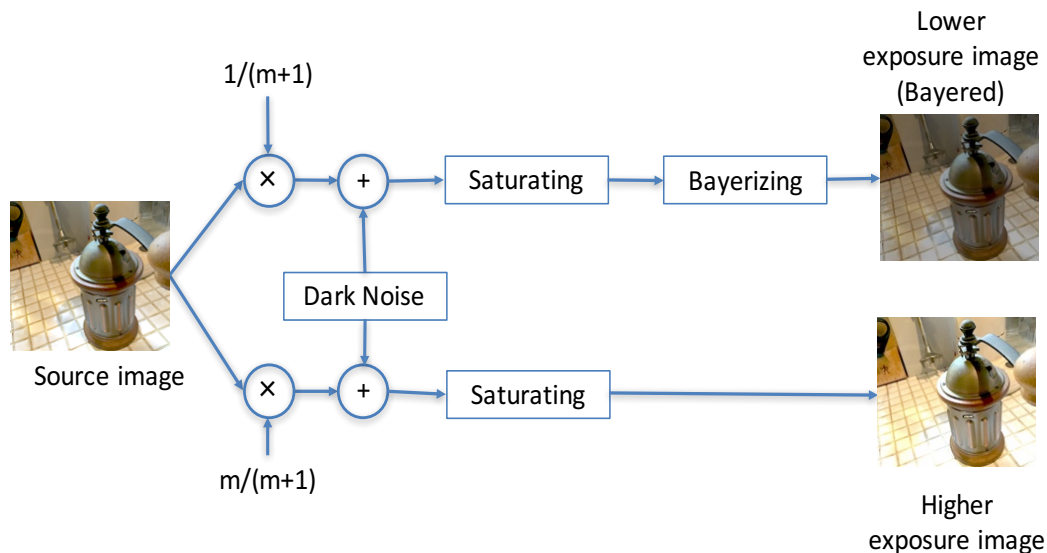


図 5.5 提案システム撮影部のモデル化

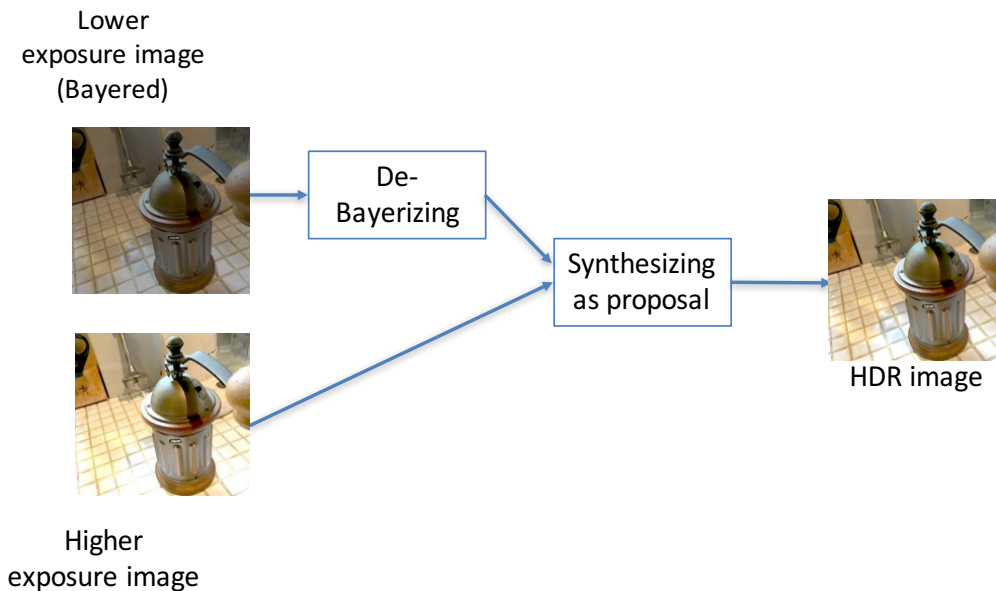


図 5.6 提案システム合成部のモデル化

このシミュレーションでは、Radiance.hdr 形式イメージを使用した (図 5.7 参照)。また、
 合成時の低露光側と高露光側の画像をそれぞれ図 5.8 および図 5.9 に示す。また、信号処理後
 の合成画像を図 5.10 に示すが、図 5.7 と図 5.10 を比較すると、図 5.10 の明るい領域では階調

が再現されていることがわかる。得られた低露出信号に変換する。図 5.11 に、切り替えが発生しているエリアを示す。たとえば、白い色は、すべてのカラーチャンネルで領域が切り替わることを示す。同様に、赤色は、赤色チャンネルのみで低露出信号に切り替わる領域を示す。同図から、飽和領域が適切に置換されていることが確認される。さらに、原画像からの二乗平均平方根誤差 (RMSE) を用いて合成画像を評価した結果を表 5.1 に示す。合成画像の RMSE 値が、低露出側と高露出側の画像との比較 RMSE 値よりも小さいことからより原画像に近いことを示している。



図 5.7 .HDR 元画像

(“Dani_belgium_oC65”, Image courtesy Dani Lischinski)

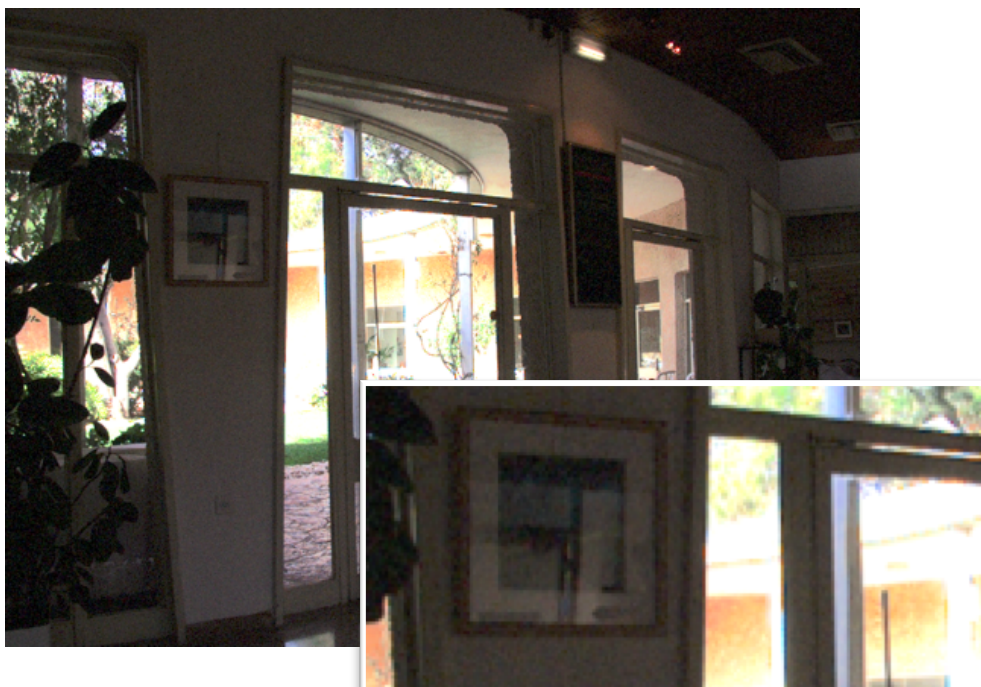


図 5.8 低露光量側画像 (視認補助のためゲインアップ)



图 5.9 高露光量側画像



图 5.10 合成画像

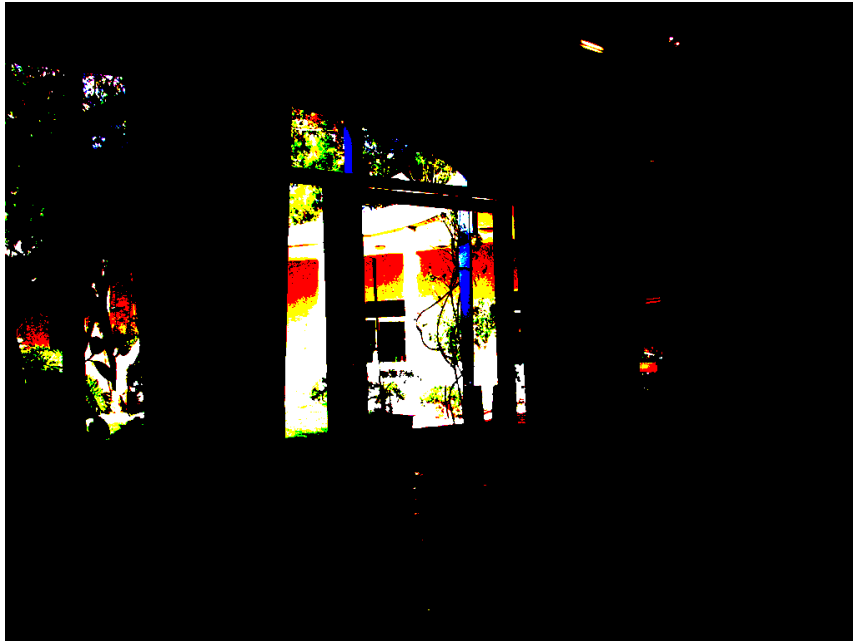


図 5.11 スイッチが生じた領域

表 5.1 画質評価

原画像との比較対象	RMSE
合成画像	21.2997
低露光側画像のみ	41.9740
高露光側画像のみ	799.5911

5.4 まとめ

3板式撮像と単板式カラー撮像からなる光学系と、それら撮像方式から出力される映像の合成方法とを組み合わせた4板式HDR撮像システムを提案した。入射光の分割比についてノイズとの関係を解析し、HLGであれば入射光量比を11とし、スイッチング点でのノイズ劣化は視認されないことを確認した。本撮像システムに関するシミュレーションを行い、高画質な高ダイナミックレンジ映像を得る上で有効であることを確認した。

参考文献

- [1] G. Chamberlain, J.P. Lee, "A Novel Wide Dynamic Range Silicon Photodetector and Linear Imaging Array," IEEE Journal of Solid-State Circuits, sc-19. No. 1, pp. 41-48 (1984)
- [2] S. Kavadias, B. Dierickx, D. Scheffer, "On-chip Offset Calibrated Logarithmic Response Image Sensor," 1999 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors, pp. 68-71 (1999)
- [3] M. Loose, K. Meier, J. Schemmel, "R27 Self-calibrating Logarithmic CMOS Image Sensor with Single Chip Camera Functionality," 1999 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors, pp. 191-194 (1999)
- [4] H. Shimamoto, K. Mitani, Y. Fujita, "Dynamic Range Expansion Method for a CMD Imager," The Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers, 54, No. 12, pp. 1781-1787 (2000)
- [5] T. Yamashita, M. Sugawara, K. Mitani, F. Okano, "Wide-dynamic-range Camera Using a Novel Optical Beam Splitting System," Proc. SPIE 4669, Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications III, 82 (2002).
- [6] M. Sugawara, K. Mitani, T. Saitoh, Y. Fujita, K. Suetsugu, "Four-Chip CCD Camera for HDTV," SPIE Proceedings, 2173, pp. 122-129 (1994)
- [7] SMPTE ST 2084, "High Dynamic Range Electro-Optical Transfer Function of Mastering Reference Displays," Society of Motion Picture & Television Engineers (2016)
- [8] ARIB STD-B67, "Essential Parameter Values for the Extended Image Dynamic Range Television (EIDRTV) System for Programme Production," Association of Radio Industries and Businesses (2015)
- [9] Recommendation ITU-R BT.2100, "Image Parameter Values for High Dynamic Range Television for Use in Production and International Programme Exchange," International Telecommunication Union (2016)
- [10] T. Yamashita, Y. Fujita, "Video frame synthesizing method for HDR video capturing system with four image sensors," IPAS-086, Proceedings of Electronic Imaging 2017 (2017)
- [11] ARIB TR-B37, "Interconnection for UHD TV Camera and Lens," Association of Radio Industries and Businesses (2016)

第6章 結論

本論文では、超高精細映像コンテンツ制作の高度化を目的とし、特に830万画素撮像素子を用いた4板式、および3,300万画素撮像素子を用いた3板式による8Kスーパーハイビジョン撮像システムを提案した。さらには撮像素子性能をシステムとして補うため、4板式による高ダイナミックレンジ撮像システムを提案し、今後すべての映像パラメータを実現するスーパーハイビジョンのフルスペック化についての指針について考察した。

本研究の概要を以下にまとめる。

第1章では、研究の背景と目的を述べ、本研究の位置づけを示した。

第2章では、本論文の対象となる超高精細映像システムの一つである、スーパーハイビジョンシステムについて、その映像パラメータの検討を行った。対象としたパラメータは空間解像度（画素数）、時間解像度（フレームレート）、色再現域（表色系）、トーン（ビット階調）である。これらについて、主観評価をもとづいた導出結果について述べた。

第3章では、既開発の4K映像用830万画素撮像素子を用いて、8K映像を取得するための撮像装置の試作結果について述べた。撮像装置の構成法として、撮像素子4枚を用いた4板式を導入した。本方式ではプリズムによって、入射光を赤、青、緑に分光し、さらに緑についてはハーフミラーにて2分配する。それぞれを単色撮像素子で撮像する際に、緑用の2つの撮像素子のみ、斜め方向に配置をずらすことで、画像空間上のサンプリング位置が水平、垂直とも2倍となるため、8K相当の映像が取得可能になるものである。本章では4板式映像の信号処理を行う際、帯域を増やすことなく処理を実行するための信号処理技術と、その際に課題となる輪郭補償処理について、新たな手法を提案し、実装した結果の有効性を示した。

第4章では、8K解像度の映像が直接撮影できる3,300万画素撮像素子の開発と、その撮像素子を用いた3板式カメラの開発について述べた。撮像素子開発に当たって最適な画素サイズと撮像素子サイズが重要であるため、この導出について検討した結果を述べた。またレンズの高解像度化を追求する際的设计難度を低減するための信号処理による倍率色収差の補正方法を提案した。その構成法と実装結果について述べ、従来の8Kカメラと同程度のSN比を確保ながら、ナイキスト周波数において20%以上の変調度を有することを確認し、有効性を示した。

第5章では、超高精細映像パラメータのうち、高ダイナミックレンジ化に適した撮像システムの提案として、4板式による高ダイナミックレンジ撮像システムを提案した。4板のうち、3板撮像方式のブロックと単板カラー撮像方式とを分光プリズムを介して結合した光学系を考案した。それぞれのブロックへの入射光量を違え、3板からの出力と単板方式からの出力信号を合成することで、高ダイナミックレンジ映像を取得できることを示した。本章では撮像装置の構成法と信号処理部のシミュレーション結果を示し、特に合成信号の転換点におけるノイズ劣化を算出し、劣化程度が視認できない範囲にあることを確認、提案システムが有効であるこ

とを示した。

以上のように，超高精細映像コンテンツ制作の高度化のため，スーパーハイビジョンの映像パラメータを実現する撮像システムの実現を模索した。

本放送の開始により，また，**Virtual Reality** といった新たな映像分野も開拓され，今後，超高精細映像コンテンツの拡大が見込まれている．そのためには，スーパーハイビジョン映像パラメータをすべて満たしつつ，小型化や低消費電力化といったより運用性の高い撮像装置の実現が必須である．フレーム周波数 **120Hz** や広色域を実現するための検討は並行して進んでおり，すべてを兼ね備えた小型スーパーハイビジョンカメラもそう遠くない将来に開発がなされることであろう．

本研究で得られた指針を基に，超高精細映像コンテンツ制作の高度化が進展し，さまざまな映像文化の創造に貢献する一助となれば幸いである．

謝辞

本論文をまとめるにあたり，愛媛大学大学院理工学研究科 藤田欣裕教授より，終始ご指導，ご鞭撻を賜りました。心より感謝の意を表します。また，高橋寛教授，樋上喜信教授，黒田久泰准教授，都築伸二准教授からは，有益なご助言並びにご指導を頂きました。ここに，深く感謝いたします。

本論文は，1999年から2017年にかけて日本放送協会および愛媛大学大学院において行った研究をまとめたものです。本論文をまとめる機会を与えて頂き，多大なるご支援を賜った技術局 春口篤局長，放送技術研究所 黒田徹所長に深謝します。また，本研究を進めるにあたり，研究の機会を与えて頂いた山田宰元所長，三宅誠元所長，榎並和雅元所長，谷岡健吉元所長，久保田啓一元所長，藤沢秀一前所長に深く感謝します。また故岡野文男元研究主幹，野尻裕司元研究主幹（現（株）NHK アイテック），伊藤崇之元次長（現（一財）NHK エンジニアリングサービス），八木伸行元研究主幹（現 東京都市大学），中須英輔元研究主幹（現（一財）NHK エンジニアリングサービス），鹿喰善明元研究主幹（現 明治大学），池田哲臣研究主幹には，研究を進めるにあたり，ご指導とご助言を頂きました。深く感謝します。また，本論文をまとめるにあたりご理解，ご支援頂きました技術局 増原一衛部長，瀧澤和史部長に感謝します。

本研究は当初より，放送技術研究所 菅原正幸元主任研究員（現（株）日本電気），三谷公二元主任研究員（現 副所長），島本洋上級研究員，奥井誠人元主任研究員（現 NICT），西田幸博研究主幹に直接の研究の指導者として細部にわたり終始貴重なご指導を頂きました。また，洗井淳元上級研究員（現 副部長）古賀則行元研究員（現 放送技術局），大村耕平元研究員（現 放送技術局），船津良平研究員，添野拓司元研究員（現 技術局），中村友洋研究員をはじめ，立体映像音響（当時）およびテレビ方式研究部のみなさま，田村繁雄技師，技術局 スーパーハイビジョン開発部（当時），制作施設部のみなさまには，多大なる助言と協力を頂きました。心から感謝します。

最後に，長年の研究生生活において，常に支援・協力してくれた 妻 美紀と子 蔵，響，凜，父 拓治に心から感謝します。

2018年3月 山下 誉行

研究業績

論文

1. 山下誉行, 三谷公二, 菅原正幸, 島本洋, 岡野文男: “走査線 4000 本級 4 板式超高精細動画カメラ”, 映像情報メディア学会誌, Vol.58, No.3, pp.383-391(2004)
2. Takayuki Yamashita, Ryohei Funatsu, Tadaaki Yanagi, Kohji Mitani, Yuji Nojiri and Tetsuo Yoshida: “A camera system using three 33-M-pixel CMOS image sensors for UHD TV2,” SMPTE Motion Imaging Journal, Vol.120, No.8, pp.24-31(2011)
3. Takayuki Yamashita, Kenichiro Masaoka, Kohei Ohmura, Masaki Emoto, Yukihiro Nishida and Masayuki Sugawara: “Super hi-vision video parameters for next-generation television,” SMPTE Motion Imaging Journal, Vol.121, No.4, pp.63-68(2012)
4. Takayuki Yamashita and Kohji Mitani: “8K extremely-high-resolution camera systems,” Proceedings of the IEEE, Vol.101, No.1, pp.74-88(2013)
5. Takayuki Yamashita and Yoshihiro Fujita: “HDR video capturing system with four image sensors,” ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol.5, No.4, pp.141-146(2017)
6. Takayuki Yamashita and Yoshihiro Fujita: “Noise characteristics of a high dynamic range camera with a four-chip optical system,” Journal of Electrical Engineering USA, Vol.6(2018)

国際学会

1. T. Yamashita, M. Sugawara, K. Mitani and F. Okano: “Wide-dynamic-range camera using a novel optical beam splitting system,” Proceedings of SPIE 4669, Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial and Digital Photography Applications III, 82 (2002)
2. T. Yamashita, K. Mitani, H. Shimamoto, M. Shirakawa and F. Okano: “A new sensor alignment method for an 8k x 4k-pixel ultrahigh-definition camera with four imagers,” Proceedings of the Electronic Imaging 2004, Vol.5301, pp. 76-86 (2004)

3. T. Yamashita, S. Huang, R. Funatsu, B. Mansoorian, K. Mitani and Y. Nojiri: “Experimental color video capturing equipment with 33-megapixel CMOS Image sensors,” Proceedings of SPIE, Vol.7249,72490H, (2009)
4. T. Yamashita, R. Funatsu, T. Yanagi, K. Mitani, Y. Nojiri and T. Yoshida: “A Camera system using three 33-Mpixel CMOS image sensors for UHD TV2,” presented at the SMPTE Annual Technical Conference & Expo (2010)
5. T. Yamashita, R. Funatsu, T. Yanagi, K. Mitani, Y. Nojiri and T. Yoshida: “A Super Hi-Vision camera using three 33-M-pixel CMOS image sensors,” Proceedings of International Display Workshops, Vol.17, No.2, pp.1727-1730(2010)
6. T. Yamashita and Y. Fujita: “Video frame synthesizing method for HDR video capturing system with four image sensors,” Proceedings of Electronic Imaging 2017, IPAS-086, pp.72-77 (2017)

国内学会

1. 山下, 菅原, 三谷, 岡野: “3 板・単板カラー方式の組み合わせによる広ダイナミックレンジ映像取得法”, 映像情報メディア学会年次大会, 9-4(2000)
2. 山下, 島本, 三谷, 菅原, 岡野: “4 板撮像・表示方式超高精細映像システムにおける輪郭補償”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.26, No.78, pp.5-8(2002)
3. 山下, 船津, 三谷, 野尻: “3300 万画素 CMOS イメージセンサーを用いた 3 板式フル解像度スーパーハイビジョンカラー撮像実験”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.32, No.50, pp.13-16(2008)
4. 山下, 船津, 三谷, 野尻, 中須: “信号処理による色収差補正における補正データ生成に関する検討”, 電子情報通信学会総合大会, Vol.2010, pp.110(2010)
5. 山下, 洗井, 船津: “超高精細映像システムを応用した立体映像システムの構築”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.37, No.43, pp.17-22(2013)
6. 山下, 日下部, 中戸川: “8K スーパーハイビジョン信号伝送の最新技術動向”, 電子情報通信学会総合大会, Vol.2014, No.BI-5-4(2014)
7. 山下, 崎山, 三橋: “4K/8K カメラの光学系について”, 映像情報メディア学会誌, Vol.71, No.6, pp.819-824(2017)