

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	放送用カメラの撮像特性改善及び小型化に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	島本洋
Author(English)	Hiroshi Shimamoto
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第7433号, 授与年月日:2008年9月25日, 学位の種別:課程博士, 審査員:羽鳥 好律
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第7433号, Conferred date:2008/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学 学位論文

放送用カメラの撮像特性改善  
及び小型化に関する研究

指導教員 羽鳥好律 教授

2008年9月

大学院総合理工学研究科 物理情報システム専攻  
島本 洋

# 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	2
第2章	放送用カメラの性能改善技術	6
2.1	はじめに	6
2.2	放送用カメラの主な性能と課題	6
2.3	ダイナミックレンジ拡大技術	8
2.3.1	複数の撮像素子による手法	9
2.3.2	複数回の撮像による手法	9
2.3.3	撮像素子自体の構造を変更する手法	12
2.4	時空間解像度改善技術	13
2.4.1	順次走査とインターレース走査の違い	14
2.4.2	順次走査-インターレース走査変換による画質改善	14
2.4.3	画素アパーチャによる垂直解像度の違い	16
2.5	小型化のための単板方式と色再現技術	19
2.5.1	3板撮像方式と単板撮像方式の違い	19
2.5.2	カラーテレビ系における色再現システム	23
2.5.3	リニアマトリクスによる色補正技術	24
2.6	まとめ	26
第3章	ダイナミックレンジ拡大技術の検討	31
3.1	はじめに	31
3.2	CMD 撮像素子によるダイナミックレンジ拡大手法	31
3.2.1	選択的画素リセットによるダイナミックレンジ拡大	31
3.2.2	CMD の任意画素リセット (ソースリセット法)	35
3.3	撮像実験	35
3.3.1	実験回路	35
3.3.2	ラインセンサを用いた実験	38

3.3.3	2次元センサを用いた実験 . . . . .	43
3.3.4	雑音特性の測定と考察 . . . . .	43
3.4	提案手法の応用と考察 . . . . .	47
3.4.1	高速電子シャッターへの応用 . . . . .	47
3.4.2	動画対応の課題 . . . . .	49
3.5	まとめ . . . . .	49
<b>第4章</b>	<b>時空間解像度改善技術の検討</b>	<b>52</b>
4.1	はじめに . . . . .	52
4.2	60フレーム/秒ハイビジョン順次走査映像の実現 . . . . .	53
4.2.1	M-FIT型CCDによる実現 . . . . .	53
4.2.2	FIT型CCDによる実現 . . . . .	55
4.2.3	水平CCDの高速駆動実験 . . . . .	58
4.2.4	撮像実験装置 . . . . .	60
4.3	撮影実験 . . . . .	63
4.3.1	垂直解像度特性の測定 . . . . .	63
4.3.2	走査変換による画質改善シミュレーション . . . . .	63
4.4	まとめ . . . . .	68
<b>第5章</b>	<b>放送用カメラの小型化技術の検討</b>	<b>71</b>
5.1	はじめに . . . . .	71
5.2	多画素撮像素子による放送品質小型単板カラーカメラの提案 . . . . .	72
5.2.1	890万画素単板カラーCMOS撮像素子 . . . . .	72
5.2.2	多画素撮像素子による単板方式の特徴 . . . . .	74
5.2.3	試作カメラ . . . . .	77
5.3	撮像実験 . . . . .	79
5.3.1	解像度特性の測定 . . . . .	79
5.3.2	雑音特性の測定 . . . . .	79
5.3.3	色再現特性の測定 . . . . .	81
5.4	色再現特性改善のシミュレーション実験 . . . . .	81
5.5	まとめ . . . . .	85
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>89</b>
	謝辞	91



# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景と目的

テレビジョンは、テレ(遠方)をビジョン(見る)、つまり居ながらにして遠方を見たいという人類の永年の千里眼願望を実現してきた。その際、よりリアルに遠方を見たい、つまりより高画質でテレビ画像を実現したいという欲求は、当然である。この欲求に応えるべく、これまでテレビジョンシステムは白黒からカラー、ハイビジョンへと臨場感を求めて進化してきた。さらに現在、ハイビジョンの16倍の解像度を持つ走査線4000本級の映像システム「スーパーハイビジョン」(Super Hi-Vision; SHV)が実用化を目指して研究されている [1][2]。テレビジョンの技術は、「見る」から、あたかもその場に居るような「現実感」を実現するものとなってきている。

テレビジョンシステムのなかで、画像入力装置であるテレビカメラも重要な役割を担ってきた。日本で初めて放送カメラが用いられたのは、1953年のNHK東京テレビジョン局本放送開始、イメージオルシコン撮像管 [3] を用いた白黒カメラであった。その後、カラー化、トランジスタ化、撮像素子のCCD(Charge Coupled Device)[4]化、高精細(High Definition; HD)化などの様々な進化を経て、現在では放送用ハイビジョンカメラの多くが2/3インチ220万画素3CCDとなっている。一方、CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)技術の発達によりCMOS撮像素子 [5][6]の性能も向上し、800万画素級CMOS撮像素子を用いたSHVカメラの開発 [7] や、さらには3300万画素の動画像カラー撮像実験も行われている [8]。

放送用カメラは、民生用ビデオカメラ等と比べて性能的には最も高位に属し、高い画質への要求を満たす必要がある。例えばダイナミックレンジでいえば、どのような撮影条件でも白とびや黒つぶれなく撮影できるカメラの要求は大変強い。これに対し、広いダイナミックレンジ特性を有する撮像素子も数多く開発されている [9] が、撮像素子の構造変更を伴う設計・開発は大きな負担となる。一方、現存の撮像素子を用いて系統的にダイナミックレンジを拡大する手法も解決策の有効な手段の一つと考えられるが、外部メモリを用いず簡易な回路で実現した例はない。また、カメラは順次走査によっても高画質化が図れる。これについては放送規格でも定められ [10] 実現が求められているが、放送用カメラに多く用いられているCCD撮像素子の場合、蓄積電荷を読み出し回路まで転送させるという構造から、画素数が増えるに従って撮像素子の駆動能力の負担が大きくなる。このよ

表 1.1: 放送用カメラの用途と応用例

用途、応用例	特徴、具体例
スタジオ用	高画質、多機能
ポータブル (EFP) 用	VTR 内蔵、使いやすさ
報道取材 (ENG) 用	小型、軽量
特殊撮影用	超高感度、高速度撮影など
簡易用	定点・天気カメラなど
医療応用	医療診断、手術など
情報取得	3次元形状検出など
映画	デジタルシネマ
宇宙	月周回衛星カメラ

うな CCD 撮像素子の高速駆動能力を検証することは、今後の高画質多画素 CCD 撮像素子の開発のためにも重要である。

一方、放送用カメラは主に放送局や番組制作プロダクションで用いられているが、高画質を追求し多くの調整機能を持つ高機能タイプのスタジオ用カメラだけではなく、報道取材用カメラや簡易用カメラなどにおいては、高画質でありながらより小型・軽量で使いやすい性能が求められている。また放送用カメラはその高画質や高信頼性により、番組制作だけでなく様々な分野でも活躍している（表 1.1）。例えば医療診断や手術などの医療応用 [11]、撮影を行ないながら被写体の 3 次元形状を検出する情報取得カメラ [12]、映画制作にフィルムカメラではなくビデオ機材を使うデジタルシネマ用カメラ [13]、また月周回衛星 “かぐや” にも搭載され宇宙より月面や「地球の出」映像を撮影している [14]。今後も放送用カメラの様々な応用が期待されている。

本研究の目的は、このような放送用カメラの高画質化、小型化、多様化に対応するべく、放送用カメラの撮像特性改善および小型化を実現することである。その具体的な技術として、撮像素子の構造に変更を加えずまた外部に画像メモリ回路を不要としたダイナミックレンジ拡大手法を提案する。また 200 万画素級 CCD 撮像素子の高速駆動実験を行い、ハイビジョン順次走査映像による時空間解像度改善について検証する。さらに放送品質を有する小型単板撮像方式を検討し、放送応用が可能な実用化カメラを試作する。これらの方式検討、駆動実験、カメラ試作を通して、放送用カメラの性能改善についての知見を得ることを目的とする。

## 1.2 本論文の構成と概要

本論文は 6 章から構成される。

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ている。

第2章では、従来の放送用カメラの性能改善技術について述べ、なかでも撮像特性改善の課題と小型化を図るための単板化の課題を明らかにし、それに対するこれまでの研究を整理するとともに、放送用カメラの性能改善に必要な研究の方向性を示す。

第3章では、ダイナミックレンジを拡大する手法として、CMD撮像素子を用い、増幅型撮像素子の特長である非破壊読み出しと高速駆動による複数回読み出しを行い、また1画素毎に選択的に蓄積電荷のリセット動作を行う手法により、撮像素子固有の特性を超えてダイナミックレンジを拡大する新しい撮像方式を提案する。またラインセンサおよび2次元センサを用いて実験を行いその効果を確認する。

第4章では、時空間解像度を改善する手法として、CCD撮像素子を用いた60フレーム/秒(60fps)での順次走査撮像方式を提案する。インターレース走査用2/3インチ220万画素FIT型CCDを用い、CCDの駆動方式を変更することにより順次走査を可能とする。また撮影した順次走査映像からインターレース走査変換するシミュレーション実験を行い、ハイビジョン映像のインターレース妨害が抑えられることを確認する。

第5章では、小型化を図る手法として、1.25インチ光学系890万画素単板カラーCMOS撮像素子を用いた放送用単板式カメラを提案する。ハイビジョンカラーカメラに必要な色信号について十分な画素数を持つとともに、イメージサイズを大きくすることにより、高い解像度特性を有することを示し、また試作カメラで感度特性も従来の放送用3板式CCDカメラと同等であることを示す。色再現特性については、シミュレーション実験によりリニアマトリクス処理による色再現特性改善が可能であることを示す。

第6章では、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、展望について述べる。

## 参考文献

- [1] F.Okano, M.Kanazawa, K.Mitani, K.Hamasaki, M.Sugawara, M.Seino, A.Mochimaru, K.Doi, “ Ultrahigh-Definition Television System with 4000 Scanning Lines, ” NAB BEC Proceedings, pp.437-440 (2004)
- [2] 野尻裕司, ”スーパーハイビジョン概要”, 映情メ学会誌, vol.61, no.5, pp.596-598 (2007)
- [3] A. Rose, et al., ”The Image Orthicon A Sensitive Television Pickup Tube”, Proc. IRE (1946)
- [4] W. S. Boyle, G. E. Smith, ”Charge Coupled Semiconductor Devices”, BSTJ, 49 (1970)
- [5] E.R. Fossum, ”CMOS Image Sensors : Electronic Camera-On-A-Chip”, IEEE Trans. on Electron Devices, 44, 10 (1997)
- [6] F.Ando, K.Taketoshi, J.Yamazaki, M.Sugawara, Y.Fujita, K.Mitani, Y.Matsuzawa, K.Miyata and S.Araki, ”A 250,000 pixel image sensor with FET amplification at each pixel for high speed television cameras”, ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 212-213 (1990)
- [7] H.Shimamoto, T.Yamashita, N.Koga, K.Mitani, M.Sugawara, F.Okano, M.Matsuoka, J.Shimura,I.Yamamoto, T.Tsukamoto, S.Yahagi, “ An 8k x 4k Ultrahigh-Definition Color Video Camera with 8M-pixel CMOS Imager ”, SMPTE Motion Imaging Journal, July/August, pp.260-268 (2005)
- [8] <http://www.nhk.or.jp/strl/open2008/>
- [9] 須川成利, ”広ダイナミックレンジイメージ センサの最新動向”, 映情メ学会誌, Vol. 60 , No. 3 pp.299-302 (2006)
- [10] ITU-R Recommendation BT.709-4: ”Parameter Values for the HDTV Standards for Production and International Programme Exchange” (1990-2000) など

- [11] 吉田哲男, 浮ヶ谷文雄, 谷岡健吉, ”超高感度 HARP カメラの開発とその応用”, 日立評論, Vol.89 No.04 376-377 (2007)
- [12] M. Kawakita, K. Iizuka, T. Aida, H. Kikuchi, H. Fujikake, J. Yonai, and K. Takizawa, ”Axi-vision camera (Real-Time Distance- Mapping Camera)”, Applied Optics, 39, pp.3931- 3939 (2000)
- [13] 三上泰彦, ”デジタルシネマ用カメラ～1080/24P 対応デジタルカムコーダー:HDW-F900～”, 映情メ学会誌, Vol.55, No.7, pp.960-962 (2001)
- [14] 三橋政次, 山崎順一, 山内正仁, 太刀野順一, ”月探査衛星かぐや(セレーネ)搭載ハイビジョンカメラシステム”, 映情学技報 (2008)

## 第2章 放送用カメラの性能改善技術

### 2.1 はじめに

ここでは放送用カメラの性能改善技術について整理するとともに、なかでも撮像特性改善の課題と、小型化を図るための単板化の課題を明らかにし、それに対する放送用カメラの性能改善に必要な研究の方向性を示す。

### 2.2 放送用カメラの主な性能と課題

放送業務用カメラの性能を決定する項目は多岐にわたるが [1][2]、そのなかで主な項目を表 2.1 に示し、以下説明する。

感度、SN 比はテレビカメラにとって重要な要素である。テレビカメラの感度は、基準信号を得るのに必要な光量で示され、2000lux の照明下で、規定された反射率の白パターンを撮像し、100%信号出力が得られたときの撮像レンズの絞り値 (F ナンバ) で示す。このとき、出力の中にノイズが多く含まれれば感度が良いとは言えないので、SN 比と共に表記される。例えば、放送用ハイビジョンカメラの標準的な数値としては、レンズ絞り F10、SN 比 54~56dB である。カメラの感度は、レンズの明るさ、色分解光学系やオンチップカラーフィルタの分光透過特性、撮像素子の感度で決定される。従って、それぞれのデバイス固有の性能に因るところが大きい。また SN 比を左右する雑音は、リセット雑音、FDA (読み出し) アンプ雑音、暗電流雑音、固定パターン雑音などの撮像素子の構成や性能に因る部分、外部回路のアンプ雑音や飛び込み雑音などのシステム設計に因る部分、光ショット雑音など物理法則に因る部分、などがある。近年では AD 変換回路を内蔵したデジタル撮像素子も開発されており [3]、アナログ回路設計で苦労したアンプ周波数特性や飛び込み雑音などの影響は大幅に軽減されつつあり、やはりデバイスの性能によるところが大きい。本研究では撮像素子自体の開発については言及しないが、第 5 章のハイビジョン単板カメラでは、メーカーと協力して開発された高性能 CMOS 撮像素子を用い信号処理と合わせて、光の利用効率が原理的に低い単板式ながら 3 板式放送用 CCD カメラと同等の感度、SN 比を実現している。

ダイナミックレンジとは、カメラが撮影できる明るい部分と暗い部分の差である。人間の視覚がもつダイナミックレンジはおよそ 100~120dB と言われているのに対し、一般の

表 2.1: カメラの性能を決定する主な項目

項目	放送用ハイビジョンカメラの性能例	本研究での目標値
感度	2000lux, F10	F11
信号対雑音比 (SN 比)	54 ~ 56dB	60dB
ダイナミックレンジ	70 ~ 80dB	従来の 2 倍*
解像度 (空間解像度・時間解像度)	30 フレーム/秒 (60 フィールド/秒)	60 フレーム/秒**
機動性/操作性 (小型化)	約 3kg ~ 7kg (レンズ含む)	約 2kg
色再現	BT.709[29] 等で規定	単板式で 3 板相当

( \*第 3 章、\*\*第 4 章で個別に検討、その他は第 5 章で検討 )

撮像素子が実現できる範囲は概ね 70 ~ 80dB 程度である [4]。また放送用カメラの場合、撮像素子で撮影できる白ピークに対しガンマ処理、ニー・スロープ処理、ホワイトクリップ処理と呼ばれるプロセス回路でその 1/6 程度にダイナミックレンジを圧縮する。従って、例えば逆光での人物映像や室内からの窓越し映像など被写体の明るい部分と暗い部分の差が大きい場面を撮影するとき、両者を同時に適正露光で撮影するためには、ダイナミックレンジの広い撮像技術が求められる。さらに、テレビジョン画像だけでなく、車載、監視、FA などの分野では、人間の視覚を超えるようなダイナミックレンジ拡大技術も求められている [5][6]。

解像度とは通常、画像の細かさ、すなわち空間周波数特性を指す。これは、光学系 (レンズや光学 LPF) の MTF、撮像デバイスの MTF (画素数、画素開口率、CCD の転送効率など)、システム (撮像方式、プロセス回路の周波数特性、電気的フィルター特性、信号出力フォーマットなど) によって決定される。しかしながらテレビジョンは動画であり、2次元平面上の解像度だけでなく、動く被写体に対する解像度、すなわち時間解像度も含まれる (これらを合わせて、時空間解像度とも呼ばれる)。これまでテレビジョン放送では、動画を奇数ラインと偶数ラインの 2 つのフィールド画像に分けて撮影、伝送するインターレース走査 (飛び越し走査とも呼ばれる) 方式が採られてきたが、1 秒間に 60 フレームの順次走査 (プログレッシブ走査とも呼ばれる) カメラを用いることにより、より高画質な順次走査映像が得られるだけでなく、撮像画像をインターレース走査信号に変換しても高画質な映像が得られるようになる。

機動性、操作性は様々な項目が含まれるが、その中でも小型化は、カメラの機動性を決定する大きな要因である。放送用カメラとして主に用いられている 3 板式では、高画質なカラー信号を得るために色分解光学系と 3 つの撮像素子を用いている。このとき、光学プリ

ズムおよび複数の撮像素子、チャンネルごとの信号処理回路などが小型化の妨げの一因となる。さらに3板式では、レンズも光学プリズムに適したものを使用する必要があり、カメラ全体としても小型化が困難であり、また価格も高価なものであった。一方民生用カメラでは小型・低価格化を主な理由として、多くが単板方式を採用している。しかしながらこれまでの単板式カメラは、画素数が十分でなく放送品質の解像度が得られないなどの課題があった。そこで放送用品質を備えた小型単板カメラの実現が求められている。

また、色再現は、光源の分光放射特性、被写体の分光反射率、レンズの分光透過率、色分解光学系（分光プリズム）やカラーフィルタ、撮像素子の分光感度、などによって決定される。放送用3板式カメラでは、放送で用いられている基準光源や撮像素子の分光感度特性などを考慮して分解光学系の設計が図られている。一方これまで放送用カメラでは特殊用途を除いてほとんど用いられてこなかった単板式カメラでは、一般に分光感度特性が3板式と異なるため、色再現特性が3板式と揃わない課題があった。

本研究ではここで挙げた項目のなかで、放送用カメラの撮像特性改善として特にダイナミックレンジ拡大技術、順次走査による時空間解像度改善技術、そして小型化の技術として単板撮像技術について検討を行う。つぎに、これらの項目について、具体的な技術について詳しく説明する。

## 2.3 ダイナミックレンジ拡大技術

ダイナミックレンジを拡大する技術として、撮像デバイスそのものの性能向上努力もなされているが [4]、感度向上とダイナミックレンジ確保はトレードオフの関係にあり、両者を同時に実現することは困難を伴う。さらにテレビジョン画像だけでなく、車載、監視、FAなどの分野でもカメラ画像は重要な役割を果たしており、より明暗の差が大きい条件の元でも良好な撮像が望まれている [5][6]。そこで、撮像素子の撮像特性の限界を超えるような広ダイナミックレンジを実現するいくつかの技術がこれまで検討されている [7]~[10]。

このようなダイナミックレンジ拡大の基本的な考え方は、明るい画像と暗い画像など複数の画像を撮像し、それぞれの画像から適当な露光量で撮影されている領域を抜き出して合成するものである（図 2.1）。複数の画像取得には大きく2つの手法、すなわち複数の撮像素子による撮像方式と、一つの撮像素子で複数回の撮像を行う方式がある [2]。一方、ダイナミックレンジ拡大のもう一つの考え方として、撮像素子自体の構造に変更を加える方法もある。それぞれの手法について表 2.2 に特徴をまとめる。

表 2.2: 主なダイナミックレンジ拡大技術と特徴

手 法	動画対応	多板化	メモリ不要	現行素子
複数撮像素子				
( CCD 電子シャッタ )			×	
複数回撮像 ( MOS 型非破壊読出 )			×	
( CMD 提案手法 )				
素子構造変更				×

### 2.3.1 複数の撮像素子による手法

撮像画像を光学ビームスプリットプリズムを用いて異なる光強度に分光し、複数の撮像素子で撮像し、取得した画像を合成処理する手法である（図 2.2）。撮影画像内に強い入射光量部分があり通常の撮像素子では飽和してしまう場合でも、ビームスプリットプリズムによりコントラストを減じた方の撮像画像を用い、広ダイナミックレンジ画像を取得する [7]。複数の撮像素子で同時に撮像するため、動画像に対しても時間的な差を生じることなく広ダイナミックレンジ画像を取得可能である。その一方、光学プリズムを用いるため一般には多板化に困難を伴う（4板式により多板化に成功した例もある [11]）。

### 2.3.2 複数回の撮像による手法

1枚の撮像素子で複数回の撮像によりダイナミックレンジを広げる手法で、撮像素子の電子シャッタ機能を利用し通常露光時間での撮影と短露光時間での撮影を行うものである。ここでは、CCDのグローバル電子シャッタによる方式と、MOS型撮像素子による非破壊読み出し方式について述べ、本研究で提案するCMDソースリセット方式との違いについ

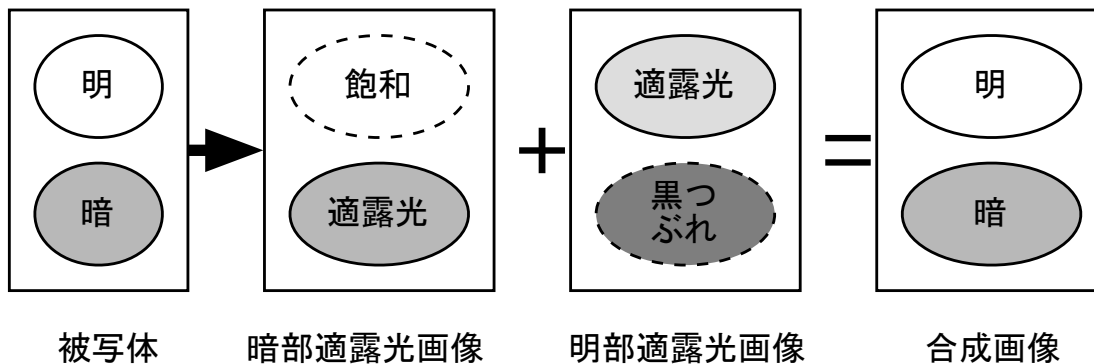


図 2.1: ダイナミックレンジ拡大の基本概念

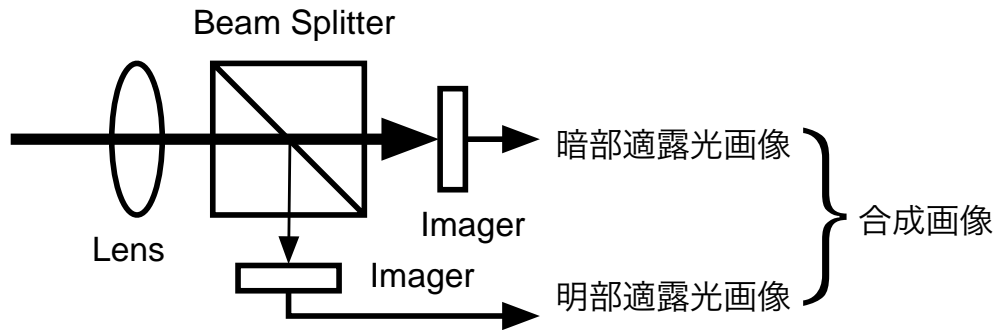


図 2.2: ビームスプリットプリズムによるダイナミックレンジ拡大原理

て説明する。

#### CCD グローバル電子シャッタによる多数回読み出し方式

この手法は、電子シャッタ等を利用して、時系列に異なる露光量の画像を撮像し、複数の画像から合成処理で広ダイナミックレンジ画像を取得するものである [8]。その概念図を図 2.3(CCD) に示す (一般には複数回による撮影だがここでは説明のため 2 回撮影の例を示す)。CCD のグローバル電子シャッタ動作を利用し、例えば 1/60 秒毎に短露光時間画像と長露光時間画像を、2 回に分けて撮像、読み出しを行い、一旦画像メモリに保存した後、それぞれの蓄積時間画像から 1 つの広ダイナミックレンジ画像を合成し、出力する。ただしこの場合、各画像は時系列に得られるため、合成画像は 2 フレーム毎に 1 枚しか得られない。また動画像に対しては撮影画像の撮影時間が異なるため合成する画像が一致せず、ぶれた画像となる場合がある、などの課題が残る。

#### MOS 型撮像素子による非破壊読み出し方式

先に述べた CCD による手法は、信号を読み出した後で一旦全画素をリセットし初期状態に戻してから次の蓄積動作を継続する方法であったが、MOS 型撮像素子では CCD のように電荷転送を行わないため、フォトダイオードに蓄積された電荷をリセットしない限り何回でも読み出しが可能な非破壊読み出し動作が可能である。その特長を活かし、ダイナミックレンジを拡大しようとする手法である [9]。概念図を図 2.3(CMD/CMOS) に示す。

この手法を用いることにより、短時間露光画像と長時間露光画像は同じフレーム期間内に得ることが可能となり、前述の動画像に対するフレーム周波数の低下や画像ぶれの影響を抑えることができる。ただし蓄積時間途中で一旦全ての画像を読み出し保存するため、外部に AD コンバータおよびそのビット深さに応じた全画面分の画像メモリが必要である

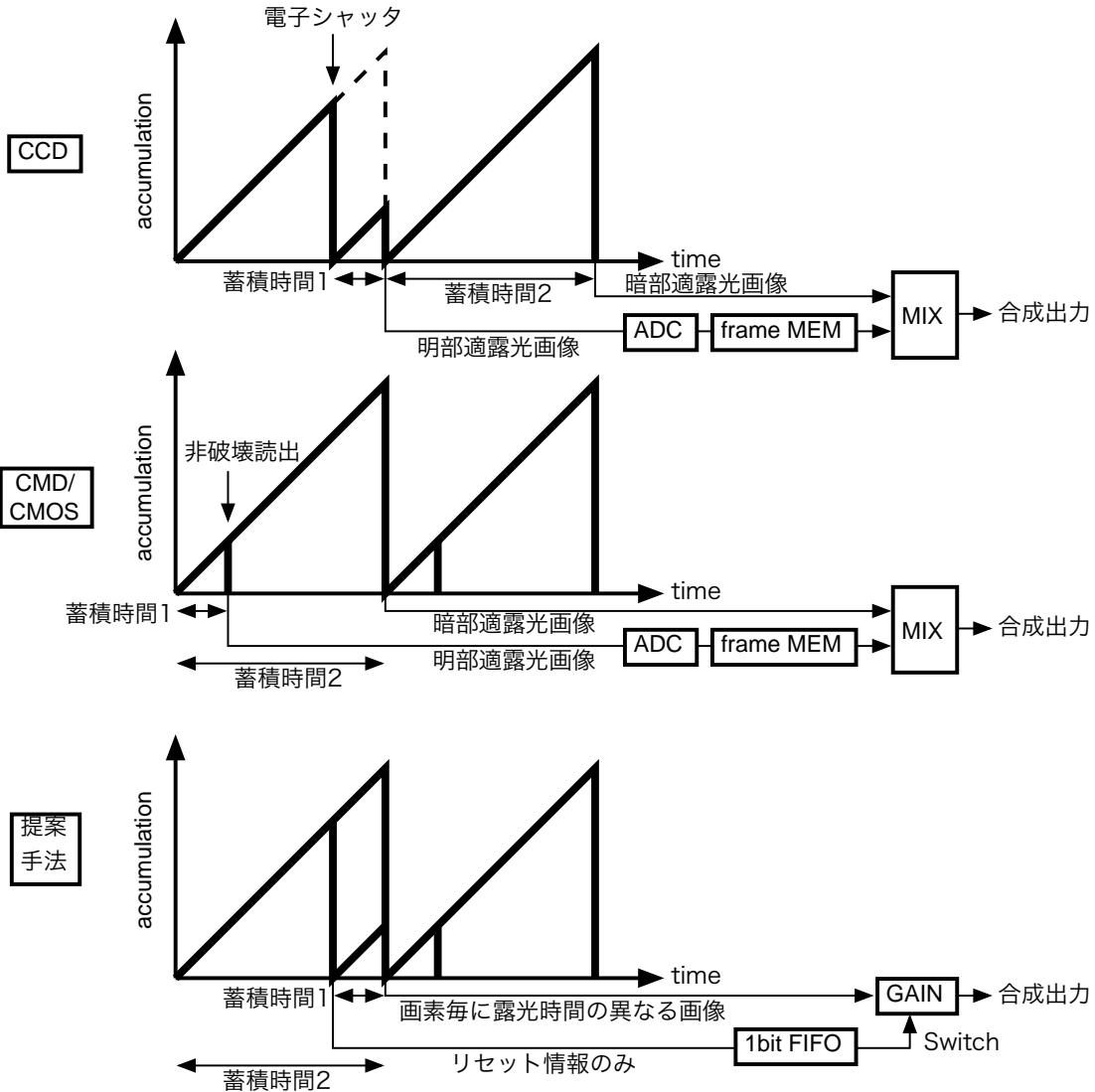


図 2.3: ダイナミックレンジ拡大方式概念図

ことは、前述の CCD の方式と同じである。

### CMD 撮像素子によるソースリセット方式

本手法では基本的な動作原理は前述の非破壊読み出し方式と同様であるが、ソースリセット法 [12] (第3章で詳述) により 1 画素毎のリセット動作制御が可能となっている。従って、蓄積期間途中の読み出し時に画像そのものをフレームメモリに保存するのではなく、読み出し画像の信号レベルによって 1 画素毎に蓄積電荷のリセット実行/不実行を判定し、そのリセットの有無情報のみを保存することができる。蓄積時間終了後の読み出し時には、保存してあったリセット情報を用いて画像を合成する (図 2.3(提案手法))。画像メモリを用いないため AD コンバータを必要とせず外部メモリも簡易で済み、また合成画像も実時間で処理できるため、広ダイナミックレンジ画像をアナログ信号のまま出力することも可能である [10]。

#### 2.3.3 撮像素子自体の構造を変更する手法

撮像素子自体の構造に変更を加える手法としては、例えば MOSFET のサブスレッショルド特性を利用して光電流を対数圧縮して電圧信号に変換し、ダイナミックレンジを拡大する手法がある [13][14]。ただしフォトダイオードの暗電流の低減、低照度側の応答速度の向上、対数圧縮の温度特性の補正などが課題となっている。また、画素内に低照度用と高照度用の感度の異なるフォトダイオードを設置する方法 [15] や、長短 2 回の露光時間で得られた光信号電荷を垂直 CCD でそれぞれ転送する方法 [16] によって、2 種類の蓄積電荷量を得て合成によってダイナミックレンジを拡大する手法がある。

さらに進んだ手法として、CMOS 撮像素子の利点を生かし信号処理機能を撮像素子に内蔵する、インテリジェント撮像素子がある。例えば、撮像素子内に列並列で信号処理回路を内蔵し、画像の明るさや動きに対して 1 画素毎に蓄積時間を適応的に制御することにより、ダイナミックレンジ拡大や動きぼけ抑圧を可能としている [17]。また少し概念が異なる手法では、1bit デジタルセンサがある。これは各画素のフォトダイオードに、蓄積電荷量が一定量に達した時に自己リセットするような回路とリセット数をカウントする回路を内蔵し、カウンタ数を出力することにより、フォトダイオードの蓄積電荷容量にかかわらず広ダイナミックレンジを得る [18]。

ただし、撮像素子の構造に変更を加える場合、現行の撮像素子をそのまま用いることは出来ない。また一般には、ダイナミックレンジを大幅に拡大するために撮像素子を設計する場合、感度、SN 比を優先して設計している放送用カメラの撮像素子とは設計目標が異なり、両者を兼ね備える性能の実現は困難を伴う。

表 2.3: HDTV (走査線 1125 本) スタジオ規格

垂直有効 走査線数	水平 画素数	フレームレート (Hz)	走査方式	表記	備考
1080	1920	60	プログレッシブ	1080/60p	
1080	1920	30(60 フィールド)	インターレース	1080/60i	ハイビジョン
1080	1920	50	プログレッシブ	1080/50p	欧州
1080	1920	25(50 フィールド)	インターレース	1080/50i	欧州
1080	1920	30	プログレッシブ	1080/30p	
1080	1920	24	プログレッシブ	1080/24p	映画
1035	1920	30(60 フィールド)	インターレース	1035/60i	旧規格

フレーム/フィールドレートは、60Hz は 59.94、30Hz は 29.97、24Hz は 23.98 を含む  
規格参照：SMPTE 274M、ITU-R BT.709、BTA-S001B

## 2.4 時空間解像度改善技術

2.2 節でも述べたように、テレビジョンは動画像であり、2次元平面上の解像度だけでなく、動く被写体に対する解像度、すなわち時間解像度も含まれる。ここで時間解像度とはフレーム周波数のことであるが、さらにテレビジョン放送では、1枚のフレーム画像を、走査線数を半分に間引いた2枚のフィールド画像に分けて伝送する、インターレース走査方式が採られている。

表 2.3 に、走査線 1125 本の HDTV スタジオ規格を示す [19][20]。現在の HDTV 規格では、画像の画素数は水平が 1920 画素、垂直有効走査線数が 1080 ラインと定められている(旧規格では 1035 ラインもあった)。一方フレームレートは 60~24Hz まで、さまざまな周波数が規定されている。また走査方式も、順次走査(プログレッシブ走査)とインターレース走査が両立している。このなかで、最も標準的なフォーマットが、フレーム周波数 30Hz(フィールド周波数 60Hz)でインターレース走査の「1080/60i」である。日本ではハイビジョンという愛称で呼ばれている。

インターレース走査方式は少ない伝送信号帯域で動解像度を上げる優れた手法であるが、近年テレビジョンの解像度が向上し、またコンピューターやデジタル信号処理装置の処理能力も向上し、静止画像や動画でより高画質が得られるプログレッシブ走査、すなわち「1080/60p」も求められるようになってきた。つぎに、このテレビの走査を時間と空間の標本化ととらえ、時空間周波数領域で解析する。

### 2.4.1 順次走査とインターレース走査の違い

順次走査、インターレース走査の信号は、垂直・時間方向の領域では図 2.4 のように表示できる [21]。したがって、走査はこの領域での標本化に相当する。時間方向に標本化されたのがフレーム（フィールド）で、垂直方向の標本化が走査線である。このため、垂直周波数  $\nu$  (cph : cycles per height、画面高あたりの周波数)、時間周波数  $f$  (Hz) の  $f - \nu$  周波数領域では、図 2.5 のようなスペクトルが発生する。具体的には、走査線数 1125 本、60 フレーム/秒の順次走査系では、基本周波数が  $\nu=1125$  cph、 $f=60$  Hz の位置となる。一方、走査線数 1125 本、60 フィールド/秒（30 フレーム/秒）のインターレース走査系では、フィールドごとに走査線番号が奇数/偶数で変化するため、走査線によるサンプル位置も、順次走査の格子状に比べてオフセット状となる。そのため、その標本化周波数は順次走査のスペクトルに加え、 $\nu=1125/2$  cph、 $f=30$  Hz を基本周波数とする位置にもスペクトルが発生する。

このとき、折り返し歪を生じない  $f - \nu$  信号帯域は、HDTV 順次走査の場合  $f=30$ Hz、 $\nu=1125/2$  cph 以内となる（図 2.5 斜線部分）。一方インターレース走査では、 $f - \nu$  信号帯域は図 2.5(b) に示すように順次走査の半分の領域となる。

図 2.6 はインターレース走査の  $f - \nu$  周波数領域における画像信号成分の周波数スペクトル例である。同図に示す S 領域は主に静止画像の周波数スペクトルを示し、M 領域は主に動画像の周波数スペクトルを示す。このように画像の周波数スペクトルが、同図点線に示すインターレース走査によるナイキスト領域の十分内側の成分をもつ画像であれば問題はないが、垂直周波数も時間周波数も高い画像、例えばアナウンサーの服に横縞模様があり人物やカメラが垂直方向に動いた映像などでは、周波数スペクトルがインターレース走査のナイキスト領域を超える場合があり、そのときには折り返し成分が低い周波数のちらつきとなって現れ、いわゆるインターレース妨害となって視覚的に検知されてしまう。

### 2.4.2 順次走査-インターレース走査変換による画質改善

インターレース妨害を解決する手段として、順次-インターレース走査変換における帯域制限がある [22] ~ [24]。これは、インターレース走査よりも広いナイキスト領域を有する順次走査カメラで撮像した後、図 2.5(b) の斜線に示すような特性の帯域制限を電氣的に行うことによって、インターレース走査で折り返し歪となる成分を除去するものである。帯域制限によってインターレース走査の帯域となった映像は、その後サブサンプルを行ってインターレース信号に変換してもスペクトルは相互に重複せず、すなわち折返し歪が抑圧されたハイビジョン映像を得ることができる。

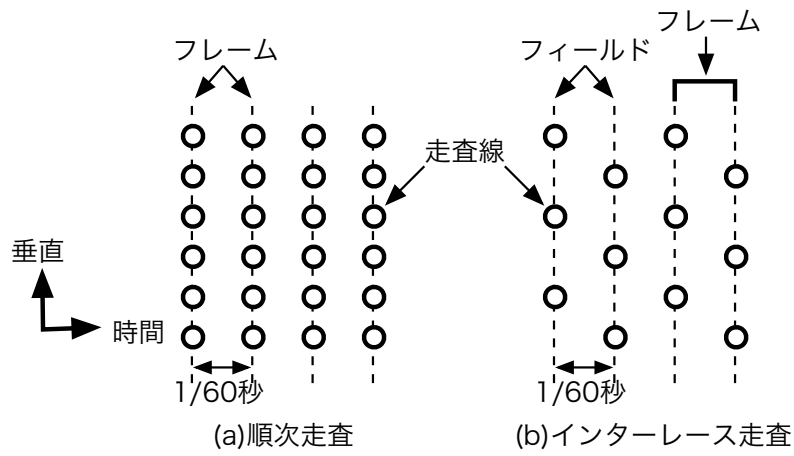


図 2.4: テレビの走査による時空間サンプル点

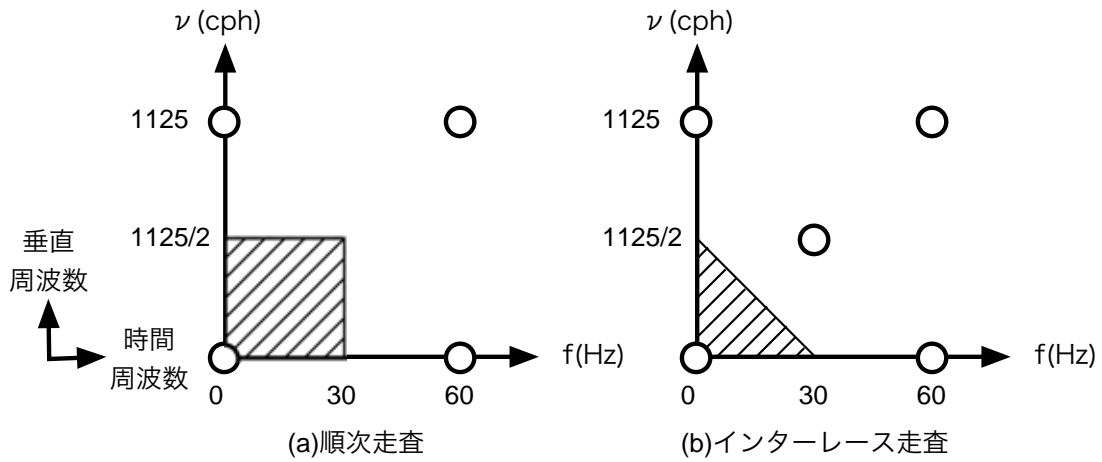


図 2.5: 走査方式による時空間スペクトル

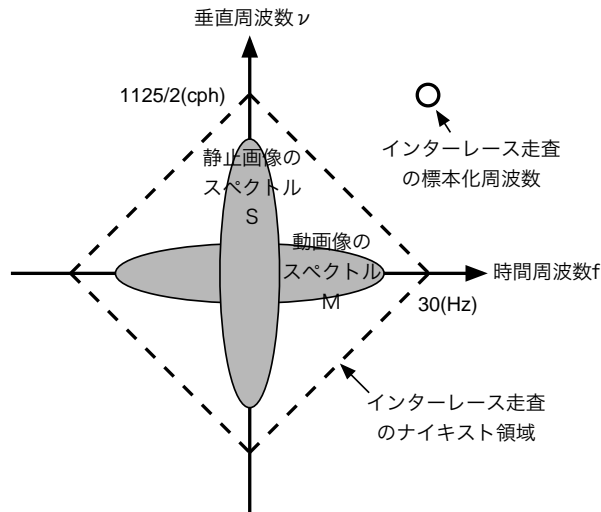


図 2.6: インターレース走査画像の時空間スペクトル

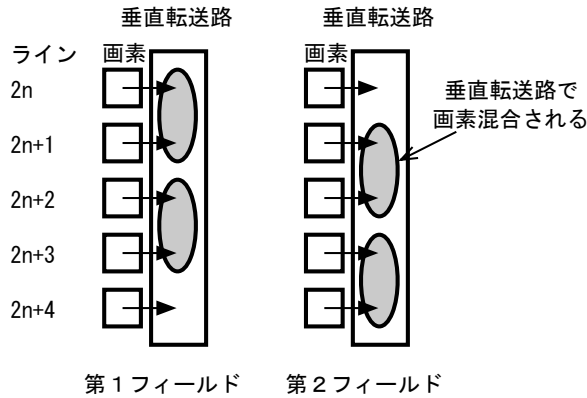


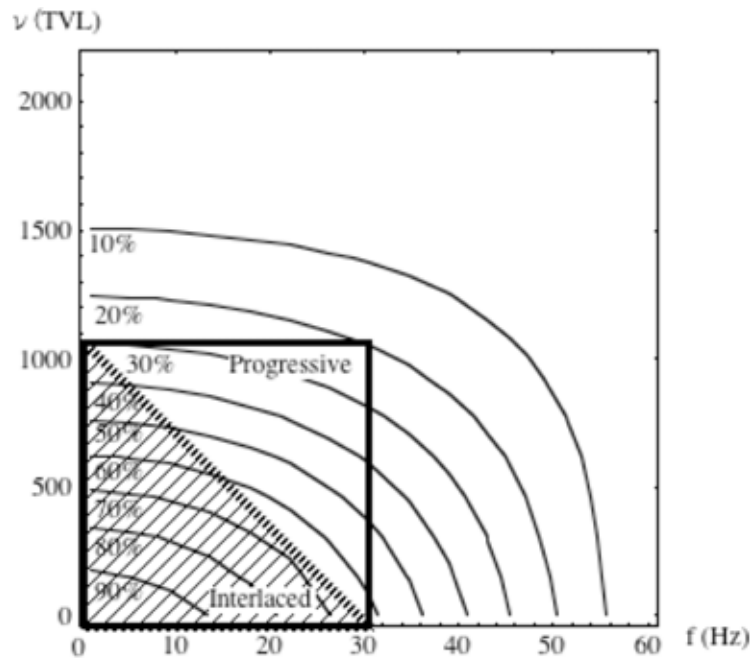
図 2.7: インターレース用 CCD の垂直転送路における垂直 2 画素混合

### 2.4.3 画素アパーチャによる垂直解像度の違い

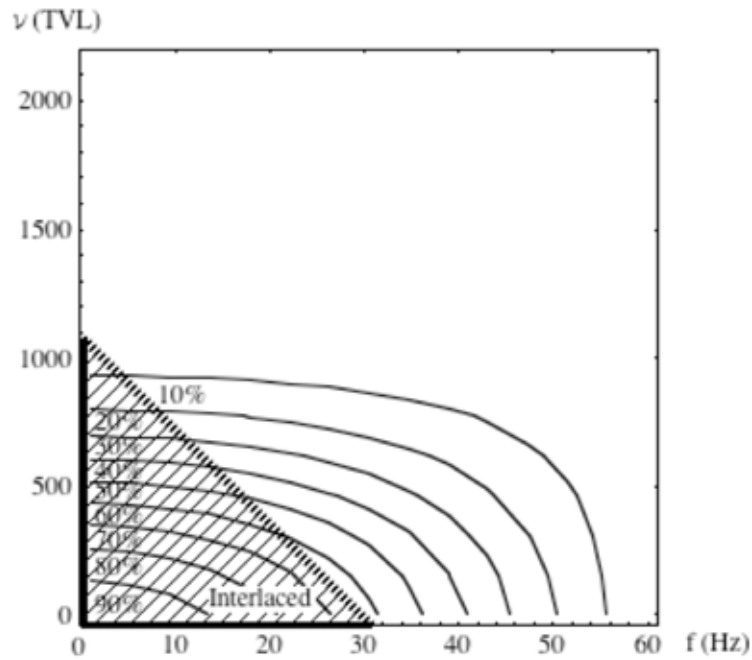
インターレース走査ではナイキスト周波数領域が狭いことに加え、インターレース用 CCD カメラでは通常、感度向上を目的として垂直方向に隣接した 2 つの画素電荷を CCD 内の垂直転送路で混合することを行う (図 2.7)。そのため、垂直方向の開口面積が 2 画素分となり、垂直解像度 (変調度) が低下する。順次走査とインターレース走査のそれぞれの場合について、CCD カメラの MTF (Modulation Transfer Function) を計算したものを図 2.8 に示す。ここで計算には、カメラの垂直解像度として理想レンズの回折限界、光学ローパスフィルター (LPF)、垂直画素アパーチャを、また時間変調度として蓄積時間アパーチャを考慮した。

図 2.8(a) は順次走査の場合で、レンズ絞り  $F=5.6$ 、光学 LPF は空間周波数 2160TV 本をヌル、垂直画素アパーチャを 100%、時間アパーチャを 100%として計算した。一方、図 2.8(b) はインターレース走査を想定した場合である。ここで、インターレース走査の垂直走査線はフィールド毎に位置が変わるが、静止画として1つのフレームで見たときの垂直解像度がどの程度低下するかは明確にはなっておらず、一般には有効走査線数の 0.7 倍程度（この数値をケル係数  $K$  と言う）と言われている。ここでは計算のため1フィールドのみの場合を想定し、垂直画素アパーチャを 200%として計算した。斜線部分はインターレース走査の帯域を示す。この場合、例えば同じ 700TV 本の静止画でも、インターレース走査で撮影した場合は約 30%の MTF 特性であるが、順次走査で撮像しインターレース走査信号に変換した場合は、約 50%の MTF 特性が得られることになる。

このように同じ帯域内でも順次走査映像は MTF が高いため、理想的な帯域制限を行えばインターレース走査へ変換した映像でも高い MTF 特性（垂直変調度）が得られる。



(a) Progressive scanning  
(vertical aperture=100%)



(b) Interlaced scanning  
(vertical aperture=200%)

図 2.8: 時間-垂直 MTF 特性とインタレース帯域

## 2.5 小型化のための単板方式と色再現技術

カラーカメラに用いられている主な撮像方式には、3板撮像方式（3板式）と単板撮像方式（単板式）がある。これまで放送業務用カメラには、光学プリズムを用いる3板式が多く用いられていた。一方カメラの小型化を図るためには体積・重量ともに大きなウエイトを占める光学プリズムを排除した単板式の採用が有力である。しかしながら単板式カメラの多くは十分な解像度特性や感度特性が得られず、放送用カメラとしては特殊用途を除いてほとんど用いられてこなかった。

ここでは放送用カメラの小型化に有効な単板カラー撮像方式について、3板式との違いを明らかにするとともに、課題について述べる。

### 2.5.1 3板撮像方式と単板撮像方式の違い

3板式は、図 2.9 に示すような構成の色分解プリズムを用い、撮像画像を RGB の色成分に分解しそれぞれの色成分画像を 3 個の撮像素子で撮像する。ここで、各色成分の分離には、ダイクロイック膜が用いられている。これは、特定の光波長域を反射しそれ以外の波長域は透過するように設計された多層干渉膜である。従って図 2.9 の場合、入射光はまず第 1 の干渉膜で青色だけを反射し、その他の緑、赤色は膜を通過する。次に第 2 の干渉膜で赤色だけを反射し、残りの緑色は通過する。

このように、3板式ではプリズム内のダイクロイック膜の反射によって RGB の光の 3 原色に分光するため、基本的には光の吸収がほとんど発生せず、光の利用効率が大変優れている。また各色チャンネルごとにトリミングフィルタを入れることにより、ダイクロイック膜だけでは十分に分解できなかった混色を除き、分光特性の立ち上がり、立ち下がりも調整することが可能である。3板式プリズムの総合特性例を図 2.10 に示す [25]。

一方単板式は、撮像素子の表面に画素毎に原色 RGB や補色の黄色 (Ye)、シアン (Cy)、マゼンタ (Mg) などの色フィルタアレイを設け、1 枚の撮像素子でカラー情報が同時に得られるものである (図 2.11)。色フィルタは、撮像素子の表面にたとえば顔料や染料によるカラーレジスト層で形成されている。単板方式は色分解光学系を用いないため、小型化や量産化が比較的容易であるが、各色フィルタは透過帯域以外の光を吸収してしまうため、例えば原色フィルタでは R,G,B とともに光の利用効率は 1/3 と、3板式と比べて原理的に低くなる。RGB 原色フィルタにおける分光透過特性の例を図 2.12 に示す。

また単板式では一つの撮像素子に色信号を割り振るため、一般には3板式と比べ各色信号の画素数は少なくなる。そのため、多くの単板式カメラでは補間処理を行う必要がある。この補間処理には現在でも様々な試みがなされている (表 2.4[26]), [27] が、例えば色の付いた細かい画像では補間処理が困難であるなど、なかなか決定的な技術には至っていない。

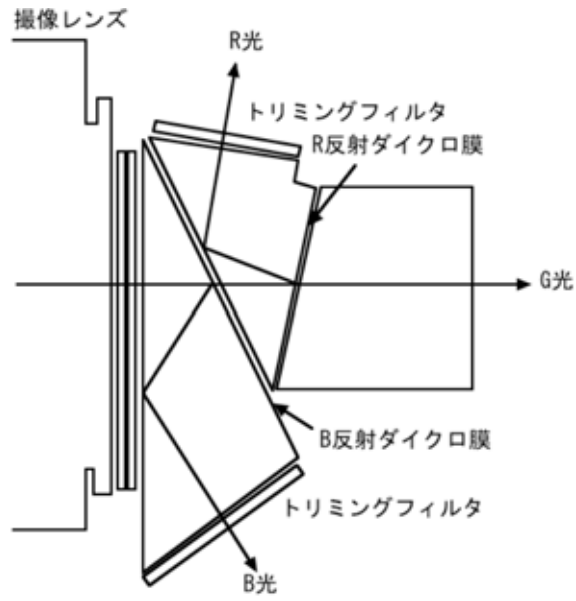


図 2.9: 3板式色分解プリズム

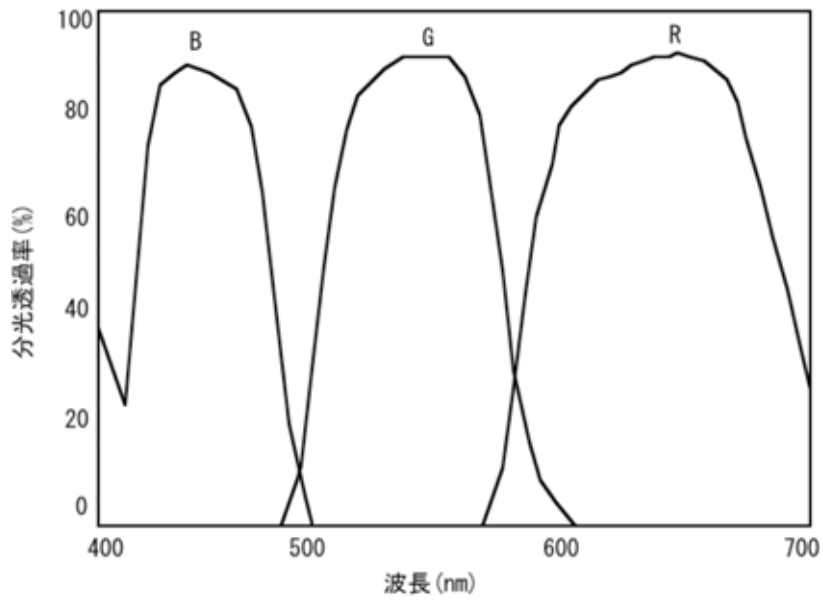


図 2.10: 3板式プリズムの総合分光特性例 [25]

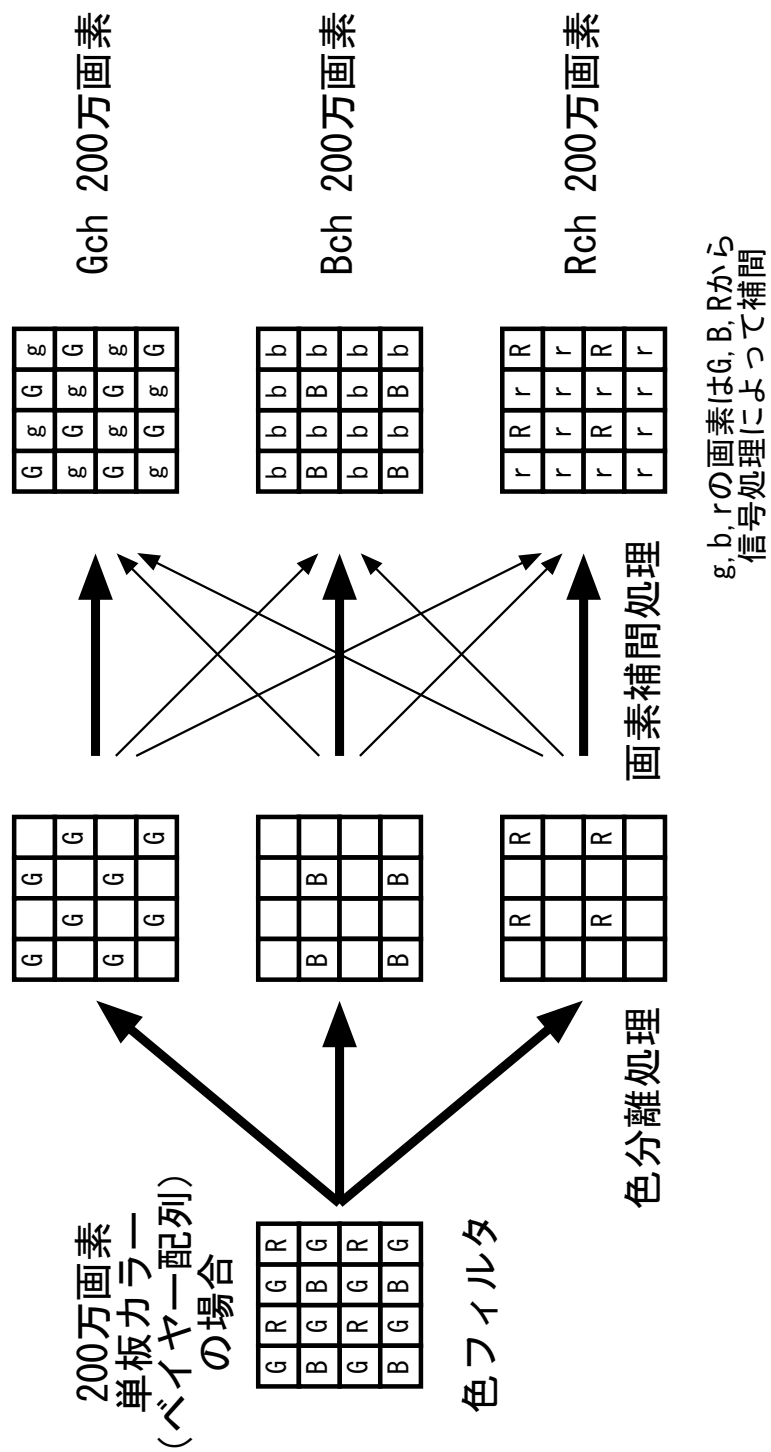


図 2.11: 単板式の色分離処理と画素補間処理の概念図

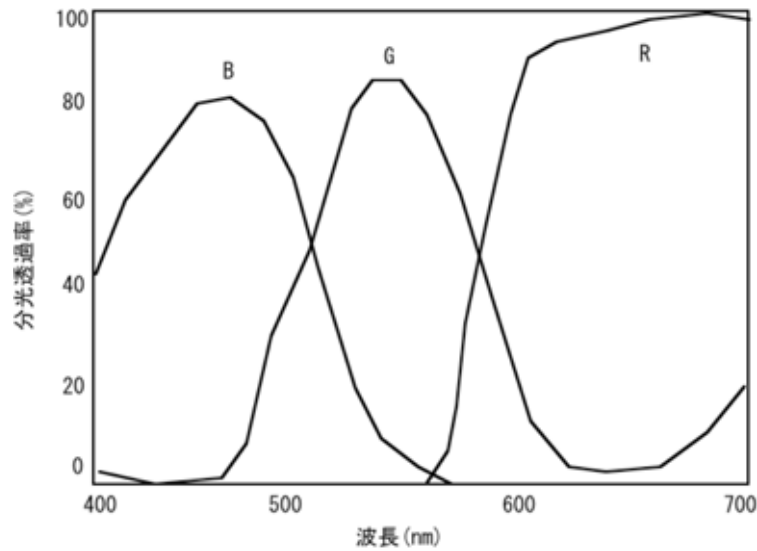


図 2.12: 原色フィルタの分光透過特性例

また補間処理の画質を高めようとするほど処理が複雑でハードウェア化が困難であったり、画像によって補間処理結果が異なる場合もあるため、高画質で実時間処理が求められる放送用カメラでは補間処理はまだ検討が十分でないという考え方もある。本研究では単板ハイビジョンカメラとして 890 万画素の撮像素子を用いることにより十分な色画素数を有し、補間処理は行わずに画像出力を可能とする。

表 2.4: 単板式カメラの補間処理手法例 [26]

- Bi-linear interpolation
- Constant hue-based interpolation
- Gradient-based interpolation
- Adaptive color plan interpolation
- Weighted average interpolation based on the color-ratio rule
- Weighted average interpolation based on the color-difference rule
- Homogeneity-directed interpolation
- Primary-consistent soft-decision
- Luminance-based interpolation
- Improved luminance-based interpolation
- Projection onto convex sets approach
- Successive approximation

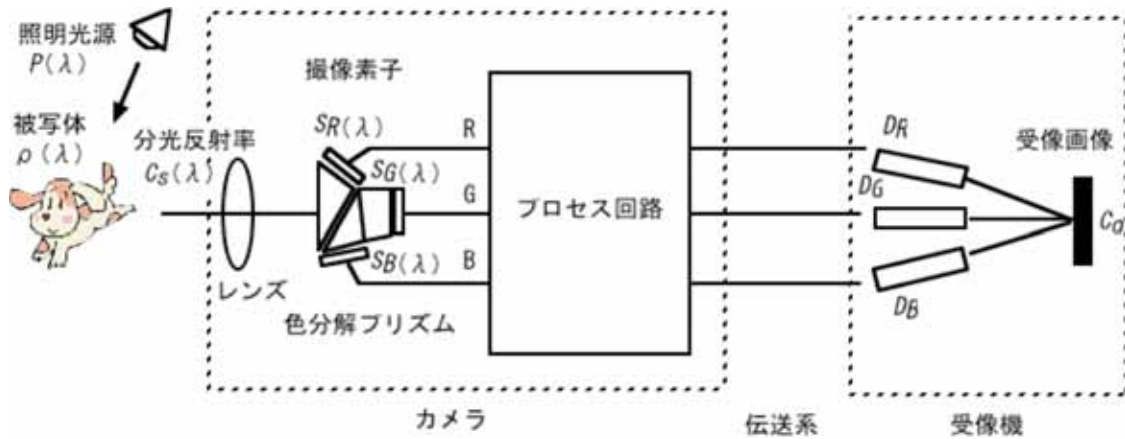


図 2.13: カラーテレビ系における色再現システム模式図

### 2.5.2 カラーテレビ系における色再現システム

前節で述べたように、3板式と単板式では一般に分光特性が異なるため、撮像された映像の色再現特性が異なる。ここでは、カラーテレビ系における色再現システムについて説明する。

図 2.13 は、3板式を例とし色再現システムを模式的に示したものである。被写体は、照明や太陽などの光源によって照らされ、その反射光がカメラのレンズを通して撮像素子に入射される。このとき、照明は光源によって決まった分光分布  $P(\lambda)$  を持ち、被写体は分光反射率  $\rho(\lambda)$  を持つ。両者の積が被写体からの反射光  $C_s(\lambda)$  としてテレビカメラへ入射する。テレビカメラはその反射光を、分光感度  $S_R(\lambda), S_G(\lambda), S_B(\lambda)$  を持ったカラーセンサで撮像し、その積分値に応じた出力を R,G,B の各色チャンネル出力信号としている。これを式で表すと以下のようなになる。

$$R = \int P(\lambda)\rho(\lambda)S_R(\lambda)d\lambda \quad (2.1)$$

$$G = \int P(\lambda)\rho(\lambda)S_G(\lambda)d\lambda \quad (2.2)$$

$$B = \int P(\lambda)\rho(\lambda)S_B(\lambda)d\lambda \quad (2.3)$$

撮像によって得られた撮像素子からの出力信号  $R, G, B$  は、信号処理を経てモニタ側へ伝送される。従って、カラーセンサの分光感度特性  $S_R(\lambda), S_G(\lambda), S_B(\lambda)$  (正確にはレンズ、プリズムやカラーフィルタ、撮像素子の分光感度特性を総合した分光特性。また通常は赤外光をカットするための IR カットフィルタも挿入される。) が図 2.10 や図 2.12 のように異なると、その  $R, G, B$  出力信号も異なったものになってしまう。

一方、テレビジョンモニタ側では、伝送されたカラー信号量に応じて受像管の R,G,B 蛍

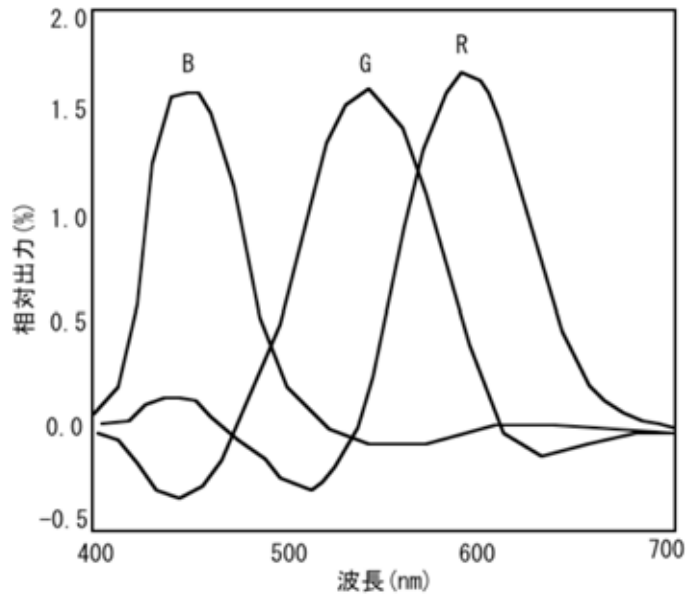


図 2.14: 理想撮像特性例

光体の輝度を決める（正確には CRT の蛍光体輝度特性は直線ではないので、カメラ側でガンマ補正を施している）。蛍光体の三色は、加法混色により任意の色を表す。これを式で表すと以下のようなになる。

$$C_d = R \cdot D_R + G \cdot D_G + B \cdot D_B \quad (2.4)$$

ここで、 $D_R, D_G, D_B$  は蛍光体の色度点（受像三原色）で、実際には蛍光体の材料より決まっている [25][28]。

そこでテレビカメラの色設計は、まず受像側の材料によって三原色の色度点が ITU-R 勧告 BT.709[29] などの規格によって定められており、次にその規格に合わせて、カメラ側の理想的な分光撮像特性が定められている（図 2.14）。しかしながらこの理想撮像特性には負の感度特性も含まれ、光学系では実現不可能である。そこで実際のカメラでは、負の部分をその近くの正の部分でキャンセルするようにカラー分光特性を調整している。さらには、色再現特性よりも感度特性を優先して分光感度特性を調整する場合がある。実際の CCD カメラの総合分光特性例を図 2.15 に示す [25]。

### 2.5.3 リニアマトリクスによる色補正技術

カメラの出力を理想撮像特性に合わせるためには、電子的なマトリクス回路が用いられる。これは以下に示すような RGB 三原色の 1 次変換マトリクスで、RGB の混合比補正により実効的に色再現特性を改善する。

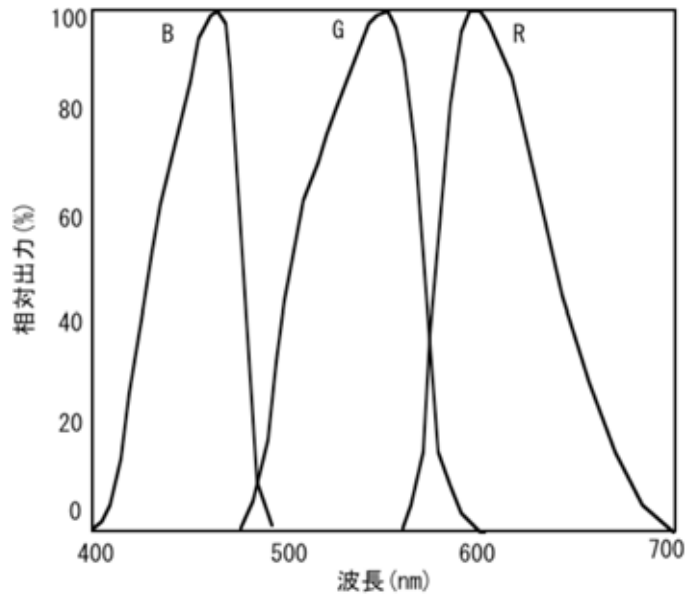


図 2.15: 実際のカメラの総合分光感度特性例 [25]

$$\begin{bmatrix} R_{LM} \\ G_{LM} \\ B_{LM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{in} \\ G_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ここで、 $R_{in}, G_{in}, B_{in}$  は回路の入力、 $R_{LM}, G_{LM}, B_{LM}$  はリニアマトリクス出力である。ただし、白バランスを保つために

$$a + b + c = 1 \quad (2.6)$$

$$d + e + f = 1 \quad (2.7)$$

$$g + h + i = 1 \quad (2.8)$$

の関係を満足する必要がある。

このマトリクスの求め方には、いくつかの方法が考えられる。

1. 理想撮像特性 (図 2.14) と実際の分光撮像特性 (図 2.15) の差を求めて、これの各スペクトル成分を実際の分光撮像特性の分担量に応じて 3 チャンネルに配分することによって定数を求める方法 [30]。しかし実際には十分な効果が得られないことが多い。
2. 被写体も含めてその色再現誤差を無くするようにマトリクスを決める方法。これは被写体としていくつかの適当な色票を選定し、最小自乗法を用いて多くの被写体に対する最適解を求めて、色再現誤差が最も小さくなるようにマトリクス定数を決めている [31]。

3. 熟練したオペレーターがモニタ上に再現された色と被写体の色を直接比較しながら、最も色誤差の少ない点を視覚的に求めてマトリクス係数を求める方法。実際にはオペレーターの調整項目が多いため、様々な撮影条件に応じるためには困難を伴う。

したがって、多くの場合、上記2の手法を用いることが多い。

ところで、3板式ではプリズムの色分解特性設計の自由度は比較的高く、まず色分解特性を十分に吟味した後、最小限の信号間演算による補正を施して色再現性の設計が行われる。一方単板式では、感度、耐久性、生産安定性などの制限から、カラーフィルタ特性調整の自由度はプリズムに比較して低く、プリズムに近い色分解特性を実現できるとは限らない[32]。そこで前述のリニアマトリクスによる色補正を積極的に利用し、色再現特性を改善することが行われる。また、図2.12のように各色チャンネル間で分光特性のオーバーラップが多い場合、リニアマトリクス処理により3板式よりも補正処理が行いやすいという考え方もある。

ここで、現状としては、放送用テレビジョンカメラにおいても色再現は必ずしも理想的な特性とはなっていない[25][33]。これは、感度特性改善やカメラ調整の容易さ、複数カメラ間や照明条件での同様な色再現性なども理由の一つとなっている。本研究では、単板式カメラを放送用として検討するにあたり、放送現場ですでに使用されている3板式カメラと混在使用しても違和感がないように撮像特性を揃えることを目標とし、リニアマトリクスを用いた色補正を行う際には理想撮像特性ではなく、実際に測定した放送用3板式CCDカメラと特性が合うように補正を行うことを試みる。

## 2.6 まとめ

本章では、放送用カメラの撮像特性改善としてダイナミックレンジ拡大技術、順次走査による時空間解像度改善技術、そして小型化の技術として単板撮像技術について述べた。とくに、撮像素子の撮像特性の限界を超えるような広ダイナミックレンジを実現する技術としては主に、複数の撮像素子による手法、一つの撮像素子で複数回の撮像を行う手法、そして撮像素子自体の構造に変更を加える手法があるが、その中でも複数回の撮像を行う手法においてMOS型撮像素子による非破壊読み出しの手法を用いると簡易に広ダイナミックレンジが実現できることを述べた。また順次走査カメラによる画質改善について、まず順次走査とインターレース走査の違いを述べ、順次走査カメラでは垂直解像度・時間解像度が向上するだけでなく、順次走査カメラで広帯域に撮像しインターレース走査に変換することにより、インターレース走査帯域による折返し歪が抑圧されたハイビジョン映像を得ることができることを述べた。さらに単板カラーカメラ技術では、まず3板式と単板式の違いを述べ、カラーカメラの色再現システムにおいてプリズムやカラーフィルタの分光

感度特性の違いによる色再現の原理について述べた。また理想撮像特性や異なる分光特性に対するリニアマトリクスによる色補正手法について述べた。

## 参考文献

- [1] 映像情報メディア学会編: ”テレビジョンカメラの設計技術”, コロナ社 (1999)
- [2] 竹村裕夫, ”CCD カメラ技術入門”, コロナ社
- [3] 川人祥二, 吉田真, 佐々木正明, 梅原啓二郎, ”アナログ 2 次元 DCT 回路と精度適応 A/D 変換器に基づく画像圧縮 CMOS イメージセンサ”, 映情メ学会誌, 52, 2, pp.206-213 (1998)
- [4] 須川成利, ”広ダイナミックレンジイメージ センサの最新動向”, 映情メ学会誌, Vol. 60, No. 3 pp.299-302 (2006)
- [5] 川人祥二, ”応用からみたイメージセンサの開発動向”, 映情メ学会誌, Vol. 59, No.3, pp.359-361 (2006)
- [6] 浜本隆之, 太田淳, ”新機能・新原理の撮像デバイスとその応用 ( 1 ) ~ 撮像デバイス ~”, 映情メ学会誌, Vol. 59, No.3, pp.362-367 (2006)
- [7] 内藤貴志, 塚田敏彦, 山田啓一, 山本新, ”環境の明るさの変化にロバストな走行車両のナンバープレート認識”, 信学論文誌 D Vol.J81-D2 No.9 pp.2019-2026 (1998)
- [8] 山田啓一, 中野倫明, 山本新, ”車載用カメラのダイナミックレンジ拡大方式”, 信学論文誌, Vol.J78-D-II, No.10, pp.1439-1449 (1995)
- [9] 稲垣修, 福田英寿, 宮原秀治, 上島岳二, 柿沼実, ”広ダイナミックレンジカメラ”, 第 2 回画像センシングシンポジウム, E-1, pp.151-154 (1996)
- [10] 島本洋, 三谷公二, 藤田欣裕, 菅原正幸, 安藤文彦, 岡野文男, 湯山一郎, ”CMD 撮像素子を用いた広ダイナミックレンジ撮像方式”, 映情メ学会誌, vol. 54, No. 12, pp.1781-1787 (2000)
- [11] T.Yamashita, M.Sugawara, K.Mitani and F.Okano, ”Wide Dynamic Range Camera Using a Novel Optical Beam Splitting System”, Proc. SPIE, Vol. 4669, pp.82-88 (2002)

- [12] 三谷, 藤田, 中村, "CMD 撮像素子の FPN 抑圧駆動法", テレビ学会誌, vol. 49, No. 2, pp. 196-203 (1995)
- [13] S. G. Chamberlain and J.P.Y. Lee, "A Novel Wide Dynamic Range Silicon Photodetector and Linear Imaging Array", IEEE Trans. Electron Devices, ED-31, 2, pp.175-182 (1984)
- [14] 高田謙二, 石田耕一, 中村里之, 草鹿泰, 岩本剛志, 野村慶, 鮫島幸一, 西田直樹, 宮武茂博, "対数変換 CCD ラインセンサ", テレビ学会誌, Vol.49, No.2 pp. 169-175 (1995)
- [15] 小田和也, 小林寛和, 竹村和彦, 竹内豊, 山田哲生: "広ダイナミックレンジ撮像素子の開発:第4世代スーパー CCD ハニカム", 映情メ学会技術報告, 27, 25, pp.17-20 (2003)
- [16] H. Komobuchi, A. Fukumoto, T. Yamada, Y. Matsuda, and T. Kuroda: "1/4 inch NTSC Format Hyper-D Range IL-CCD", PROC. 1995 IEEE Workshop on CCDs and AISs, SS-1 (1995)
- [17] Takayuki Hamamoto and Kiyoharu Aizawa, "A Computational Image Sensor with Adaptive Pixel-Based Integration Time", IEEE J. of SOLID-STATE CIRCUITS, vol.36, no.4, pp.580-585, (2001)
- [18] F. Andoh, H. Shimamoto, Y. Fujita: "A digital pixel image sensor for real-time readout", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.47, Issue.11 (2000)
- [19] SMPTE standard for Television 274M: "1920 x 1080 Scanning and Analog and Parallel Digital Interfaces for Multiple Picture Rates" (1995-1998)
- [20] ITU-R Recommendation BT.709-4: "Parameter Values for the HDTV Standards for Production and International Programme Exchange" (1990-2000)
- [21] 吹抜敬彦, "TV 信号の多次元信号処理", 日刊工業新聞 (1988)
- [22] 西澤, 田中, "順次走査変換による画質改善", NHK 技研月報, 27, 12, pp.507-512 (1984)
- [23] 栗田, "ハイビジョン倍速走査方式画像のハイビジョンへの走査変換とその画質", テレビ学技報, Vol.17, No.54, pp.31-36 (1993)
- [24] 平野裕弘, 吹抜敬彦, 吉木宏, 石倉和夫, 鈴木教洋, "順次走査カメラによる順次-インタレース走査変換の信号処理の検討", 映情メ学会誌, Vol.43, No.5 pp. 513-520 (1989)

- [25] 藤田欣裕, 中野豊之, ”テレビにおける色再現 (I) 撮像系の色設計”, テレビ誌, Vol. 47, No. 7, pp.972-978 (1993)
- [26] Takahiro Saito, ”Color Imaging: Color Demosaicking”, IEEE ISSCC06 Forum (2006)
- [27] 村田治彦, 森幸夫, 前中章弘, 岡田秀史, 千原國宏, ”PS-CCD における相関判別色分離方式”, 映情メ誌, Vol.55, No.1 pp. 120-132 (2001)
- [28] 奥田博志, ”テレビにおける色再現 (III) 表示系の色設計”, テレビ誌, Vol. 47, No. 8, pp.1097-1109 (1993)
- [29] ITU-R Recommendation BT.709-4: ”Parameter Values for the HDTV Standards for Production and International Programme Exchange” (1990-2000)
- [30] 齋藤利也, ”カラーカメラの色再現”, テレビ誌, 23, 1 (1969)
- [31] A.H. Jones: ”Optimum Color Analysis Characteristics and Matrices for Color Television Cameras With Three Receptors”, SMPTE J., vol.77, pp.108-115 (1968)
- [32] 西尾研一, ”CCD カメラの色彩”, カラーフォーラム JAPAN, 10-1, pp. 143-147 (1999)
- [33] 熊田純二, 金澤勝, ”テレビジョンの色再現”, 映情メ学会誌, Vol. 55, No. 10, pp. 1233-1237 (2001)

## 第3章 ダイナミックレンジ拡大技術の検討

### 3.1 はじめに

逆光や室内からみた窓辺など光量差の大きい被写体をTVカメラで撮像すると、撮像素子のダイナミックレンジの限界からハイライト入射部が飽和してしまうなど撮像領域全体の被写体を十分な階調で撮像することができない。しかしながら撮像素子の性能向上によるダイナミックレンジの大幅な拡大には限界がある。そのため第2章で述べたように撮像システムとして広ダイナミックレンジ化を図っていく技術がこれまでにいくつか検討されている。

ここでは、増幅型撮像素子であるCMD(Charge Modulation Device)[1]を用い、特にCMD撮像素子で動作可能な、画素毎に素子外部から蓄積電荷をリセットするソースリセット法[2][3]を用いることにより、ダイナミックレンジ拡大を可能とする新たな撮像方式について提案する。本撮像方式の目的は、より明るい入射光に対し撮像素子が飽和しないようにして信号を取り出すことによってダイナミックレンジの拡大を図ることであり、またそのダイナミックレンジ拡大を撮像素子内部の構造を変更することなく外部に簡易な回路を付加することにより実現することである。本撮像方式について、基礎検討としてラインセンサおよび2次元センサを用いてダイナミックレンジを2倍に拡大する実験を行い、その効果を確認する。

### 3.2 CMD撮像素子によるダイナミックレンジ拡大手法

#### 3.2.1 選択的画素リセットによるダイナミックレンジ拡大

撮像素子受光面の一部に強度の光入射がある場合、当該領域のフォトダイオード蓄積電荷容量が飽和してしまうことにより、撮像カメラが表現できるダイナミックレンジが制限される。この一部の強露光量領域の蓄積電荷飽和を避けるためにレンズ絞りや電子シャッターを用いると、撮像領域全体の蓄積電荷量が抑えられてしまい、通常露光量領域も蓄積電荷量が少なくなり、信号出力のS/N特性が不利になってしまう。

本撮像方式では、撮像素子受光面のうち強露光量領域を検知し、当該画素のみ選択的に電子シャッター動作を行うことにより蓄積電荷の飽和を防ぎ、通常露光量領域とともに強露光量領域も蓄積電荷を飽和させることなく読み出すことにより、ダイナミックレンジを

拡大する。図 3.1 に本方式の概念図を示す。

強露光量領域を検知するためには、蓄積期間中に高速で各画素の蓄積電荷を読み出す。本撮像方式では撮像素子として非破壊読み出しや高速動作が可能な特長を有する増幅型撮像素子を用い、これを高速駆動させることにより、蓄積期間中に複数回の非破壊読み出し動作を行い、蓄積期間途中で各画素の蓄積電荷量を読み出す。このとき読み出し動作は非破壊で行われるため各画素の蓄積電荷量には影響を与えない。

強露光量領域画素の蓄積電荷を選択的にリセットするための電子シャッター動作には、ソースリセット法を行う。本撮像方式では、撮像素子として CMD を用いる。CMD は増幅型撮像素子としての特長を有するほか、ソースリセット法を用いることにより任意の画素に対し読み出し動作中に 1 画素単位でその蓄積電荷をリセットすることが可能な特長を有す。ソースリセット法については、後ほど詳述する。

次に、本撮像方式におけるダイナミックレンジ拡大動作を、1 画素に注目しその露光時間経過に対する蓄積電荷量の変化を模式的に示した図 3.2 を用いて説明する。

強入射光量画素の場合、短時間で蓄積電荷量が増加する。そのままフィールド周期等正規の蓄積期間（図 3.2 の時間  $t_2$ ）まで蓄積を継続すると蓄積電荷量が過剰となり飽和してしまう。そこで、撮像素子を高速で駆動し、蓄積期間途中（図 3.2 の時間  $t_1$ ）における蓄積電荷量を非破壊動作で読み出す。読み出した信号の出力強度を調べ、その強度が過剰であった場合、例えば正規の蓄積期間内に飽和することが予想される強度であった場合、ソースリセット法を用いて当該画素の蓄積電荷をリセットする。リセットされた画素はその後再び蓄積を開始し、正規の蓄積期間（時間  $t_2$ ）において読み出される。このように強入射光量画素も飽和せずに信号を読み出すことが可能となる。蓄積期間途中でリセット動作（電子シャッター動作）を行った画素からの読み出し信号は蓄積時間が短縮し出力が減少しているので、電子シャッター時間から算出した利得を乗じて補正し、出力する。蓄積期間中の蓄積電荷量の検知を複数回行った場合、より強い入射光量にも対応できると共に被写体の動きが大きい場合等露光時間経過による蓄積電荷量の変化が一定でない場合でも比較的正確に露光量の検知および信号出力の補正を行うことが可能となる。

入射光量が過剰でない画素の場合、蓄積期間途中（時間  $t_1$ ）における読み出し動作時にリセット動作は行われぬ。この場合、読み出し動作は非破壊で行われており、画素の蓄積電荷は読み出し動作の影響を受けずそのまま蓄積が継続される。

本撮像方式のダイナミックレンジ拡大動作は、撮像素子の外部に読み出し信号量の検知およびリセット動作のための簡易な電気回路を付加することにより実現できる。撮像素子からの信号出力を実時間で処理し、読み出す画素毎にリセット動作を撮像素子にフィードバックすることにより、被写体に適応して行う。その結果、撮像素子の構造を変更することなくダイナミックレンジを拡大することが可能となる。

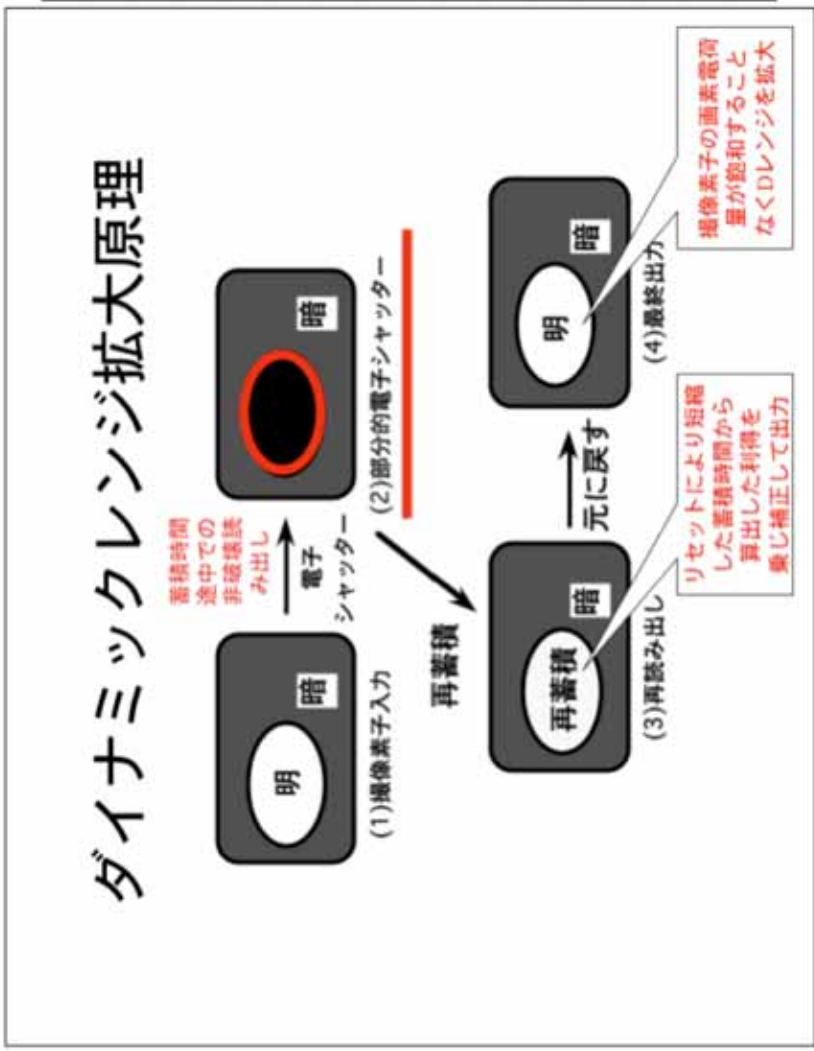
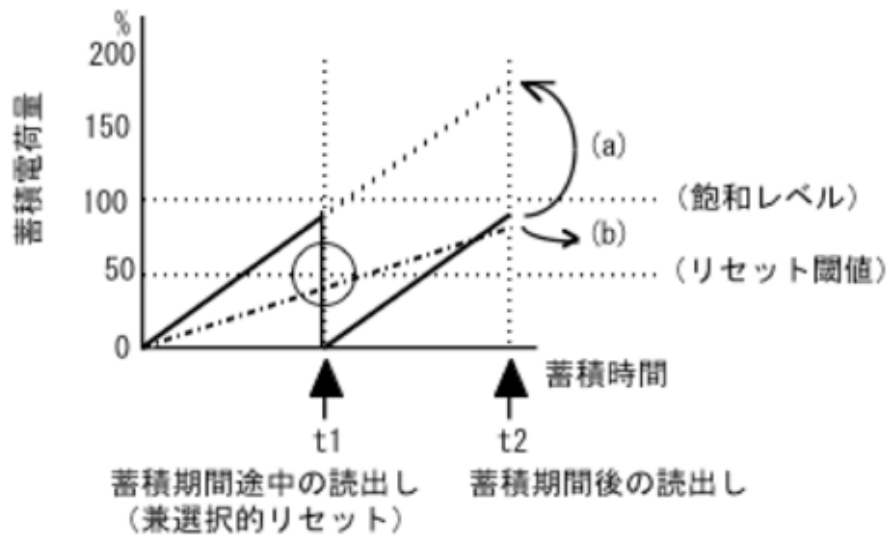


図 3.1: ダイナミックレンジ拡大の基本概念



	信号出力の分類	信号出力の処理
(a)	強入射光量のため蓄積期間途中の読出し時出力がリセット閾値を超過し、蓄積電荷が期間途中でリセットされた画素の出力	リセットにより短縮した蓄積時間から算出した利得を乗じ補正して出力
(b)	蓄積期間途中の読出し時出力がリセット閾値を超過しなかった画素の出力	そのまま出力

図 3.2: 1 画素の蓄積電荷の時間変化

### 3.2.2 CMD の任意画素リセット (ソースリセット法)

CMD は 1 画素 1 トランジスタで構成され、ゲート直下で光電変換および蓄積を行い、ゲートに蓄積された電荷によりドレイン・ソース間の電流を変調する増幅型撮像素子である。各画素からの信号電流は、水平シフトレジスタによって順次スイッチされるトランジスタを通して信号読み出し線へ出力される。各画素のゲート電極はライン毎に共通につながれており、通常のリセット動作ではゲート電位を制御することによりライン毎に一斉に行われる。図 3.3 に CMD 撮像素子の構成図を示す。

このとき、CMD の動作はトランジスタの相対的な電位関係が重要であり、特にリセット動作に関してはゲート電位を上げる代わりにソース電位を下げ、ドレイン・ソース間の基板方向への障壁をなくすことで、蓄積された正孔を基板側へ吐き出すことができる。このリセット方法は、従来のゲート電位を制御するゲートリセット法に対してソースリセット法と呼ばれる [2] [3]。図 3.4 にゲートリセット法とソースリセット法の電極バイアスの相対的な電位関係を示す。

各 CMD トランジスタのソースラインは、読み出しスイッチを通して素子出力端子に接続されている。そこでこの出力端子に外部からリセット電位を加えられるような回路を付加することにより、読み出ししている最中の画素のリセット動作を素子外部から制御することができる。ソースリセットはゲート電位が読み出しレベルのトランジスタに対してリセット動作を行う。そのため、ソースラインが各列で共通配線となる 2 次元センサにおいても、ソースラインにリセット電位が加えられたとき、非選択垂直線の画素はゲート電位が蓄積レベルであるためリセット動作とならず、選択垂直線の読み出し中の 1 画素のみがリセット動作となる。

## 3.3 撮像実験

### 3.3.1 実験回路

前節で述べたダイナミックレンジ拡大手法の動作を確認するため、ラインセンサ及び 2 次元センサを用いて駆動実験及び撮像実験を行った。ここではラインセンサの例を用いて、実験回路について説明する。

図 3.5 にダイナミックレンジ拡大駆動実験回路図を示す。撮像素子からの読み出し線には、スイッチ用トランジスタを介しリセット電位を与える定電圧源が付加されている。撮像素子からの読み出し出力は電流電圧変換され、比較器で任意に設定したリセット閾値と 1 画素毎に順次比較される。読み出し出力が閾値を超過する場合、比較器の出力がオンとなりリセットパルスによりスイッチが導通し、リセット電位が読み出し線に加えられ読み出し中の画素の蓄積電荷がリセットされる。

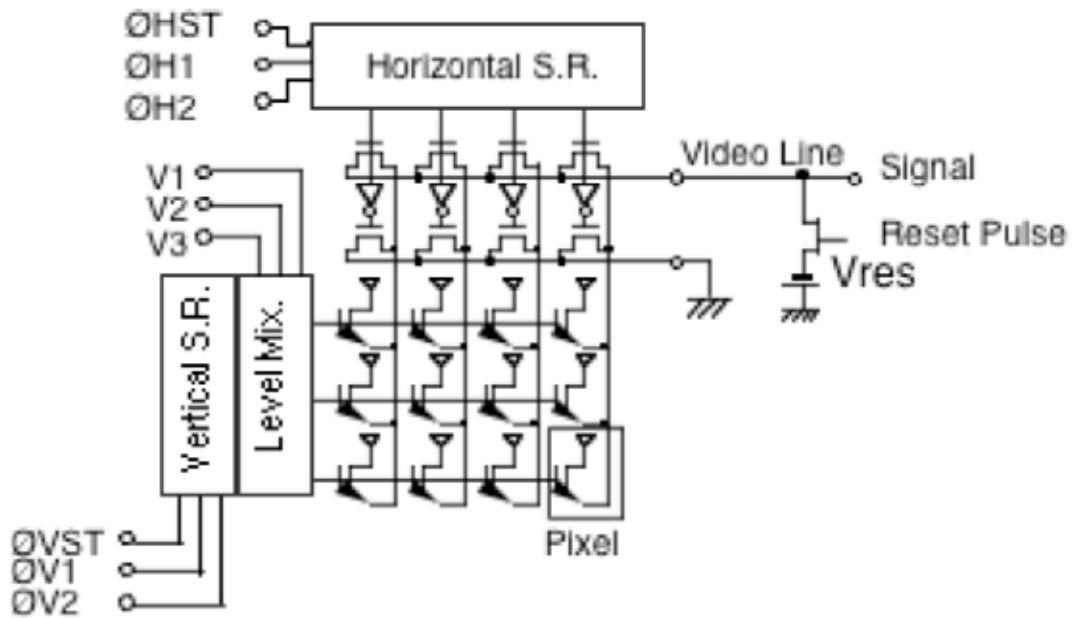


図 3.3: CMD 撮像素子の構成図

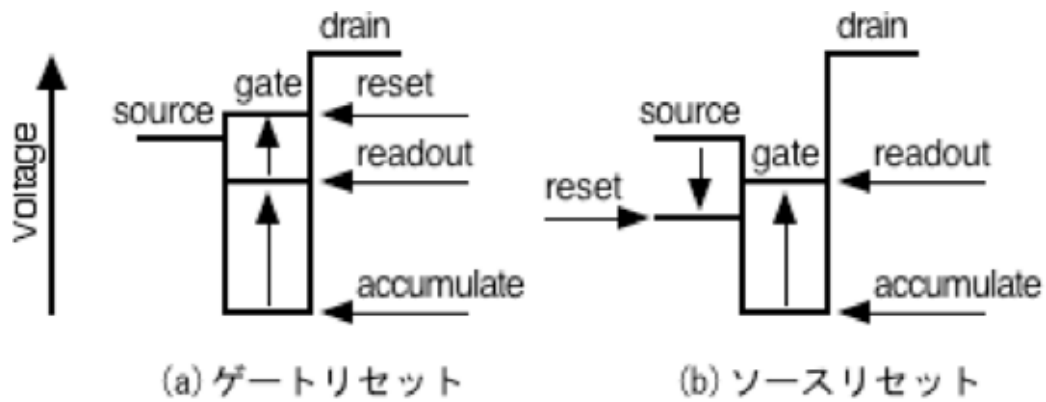


図 3.4: CMD トランジスタの電極バイアス

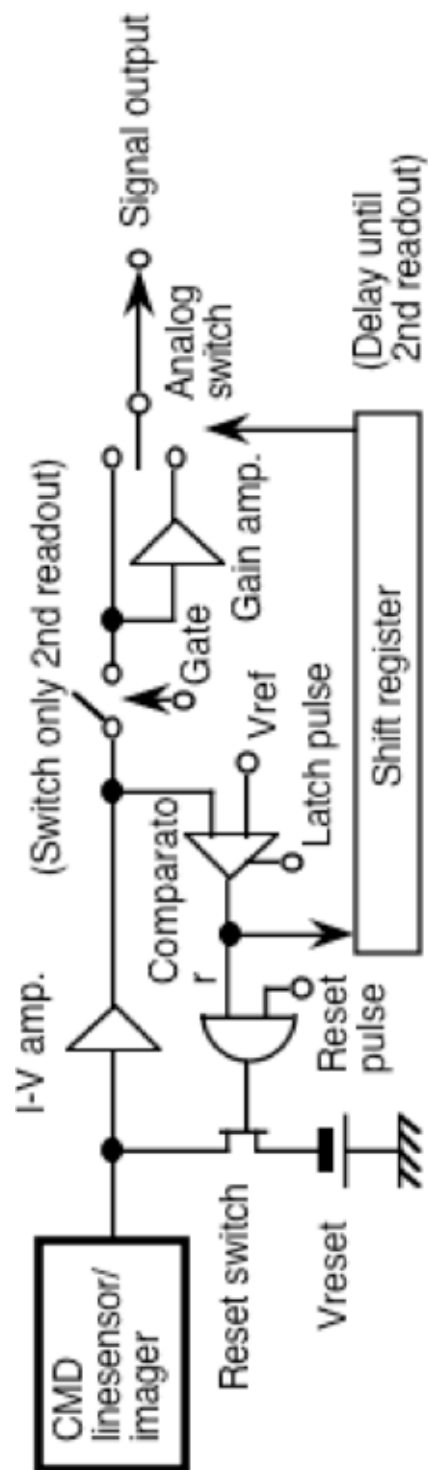


图 3.5: 实验回路

図 3.6 に比較器の動作タイミングを示す。撮像素子内の水平シフトレジスタにパルス  $\Phi H1$ 、 $\Phi H2$  を与えることにより各画素からの読み出し信号が順次出力される。 $\Phi H2$  のタイミングで読み出された信号出力はその読み出し期間中にリセット閾値と比較され、比較結果がラッチされる。比較結果がオンのときはリセットパルスにより読み出し中の画素の蓄積電荷はリセットされ、比較結果がオンでないときはリセットされない。どの画素がリセットされたかを記憶しておくため、比較器の出力はシフトレジスタ (FIFO メモリ) に保存する。蓄積期間後の読み出し時には、シフトレジスタからの出力に応じ、蓄積期間途中でリセットされた画素については電子シャッターの時間に応じた利得を乗じて出力し、通常蓄積の画素は利得を等倍として出力する。

### 3.3.2 ラインセンサを用いた実験

画素サイズ  $10.2\mu m \times 10.4\mu m$  で水平方向に 100 画素を持つ CMD ラインセンサを用い、ダイナミックレンジ拡大駆動実験を行った。蓄積期間を  $500\mu s$  とし、読み出し周波数 1MHz で駆動した。今回の実験ではダイナミックレンジを 2 倍拡大することを想定し、蓄積期間の半分の時点で読み出し走査を 1 回、そして蓄積期間後にもう 1 回行っている。駆動タイミングおよび出力信号の模式図を図 3.7 に示す。

ラインセンサの水平方向にランプ状に輝度変化する光を入射したときの実験結果を図 3.8 に示す。ダイナミックレンジを拡大しない駆動では入射光が大きい部分で出力信号が飽和してしまうが (a)、本手法を用いることにより、強露光量領域の出力信号が飽和することなく出力されていることがわかる (b)。

なお、蓄積期間後の読み出し時には全画素強制的にソースリセットを行い、蓄積電荷を全画素順次廃棄する。このとき、各画素毎に読み出し信号とリセット直後の蓄積電荷のない信号出力の差分を取ることで、画素毎に固有の固定パターン雑音 (Fixed Pattern Noise; FPN) を抑圧することができる [3]。図 3.9 に FPN 抑圧回路を、また図 3.10 に FPN 抑圧の様子を示す。

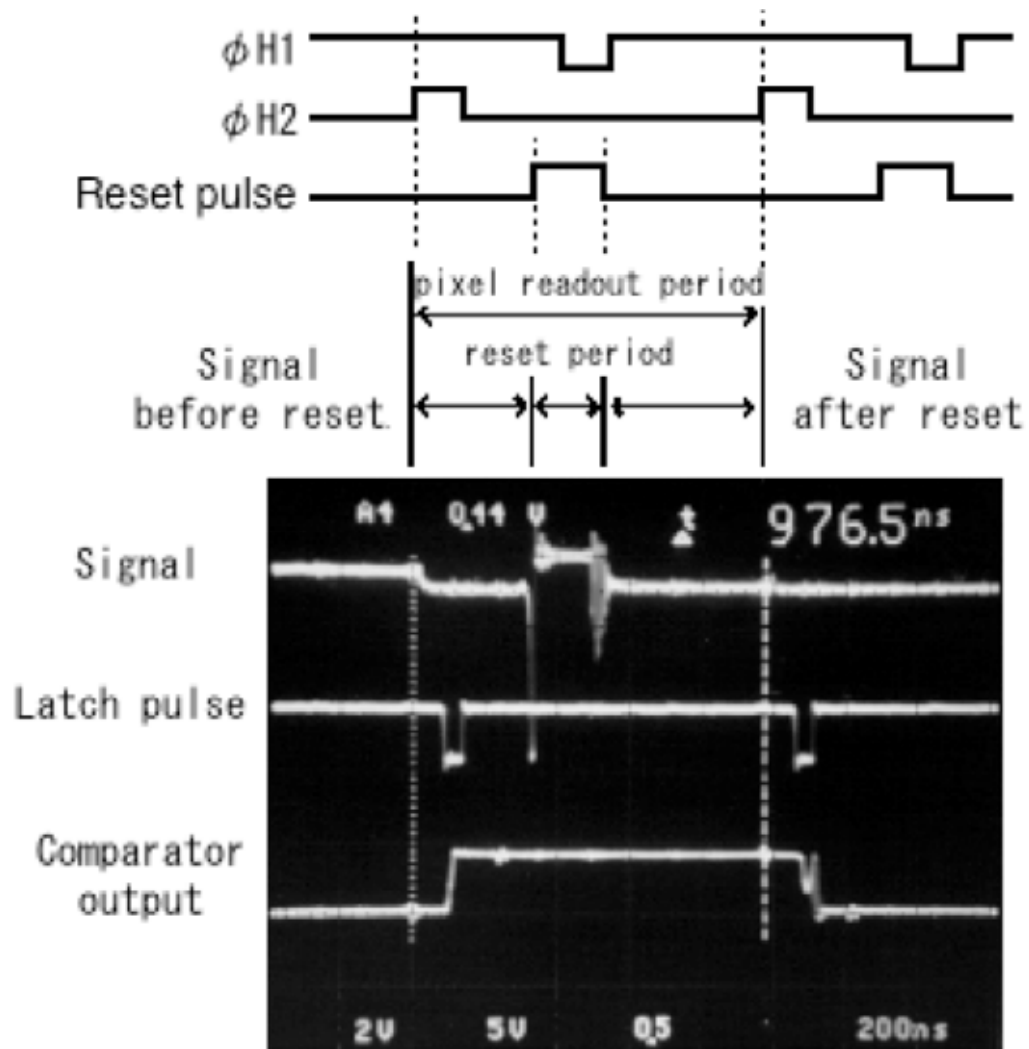


図 3.6: 比較器の動作波形

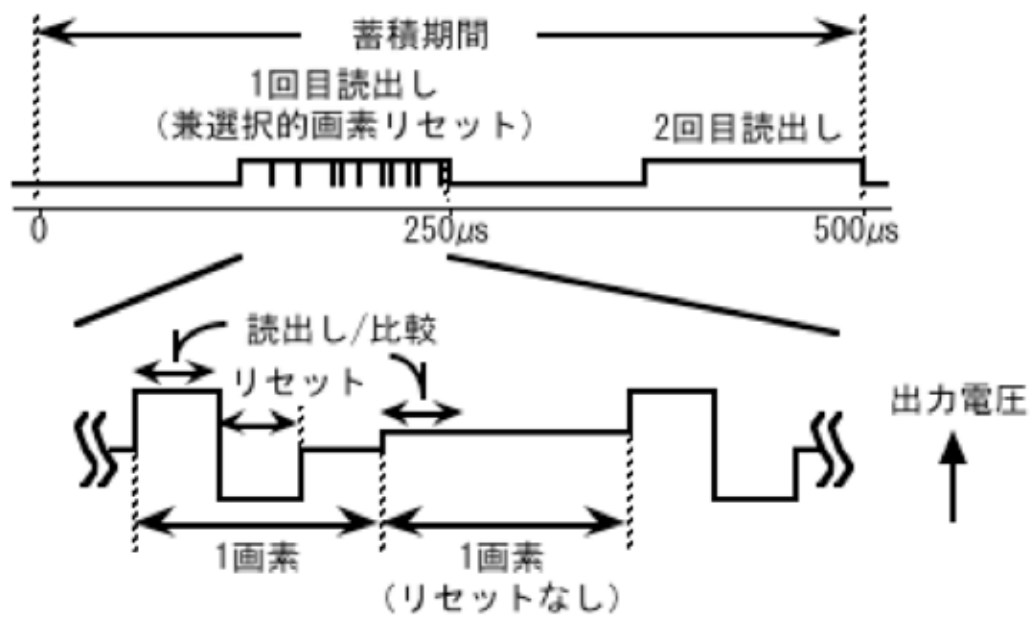
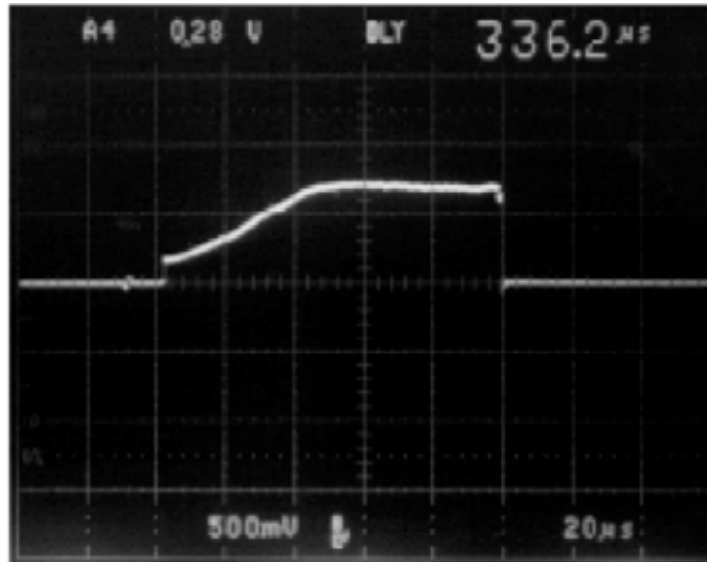


図 3.7: ラインセンサの駆動タイミング及び出力信号模式図

(a) Without  
Dynamic range  
expansion



(b) With  
Dynamic range  
expansion

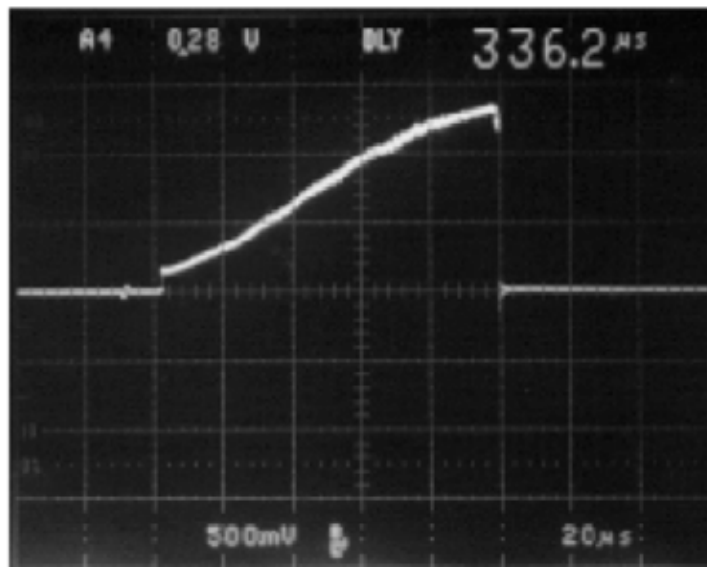


図 3.8: ラインセンサ実験結果

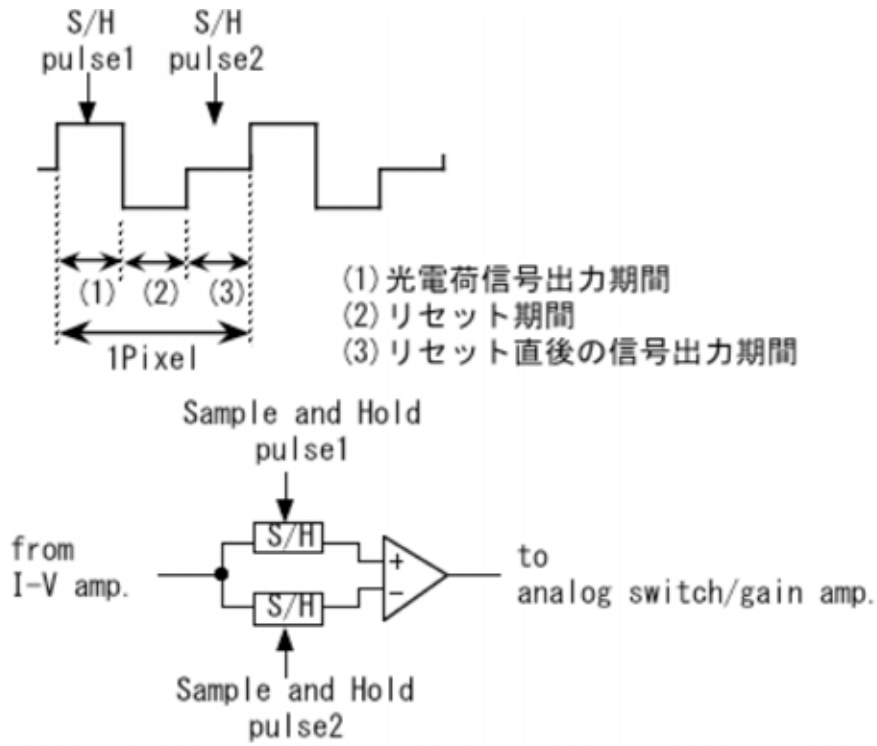


図 3.9: FPN 抑圧回路

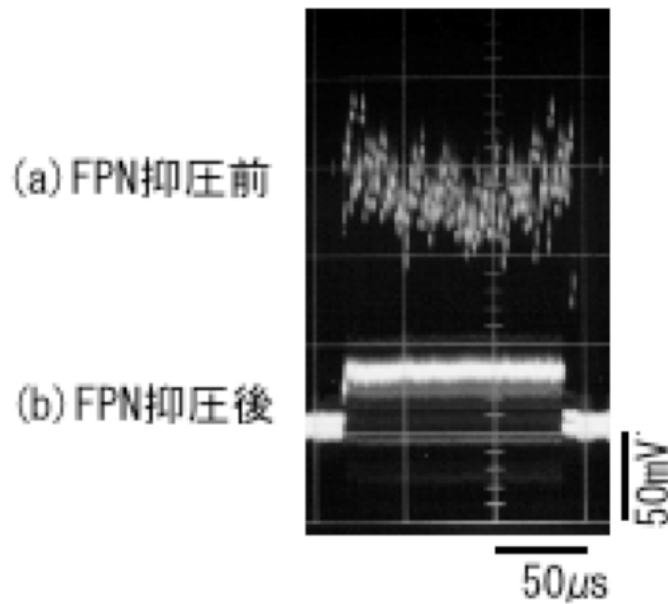


図 3.10: CMD 撮像素子の FPN 抑圧効果

### 3.3.3 2次元センサを用いた実験

有効画素数 31 万画素 (636 x 488)、画素サイズ  $10.2\mu\text{m} \times 10.4\mu\text{m}$  の NTSC 用 1/2 インチ CMD 撮像素子を用い、2 倍のダイナミックレンジ拡大実験を行った。2 次元撮像素子において本撮像方式によりダイナミックレンジを 2 倍に拡大するためには、フィールド周期の倍速で撮像素子を駆動すればよい。今回はソースリセットによる 1 画素リセットを確実にを行うためと回路およびモニタ系の簡素化のため倍速では駆動せず、通常レートで駆動した。そのためインターレース走査において同一フィールドの画素を 2 回繰り返して読み出している。第 1 フィールドでは読み出しおよび選択的画素リセットを行い、第 2 フィールドでは読み出し信号を画素毎にアンプゲインを切り替えて出力する。従って NTSC モニタ上への出力は第 1 フィールドはブランク、第 2 フィールドは映像を出力し、30 フィールド/秒のビデオレートとして出力した。駆動タイミングチャートを図 3.11 に示す。駆動周波数は 14.3MHz (2 線読み出しのため水平走査回路は 7.16MHz) で、1 画素期間中のリセット期間は 35ns とした。

グレースケールチャートを撮像した結果とその 1 ライン分のオシロスコープ波形を図 3.12 に示す。強露光量領域の出力信号が飽和せずに出力されていることがわかる。

### 3.3.4 雑音特性の測定と考察

リセットされた画素は電子シャッターによる蓄積時間の短縮をアンプによる信号増幅により補正するため雑音が増加する。そこで雑音特性を解析するためにラインセンサの実験回路を用い、雑音測定を行った。雑音の測定はオシロスコープで観測し、雑音電圧の p-p 値を読みとった。雑音には固定パターン雑音とランダム雑音があるが、固定パターン雑音については前節に述べた FPN 抑圧回路によってオシロスコープでは測定できない程度に抑圧されており、ここではランダム雑音について解析を行った。

ランダム雑音には、リセット雑音、読み出し走査雑音、光ショット雑音、暗電流雑音、検出雑音等がある。リセット雑音とはフォトダイオードなどの容量をスイッチを介して充電するとき生ずる熱雑音であるが、CMD ではリセット動作は電界によるドリフト機構で行われるため発生しない [4]。読み出し走査雑音とは MOS 型撮像素子において各画素から出力線へ読み出すための水平および垂直選択スイッチにより発生するスイッチング雑音であるが、増幅型撮像素子の場合画素毎に増幅器を有しており、出力信号量に対するスイッチング雑音量の相対的な影響は少なく、ここでは考えないこととする。光ショット雑音は入射光そのものに含まれている光量子雑音であり、その雑音量は入射光量に依存し光電変換により発生した蓄積電荷量の 1/2 乗に比例して増加する。暗電流雑音はフォトダイオードにおける熱励起によって発生し、その雑音量は蓄積時間に依存し蓄積時間の 1/2 乗に比

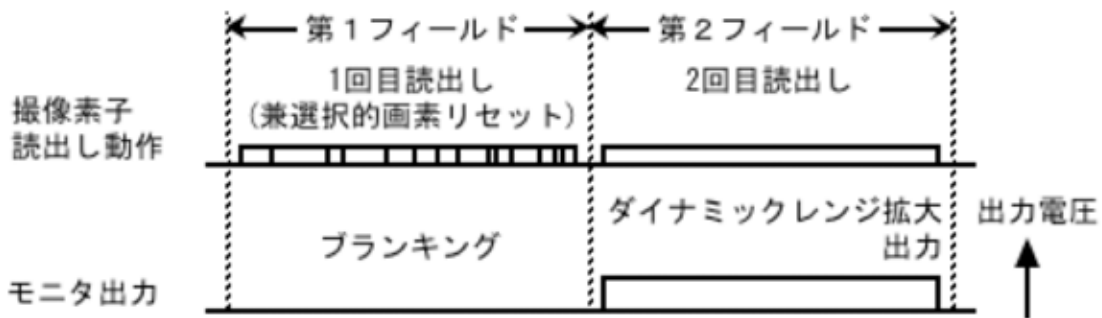


図 3.11: 2次元センサの駆動タイミングチャート

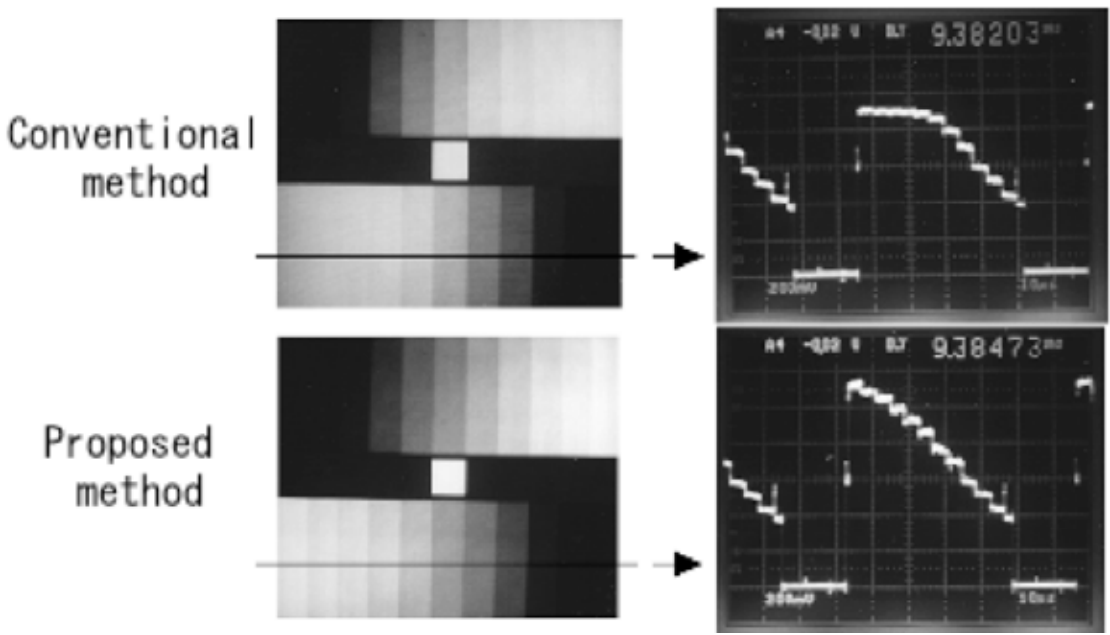


図 3.12: 2次元センサ実験結果 (グレースケールチャート)

例して増加する。検出雑音は撮像素子の出力容量とフィードバック型電流電圧変換アンプ間で発生し、撮像素子の出力容量やアンプの等価雑音抵抗などに依存するが [4]、入射光量や蓄積時間には依存しない。ランダム雑音の総合的な値は、これら各要因による雑音量の 2 乗平均となる。

撮像素子からダイナミックレンジ拡大回路を経て出力された信号について、その雑音を測定し、入射光量の撮像面照度毎にグラフにプロットしたものを図 3.13 に示す。図 3.13 の測定値グラフ (b) は、通常駆動の場合の測定結果である。雑音量が途中から減っているのは、画素の蓄積電荷量が飽和し光ショット雑音の影響がなくなったためと思われる。なお、このとき飽和した画素からの読み出し信号は各画素毎の飽和蓄積量の違いによる固定パターン雑音が生じるが、測定はオシロスコープ上でランダム雑音成分のみを観察している。図 3.13 の測定値グラフ (a) は、蓄積期間途中において強制的にリセットした後アンプで増幅した場合である。このとき各画素の蓄積時間は通常駆動に比べて半分となり、かつ出力信号はアンプにより 2 倍に増幅されている。

図 3.13 の測定値グラフ (a)、(b) をみると、共に入射光量依存がみられるが、グラフの傾きが光ショット雑音の傾き（入射光量の  $1/2$  乗に比例）に比べて小さい。これは雑音に入射光量に依存しない成分が含まれているためと思われる。通常駆動の蓄積電荷が飽和する直前付近（図 3.13 の照度  $E_t$  での出力）における、入射光量に依存する雑音（光ショット雑音）と入射光量に依存しない雑音（暗電流雑音及び検出雑音）の比を図 3.13 から算出（付録 1）すると、非入射光量依存性雑音が光ショット雑音のおよそ 0.93 倍となり、光ショット雑音とほぼ同程度含まれていることが分かる。

つぎに、非光量依存性の雑音について解析する。非入射光量依存性雑音の内、暗電流雑音は蓄積時間に依存するが、検出雑音は蓄積時間に依存しないため、リセット及びアンプ増幅した場合に 2 つの雑音量の増え方は異なる。非光量依存性雑音の成分が全て検出雑音であるならば、増幅により雑音量は 2 倍に増加するはずである。他方、雑音成分が全て暗電流雑音であるならば、同じく増幅により 2 倍に増加するがリセットにより蓄積時間が半分となるのでその  $1/\sqrt{2}$  倍となり、結局  $\sqrt{2}$  倍に増加するはずである。図 3.13 において (a) と (b) を比較すると、リセットの有無による雑音量の差は約 1.8 倍となっている。これは、暗電流雑音と検出雑音が混ざりあっているためと思われる。暗電流雑音成分と検出雑音成分の比を、図 3.13 より算出（付録 2）すると、検出雑音は暗電流雑音のおよそ 1.3 倍と求められた。

このように、ダイナミックレンジ拡大のために蓄積電荷のリセット動作を決定するリセット閾値付近の入射光量において、非光量依存性雑音が光ショット雑音と同程度含まれ、その中でも検出雑音が暗電流雑音が支配的であることが分かった。従って技術的には、電流電圧変換アンプに等価雑音抵抗ができるだけ低いトランジスタを用いることにより、雑音

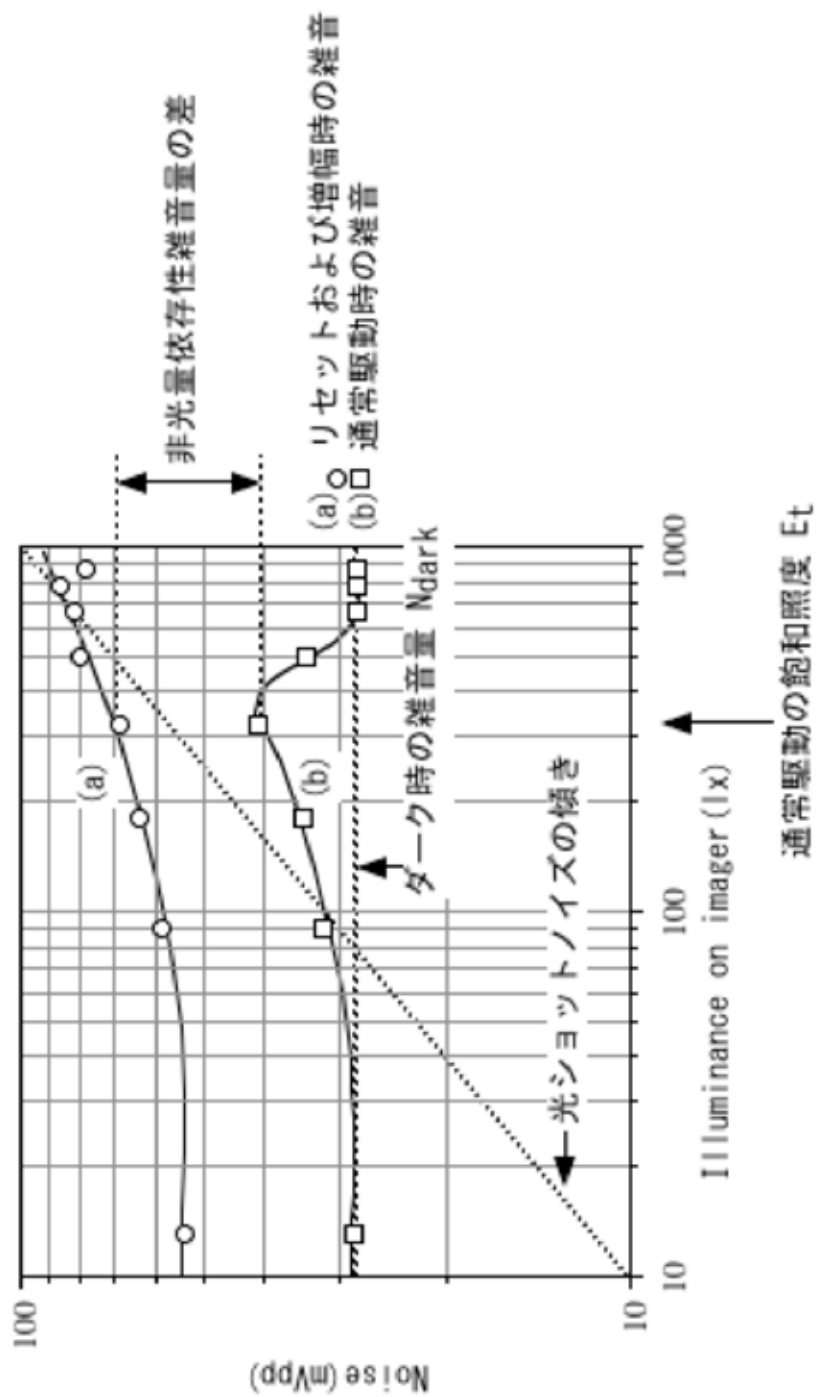


図 3.13: ダイナミックレンジ拡大による雑音特性

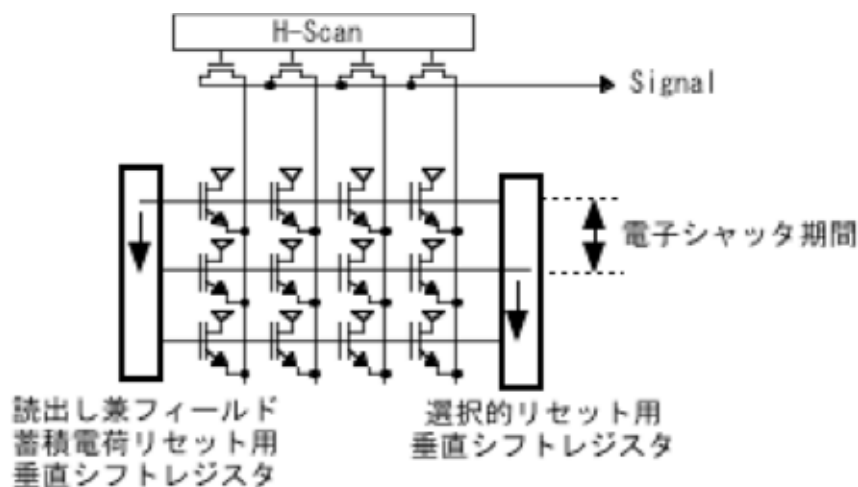


図 3.14: 高速電子シャッターに対応した CMD 撮像素子の例

特性をより改善することが可能である。ただし、本手法はより明るい入射光に対してダイナミックレンジを拡大する方式であり、実際にはダイナミックレンジ拡大動作により S/N がそれ以上劣化するものではない。またランダム雑音の視感度特性は画面輝度が高いほど雑音検知限が低くなる [5] ため、実際上の影響は少なくなると思われる。

### 3.4 提案手法の応用と考察

#### 3.4.1 高速電子シャッターへの応用

今回の駆動実験ではダイナミックレンジを 2 倍に拡大したが、将来、より大幅にダイナミックレンジを拡大するためには、より短い電子シャッター期間を得る必要がある。しかしながら本手法で単純に電子シャッター期間を短くするためには、より高速な撮像素子駆動速度が必要となる。これを解決するためには、同じ CMD 撮像素子において、垂直走査回路を 2 重化し、水平走査回路のみ倍速で駆動し、2 つの垂直走査線を切り替えて読み出すことにより 1 フィールド期間内に蓄積期間の異なる画素信号を 2 種類読み出せるような構造 [6] とすればよい。その撮像素子の構成を図 3.14 に示す。

この撮像素子において、例えば一方の垂直走査線は電子シャッターのための選択的画素リセットに用い、他方は蓄積期間後の読み出しとフィールド蓄積電荷のリセットに用いることにより、通常のフィールドレートで走査しても 2 つの走査線の走査開始時間の差がそのまま電子シャッター期間とすることが可能となる。駆動タイミングチャートの例を図 3.15 に示す。

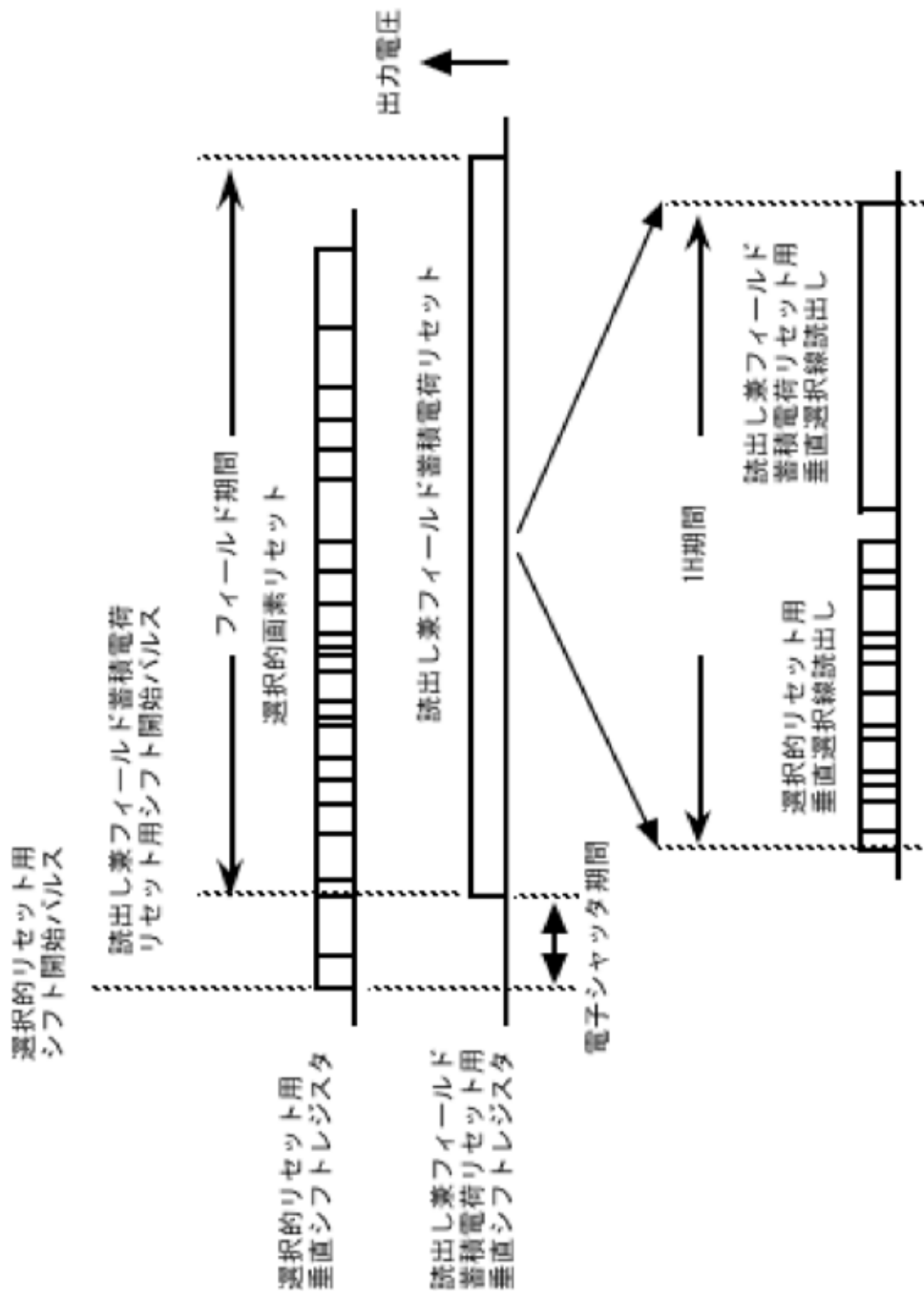


図 3.15: 高速電子シャッターに対応したCMD撮像素子の駆動タイミングチャート例

### 3.4.2 動画対応の課題

第2章でも述べたように、本手法では1フィールド期間内に短時間露光画像と長時間露光画像が取得できるため、動画像に対しても通常の使用では問題がない。しかし厳密に言うと、短時間露光は電子シャッター動作により動きの止まった画像、長時間露光は通常の1/60秒の蓄積ぼけ画像となるため、合成により画面上の部分的に動きぼけ量が異なる映像となる。また蓄積期間中の入射光量が一定であると仮定しているため、例えば動画像などによりリセット動作前後で画素への入射光量が大幅に変わる場合、合成処理が正確に行えなくなってくる可能性がある。

これらは、電子シャッター動作を利用する、他のダイナミックレンジ拡大方式と共通の課題である。この点については、今後人間の視覚特性なども含めて妨害について評価し、その程度が大きければ解決手法を考える必要がある。

## 3.5 まとめ

増幅型撮像素子であるCMDを用い、非破壊読み出し方式の特長を生かし、さらにCMD撮像素子で動作可能な、画素毎に素子外部から蓄積電荷をリセットするソースリセット法を用いることにより、ダイナミックレンジ拡大を可能とする新たな撮像方式について提案した。

本方式の大きな特長は、従来のCMD撮像素子の内部構造をまったく変更することなく、外部に簡易な回路を付加することにより、撮像素子が持つダイナミックレンジ限界を超えることが可能となることである。さらに第2章でも説明したように、画像メモリを用いないためADコンバータを必要とせず外部メモリも簡易で済み、また合成画像も実時間で処理できるため、広ダイナミックレンジ画像をアナログ信号のまま出力することも可能である。本撮像方式について、基礎検討としてCMDラインセンサおよび2次元センサを用いてダイナミックレンジを2倍に拡大する実験を行い、その効果を確認した。またラインセンサの雑音特性を解析し、技術的には検出アンプ回路の低雑音化を図ることによりダイナミックレンジ拡大に伴う雑音特性をより改善できることを示した。

< 付録 1 > 通常駆動の蓄積電荷が飽和する直前付近 ( 図 3.13 の照度  $E_t$  での出力 ) における、入射光量に依存する雑音 ( 光ショット雑音 ) と入射光量に依存しない雑音 ( 暗電流雑音及び検出雑音 ) の比の算出

画素への入射光量に依存する雑音成分を  $N_p$ 、依存しない成分を  $N_{np}$  とすると、その総合雑音量  $N_t$  は

$$N_t = \sqrt{N_p^2 + N_{np}^2} \quad (3.1)$$

となる。ここで  $N_{np}$  は図 3.13 におけるダーク時の雑音量  $N_{dark}$  とみなせるため、上式より  $N_p$  は

$$N_p = \sqrt{N_t^2 - N_{np}^2} = \sqrt{N_t^2 - N_{dark}^2} \quad (3.2)$$

となる。 $N_t$  と  $N_{dark}$  は測定値より得られ、その結果  $N_p$  と  $N_{np}$  の比は

$$\frac{N_{np}}{N_p} \simeq 0.93 \quad (3.3)$$

と求められる。

< 付録 2 > 暗電流雑音成分と検出雑音成分の比の算出

暗電流雑音  $N_d$ 、検出雑音  $N_a$  を

$$N_d = \alpha T^{1/2} \quad (3.4)$$

$$N_a = \beta \quad (3.5)$$

( 但し、 $T$  : 蓄積時間、 $\alpha$ 、 $\beta$  : 定数 )

とすると、リセットによる蓄積時間半減及びアンプによる 2 倍増幅によりそれぞれの雑音量は

$$N'_d = 2\alpha \left(\frac{T}{2}\right)^{1/2} = \sqrt{2}\alpha T^{1/2} = \sqrt{2}N_d \quad (3.6)$$

$$N_a = 2\beta = 2N_a \quad (3.7)$$

となる。総合的な雑音量  $N_{t2}$  ( 通常駆動 )、 $N'_{t2}$  ( リセット及び増幅有り ) の比は

$$\frac{N'_{t2}}{N_{t2}} = \frac{\sqrt{N'^2_d + N'^2_a}}{\sqrt{N^2_d + N^2_a}} = \sqrt{\frac{2N^2_d + 4N^2_a}{N^2_d + N^2_a}} \quad (3.8)$$

これが図 3.13 より約 1.8 と等しいので

$$\frac{N_a}{N_d} \simeq 1.3 \quad (3.9)$$

と求められる。

## 参考文献

- [1] 中村, 森田, 松本, 太田, "10um 画素 CMD イメージャ", テレビ全大, 4-4, 1987
- [2] T.Nomoto, K.Matsumoto, T.Nakamura, "Carrier Reset Operation in Charge Modulation Device", Jpn J. Appl. Phys, Vol. 32, pp. 3754-3759, 1993
- [3] 三谷, 藤田, 中村, "CMD 撮像素子の FPN 抑圧駆動法", テレビ学会誌, vol. 49, No. 2, pp. 196-203, 1995
- [4] 中村, 松本, 野本, "CMD 撮像素子-高解像度化への取り組み-", テレビ学会技術報告, Vol. 19, No. 25, pp. 13-18, 1995
- [5] 安藤 他, "ランダム雑音の視感度特性からみた固体撮像デバイスの設計", テレビ学会技術報告, Vol. 9, No. 44, pp. 37-42, 1986
- [6] 五味, "固体撮像素子", 特開平 7-38815, 1995

## 第4章 時空間解像度改善技術の検討

### 4.1 はじめに

これまでハイビジョン映像はその高い精細度を生かし、放送のみならず映画やコンピュータグラフィックスなどにおける豊かな映像表現、また医療や計測などにおける豊富な映像情報などを実現してきた。放送においても2000年よりBSデジタル放送が開始され、また2003年からは地上波デジタル放送も開始され、いずれも中心となるサービスとしてハイビジョン放送が行われている。今後もハイビジョン映像の重要性がますます高まってくる。

第2章において述べたように、映像入力装置であるカメラを従来のインターレース走査(60フィールド/秒)から順次走査(60フレーム/秒)とすることにより、例えばデジタル画像処理装置との適合性の向上や、垂直解像度や動解像度の改善、すなわち時空間解像度の改善が図られる。また、順次走査で撮像し、インターレース走査映像へ変換することにより、順次走査画像だけでなくインターレース走査画像においても、インターレース妨害の低減などの画質向上が実現できる[1]。このような順次走査HDTVカメラは、SMPTE274M[2]やITU-R BT.709[3]、電気通信技術審議会一部答申[4]などにおいてフォーマットとして既に規定されている。

ここでは、放送用ハイビジョンカメラに用いられているCCD(Charge Coupled Device)撮像素子を用い、60フレーム/秒での順次走査撮像実験装置を実現した。放送用カメラのCCD撮像素子を用いた理由は、

1. 順次走査用撮像素子の開発を待たず早期に実現が可能であること
2. 光学フォーマットを2/3インチとすることにより、光学レンズなど放送用として用いられている豊富なハイビジョン機材を有効に活用することが可能となること
3. 将来の順次走査撮像素子として高速駆動の可能性を試みること
4. CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)型撮像素子などで必要となる固定パターン雑音抑圧処理回路を不要とし、従来のハイビジョン用信号処理回路などを流用できること

などによる。

60 フレーム/秒での順次走査を実現するために、まず、30 フレーム/秒であるが順次走査可能な M-FIT(Multiple Frame Interline Transfer) 型 CCD[5][6] を用い、駆動周波数を高くすることにより 60 フレーム/秒での順次走査を実現する [7]。つぎに、インターレース走査用 CCD を用い、駆動方式を工夫することにより 60 フレーム/秒での順次走査を実現する [8]。撮像実験装置は 3 板カラー方式で試作し、撮像実験を行った。

## 4.2 60 フレーム/秒ハイビジョン順次走査映像の実現

### 4.2.1 M-FIT 型 CCD による実現

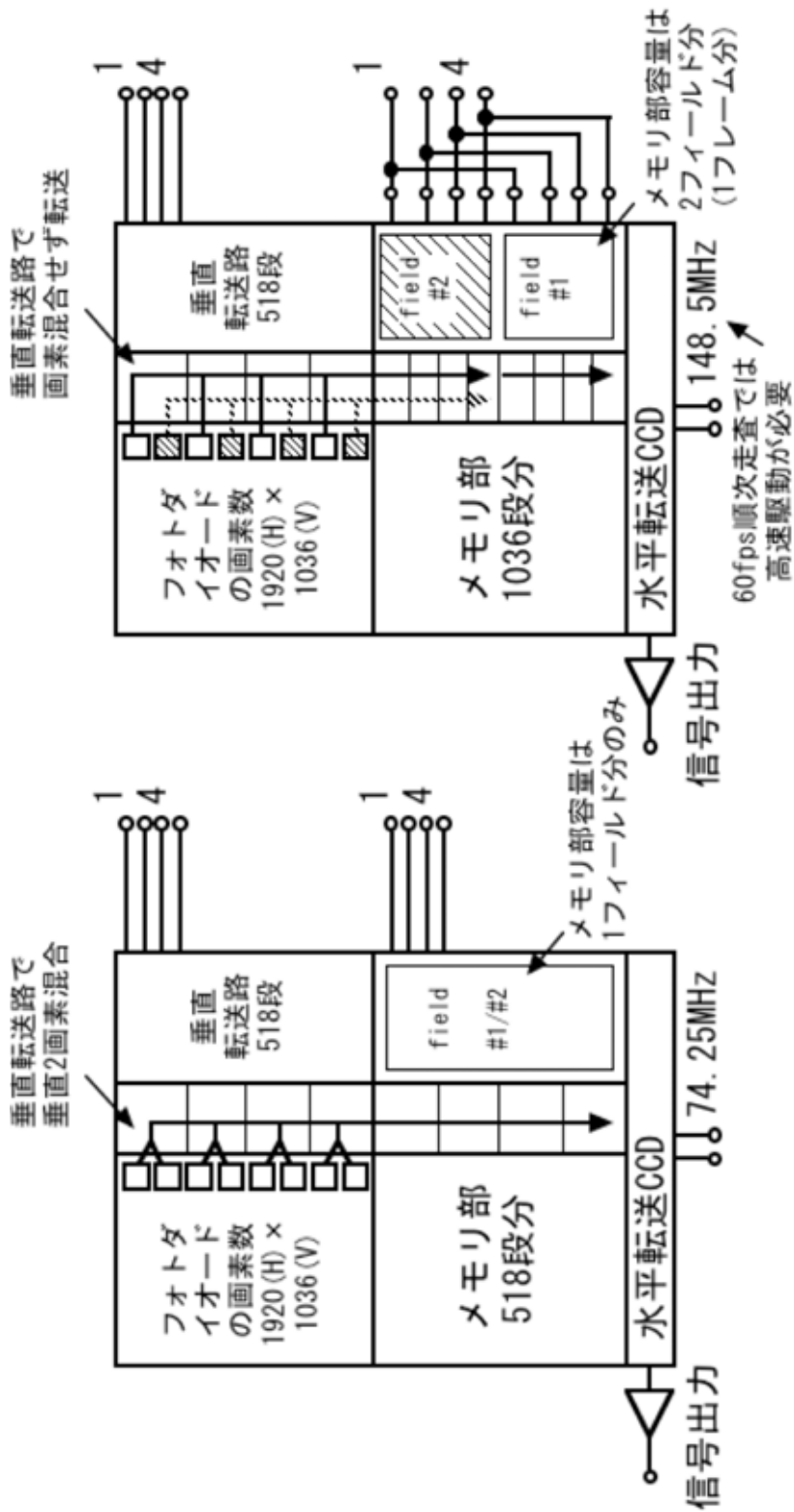
この手法は、放送用ハイビジョンカメラ用に開発された 2/3 インチ 200 万画素 M-FIT 型 CCD 撮像素子 (有効画素水平 1920 画素、垂直 1036 ライン) を用い、ハイビジョン順次走査駆動を実現するものである。M-FIT 型 CCD は本来、飽和、感度、スミアなどの基本特性改善のために開発されたものであるが、同一の素子で駆動方法を変えることにより、順次走査動作が可能となるように設計されている。図 4.1(b) に M-FIT 型 CCD の素子構造及び駆動法を示す。また比較のため、通常のインターレース走査に用いられる FIT 型 CCD の素子構造及び駆動法についても同図 (a) に示す。

通常インターレース用の FIT 型 CCD は、インターレース走査を行う際、雑音特性を改善するために垂直転送路内で受光部からの読み出し電荷を 2 画素分混合し、転送する。従って、CCD のメモリ部も画素数の半数の 518 ライン分しか保有していない (図 4.1(a))。

これに対し M-FIT 型 CCD では、受光部からの読み出しを複数回に分けて蓄積部へ転送する構造 (M-FIT 構造) となっている。そのため、受光部からの読み出し電荷を混合せずに第 1 フィールドと第 2 フィールド (奇数ラインと偶数ライン) の 2 回に分けて転送し、全画素分の電荷を独立に CCD のメモリ部に保存することが可能となる (図 4.1(b))。メモリ部から水平転送 CCD に転送された電荷は、30fps の場合はインターレース走査と同じ駆動周波数で、また 60fps の場合はインターレース走査の 2 倍の駆動周波数で、読み出される。CCD から出力された画像信号は奇数ライン、偶数ラインに分かれて読み出されるため、外部のメモリ回路で走査線を並び替え 1 フレームに再構成する。

菅原らはこの CCD を用い、30 フレーム/秒 (30fps) においてハイビジョン順次走査駆動を行い、垂直限界解像度として 1000TV 本が得られることを確認している [9]。

一方 60 フレーム/秒での全画素読み出しを行うためには垂直、水平共に駆動周波数がインターレース時の 2 倍と高速になる。特に水平 CCD 駆動周波数は 200 万画素撮像素子の場合、148.5MHz となる (表 4.1)。CCD のゲート電極は容量性負荷のため、この高速駆動に対し負荷インピーダンスは 10 程度となる。このため高速駆動が困難であり、これまで 30 フレーム/秒でしか行われていなかった。そこで、水平駆動回路を改善し、大きな出力



(a) 通常のFIT型CCD

(b) 順次走査可能なM-FIT型CCD

図 4.1: M-FIT 型 CCD の素子構造及びその駆動法

表 4.1: 200 万画素 M-FIT 型 CCD 駆動周波数

scanning mode	1035/60i	1035/60p
frame/field freq.(/sec.)	60 fields	60 frames
vertical CCD lines	518	1036
vertical CCD drive freq. (MHz)	0.58	1.16
horizontal CCD drive freq. (MHz)	74.25	148.5

電流がとれるようにするとともに、CCD の転送効率を向上させるため駆動電圧を 5V から 6.6V 程度まで増加させた。また垂直駆動についても駆動タイミングおよび電圧を最適化することにより、60 フレーム/秒での順次走査駆動を実現した。

#### 4.2.2 FIT 型 CCD による実現

前節では順次走査可能な M-FIT 型 CCD を用い、駆動周波数を高くすることにより 60fps での順次走査を実現した。しかしながらこの撮像素子は旧規格 (SMPTE-240M など) のため有効走査線が 1036 ラインしか有しておらず、現在のハイビジョン規格である 1080 ラインには対応していない。そこで、現在の放送用ハイビジョンカメラとして実用に供されている 2/3 インチ 220 万画素 FIT 型 CCD 撮像素子 (有効画素水平 1920、垂直 1080 ライン) を用い、60 フレーム/秒での 1080 ライン順次走査映像を得る手法を検討した。これは、本来はインターレース走査専用である撮像素子を用い、駆動方式の工夫により順次走査を可能とすると共に、やはり駆動周波数を従来の 2 倍速で高速駆動することにより、1080/60p を実現するものである [8]。この撮像実験装置により、現在のハイビジョン規格である 1080/60p に対応が可能となった。つぎに、インターレース走査用 FIT 型 CCD を用いて順次走査駆動を実現する手法について説明する。

インターレース走査用 FIT 型 CCD の構造を図 4.2 に示す。通常のインターレース駆動では、フォトダイオードで蓄積された信号電荷は垂直ブランキング期間内に垂直転送路へ転送され、引き続きフレームメモリへ高速で転送される。垂直転送路では垂直方向に画素加算を行うため、転送路容量が 2 画素分あり、かつ、転送段数は 1 フレームの半分 (1 フィールド、540 ライン) で構成されている。またメモリも同様に 1 フィールド分 (1920 x 540 画素) となっている。しかしながら本 CCD で順次走査を行うためには、全画素数分のメモリ部が必要となる。そこで垂直転送路をメモリとして使用する手法 [12] を用い、1 つめのライングループは FIT(Frame Interline Transfer) 転送によりメモリ部に保存し、2 つめのライングループは垂直転送路に保存することとする。

本 CCD を用いた順次走査駆動の手順を、以下説明する。図 4.3 に垂直転送路の駆動パル

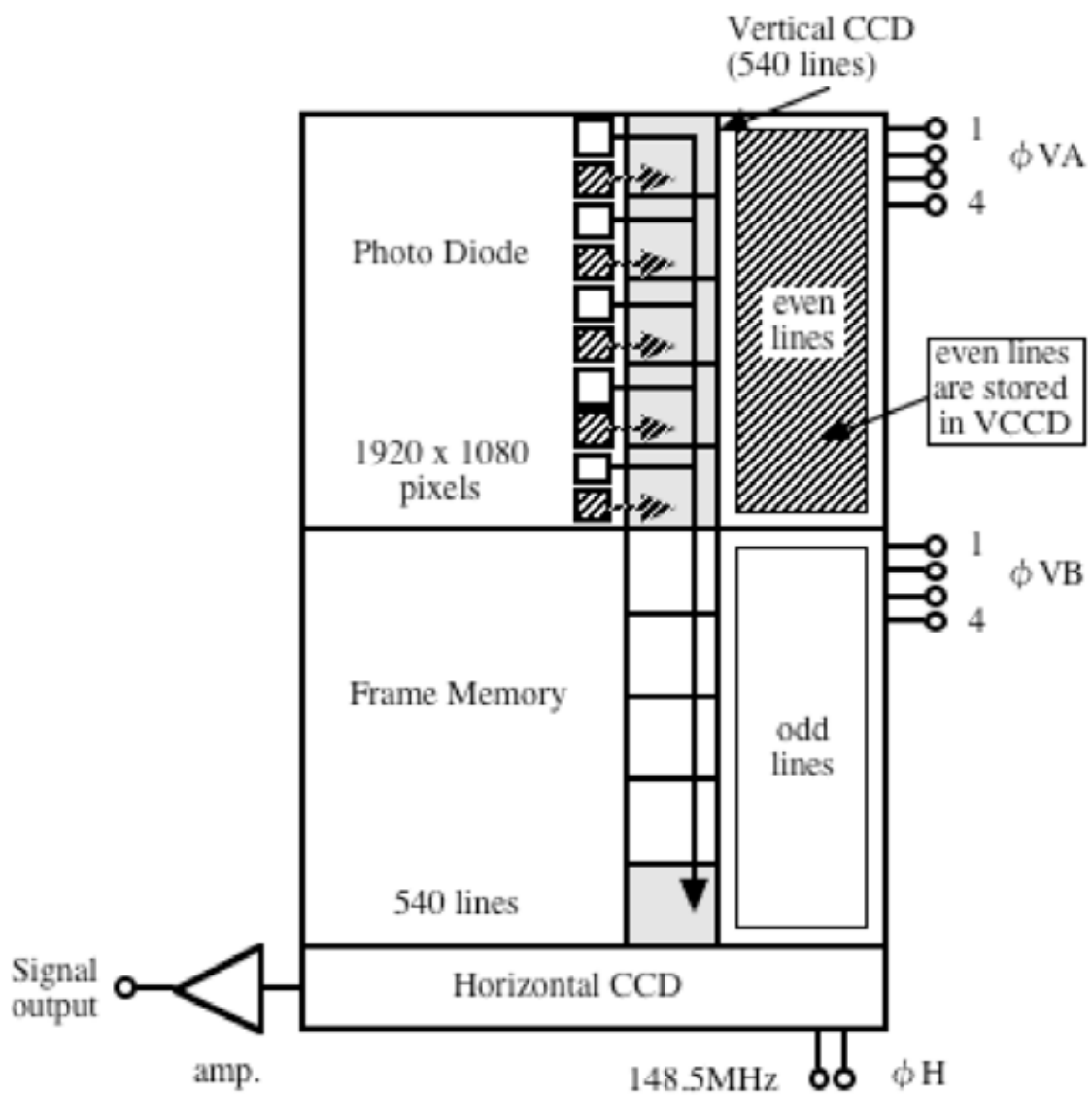


图 4.2: 1080I 用 FIT 型 CCD 構造と順次走査方式

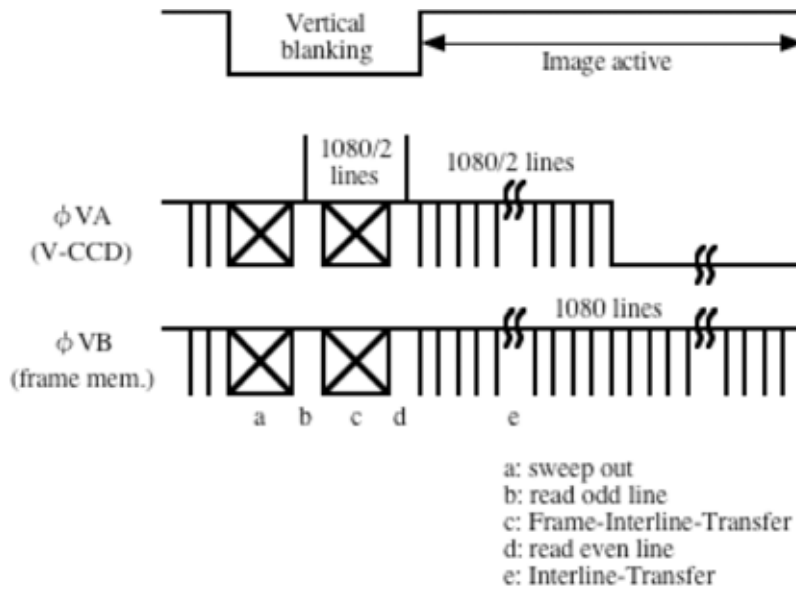


図 4.3: 垂直駆動パルスタイミング

タイミングを示す。

- (a) 垂直ブランキング期間において、まず垂直転送路内に残っている不要電荷を掃き出す。
- (b) 受光部の画素電荷のうち、奇数ラインの電荷だけ垂直転送路へ転送する。
- (c) (b) の画素電荷を CCD メモリ部へ高速転送する (FIT 転送動作)。
- (d) 受光部の画素電荷のうち、残りの偶数ラインの電荷を垂直転送路へ転送する。  
このとき、CCD メモリ部は 540 ライン分しかないのでこの画素電荷は FIT 転送はせず、そのまま垂直転送路に保存し、メモリ部として利用する
- (e) 垂直ブランキング期間が終了し有効画像期間になったら、通常の CCD 駆動と同じように、水平ブランキング期間毎に 1 ライン分の画素電荷をフレームメモリから水平転送路へ転送する (IT(Interline Transfer) 転送)。このとき、同時に垂直転送路に保持されている画素電荷も 1 ラインずつフレームメモリへ転送する。以上の動作をインターレースの 2 倍速で 1 フレーム期間内に行う。CCD から出力された画像信号は奇数ラインと偶数ラインに分割して出力されており、外部メモリでライン順番を並び替え 1 フレームの順次走査映像信号に再構成する。

以上の動作により、受光部の画素電荷を画素混合することなく、奇数ラインと偶数ライン 2 つのグループに分け、全画素を独立に転送することができる。また本駆動方式を用い

ることにより、順次走査が可能となるだけでなく、FIT 転送周波数もインターレース走査の倍速とすることなく、インターレース走査時と同等の速度に抑えることができる。

一方、以下のようなデメリットも生じる。すなわち、FIT 型 CCD では、FIT 駆動によって垂直転送路に転送された画素電荷を高速にフレームメモリ部へ転送することにより、垂直転送路への光の漏れ込みなどによるスミア妨害を軽減する構成となっている。しかしながら本方式では FIT 駆動と IT 駆動を併用するため、片方のライングループについては IT 駆動と同等のスミア妨害が発生する。これについては今後、信号処理や読み出し方の工夫により、IT 駆動による信号のスミアレベルを減じたり目立たなくする手法の検討を行う必要がある。

#### 4.2.3 水平 CCD の高速駆動実験

60fps で順次走査を行うためには水平、垂直共に駆動周波数をインターレース時の 2 倍とす必要がある。特に水平駆動周波数は 1 線読みの場合 148.5MHz と高速になる。一般に、電荷転送撮像素子である CCD は、X-Y アドレスのスイッチングによる CMOS 型撮像素子に比べ電荷転送に時間がかかるため [10]、高速駆動が困難である。そこで、CCD の駆動電圧を上げ、実験により高速駆動を確認した。

CCD の水平転送路を 148.5MHz で駆動し、駆動電圧を上昇させたときの転送効率を測定した。駆動電圧の測定は、撮像素子の駆動パルス入力端子でパルス波高値を測定することがプローブ容量の影響等により困難であったため、ドライブ回路の電源電圧で行った。CCD1 段あたりの転送効率の測定は、チャート画面を撮像し、画面左側と右側における信号振幅減衰率より、以下の式で求めた [11]。

$$A_R = \exp[-n\epsilon(1 - \cos 2\pi f/f_c)] \quad (4.1)$$

$$\eta = 1 - \epsilon \quad (4.2)$$

( $A_R$ : 振幅減衰率、 $n$ : 転送段数=1440、 $\epsilon$ : 非転送効率、 $\eta$ : 転送効率、 $f$ : 信号周波数=27.5MHz、 $f_c$ : クロック周波数=148.5MHz)

図 4.4 に測定結果を示す。駆動電圧を上げていくと共に転送効率が向上していることがわかる。今回はドライブ回路の制限により 6.6V までとしたが、CCD1 段あたりの転送効率は 99.98 % とすることができた。

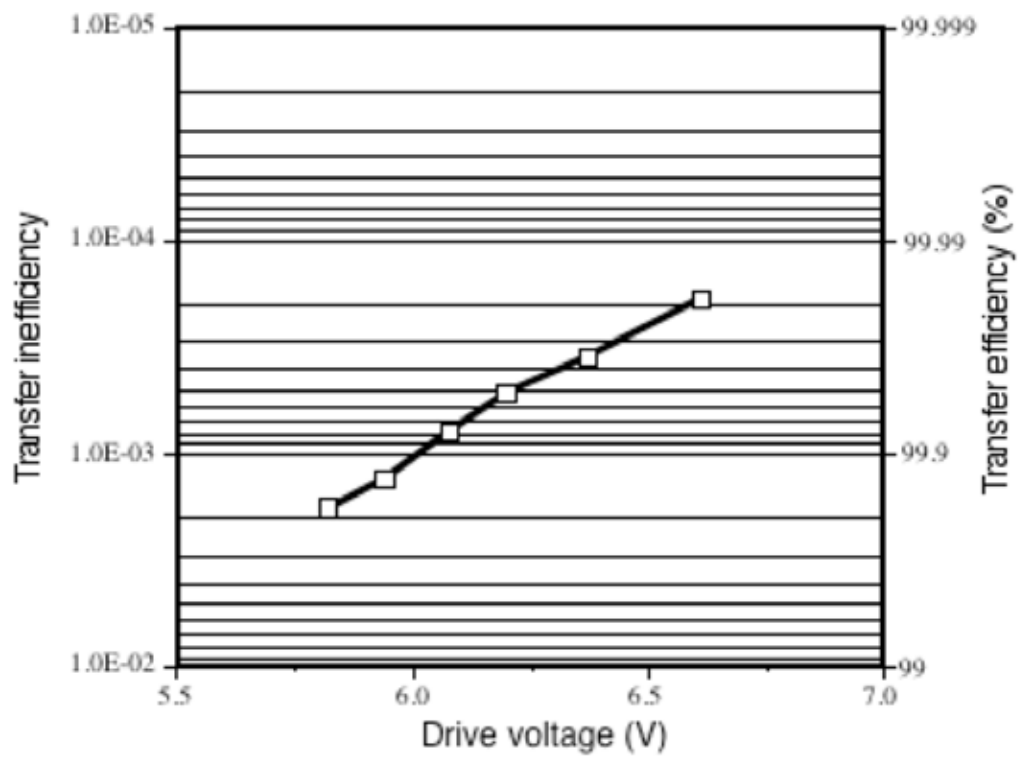


图 4.4: 水平 CCD 転送効率

表 4.2: 試作撮像実験装置仕様

走査方式	HDTV 順次走査
フレームレート	60 fps
カラー方式	3 板式
撮像素子	2/3 インチ光学系 220 万画素 ( 1920(水平) × 1080(垂直) インターレース用 FIT 型 CCD
駆動周波数	水平 148.5MHz 垂直 ( FIT 駆動 ) 2.1MHz 垂直 ( IT 駆動 ) 67.5KHz
CCU 出力	1080/60p HD-SDI Dual Link 1080/60p アナログ 1080/60i アナログ
ディスプレイ	1080/60p カラー CRT モニタ

#### 4.2.4 撮像実験装置

ハイビジョン用 2/3 インチ 220 万画素 ( 1920 x 1080 ) CCD を用いて 1080/60P 撮像実験装置を試作した。撮像実験装置システムの概要を図 4.5 に、また仕様を表 4.2 に示す。カメラヘッドは CCD を 3 枚用いた RGB 3 板式とし、それぞれの色チャンネル信号はアナログプロセス回路を経て、カメラコントロールユニット ( CCU ) へ送られる。CCU では A/D 変換後、ライン並び替えおよびフィルタ処理などのデジタル信号処理を行い、HDS-SDI-Dual Link[13] とアナログによる 1080/60p 信号、ならびに垂直 2 ライン信号を電気回路において加算平均した簡易 1080/60i 信号を出力する。試作カメラおよびカメラコントロールユニットの外観写真を図 4.6 に示す。

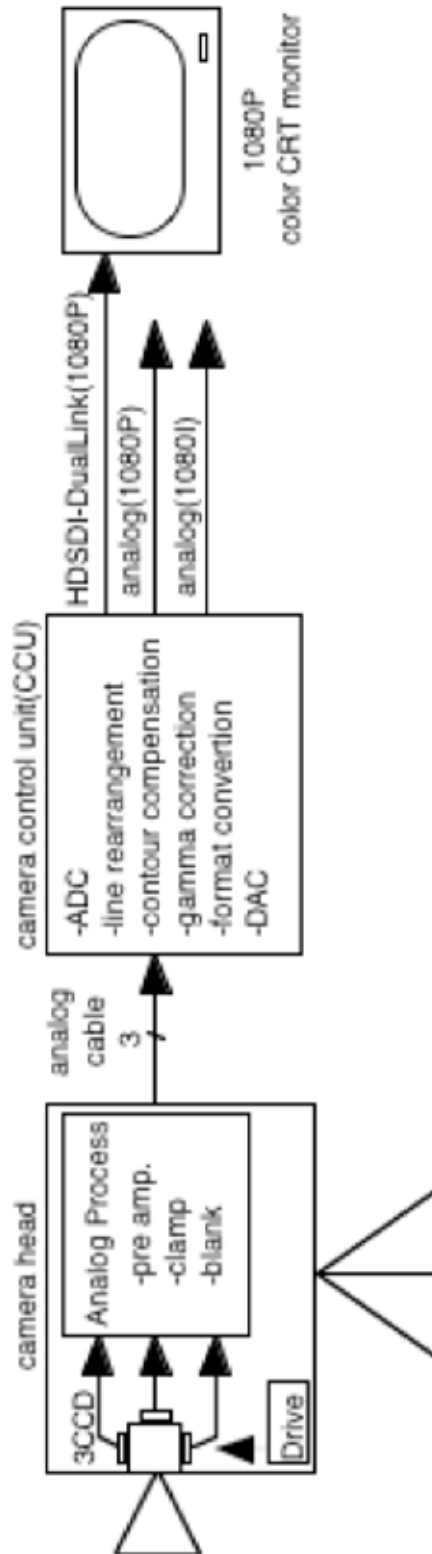


図 4.5: 試作撮像実験装置システム

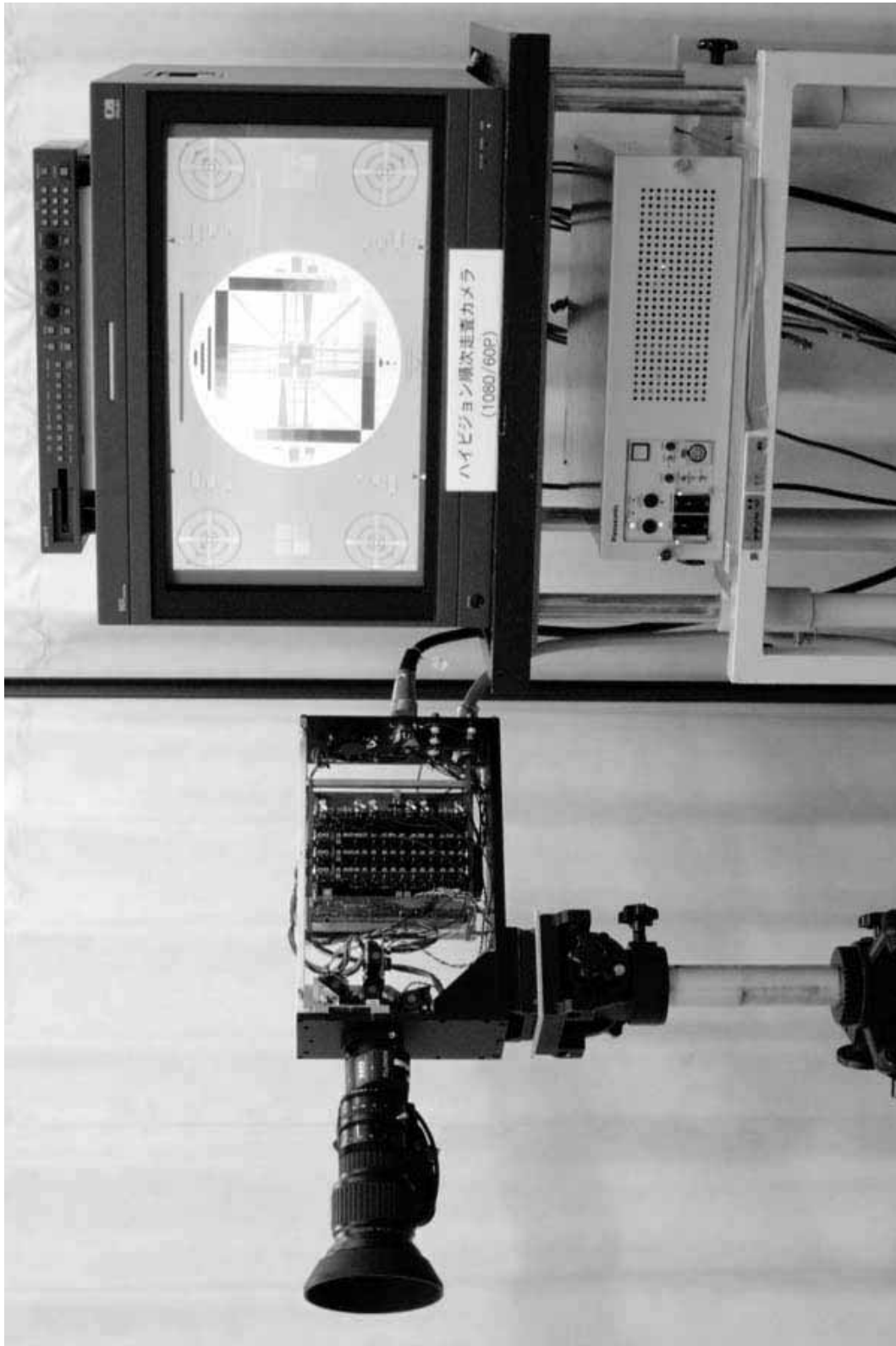


図 4.6: 試作撮像実験装置

## 4.3 撮影実験

### 4.3.1 垂直解像度特性の測定

試作装置を用いて撮像実験を行った。その撮像例を図 4.7 に示す。ハイビジョン用高精細度解像度チャートを撮像し、緑信号をモノクロモニタに表示し、その中心部を拡大した。水平、垂直共に解像度 1000TV 本が達成されている。また、垂直 MTF 特性を図 4.8 に示す。実線は、CCD の画素開口率を 100% と仮定し、 $F=5.6$  における理想レンズの回折限界および空間周波数 2160TV 本をヌルとする光学 LPF を挿入、として計算した理論値であり、黒丸は測定値である。700TV 本では 57%、1000 TV 本でも 30% の高い変調度が得られた。

### 4.3.2 走査変換による画質改善シミュレーション

つぎに、順次-インターレース走査変換による画質改善実験を行った。映像は、順次走査およびインターレース走査カメラで移動する CZP (Circular Zone Plate) チャートを撮像した。CZP チャートは、 $x$  を水平方向、 $y$  を垂直方向の空間座標とすると  $g(x, y) = \cos[\pi(x^2 + y^2)]$  の波形で描かれており、画面位置によって異なった空間周波数を示す。1080TV 本までの空間周波数を 1/60 秒あたり 1/1080 画面高ずつ下方向に移動させることにより、図 4.9 に示す時空間周波数成分の動画像が得られる [14][15]。これをカメラで撮像すると、順次走査では 1080TV 本以上が、インターレース走査では 540TV 本以上が有害な折り返し成分となる。

カメラに用いた光学 LPF は、順次走査では 2160TV 本をヌルとする特性となっている。一方、インターレース走査カメラの光学 LPF 特性は明確ではないが、垂直 MTF 特性を測定した結果、ヌル点は 1000TV 本程度以上と思われる。従って、どちらのカメラも光学的には 1000TV 本程度までは帯域を有している。順次-インターレース走査変換は、映像を PC に取込みソフトウェアによる計算でフィルタ処理を行った。順次走査カメラによって得られた映像に対して、図 4.10 に示す 540TV 本の垂直帯域制限フィルタ処理を施した後、2:1 に走査線を間引いてインターレース走査のフィールド静止画像とした。インターレース走査カメラによる映像についても電気フィルタ特性を揃えるため、フレーム画像に対して同じ帯域制限フィルタ処理を施した後、走査線を間引いてフィールド静止画像とした。

実験結果を図 4.11 および図 4.12 に示す。540TV 本から 1080TV 本の帯域において、インターレース走査カメラ映像 (図 4.11) では折り返し成分が妨害として視認されているのに対し、順次走査-インターレース走査変換映像 (図 4.12) では折り返し成分がほとんど視認されておらず、順次走査による撮影および走査変換によりインターレース走査映像の画質も改善されることが確認できた。

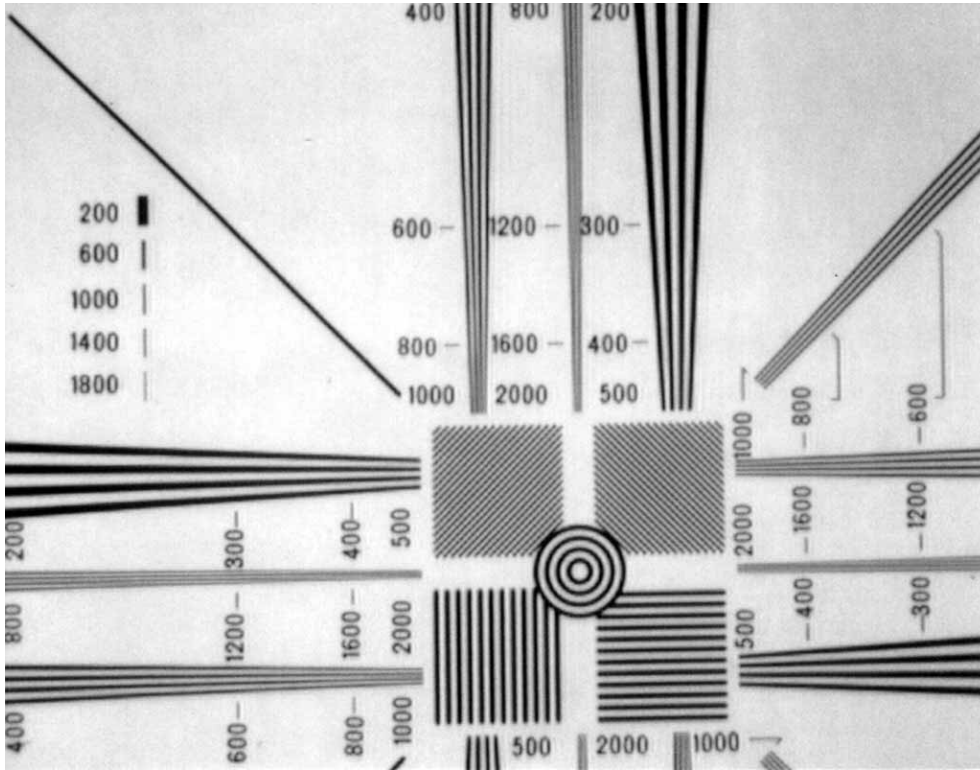


图 4.7: 顺次走查摄像例

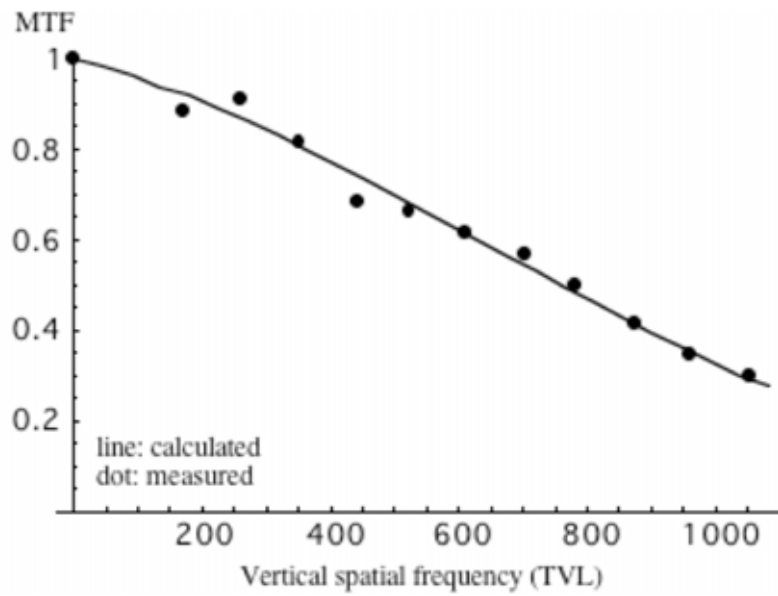


图 4.8: 垂直 MTF 特性

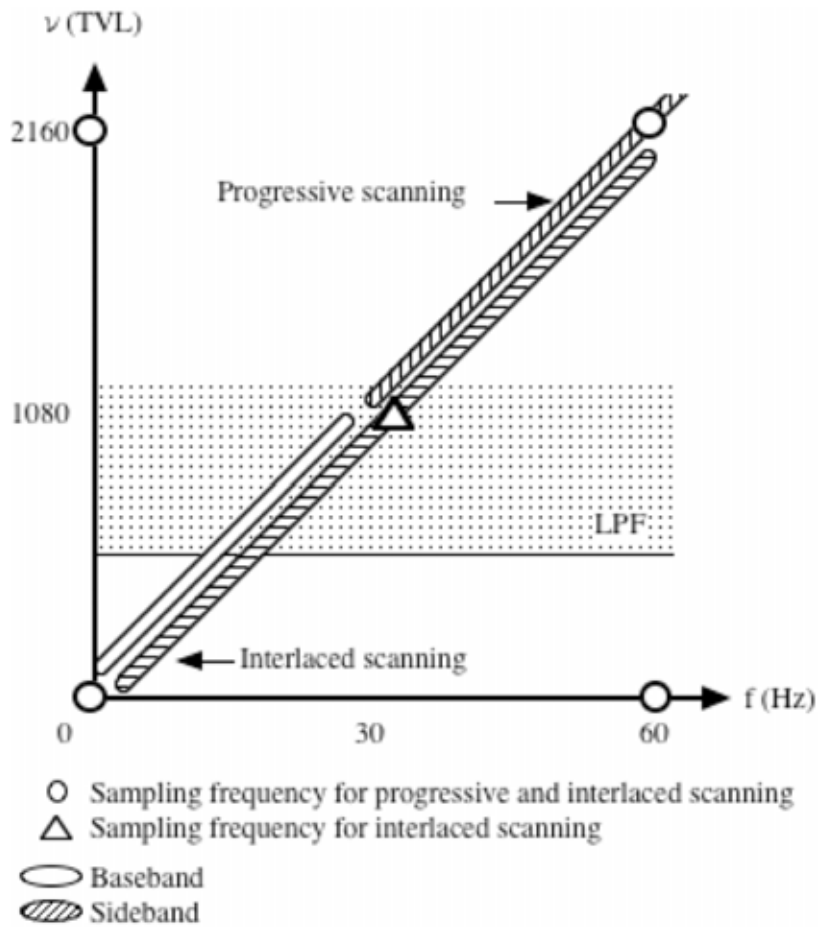


図 4.9: 撮像画像の時空間周波数成分

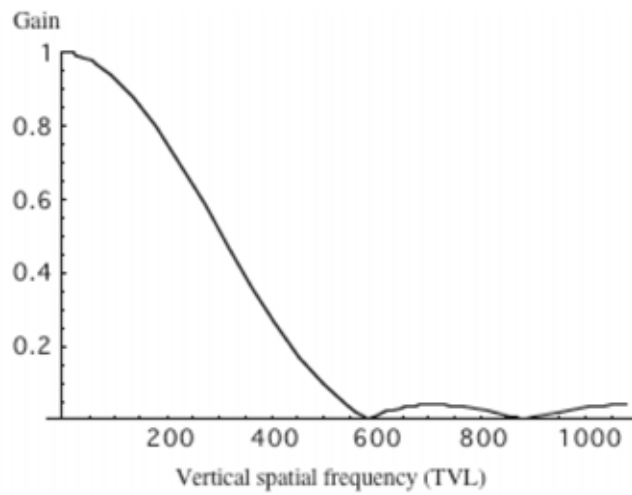


図 4.10: 垂直帯域制限フィルタ特性

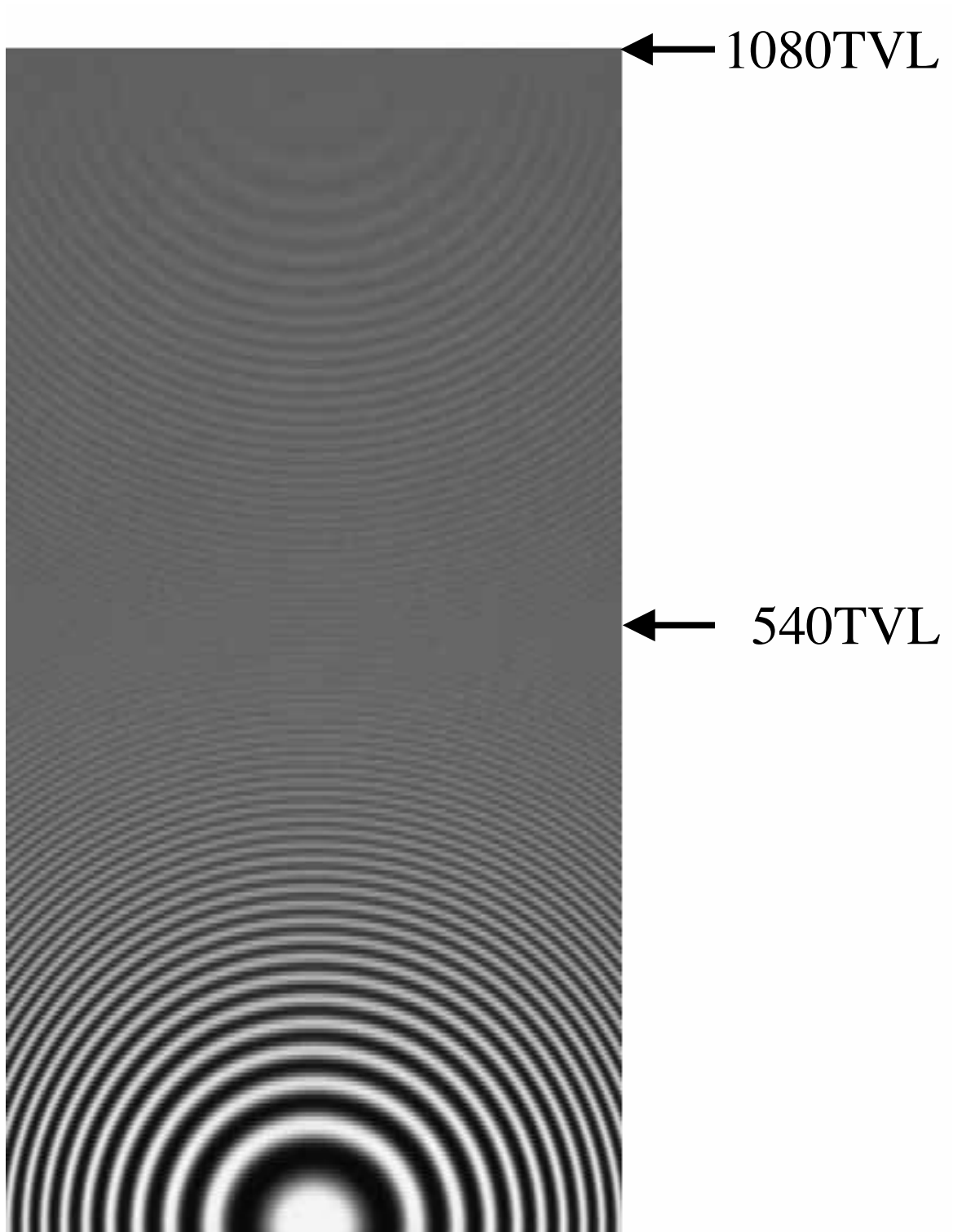


図 4.11: 走査変換による画質改善例 (インターレース走査カメラで撮像)

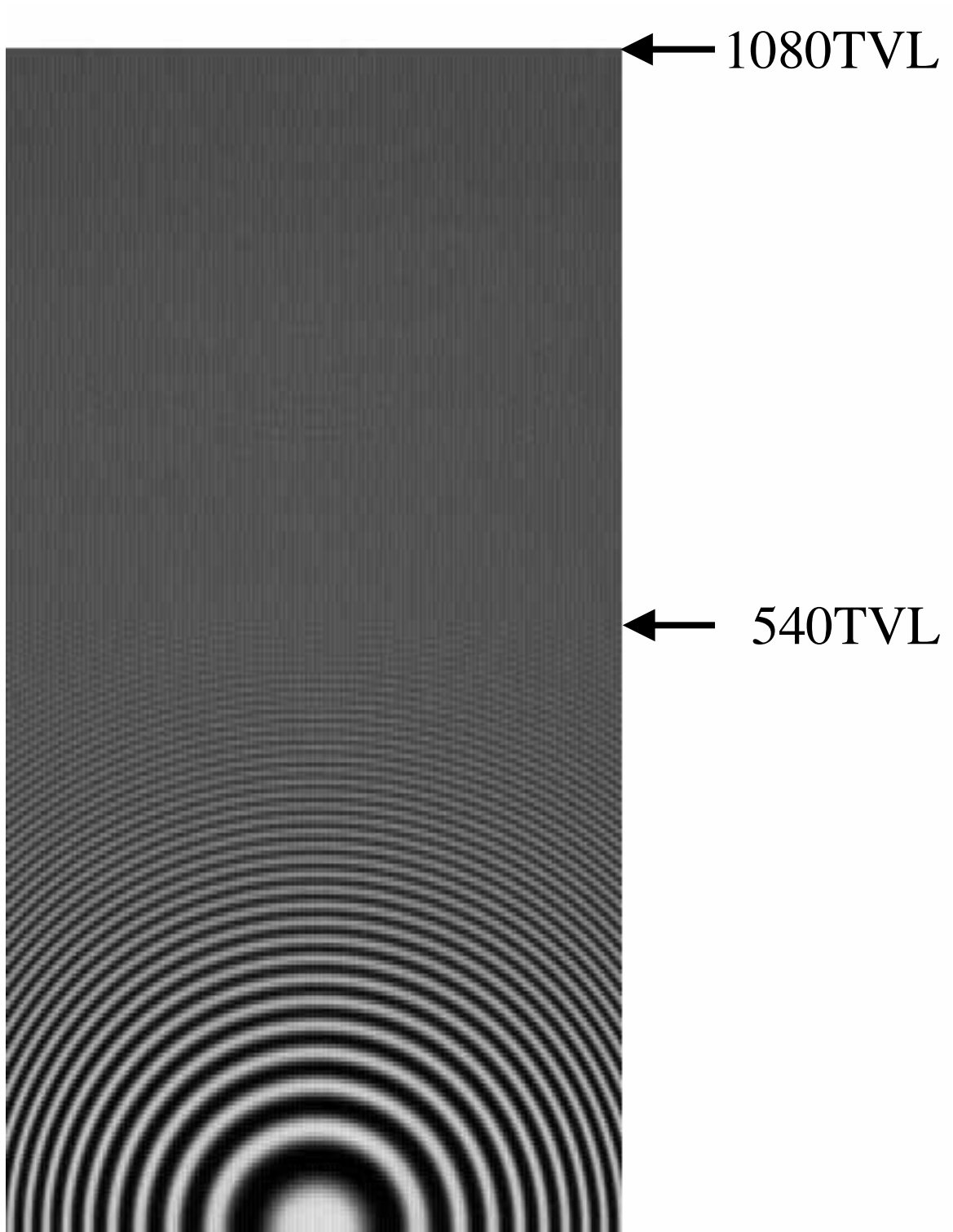


図 4.12: 走査変換による画質改善例 (順次走査カメラで撮像しインターレース走査に変換)

## 4.4 まとめ

カメラをインターレース走査から順次走査とすることにより、垂直解像度や動解像度（時空間解像度）が改善される。また順次走査で撮像し、インターレース映像へ変換処理を行うことにより、インターレース妨害の低減などが図れる。ここでは、ハイビジョン放送用カメラに用いられている 2/3 インチ 200 万画素 M-FIT 型 CCD および 220 万画素 FIT 型 CCD を用いて、60 フレーム/秒のハイビジョン順次走査映像を実現した。

順次走査を行うためには、CCD の高速駆動が必要となる。前述の CCD を用いて高速駆動実験を行った結果、駆動電圧を上げることにより 148.5MHz において 1 段当たりの転送効率 99.98 % を得ることができた。3 板カラー方式のハイビジョン順次走査撮像実験装置を試作し撮像実験を行った結果、限界解像度は水平、垂直ともに 1000TV 本を得、また垂直 MTF 特性が 700TV 本において 57 % と高い変調を得ることができた。一方、順次走査映像からインターレース走査映像へ変換するシミュレーション実験を行い、ハイビジョン映像のインターレース妨害が抑えられることを確認した。

## 参考文献

- [1] 西澤台次, 田中豊, "順次走査変換による画質改善", NHK 技研月報, 27, 12, pp.507-512(1984)
- [2] SMPTE standard for Television 274M: "1920 x 1080 Scanning and Analog and Parallel Digital Interfaces for Multiple Picture Rates" (1995-1998)
- [3] ITU-R Recommendation BT.709-4: "Parameter Values for the HDTV Standards for Production and International Programme Exchange" (1990-2000)
- [4] 電気通信技術審議会一部答申 諮問第 74 号「デジタル放送方式に係る技術的条件」
- [5] Y.Toyoda, K.Itakura, T.Nobusada, Y.Saitoh, N.Kokusennya, R.Nagayoshi, H.Tanaka, M.Ozaki, M.Sugawara, K.Mitani, Y.Fujita, "A 2/3-inch 2.0M-pixel M-FIT CCD with a single channel HCCD for HDTV camera," ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.220-221 (1994)
- [6] 板倉啓二郎, 信定俊英, 豊田泰之, 斎藤幸男, 国仙谷昇, 永吉良一, 田中宏典, 尾崎正義, 菅原正幸, 三谷公二, 藤田欣裕, "2/3 インチ 200 万画素 M-FITCCD イメージセンサ", テレビ学技報 Vol.18, No.16, pp.7-12 (1994)
- [7] H. Shimamoto et al.: "High-Speed Progressive Operation of a 2M-Pixel M-FIT CCD", Proceedings of SPIE, vol.4306, pp.205-209 (2001)
- [8] 島本ほか: "ハイビジョン用 220 万画素 CCD による 60 フレーム/秒順次走査撮像実験", 映情学技報, Vol.26, No.78, pp.17-20 (2002)
- [9] 菅原正幸, 三谷公二, 齋藤敏紀, 藤田欣裕, 板倉啓二郎, "2/3 インチ 200 万画素 CCD の全画素読み出し駆動", テレビ学技報, Vol.18, No.34 pp. 55-60 (1994)
- [10] James E. Carnes: "Free Charge Transfer in Charge-Coupled Devices ", IEEE trans. Electron Devices, Vol.ED-19, No.6, pp.798-808 (1972)
- [11] Joyce and Bertran: "Linearized Dispersion Relation and Green's Function for Discrete Charge Transfer Devices with Incomplete Transfer", Bell Syst. Tech Jour. 50, 1741-1759 (1971)

- [12] 芳賀, ”固体撮像素子駆動方法”, 特開平 1-233971 (1989)
- [13] SMPTE standard for Television 372M: ”Dual Link 292M Interface for 1920 x 1080 Picture Raster”(2002)
- [14] 吹抜敬彦, ”TV 信号の多次元信号処理”, 日刊工業新聞 (1988)
- [15] 栗田, ”ハイビジョン倍速走査方式画像のハイビジョンへの走査変換とその画質”, テレビ学技報, Vol.17, No.54, pp.31-36 (1993)

## 第5章 放送用カメラの小型化技術の検討

### 5.1 はじめに

放送業務に用いられているハイビジョンカメラ（放送用 HDTV カメラ）の多くは、第2章に述べたように、撮像素子を3枚用い分光プリズムによって赤 (R)・緑 (G)・青 (B) のカラー信号を得る、3板撮像方式（以降3板式とも呼ぶ）を用いている [1]。この方式は、放送映像品質として十分な解像度特性が得られる一方、光学プリズムや複数の撮像素子を用いるため、一般に機材が高価となってしまう。他方、民生用カメラに多用されている単板撮像方式（以降単板式とも呼ぶ）は分光プリズムを用いず1枚の撮像素子でカラー信号を取得するため、機材が小型・安価にできる。しかしながら、これまで一般に単板式カメラは十分な解像度特性が得られず、放送用カメラとしては特に小型化が求められるような場合に限って用いることが多かった。

一方、単板式の利点として、光学プリズムを用いないためフランジバックが短いレンズが利用できる。その結果、フィルム撮影用レンズなどを使用することが可能となり、レンズ選択のバリエーションが増える。また、レンズ筐体が3板式用と比較すると小さくしやすいので、逆にカメラシステムとして大きな光学フォーマットでも採用しやすく、例えば、大判撮像素子を用いることにより感度特性や解像度特性に優れたカメラを設計することも可能である [2]。

ここでは、放送用品質を有しつつ小型・安価でかつ高解像度のハイビジョンカメラを実現することを目的とし、従来のハイビジョンカメラ用撮像素子よりも画素数が多く受光面積も大きな1.25インチ光学系890万画素単板カラー撮像素子を用い、試作した放送用単板カラーハイビジョンカメラについて述べる。まず本方式の特徴である、890万画素撮像素子による単板カラー撮像方式を提案し、実用化カメラとして試作したカメラとその撮像特性について検討する。さらに、リニアマトリクスによる色再現特性の改善についても検討する。

表 5.1: 890 万画素単板カラー CMOS 撮像素子の主な仕様

Process	0.13 $\mu$ m 2 Poly 3 Metal CMOS process
Optical format	1.25 Inch
Active image size	17.3mm $\times$ 9.1mm
Active pixels	4112(H) $\times$ 2168(V)
Pixel size	4.2 $\mu$ m $\times$ 4.2 $\mu$ m
Supply voltage	3.3 V (Analog) / 1.8V (Digital)
ADC	14Bit column parallel
Scanning	Progressive
Frame rate	60 fps
Color filter	RGB Bayer's pattern

## 5.2 多画素撮像素子による放送品質小型単板カラーカメラの提案

### 5.2.1 890 万画素単板カラー CMOS 撮像素子

本試作カメラで用いている 890 万画素単板カラー CMOS 撮像素子 [3] について、主な仕様を表 5.1 に、撮像素子の構成を図 5.1 に、素子の写真を図 5.2 に示す。

本撮像素子は、NHK の超高精細映像システム（スーパーハイビジョン）カメラ [4] 用として開発された撮像素子 [5] をベースとし、撮像特性の改善およびカラー化を図ったものである。有効画素数は、SMPTE 暫定規格（SMPTE2036-1）[6] の水平 3840  $\times$  垂直 2160 ラインをカバーしており、このため水平・垂直共に HDTV 規格（SMPTE274M、水平 1920  $\times$  垂直 1080 ライン）[7] の 2 倍の画素数を確保することが可能である。画素サイズは、放送用カメラに標準的に用いられている 2/3 インチ 220 万画素撮像素子 [8] の 5.0 $\mu$ m  $\times$  5.0 $\mu$ m よりも若干小さいが、画素数が多いため撮像素子全体の受光サイズは大きく、1.25 インチ光学系に相当する。撮像素子は 60fps の順次走査が可能である。

カラーフィルタは、撮像素子が順次走査可能であること、また色再現特性も重視することから、原色ベイヤー配列 [9] を用いた。一般に、単板式は色信号を得るのにオンチップカラーフィルタを用いるため、色分解光学プリズムを使用する 3 板式と比べて、光の利用効率が低いことが短所として挙げられる。本方式では、1 画素あたりの画素サイズは従来の 3 板式と同程度としつつ、画素数を増やすことによって撮像素子全体の受光面積が大きくなっている。また後述するように HDTV フォーマットの 1 画素に対して、G,G,B,R の四つの画素信号を用いることが可能なため、信号処理によって画素信号を加算することが可能である。これらの理由により、カメラとして従来の 3 板式と同等の信号雑音特性を得ることが可能となった。実際に本試作カメラを用い信号雑音特性を測定した結果については、後ほど述べる。

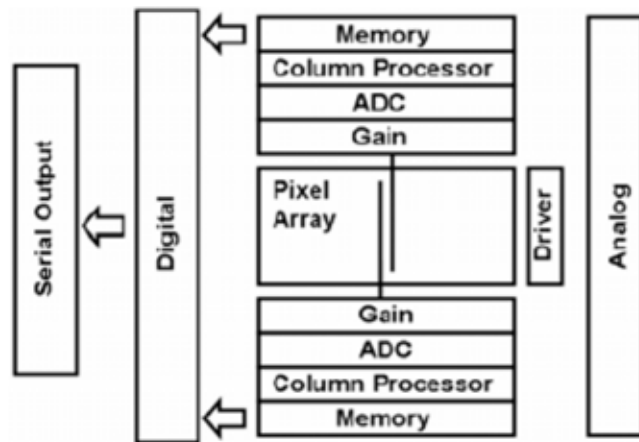


図 5.1: 撮像素子のブロックダイアグラム [3]



図 5.2: 撮像素子の写真

### 5.2.2 多画素撮像素子による単板方式の特徴

本カメラの特長は、撮像素子の画素数が多く、また受光面積が大きいことである。そのため第2章でも述べたように、多くの単板式カメラで画素数が不足するために行われている画素補間処理が不要であり、撮影画像に細かい映像が含まれている場合に発生しやすい、補間処理による偽色など不要なアーティファクトを招く心配がない。また受光面積が大きいためレンズのイメージサイズが大きくなり、回折によるレンズの解像度特性は改善する。

カメラの解像度特性（空間周波数特性またはMTF特性とも言う）は、撮像素子の画素数だけではなく、レンズの回折や、また撮像素子の画素開口率によるアパーチャ効果などのMTF特性も総合したものとなる。そこで、本方式におけるこれらの解像度特性の計算を行った。

#### レンズの回折によるMTF特性

収差のない理想的なレンズでも、波動光学的な回折現象によりMTF特性の劣化が生じる。その特性は以下の式で表される。

$$MTF_{dif}(\mu) = \frac{2\beta - \sin 2\beta}{\pi} \quad (5.1)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left( \lambda F_{no} \frac{\mu}{2V} \right) \quad (5.2)$$

[ただし、 $\lambda$ ：波長、 $F_{no}$ ：レンズ絞り値、 $\mu$ ：空間周波数 (TV本)、 $V$ ：像面垂直長]

本方式の光学フォーマットは1.25インチで、撮像素子の像面垂直長は9.1mmである。この場合について、 $\lambda=550\text{nm}$ 、 $F_{no}=5.6$ の条件で計算した結果を図5.3に示す。また比較として従来の3板式（2/3インチ光学系、撮像素子の像面垂直長5.4mm）の場合で計算した結果を同図に破線で示す。同じF値ではイメージサイズが大きいほどMTF特性が高いことがわかる。

#### 画素開口率によるMTF特性

Bayerパターンにおいて図5.4に示すように $G_1, G_2, R, B$ の各色画素が2次元平面上に $d_0$ の間隔で正方格子状に配置されるとき、 $G_1$ 画素を基準に考えるとR画素は水平方向に $d_0/2$ 、B画素は垂直方向に $d_0/2$ 、 $G_2$ 画素は水平・垂直方向にそれぞれ $d_0/2$ ずれて配置されており、G,R,B信号の周波数スペクトルは以下ようになる。

$$S_g(\mu, \nu) = A(\mu, \nu) \frac{1}{d_0^2} \sum_m \sum_n \delta \left( \mu - \frac{m}{d_0}, \nu - \frac{n}{d_0} \right) \cdot \{1 + (-1)^{m+n}\} \quad (5.3)$$

$$S_r(\mu, \nu) = A(\mu, \nu) \frac{1}{d_0^2} \sum_m \sum_n \delta \left( \mu - \frac{m}{d_0}, \nu - \frac{n}{d_0} \right) \cdot (-1)^m \quad (5.4)$$

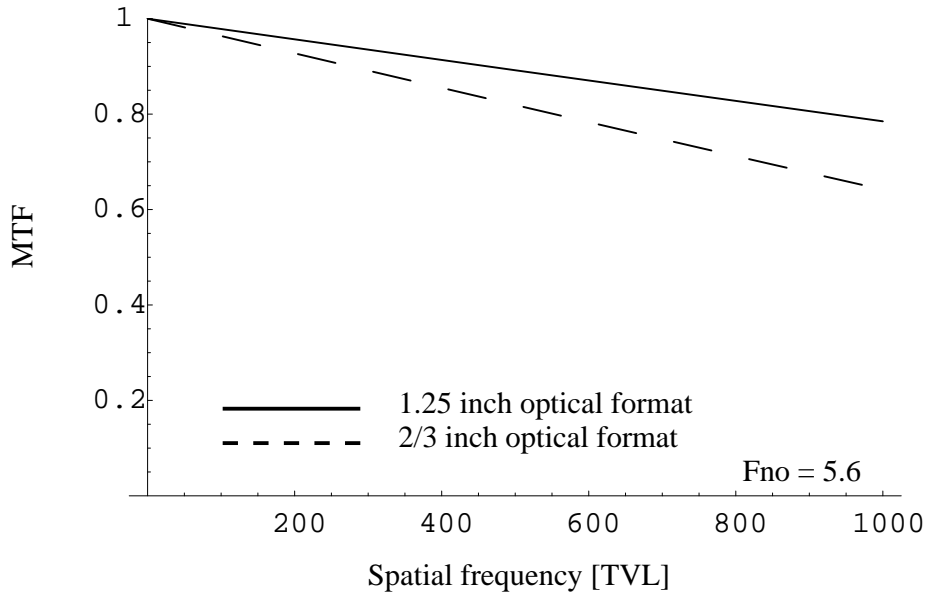


図 5.3: レンズの回折による MTF 特性

$$S_b(\mu, \nu) = A(\mu, \nu) \frac{1}{d_0^2} \sum_m \sum_n \delta\left(\mu - \frac{m}{d_0}, \nu - \frac{n}{d_0}\right) \cdot (-1)^n \quad (5.5)$$

[ただし、 $\mu, \nu$  はそれぞれ水平および垂直空間周波数、 $A(\mu, \nu)$  は各画素のアーチャー特性、 $\delta$  はデルタ関数、 $m, n$  は整数] となる。

ところで、本方式では撮像素子の有効画素数が水平、垂直ともに HDTV の 2 倍なので、図 5.4 のように HDTV フォーマットで考えると水平 2 画素、垂直 2 画素の Bayer パターンがちょうど 3 板式の 1 画素を構成することになる。このとき、単板撮像素子自体の画素開口率が仮に 100% (図 5.4 の  $d = d_0/2$ ) のときでも、3 板式における 1 画素分に占める面積割合は計算上 25% となる。

一般に画素開口窓が正方形の場合、水平・垂直方向の開口率を  $d/d_0$  とするとその周波数レスポンスは

$$MTF_{apt}(\mu, \nu) = \frac{\sin\left(\pi \frac{d}{d_0} \frac{\mu}{f_s}\right)}{\left(\pi \frac{d}{d_0} \frac{\mu}{f_s}\right)} \cdot \frac{\sin\left(\pi \frac{d}{d_0} \frac{\nu}{f_s}\right)}{\left(\pi \frac{d}{d_0} \frac{\nu}{f_s}\right)} \quad (5.6)$$

[ただし、 $f_s$  はサンプリング周波数] となる。

1 画素について、本方式を  $d/d_0 = 0.5$ 、3 板式の場合を  $d/d_0 = 1$  として計算した結果を図 5.5 に示す。実線が本方式、破線が 3 板式の場合である。本方式では計算上の開口率が小さいためレスポンスが高いことがわかる。

このように、本方式では 3 板式と比較して G 信号の空間サンプリング周波数が高く (B,R 信号については 3 板式と同じ) またイメージサイズや計算上の画素開口率により各画素信

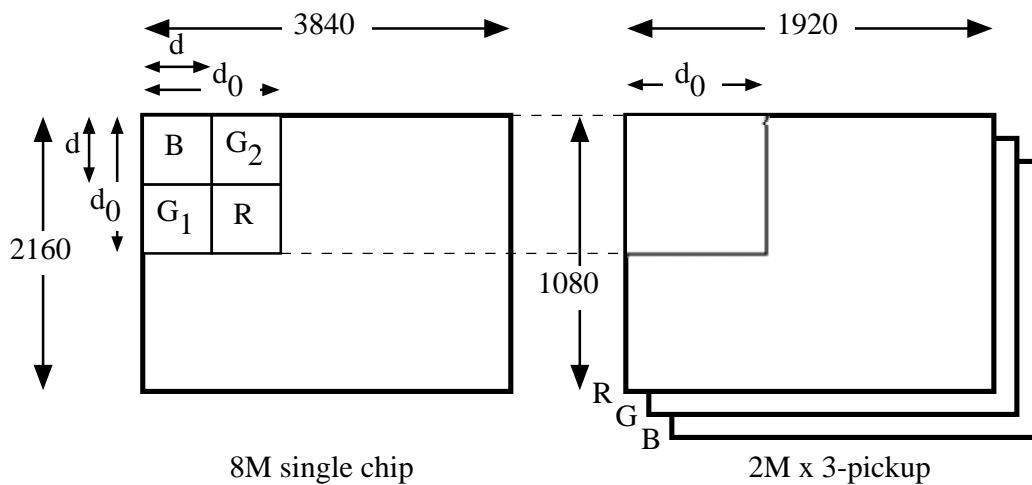


図 5.4: 本方式と 3 板式の HDTV フォーマットにおける画素構成の違い

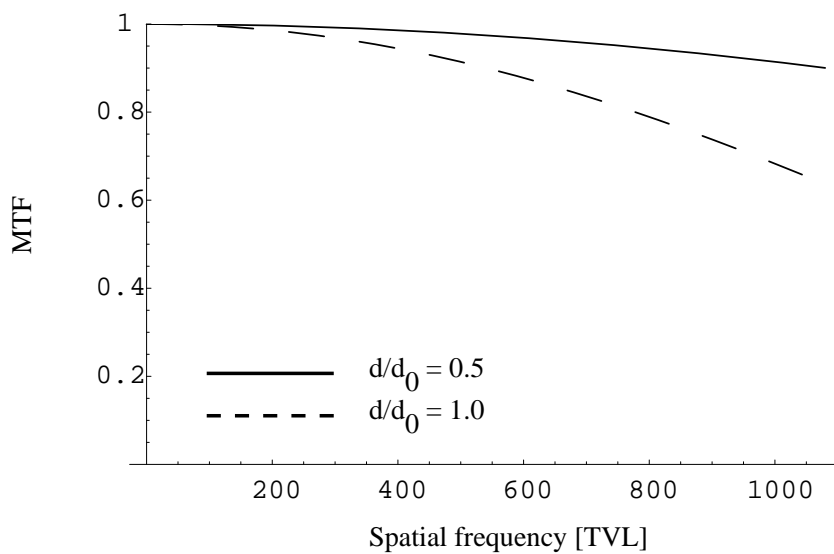


図 5.5: 画素開口率による MTF 特性

表 5.2: 試作カメラの主な仕様

Image sensor	8.9 Mega pixel CMOS
Image system	Single-chip color
Lens	Four Thirds System format
Video format	1080/59.94i
Video signal	HD-SDI
Sensitivity	2000Lux F11
Dynamic range	400%
Signal-to-Noise ratio	60dB
Weight	Appx.1.4 kg
Camera control	Remote control panel

号の MTF レスポンスが高いことが特徴となっている。本カメラでは、後述するように実際に放送用カメラとして使用するときには他の放送用 3 板式カメラと解像度特性を揃えるために電気回路で信号帯域を制限しているが、その際にも、放送用カメラでは通常行われる画像のエッジ量を調整する輪郭補償量の抑圧や、また雑音特性の改善につながっている。

### 5.2.3 試作カメラ

試作したカメラの外観を図 5.6 に、カメラシステムの概要を図 5.7 に、主な仕様を表 5.2 に示す。

レンズは、本撮像素子とほぼ同じ光学フォーマットを有し、またデジタルスチルカメラ用として市販され汎用性も高いフォーサーズシステム規格 [10] レンズを用いた。重量はカメラ単体で約 1.4kg、レンズを含めても 2kg 程度である。撮像素子からは、全画素信号が毎秒 60 フレームの順次走査で出力され、カメラプロセス回路で HDTV 信号へ変換した後、HD-SDI 信号形式で出力される。カメラ制御はリモートパネルより操作可能である。



図 5.6: 試作カメラ外観

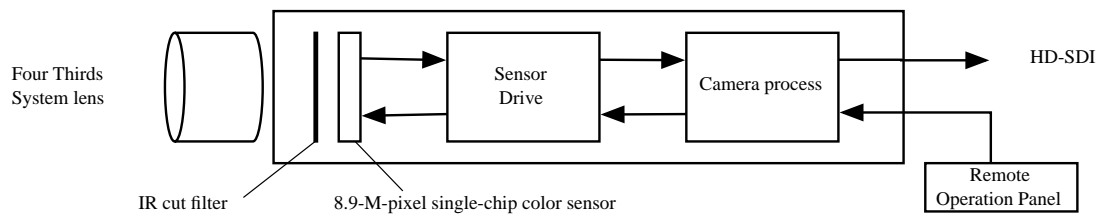


図 5.7: カメラシステム概要ブロック図

## 5.3 撮像実験

### 5.3.1 解像度特性の測定

前章において本方式は、MTF 特性が原理的に高いことを示したが、今回の試作カメラでは従来の放送用カメラ（2/3 インチ光学系 220 万画素 3 板式 CCD カメラ）と特性を揃えるため、電気的なローパスフィルタ（LPF）処理によって解像度を抑え、その分雑音特性を向上させた。なお、光学 LPF についてはまだ詳細な検討を行っていないため、今回の測定実験では挿入していない。

本カメラを用い、輝度信号における MTF 特性を測定した結果を図 5.8 に示す。従来の放送用 3 板式 HDTV カメラで測定した結果も同図に破線で示す。800TV 本における MTF 特性は 35% 以上（矩形波チャート変調度 (aperture response; AR) では 45% 以上）あり、本カメラが 3 板式カメラと同等の解像度特性を有していることがわかる。

図 5.9 に本試作カメラの撮像例（解像度チャートの画面中心部拡大写真）を示す。今回の測定実験では、モアレによる偽色の発生などは顕著には見られなかったが、今後光学 LPF 特性も含めた最適な解像度特性について検討を行っていく。

### 5.3.2 雑音特性の測定

本カメラの HD-SDI 出力信号をアナログ信号に変換し、輝度信号における雑音特性を HDTV ビデオノイズメータ（シバソク製 VN32A6）で測定した。その結果、感度 2000 lux、F11、ダイナミックレンジ 400% において、SN 比 60 dB が得られた。これは感度、ダイナミックレンジ、SN 比を合わせた総合的な撮像特性としては放送用 3 板式 HDTV カメラと同程度の性能であり、放送用カメラとしての性能を得ている。

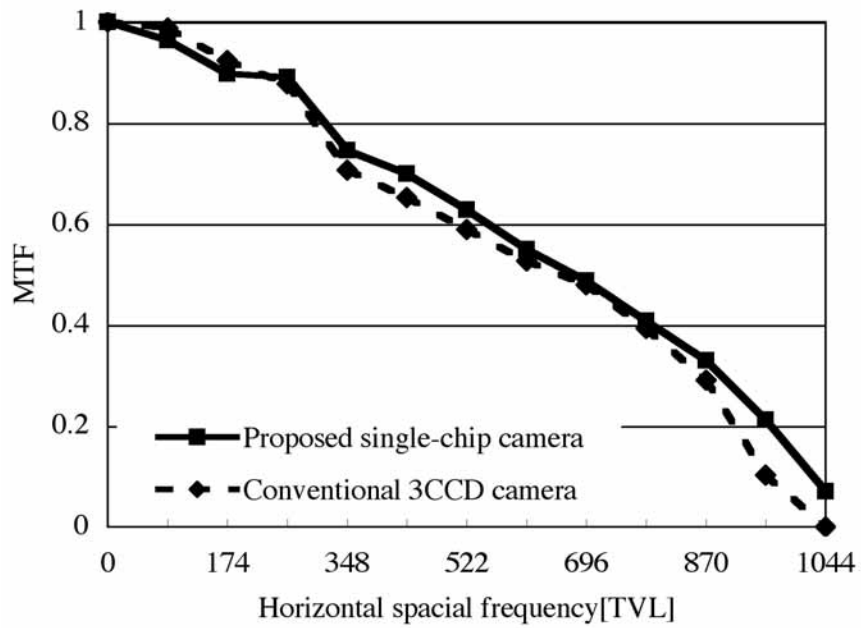


図 5.8: 撮像方式による MTF 特性の違い

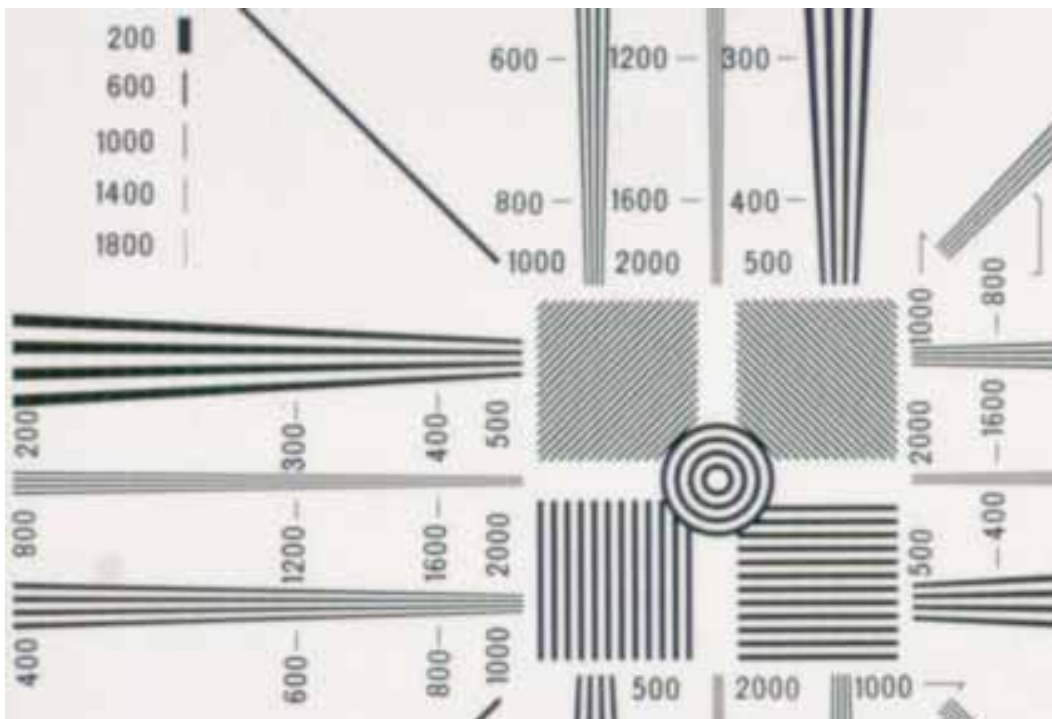


図 5.9: 解像度チャートの画像例 (画面中心部)

### 5.3.3 色再現特性の測定

単板式と3板式では光学的な色分離方式が異なるため色再現特性も異なると考えられる。そこで、測定実験を行った。

まず D65 の光源において Gretag-Macbeth ColorChecker チャートを撮像した。撮像結果の画像を図 5.10 に示す。比較のため放送用 3 板式カメラで撮像した結果についても図 5.11 に示す。

つぎに、単板式と 3 板式により撮影された二つの画像の色差を評価するため、撮像画像から得られた各色の RGB データを CIELAB( $L^*a^*b^*$ ) 空間 [11] に変換し、その数値を  $a^*b^*$  2 次元平面にプロットした。その結果を図 5.12 に示す。丸点が 3 板式で再現された色空間座標、矢印の先が単板式で再現された色空間座標を示す。

ここで、一般に 2 色の  $L^*a^*b^*$  の数値を  $\{L_1^*, a_1^*, b_1^*\}$  および  $\{L_2^*, a_2^*, b_2^*\}$  とすると、2 色の色差は次式で計算される。

$$\Delta E_{ab}^* = \left\{ (L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.7)$$

またその  $N$  色の平均値は

$$mean \Delta E_{ab}^* = \frac{\sum_N (\Delta E_{ab}^*)}{N} \quad (5.8)$$

と表される。前述の単板式と 3 板式の測定結果について、二つの画像間でチャート 24 色の平均色差を計算すると約 9.3 であった。測定結果は光源などの測定条件によっても異なるが、放送用カメラにおける単板式と 3 板式の許容色差については、今後主観評価なども含めて行っていく必要がある。

## 5.4 色再現特性改善のシミュレーション実験

単板式カメラを放送用として用いることの特徴の一つとして、3 板式カメラと混在して使用されることがあげられる。特に、放送では複数台のカメラを同時に用い、映像を切り替えるマルチカメラ撮影が通常に行われるため、カメラ画像をスイッチングすることによって大きく画質が異ならないように、それぞれのカメラ特性を揃えることが重要となる。そこで、ここではリニアマトリクス処理による色再現特性の改善をシミュレーションにより検討した。

リニアマトリクス処理は、RGB 空間の場合であれば  $3 \times 3$  のマトリクス演算によって RGB の混合比を補正し、任意の色再現特性を得るものである。このマトリクス係数の決定方法としては種々あるが、ここではターゲットとする色再現特性との差を色度計算し、その差が最小となるような係数を最小 2 乗法により求めた [12]。



図 5.10: 本カメラの ColorChecker 撮像画像例

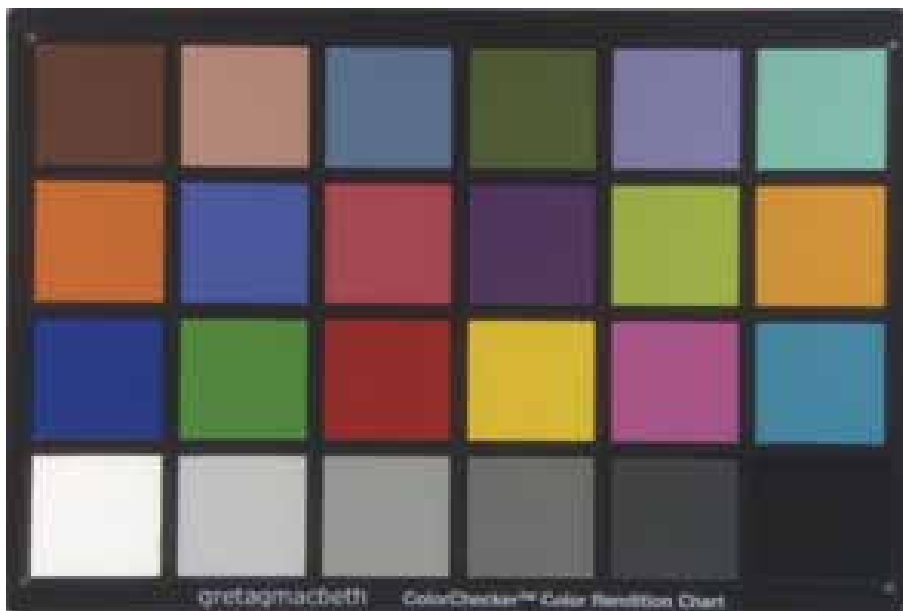


図 5.11: 3 板式 HDTV カメラの ColorChecker 撮像画像例

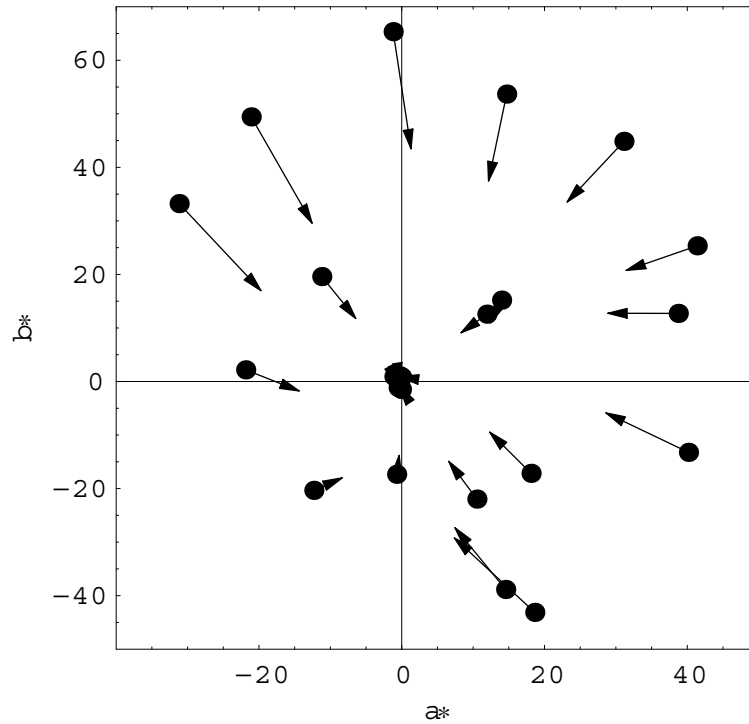


図 5.12: 3 板式カメラ (黒丸) と本カメラ (矢印の先) の色差例

その結果得られたリニアマトリクス係数例を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} R_{LM} \\ G_{LM} \\ B_{LM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.12 & -0.02 & -0.10 \\ -0.23 & 1.40 & -0.17 \\ 0.06 & -0.36 & 1.42 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{in} \\ G_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

[ $R_{in}, G_{in}, B_{in}$  は撮像画像データ、 $R_{LM}, G_{LM}, B_{LM}$  はリニアマトリクス処理後の画像データ]

この係数を用い、色再現特性の改善を行った画像を図 5.13 に、またその画像から得られた各色の  $L^*a^*b^*$  空間座標プロットを図 5.14 に示す。図中黒丸が 3 板式の色再現特性、矢印の先が補正後の単板式の色再現特性を示す。

補正後の単板式と 3 板式の式 (5.8) の平均色差は、約 1.8 へ改善した。ここでは補正の一例を示したが、色再現特性の改善は重要な課題であり、今後とも検討していく。

なお本カメラにはリニアマトリクス回路や、色度図上を 12 等分する軸に対して独立に彩度、色相を補正する 12 軸補正回路なども用意され、色再現性の細部調整も可能となっている。

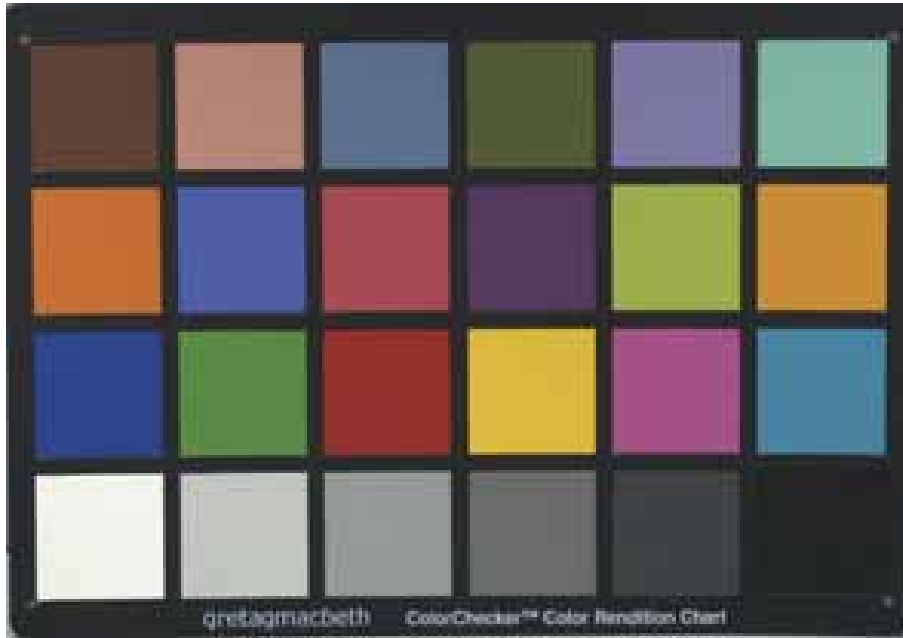


図 5.13: リニアマトリクスによる補正後の画像例

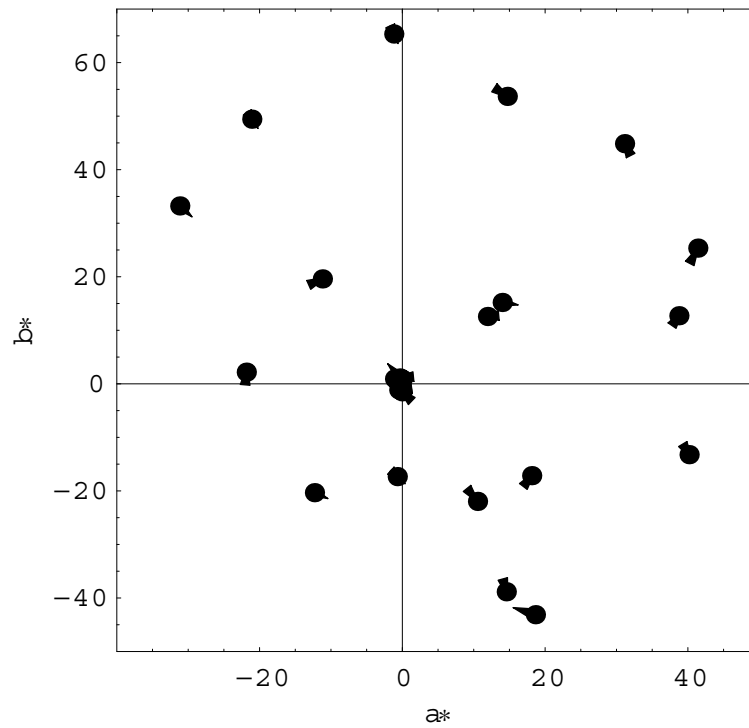


図 5.14: リニアマトリクスによる補正後の色差例

## 5.5 まとめ

放送用品質を有しつつ小型・安価でかつ高解像度のハイビジョンカメラを実現することを目的とし、従来のハイビジョンカメラ用撮像素子よりも画素数が多く受光面積も大きな1.25インチ光学系890万画素単板カラー撮像素子を用い、放送用単板カラーハイビジョンカメラを試作した。本提案方式は、十分な画素数を持つことにより従来の220万画素単板式カメラ等で必要だった画素補間処理が不要となるだけでなく、従来の3板式と比較しても、イメージサイズを大きくすることによりレンズの回折による解像度特性が向上し、また撮像素子の計算上のアパーチャ特性によっても解像度特性が向上する利点がある。さらにG信号の画素数が3板式の2倍あるため、G信号を加算処理することによりカメラの雑音特性も向上する利点がある。

試作したカメラの撮像特性について測定した結果、解像度特性は800TV本においてMTFで35%（ARで45%）以上、雑音特性は2000lux F11、ダイナミックレンジ400%においてSN比60dBと、現用の放送用3板式カメラと同等以上の性能が得られた。また色再現特性について測定した結果、CIELAB色度座標における3板式との色差（E）は約9.3であった。さらに、リニアマトリクス処理による色再現特性改善をシミュレーションした結果、3板式との色差は約1.8と大きく改善した。試作したカメラは、本体重量は約1.4kgであり、さらにズームレンズを取り付けた状態でも約2kgと、放送用カメラとして小型化が図れた。

なお、本カメラは放送用機器として必要なHD-SDI出力やリモート制御も備えており、既に実用化カメラとして、いくつかの放送番組で試行的に使用されている（図5.15は、NHK放送番組「アインシュタインの眼」での収録風景）。



図 5.15: 単板カメラの放送運用例

## 参考文献

- [1] 映像情報メディア学会編: "テレビジョンカメラの設計技術", コロナ社 (1999)
- [2] Hill WA, Persall S, Mcgriff R: "The introduction of large sensors for digital cine acquisition cameras", SMPTE J., 115, pp.59-66 (2006)
- [3] S. Matsuo, T. Bales, M. Shoda, S. Osawa, B. Almond, Y. Mo, J. Gleason, T. Chow, I. Takayanagi, "A Very Low Column FPN and Row Temporal Noise 8.9M-Pixel, 60 fps CMOS Image Sensor with 14bit Column Parallel SA-ADC", VLSI Symposium, III-14 (2008)
- [4] Hiroshi Shimamoto, Takayuki Yamashita, Noriyuki Koga, Kohji Mitani, Masayuki Sugawara, Fumio Okano, Masato Matsuoka, Jiro Shimura, Isao Yamamoto, Taku Tsukamoto, and Satoshi Yahagi: " An Ultrahigh-Definition Color Video Camera With 1.25-inch Optics and 8k x 4k Pixels, " SMPTE J., July/August, pp.260-268 (2005)
- [5] Isao Takayanagi, Miho Shirakawa, Koji Mitani, Masayuki Sugawara, Steinar Iversen, Jorgen Moholt, Junichi Nakamura, and Eric R. Fossum: "A 1.25-inch 60-frames/s 8.3-M-pixel digital-output CMOS image sensor," IEEE J. Solid-State Circuits 40 (11): 2305-2314 (Nov. 2005)
- [6] SMPTE standard for Television 2036-1: "Ultra High Definition Television - Image Parameter Values for Program Production"
- [7] SMPTE standard for Television 274M: "1920 x 1080 Scanning and Analog and Parallel Digital Interfaces for Multiple Picture Rates"
- [8] 例えば、Chamberlain, S.G. Kamasz, S.R. Smith, C.R. Washkurak, W.D. Farrier, M.G.: "Mega pixel CCD image sensor technology", Electron Devices Meeting, Tech D. Int., pp.701-704 (1994)
- [9] B. E. Bayer: " Color Imaging Array, " U.S. Patent, 3 971 065 (1976)

- [10] フォーサーズシステム規格の概要 ”<http://www.four-thirds.org/jp/about/standard.html>”
- [11] Publication CIE No. 15.2: ”Colorimetry 2nd” (1986)
- [12] A.H. Jones: ”Optimum Color Analysis Characteristics and Matrices for Color Television Cameras With Three Receptors”, SMPTE J., vol.77, pp.108-115 (1968)

## 第6章 結論

本論文では、放送用カメラの撮像特性改善および小型化を目的とし、特にダイナミックレンジ拡大技術、順次走査による時空間解像度改善技術、および小型化の技術として単板撮像技術について提案およびカメラの試作、開発を行い、放送用カメラの性能改善についての指針を考察した。

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、放送用カメラの性能改善技術について述べ、なかでも撮像特性改善の課題と小型化を図るための単板化の課題を明らかにし、それに対するこれまでの研究を整理するとともに、放送用カメラの性能改善に必要な研究の方向性を示した。

第3章では、ダイナミックレンジを拡大する手法として、CMD撮像素子を用い、増幅型撮像素子の特長である非破壊読み出しと高速駆動による複数回読み出しを行い、さらにCMD撮像素子で動作可能なソースリセット法を用い1画素毎に選択的に蓄積電荷のリセット動作を行うことにより、撮像素子固有の特性を超えてダイナミックレンジを拡大する新しい撮像方式を提案した。本方式の特長は、CMD撮像素子の内部構造を変更することなく、外部に簡易な回路を付加することにより実現可能なことである。さらに画像メモリを必要とせず広ダイナミックレンジ画像を実時間で出力することが可能である。基礎検討としてCMDラインセンサおよび2次元センサを用いてダイナミックレンジを2倍に拡大する実験を行い、その効果を確認した。

第4章では、時空間解像度を改善する手法として、ハイビジョン放送用カメラに用いられている2/3インチ200万画素M-FIT型CCDおよび220万画素FIT型CCDを用いて、60フレーム/秒のハイビジョン順次走査映像を実現した。CCDの駆動電圧を上げることにより順次走査に必要な高速駆動を可能とし、水平転送CCDでは148.5MHzにおいて1段当たりの転送効率99.98%を得た。3板カラー方式のハイビジョン順次走査撮像実験装置を試作し撮像実験を行った結果、限界解像度は水平、垂直ともに1000TV本を得、また垂直MTF特性が700TV本において57%と高い変調度を得ることができた。一方、順次走査映像からインターレース走査映像へ変換するシミュレーション実験を行い、ハイビジョン映像のインターレース妨害が抑えられることを確認した。

第5章では、小型化を図る手法として、1.25インチ光学系890万画素単板カラーCMOS

撮像素子を用いた放送用単板カラーハイビジョンカメラを提案した。従来のハイビジョンカメラ用撮像素子よりも画素数が多く受光面積も大きな撮像素子を用いることにより、解像度特性や雑音特性が向上した。試作したカメラの撮像特性は、解像度特性が 800 TV 本において MTF で 35% (AR で 45%) 以上、雑音特性は 2000 lux F11、ダイナミックレンジ 400% において SN 比 60 dB と、単板式ながら現用の放送用 3 板式カメラと同等以上の性能が得られた。色再現特性についてリニアマトリクス処理による色補正をシミュレーションした結果、CIELAB 色度座標における 3 板式との色差 ( $E$ ) は、補正前の約 9.3 から約 1.8 へと改善した。試作したカメラは本体重量が約 1.4kg、レンズを含めても約 2kg と、放送用カメラとして小型化が図れた。

以上のように、本論文では放送用カメラの性能改善を図るため、CMD 撮像素子を用いたダイナミックレンジ拡大、CCD 撮像素子を用いた 60 フレーム/秒ハイビジョン順次走査映像、および 1.25 インチ光学系 890 万画素撮像素子を用いた放送用小型単板カラーハイビジョンカメラを提案し、放送用カメラの撮像特性改善と小型化に関する指針を示した。

本研究では主に HDTV までの解像度の撮像技術に関する検討を行ったが、総務省情報通信審議会が「衛星デジタル放送の高度化に関する技術的条件」一部答申で 1080/60p、2160/60p などの映像フォーマットを導入し、また Digital Cinema Initiatives, LCC (DCI) がデジタル・シネマ向けの映像フォーマットとして 4096 × 2160 画素 (「4K × 2K」または「4K デジタル・シネマ」と呼ばれる) を策定するなど、今後はより多様な映像フォーマットへの対応も必要となってくる。これに対し例えば第 5 章で用いた撮像素子は HDTV の 4 倍以上の画素数を有しており、電気的 LPF による帯域制限だけでなく、将来的には画素補間信号処理を施すことにより単板式で HDTV 以上の映像フォーマットに対応することも可能となる。また撮像素子はすでに 60 フレーム/秒での順次走査で動作しており、第 4 章で行った順次走査映像の検討結果も踏まえ、今後高画質ハイビジョンや医療、宇宙応用の検討など更なる発展が期待される。一方、これまで放送用カメラでは単板方式は高画質カメラとしてはほとんど用いられてこなかったが、今後は映画用レンズの使用やイメージサイズによる被写界深度の違い、色補正等による色再現域の拡大などの検討により、より印象的なシーンの撮影などの新たな映像表現の可能性も広がる。補間処理や色補正処理、順次走査信号出力による感度、SN 比などの撮像特性には十分注意しつつも、今後これらの新しい応用が期待される。

本研究で得られた指針を基に、放送用カメラの撮像特性が向上すると共に小型で使いやすいカメラが実現し、より豊かな放送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、東京工業大学大学院総合理工学研究科 羽鳥好律教授より、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、東京工業大学大学院総合理工学研究科 前島英雄教授、佐藤誠教授、黒澤実准教授、山口雅浩准教授、東京理科大学 浜本隆之准教授からは、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、1995年から2008年にかけて日本放送協会 放送技術研究所および財団法人NHK エンジニアリングサービス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放送技術研究所 久保田啓一所長、ならびに谷岡健吉前所長に深謝します。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泉武博元所長、西澤台次元所長、吉野武彦元所長、山田宰元所長、三宅誠元所長、榎並和雅元所長に、深く感謝します。また、故二宮佑一研究主幹、湯山一郎元研究主幹、岡野文男研究主幹、野尻裕司研究主幹、伊藤崇之次長、八木伸行（人間・情報）部長、中須英輔担当部長、財団法人NHK エンジニアリングサービス先端開発研究部 浜田浩行部長には、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。

本研究は当初より、藤田欣裕研究主幹、菅原正幸主任研究員、三谷公二主任研究員、安藤文彦元主任研究員、齋藤敏紀元研究員（現報道局チーフエンジニア）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、研究メンバーの山下誉行専任研究員、古賀則行元研究員（現北九州放送局）、船津良平研究員には、多大なる助言と協力を頂きました。心より感謝します。

2005年から2006年にかけて客員研究員として滞在したスタンフォード大学 心理学部兼工学部電気工学科 Brian Wandell 教授および工学部電気工学科 Information Systems Laboratory (ISL) 所長の Abbas El Gamal 教授には、有益なディスカッションと助言を頂きました。心より感謝します。

最後に、常に支援・協力してくれた妻みゆきと、心を癒してくれた愛犬リリーに心から感謝します。

# 研究業績

## 論文

1. 島本洋, 三谷公二, 藤田欣裕, 菅原正幸, 安藤文彦, 岡野文男, 湯山一郎, “ CMD 撮像素子を用いた広ダイナミックレンジ撮像方式 ”, 映像情報メディア学会誌, vol. 54, No. 12, pp.1781-1787 (2000)
2. 島本洋, 菅原正幸, 三谷公二, 山下誉行, 古賀則行, 岡野文男, “ 60 フレーム/秒ハイビジョン順次走査3板カラー撮像実験 ”, 映像情報メディア学会誌, vol. 58, No. 3, pp.369-374 (2004)
3. 島本洋, 三橋政次, 峯忠己, 船津良平, 橘川俊哉, 三谷公二, 浜田浩行, 羽鳥好律, “ 890万画素撮像素子を用いた放送用単板カラーハイビジョンカメラの試作 ”, 映像情報メディア学会誌, vol. 62, No. 7 pp. 1104-1109 (2008)

## その他の論文

1. H.Shimamoto, T.Yamashita, N.Koga, K.Mitani, M.Sugawara, F.Okano, M.Matsuoka, J.Shimura, I.Yamamoto, T.Tsukamoto, S.Yahagi, “ An 8k x 4k Ultrahigh-Definition Color Video Camera with 8M-pixel CMOS Imager ”, SMPTE Motion Imaging Journal, July/August, pp.260-268 (2005)  
( *SMPTE Journal Certificates of Merit award 受賞* )

## 国際学会

1. H.Shimamoto, K.Mitani, Y.Fujita, “ Dynamic Range Expansion Method for a CMD imager ”, Proceedings of SPIE, 3019, pp.249-255 (Feb. 1997)
2. H.Shimamoto, M.Sugawara, F.Okano, “ High-Speed Progressive Operation of a 2M-Pixel M-FIT CCD ”, Proceedings of SPIE, 4306, pp.205-209 (Jan. 2001)
3. H.Shimamoto, M.Sugawara, F.Okano, K.Itakura, “ An Experimental 60-fps Progressive-scan HDTV Color Camera ”, ABU Technical Review, 198, pp.3-8 (2002)

4. H.Shimamoto, T.Yamashita, N.Koga, K.Mitani, M.Sugawara, F.Okano, M.Matsuoka, J.Shimura, I.Yamamoto, T.Tsukamoto, S.Yahagi, “ An Ultrahigh-Definition Color Video Camera With 1.25-inch Optics and 8k x 4k Pixels ”, SMPTE Technical Conference (Oct. 2004)
5. H.Shimamoto, T.Yamashita, R.Funatsu, K.Mitani, Y.Nojiri, “ Experimental single-chip HDTV image acquisition system with 8M-pixel CMOS image sensor ”, Proceedings of SPIE, 6068-9 (2006)
6. H.Shimamoto, T.Yamashita, R.Funatsu, K.Mitani, Y.Nojiri, ”Characteristics of experimental single-chip color HDTV image acquisition system with 8M-pixel image sensor”, Proceedings of SPIE, 6502 (2007)

## 国内学会

1. 島本洋, 三谷公二, 藤田欣裕, 野本哲夫, ”200万画素CMD撮像素子を用いた順次走査の検討”, テレビジョン学会大会, pp. 445-446 (1994)
2. 島本他, ”ハイビジョン用CMD撮像素子を用いた高速駆動実験”, 電通学会全国大会, D-356 (1994)
3. 島本洋, 三谷公二, 藤田欣裕, ”CMDラインセンサを用いた広ダイナミックレンジ化の基礎検討”, テレビジョン学会大会, No.31 pp. 85-86 (1995)
4. 島本洋, 三谷公二, 藤田欣裕, ”CMDラインセンサを用いた高ダイナミックカメラへの基礎検討”, 電子情報通信学会総合大会, p. 97 (1995)
5. 島本洋, 三谷公二, 藤田欣裕, “ CMD撮像素子を用いた広ダイナミックレンジ撮像の検討 ”, 電子情報通信学会大会, D-310 (1996)
6. 島本洋, 三谷公二, 藤田欣裕, ”ハイビジョン画像による超高精細動画表示システム”. 電子情報通信学会ソサイエティ大会, p. 243 (1996)
7. 島本洋, 三谷公二, 藤田欣裕, ”超高精細動画からのハイビジョン切り出し映像”, テレビジョン学会技報, Vol.20, No.63, pp. 37-44 (1996)
8. 島本洋, 菅原正幸, 三谷公二, 藤田欣裕, “ 五の目サンプル超高精細撮像システムにおける輪郭補償の検討 ”, 映像情報メディア学会技術報告, vol.21, no.42, p49-54 (1997)
9. 島本洋, 菅原正幸, 三谷公二, 湯山一郎, 藤田欣裕, ”超高精細撮像システムのための領域分割並列処理装置”, 電子情報通信学会技報. Vol.98, No.422, pp. 9-15 (1998)

10. 島本洋, 菅原正幸, 岡野文男, 永吉良一, "200 万画素 M-FIT CCD の高速全画素読み出し実験", 映像情報メディア学会大会, pp. 127-128 (2000)
11. 島本洋, 菅原正幸, 三谷公二, 岡野文男, " ハイビジョン用 220 万画素 CCD による 60 フレーム/秒順次走査撮像実験 ", 映像情報メディア学会技術報告, vol.26, no.78, pp.17-20 (2002)
12. 島本洋, 三谷公二, 山下誉行, 古賀則行, 岡野文男, " 走査線 4000 本級超高精細装置の MTF 特性 ", 映像情報メディア学会大会, 21-6 (2003)
13. 島本洋, "走査線 4000 本級超高精細カメラ", 画像入力シンポジウム (2003)

## 特許

1. 特許 3484252 固体撮像デバイス
2. 特許 3790057 固体撮像素子
3. 特許 3875423 固体撮像素子およびそれ用の映像信号出力装置
4. 特許 3888847 広視野映像撮像装置
5. 特許 3891402 映像切出し制御装置
6. 特許 4078144 固体撮像装置及びその駆動方法
7. 特許 4133455 テレビカメラ及び画素信号の読み出し方法