

スーパーハイビジョン・フル解像度 カメラシステム

山下 誉行

A Full Resolution Super Hi-Vision Camera System

Takayuki YAMASHITA

ABSTRACT

We developed a color camera system for ultrahigh definition TV (Super Hi-Vision) with three 33 M-pixel CMOS image sensors, a high-performance lens, and a signal processing unit. This camera can capture images at 60 frames per second (progressive scanning). The results of shooting experiments using this system showed that the modulation transfer function (MTF) characteristic was greatly improved from that of the previous SHV camera and the SN ratio was 48 dB.

1. まえがき

次世代映像システムとして立体映像や高精細・高臨場感映像に対する関心が高まっている。当所では、次世代放送システムを目指してスーパーハイビジョン (SHV) の研究開発を進めている。SHVは水平視野角100°の広視野映像と3次元音響による高い臨場感と没入感を目指したシステムで、100°の視野角でも画素構造が知覚できない7,680画素×4,320ラインの超高精細映像フォーマットを採用している。これらのシステムパラメーターはITU-RおよびSMPTEで既に標準化されている¹⁾²⁾。

SHVカメラについては2000年ごろから走査線4,000本級のカメラシステム³⁾として開発に着手した。開発当

初、SHV映像フォーマットに相当する3,300万画素の動画用撮像素子は無かったので、当時、最多画素となる830万画素の撮像素子^{4)~6)}を開発し、それを緑 (G) に2枚、赤 (R)、青 (B) にそれぞれ1枚ずつ用いたデュアルグリーン (DG) 撮像方式で撮像装置を試作した。DG撮像方式は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なので、R,G,Bそれぞれに3,300万画素が必要なSHVシステムの本래の解像度には達していなかった。

初期システムの開発から8年を経て、次世代放送システムとしての評価および実用化に向けたシステム開発を進めるために、SHVシステム本래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っ

た。そこで、今回、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。

本稿では、まず、カメラの要求条件を示し、これを達成するための課題を明確にする。次に、この課題を解決するための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を行い、今回の試作システムの有効性を示す。

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「R,G,B各色で3,300万画素の解像度を達成し、感度・S/Nを従来のDG撮像方式カメラと同等に維持したまま、屋外撮影が可能な機動性・運用性を確保したサイズに収めること」と設定した。

この要求条件の解像度を実現するためには、まず、撮像素子を試作する必要がある。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^{*1}の影響もある。多画素化によってこれまでに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。

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。

一方、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。

3. カメラ設計

1図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（1）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、（2）カメラヘッドの小型化・省電力化、（3）広帯域信号伝送インターフェース、（4）色収差補正方式の4点である。

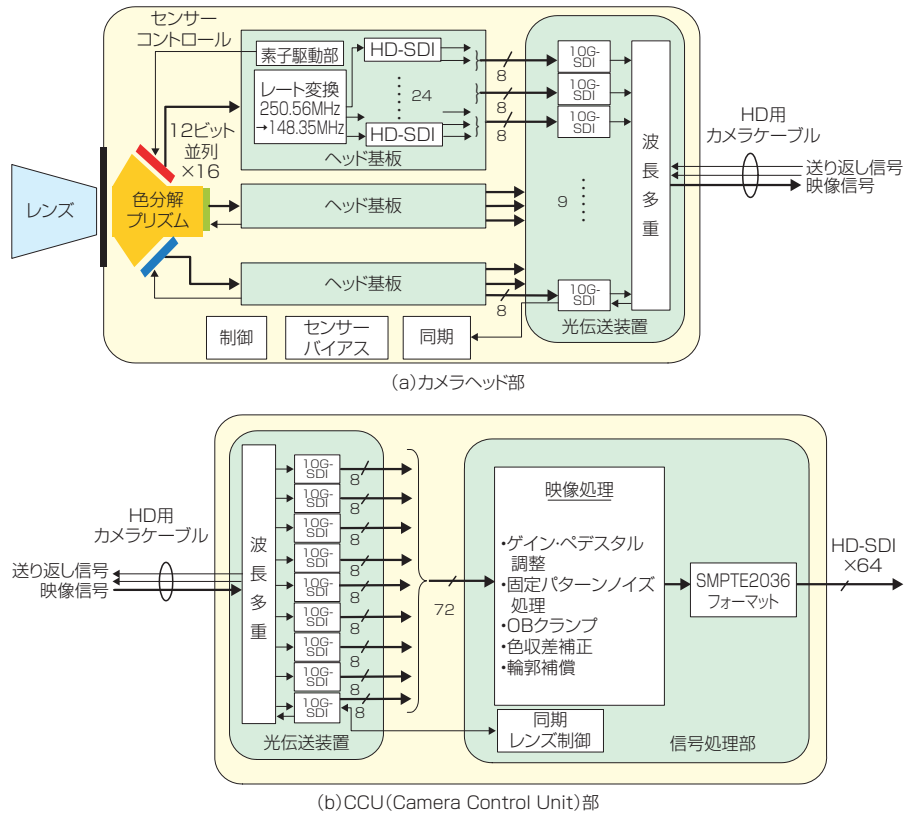
以下、1図に示すカメラシステムのブロック構成に従って構成要素について述べ、上記の課題を解決する手段を併せて示す。

（1）撮像素子

撮像素子の設計仕様を1表に示す。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830万画素CMOS撮像素子を用いた従来のDG撮像方式カメラのS/N値45dB⁷⁾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2図に示す。2図から画素サイズが4μm角程度以上であれば飽和信号電荷量として25,000電子(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24電子と見込めば、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。3図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無収差理想レンズの変調度特性の計算値を示す。3図から3.8μm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3.8μm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16.4

*1 光の波長ごとに屈折率が違うことによって生じるレンズ周辺部での色ずれ。



1図 カメラシステムのブロック図

1表 撮像素子 設計仕様

光学フォーマット	2.5インチ	
画素サイズ	3.8μm角	
素子構造	CMOS 3トランジスター	
受光面サイズ	水平29.8mm 垂直16.4mm	
画素数	水平	有効7,680 (トータル7,840)
	垂直	有効4,320 (トータル4,360)
信号出力数	12bit 16並列	
出力クロック	250.56MHz	
信号出力方式	LVDS	
走査方式	順次走査	
消費電力	3.8W	

mm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

*2 ANSI (米国規格協会) / TIA (米国電気通信工業会) / EIA (米国電子工業会) で規格化された小振幅・低消費電力の信号伝送インターフェース規格。

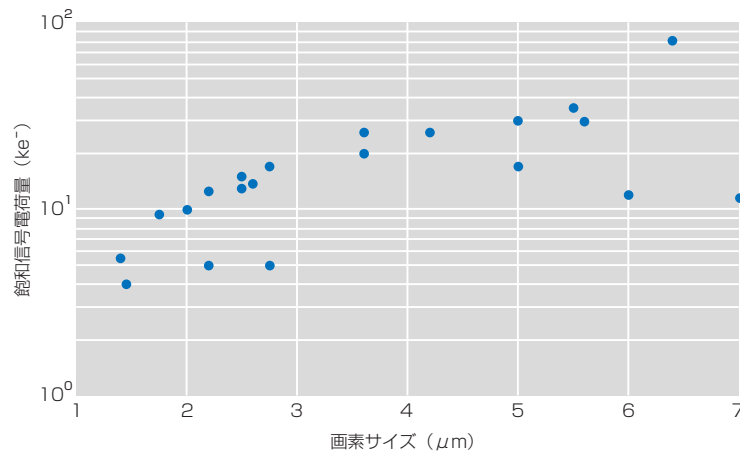
ず、素子内でデジタル信号に変換することとした。また、高データレート撮像を実現する方法として有効なマルチ出力端子を有する素子構造とすることで1本当たりの出力クロックを抑制した。並列出力数を16とし、1出力当たりのクロック周波数を250.56MHzとした。更に、出力信号形式に差動タイプのLVDS (Low Voltage Differential Signaling)*2を使用し、高速デジタル信号のノイズに対する耐性を確保した。

(2) カメラヘッド

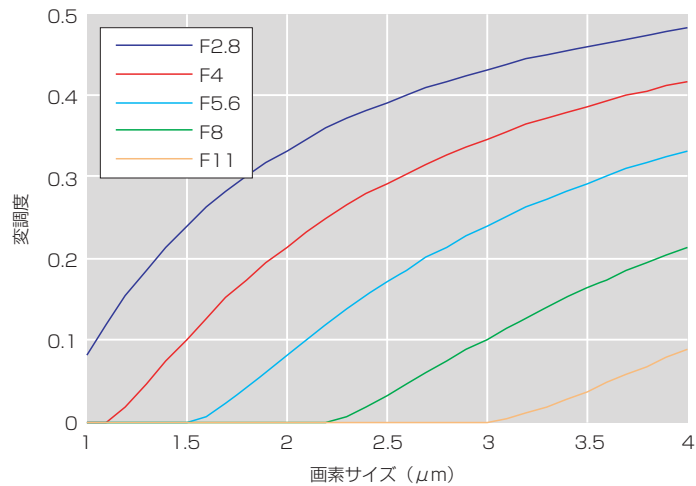
カメラヘッドを小型化・省電力化するために、カメラヘッドの構成は撮像素子の駆動と素子からの出力を受けるヘッド基板と信号伝送インターフェースなどCCU (Camera Control Unit) へのデータ伝送が行えるだけの最小限の構成とした。ヘッド基板内での信号処理では素子駆動周波数 (250.56 MHz) からハイビジョン互換周波数 (148.35 MHz) へのデータレート変換とHD-SDI (High Definition - Serial Digital Interface) エンコードだけを行う。1色当たりHD-SDI 24本、3色で計72本の映像信号を信号伝送インターフェースに入力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

(3) 広帯域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



2図 飽和信号電荷量と画素サイズ



3図 画素サイズとナイキスト周波数における変調度特性

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、上記の性能を実現している10G-SDI[®]を複数リンクし、所要のデータレートを確保した。

今回用いた10G-SDI変換ユニットは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。このユニットを9個用いてヘッド基板から出力されるHD-SDI×72本分のSHV信号を10G-SDI×9本の光信号に変換する。更に、消費電力を抑制し、従来のハイビジョンカメラ用ケーブルで伝送するために、高密度波長多重 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) を用いて9波を多重し、後段のCCUへ伝送する。

(4) CCU

CCUではカメラケーブルで伝送されたSHV信号を、

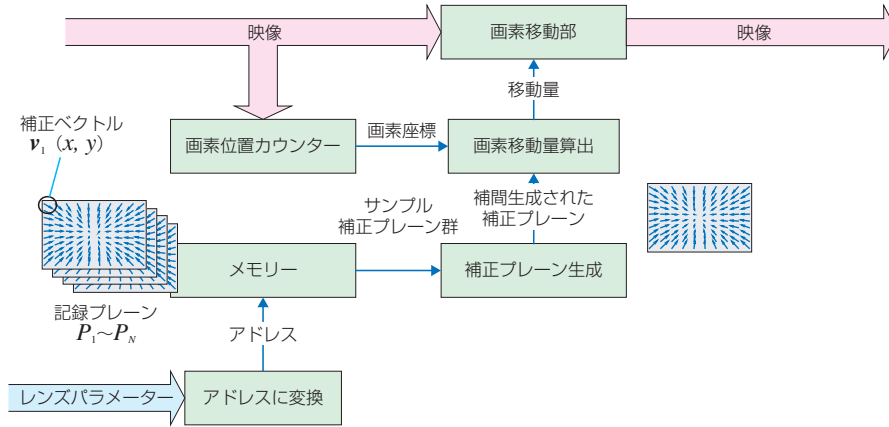
再度、HD-SDI×72本に戻して信号処理部に入力する。信号処理部では、ブロック図に示した一般的なカメラ信号処理を行うとともに、ピントのあった領域をビューファインダー上に表示するフォーカス補助信号の生成のほかに、色収差補正処理を行う。色収差補正はレンズ内で行う光学的な補正が一般的であるが、レンズ径の増大や補正用レンズ^{*3}の挿入などでレンズ寸法が大きくなるので、信号処理で行い高精度の補正とレンズの小型化の両立を実現する。

以下、色収差補正処理について述べる。

(a) 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

*3 負の屈折率を持ち、元のレンズの収差を補正するレンズ。色消しレンズとも呼ばれる。



4図 色収差補正処理方式のブロック図

2表 カメラ諸元

光学フォーマット	2.5インチ
走査方式	順次走査
焦点距離	31mm (固定)
撮像画角	水平50° 垂直29°
開放F値	1.7
最短被写体距離	1m
ヘッド重量	65kg
CCU寸法 (高さ×幅×奥行)	160cm×59cm×75cm
ヘッド消費電力 (伝送装置含)	300W

高精度化を目指した。色収差補正処理方式のブロック図を4図に示す。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トを算出し、信号処理装置上のメモリーに記録する。これを記録プレートと呼び、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、記録プレート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ト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。

(b) データ量削減のための間引き手段

本補正方式では、記録プレート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ト数で、補間処理で生成した補正プレートに含まれる誤差が最小になることを目指して、最適な記録プレート数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ト数を N 、 m 枚目の記録プレート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 $m=N$ のプレートは必須とし、それ以外のプレートから p 枚を間引く場合を考える。間引きプレートの組 $d = \{d_1, d_2, \dots, d_p\}$ の i 番目のプレート d_i について、他のプレートのデータから補間処理して生成した補正ベクトルを $v'_{d_i}(x,y)$ 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。

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

$diff(d_i)$ の最大値を間引きプレートの組 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 枚のプレートを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、

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

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トの組み合わせが得られる。

4. カメラの撮像実験

試作カメラの諸元を2表に、試作したカメラヘッドを5図に示す。カメラヘッドの重量はレンズ込みで65

kg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6図に示す。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6図(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。

試作したフル解像度カメラと従来のDG撮像方式カメラのMTF (Modulation Transfer Function) 特性*4 (F5.6, 垂直方向) を7図に示す。試作カメラのMTF特性はナイキスト周波数までの全周波数範囲において、DG撮像方式のカメラの変調度を上回っている。また、



5図 カメラヘッドの外観

ナイキスト周波数での変調度も目標とした20%を超えている。カメラのS/Nを測定した結果、S/N値は48dB(感度設定2,000lx, F2.8)であることが確認でき、目標としたDG撮像方式を上回る性能が得られた。

5. あとがき

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



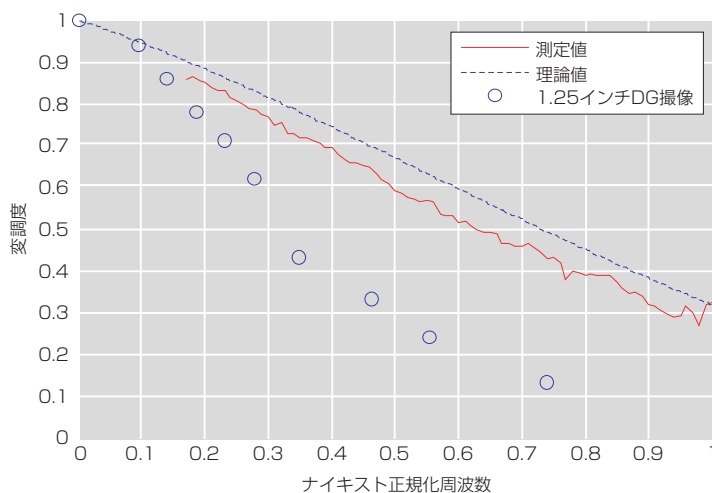
(a) 画角全体



(b) 中心部(拡大)

6図 撮影画像

* 4 画像の空間周波数に対する変調度を表す特性。



7図 試作カメラのMTF特性

上の変調度を達成した。

今後、SHV放送の実用化に向け、更なる小型化を目指し、光学系の縮小や単板方式によるカメラ開発の検討を進めていく。更に、撮像性能の改善とSHVの映像パラメーターの検討に資するために、広色域、高ダイナミックレンジを実現した撮像装置の開発を進める。

最後に、カメラおよびレンズの開発に協力していただいた(株)日立国際電気 小野寺秀夫氏、吉田哲男氏、柳忠明氏、桑原宗光氏、フジノン(株) 矢作智氏、金山茂弘氏に深く感謝する。

参考文献

- 1) Rec. ITU-R BT.1769, "Parameter values for an expanded hierarchy of LSDI image formats for production and international programme exchange" (2007)
- 2) SMPTE 2036-1-2007, "Ultra High Definition Television – Image Parameter Values for Program Production" (2007)
- 3) 山下, 三谷, 菅原, 島本, 岡野: "走査線4000本級4板式超高精細動画カメラ," 映情学誌, Vol.58, No.3, pp.383-391 (2004)
- 4) C. Smith, M. Farrier, K. Mitani, Q. Tang and G. Ingram: "An 8M-CCD for an Ultra High Definition TV Camera," IEEE Workshop on CCD and Advanced Image Sensors, Nagano, Japan (1999)
- 5) 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)
- 6) 松尾, T. Bales, 正田, 大澤, B. Almond, Y. Mo, J. Gleason, T. Chow, A. Andersson, 高柳: "14ビットカラムパラレルADCを搭載した, 低ノイズ8.9メガピクセルCMOSイメージセンサ," 映情学技報, IST2008-40, pp.13-16 (2008)
- 7) 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 J., pp.260-268 (2005)
- 8) SMPTE 435, "10 Gb/s Serial Signal/Data Interface" (2009)

やましたたかゆき
山下 誉行



1995年入局。京都放送局を経て1999年より放送技術研究所にて、カメラの高機能化、超高精細撮像技術および立体撮像技術に関する研究に従事。現在、放送技術研究所テレビ方式研究部主任研究員。