ノイズ軽減機能内蔵IR対応HDTV超高感度ハンディカメラ

An Ultra High-Sensitivity IR-HDTV Handheld Camera with Built-in Noise Reducer

正会員 三橋 政次^{†1}, 宮崎 正之^{†1}, 正会員 山崎 順一^{†1},
水野 到^{†2}, 渭原 常夫^{†2}, 吉川 和雄^{†3},
斉田 有宏^{†3}, 蛭間 位吉^{†4}, 鈴木 拓弥^{†5}

Seiji Mitsuhashi^{†1}, Masayuki Miyazaki^{†1}, Junichi Yamazaki^{†1}, Itaru Mizuno^{†2}, Tsuneo Ihara^{†2},
Kazuo Yoshikawa^{†3}, Arihiro Saita^{†3}, Takayoshi Hiruma^{†4} and Takuya Suzuki^{†5}

Abstract A newly developed camera is proposed that uses two types of devices - gallium arsenide phosphorus (GaAsP) to provide a high level of quantum efficiency in the visible light region and gallium arsenide (GaAs) to provide a high level of quantum efficiency in the near infrared region - in the photocathode of a proximity type image intensifier (II). We have discovered that image burning, which has been a problem with the photoelectric surface in a conventional II, can be halved by increasing the resistance of a micro-channel plate. We have developed a noise-reduction circuit capable of eliminating feedback ion noise by taking into account its characteristics. We have also developed a lens and a prism that has an enhanced ability to allow more near-infrared rays to pass through. In actual imaging experiments, we were able to take quality images of animals in conditions without moonlight.

キーワード：HDTV, GaAs, 近赤外線, イメージインテンシファイヤ, 超高感度

1. ま え が き

夜行性動物の撮影や、火山、事故などの報道現場では、照度の低い条件でも十分に映像信号レベルが得られる超高感度カメラが必要である。

筆者らは、これまでこのような要望に応えるため、CCDの約400倍の感度を有する、第3世代と呼ばれるイメージインテンシファイヤ：II (Image Intensifier) を内蔵した、超高感度ハイビジョンカメラを開発してきた^{1)~3)}。このカメ

ラで用いているガリウム砒素リン (GaAsP) 光電面は、緑の中心波長である540nmの量子効率が50%と高く、CCDや新スーパーHARP撮像管の同一波長感度に比べても、充分高い1次量子効率を持っている。加えて赤色の感度も高いため、南極昭和基地ではオーロラ撮影で豊かな色が再現され、そのほか蛍やヤコウタケなどの発光生物の撮影、報道では洪水や中越地震の夜間撮影など多くの番組で使用されている。

しかし、このハイビジョンIIカメラは、イオンフィードバック (IFB) によって画面上に輝点が瞬間現れるノイズが見られることや、明るい被写体を長時間撮影すると焼き付きを生じること、月明かりのない闇夜においては感度が不足するなどの課題があった。

今回、IFBノイズの性質に着目してリアルタイムでノイズを軽減できる小型の回路を新たに開発し、カメラに内蔵した。また、I.I.の焼き付き実験を行い、MCP (Micro Channel Plate) に飽和特性を持たせることで、焼き付きを軽減できることを見出した。さらに近赤外線 (IR) に高い感度を持つデバイスの採用や、IR透過率の高い光学系を検討することにより、闇夜で動物に気づかれることなく、明るく撮影できるIR対応の超高感度IIカメラを開発した。

以下、2章で受光素子のIR感度の検討を行い、3章では光学系のIR対応の検討を、4章でI.I.の焼き付き低減、5章ではIFBノイズの軽減についてそれぞれ考察し、6章でカメラの特性評価を行い、7章で実際の撮像例を示す。

2005年8月8日受付、2005年11月22日再受付、2005年12月22日採録

†1 NHK 技術局 番組施設部

(〒150-8001 渋谷区神南2-2-1, TEL 03-5455-5437)

†2 浜松ホトニクス株式会社 電子管事業部第5部門

(〒438-0193 静岡県磐田市下神増314-5, TEL 0539-62-3151)

†3 フジノン株式会社 光学機器部

(〒330-8624 埼玉県さいたま市北区植竹町1-324, TEL 048-668-2106)

†4 池上通信機株式会社 池上工場 カメラ部

(〒144-0033 大田区東糀谷4-6-15, TEL 03-3743-5524)

†5 株式会社芙蓉ビデオエージェンシー 商品開発部

(〒241-0826 横浜市旭区東希望が丘7-25, TEL 045-362-0908)

†1 Engineering Administration Department, NHK

(2-2-1, Jinnan, Shibuya-ku, Tokyo 150-8001, Japan)

†2 Electron Tube Center, Hamamatsu Photonics K.K.

(314-5, Shimokanzo Iwata-city Shizuoka 438-0193, Japan)

†3 Optical Instrument Department, Fujinon Corporation

(1-324, Uetake Kita-ku Saitama-city Saitama 330-8624, Japan)

†4 Ikegami Factory, Ikegami Tsushinki Co., Ltd.

(4-6-15, Higashi-koujiya Ohta-ku Tokyo 144-0033, Japan)

†5 Fuyoh Video Industry Co. Ltd.

(7-25, Higashi-kibougoka Asahi-ku Yokohama 241-0826, Japan)

2. 受光素子の検討

図1にI.I.の構造を示す。入射した光は光電面で光から電子に変換され、電子はMCPで約1万倍に増倍、そのあと加速された電子は蛍光面で電子から光に変換される。

第2世代のI.I.カメラ^{4)~7)}の光電面はアルカリ金属を含む複数の材料の結晶体(マルチアルカリ)からなる。今回は第3世代のGaAsPやガリウム砒素(GaAs)結晶⁸⁾を用いたI.I.を採用した。図2に、第2世代と第3世代のデバイスの量子効率を比較して示す。マルチアルカリに比べ、GaAsPは可視光領域で約5倍の感度を持ち、GaAsについてはIR領域で約10倍の感度を持つ事がわかる。GaAsP, GaAsそれぞれのバンドギャップは1.642, 1.435eVである。また、暗電流の実測値は、それぞれ4.0E-15, 6.9E-15 A/cm²であるため、1

図1 I.I.の構造
Structure of Image Intensifier.

図2 光電面の分光感度特性
Spectral sensitivity of photocathodes.

表1 ハイビジョンI.I.カメラの比較
Comparative chart of HDTV I.I. Camera.

カメラの種類	大口径 I. I. カメラ	VCR 一体型 I. I. カメラ	今回の開発
I. I. の世代	第2世代	第3世代	第3世代
光電面材料	Rch, Gch, Bch: マルチアルカリ (Na, K, Cs)	Rch, Gch, Bch: GaAsP	Rch: GaAs Gch, Bch: GaAsP
感度波長域	300~700nm	300~700nm	300~900nm
主な特徴	2.5 インチ 光学系 光電面对角 40mm	2/3 インチ 光学系 光電面对角 16mm 小型軽量	近赤外対応 焼き付低減 ノイズ低減
おもな使用例	しし座流星群 すばる望遠鏡 による天体撮影	緊急報道 南極のオーロラ 撮影 発光生物の撮影	夜行性動物撮影 夜間監視

万倍程度の増倍を行っても受光面積全域の暗電流は0.1nA以下と少なくできる。これらの検討から、RGB3板式カラーカメラにおいて、B, GchにはGaAsPを、RchにはGaAsを選択することで、可視光(波長380~700nm)からIR領域(波長700~900nm)まで高い感度をもつカメラが実現できると判断した。これまで開発してきたハイビジョンI.I.カメラと今回のカメラとの比較を表1に示す。

3. 光学系のIR対応

カメラのIR感度を高めるためには、光学系についてもIR対応が必要である。図3に今回のカメラの光学系の構造を示す。RGB色分解光学系のRchの帯域をIRまで拡大した。ズームレンズや拡大レンズについては、ワイドバンドコーティングによってIRの透過率を高めた。図4に、従来のコーティングと今回のワイドバンドコーティングの透過率の波長依存性(ピークで正規化)を比較して示す。後者の方が長波長までフラットに透過していることがわかる。このコーティングにより、22倍のズームレンズのIR領域の透過率を35%から80%に高めることができた。

本カメラは、可視光カラー撮影とIR撮影の両方が可能となるように設計している。そのため、色分解光学系の前に回転式の波長選択用フィルタを設けた。フィルタの種類は、可視光のみを透過、IRのみを透過、両者を透過の3種類とした。なお、IR透過フィルタはガラス厚を薄くしてフォーカス位置を補正した。また、フィルタの選択に連動して、カメラのカラーマトリクスを変更できる信号処理系を新規に設計した。

図3 色分解光学系
Schematic of optical and pick up system.

図4 レンズコーティングの比較
Normalized spectral transmittance as function of wave length.

4. 焼き付きの低減

IIカメラには、連続して過大光を入射すると焼き付きが生じるという課題があり、運用には注意が必要となる。増倍を行うMCPは、多数の細い鉛ガラス管(チャンネル)を束にして構成されている。このチャンネル内壁は、水素還元法でPbを析出させることで伝導性を持たせており、その両端面に電圧が印加される。チャンネル端面から入った電子は、電界に引かれながら出口に向かって進み、壁面で何回も衝突を繰り返しながら、2次電子を放出、電子増倍が行われる。同一電圧においては、MCPの出力電子数は入力電子数に比例するため、過大光が入るとMCP出口付近の電子数は膨大となり、IFBが極度に増加して光電面劣化が生じる。これが焼き付きである。

MCPには、電圧が印加された状態でストリップ電流が流れており、放出された2次電子の場所に電子を供給している。ここでMCPを高抵抗化すれば、電子供給が間に合わなくなり、増倍が頭打ちになることで、焼き付きを軽減できるのではないかと考えた。そこで、抵抗値の異なるMCPを製作してIIに組み込み、スクリーン電圧 V_s をパラメータとして焼き付きレベルを測定した。

実験の結果を図5に示す。図中のA、Bは高抵抗品(約416M Ω)であり、a、bは従来品(約116M Ω)である。またAa、Bbのスクリーン電圧はそれぞれ $V_s=5kV$ 、 $7kV$ で、スクリーン輝度は一定としている。図から高抵抗品の焼き付レベルは、従来品に比べて約半分に減少しており、スクリーン電圧の差による焼き付きレベルの差は認められない。

一方、図6に示すように抵抗値が高すぎると、ネガ残像の消滅時間が長くなることがわかった。図ではスクリーン輝度を10と15nitで評価した。これは、過大光の入射によって制限されていた電子の供給が元の状態に戻るのに、高抵抗ほど時間を要するためと思われる。これらのことを考慮して、高抵抗品の最適抵抗値を約400~500M Ω とした。図7はこの高抵抗品の入出力特性を示したもので、過大入力光に対して出力が飽和していることがわかる。

5. 内蔵ノイズリデューサ

5.1 IFBノイズの低減

IIカメラは、MCPゲインによる感度上昇に伴い、IFBノイズが多く発生してくる。これは、光電子や増倍電子がII内部の残留ガス(中性粒子)に衝突してイオンを生成し、これが光電面側に戻ってさらに電子を発生させる正帰還が起きる現象である。このIFBノイズは、ランダムに発生して信号レベルは高く、個々のノイズは短時間で消滅するという性質がある。この性質に着目して、映像信号からIFBノイズだけを取り除く装置の開発を行った。カメラ内蔵型NRの信号処理の流れを図8に示す。まず、7H $\times$ 7V画素領域で考える。中央画素の信号レベルが周辺画素の中間値と比べて著しく高いとき、これをノイズ可能性画素と見る。次に前後のフィールドに対しても同じ検出をして、同じ位

図5 MCPの抵抗値と焼き付き(過大光)
MCP gain as function of the status of light irradiation.

図6 MCPの抵抗値と残像時間(過大光)
Photogene time as function of MCP resistance.

図7 IIの入出力特性
Phosphor luminance as function of incident energy.

置で検出されれば、それはノイズではなく被写体であると考え。ノイズと判断した場合には、その検出領域内の中間値と置き換えるという方法を取った(条件付メディアンフィルタ)。ただし、前後のフィールドとの単純比較を行うと、例えば、流れ星のような動く輝点もノイズと判断してしまうので、前フィールドの輝点履歴マップの中から同じ位置の情報だけでなく、近傍の情報を取得している。ノイズレベルの閾値や近傍情報の範囲(最大13H $\times$ 7V)は、設定が変えられるようにした。実験では、前後フィールドの一方だけの履歴を見ても、検出結果にそれほど違いのないことがわかった。このデジタル信号処理回路を、約600万トランジスタのFPGAで製作し、小型の基板に収めた。このカメラ内蔵型NRの外観を図9に示す。

5.2 その他のノイズ軽減

前項で述べたIFBノイズの他に、CCD出力後のアンプの増幅度を上げた状態で目立つアンプノイズや、入射光量が少なくなること目立つ光ショットノイズがある。これらのノイズは、被写体の動きが少なければ信号の巡回あるい

図8 NRの信号処理の流れ
System diagram of Noise Reducer.

図9 内蔵NRの外観
Built-in Noise Reducer.

は蓄積によって軽減することが可能である。

今回、内蔵NRの中に巡回型のリカーシブフィルタを組込んだ。1フィールド前の画像データをある割合だけ現在のフィールドに混合する。図8の係数 α を大きくする($0 < \alpha < 1$)とランダムノイズは少なくなり、残像が大きくなる。

また、NRのメモリーを利用して、スローシャッター動作を可能とした。これは、CCDの蓄積時間を走査時間よりも長くし、読出した間欠的な信号をフレームメモリーで保持して、連続的に読出すものである。CCDは、フレーム蓄積とフィールド蓄積の2種類で駆動できるようにした。前者はCCDの垂直画素混合を行わずに2フィールドで読出す。垂直解像度が高くなる反面、感度が後者の半分になり、動きが不自然になる場合もある。蓄積時間を長くすると、CCDの白傷が増加すること、ノイズが固定して視認されることを考慮して、カメラの最大蓄積時間は1秒とした。

(a) CCD (12dB)

(b) 本カメラVISIBLE

(c) VISIBLE+IR

(d) IR

図13 低照度撮像例

Example images shot under low-light condition
(a) Current HDTV CCD camera using 12dB gain up, (b) Our camera using VISIBLE mode, (c) VISIBLE+IR mode, (d) IR mode.

6. カメラの特性

カメラはハンディスタイルであり、その諸元を表2に示す。カメラの光学フィルタは、電動式で切替えられるようにした。各種のノイズ軽減フィルタはカメラの側面のスイ

表2 カメラの諸元
Specification of HDTV II. Camera.

型名	HDL-V90M・IRN
走査方式	1080/59.94i
感度	150lx @F4 以上
最低被写体照度	0.0061x (30dB @F2)
S/N	57dB
撮影モード1	可視光
撮影モード2	可視光+IR
撮影モード3	IR
高速ゲートシャッター	1/60~1/1,000,000sec
寸法	148mm×267mm×405.5mm
消費電力	50W
重量	5.8kg 以下 (レンズ、VF 除く)

タッチで選択できるようにした。そのノイズ軽減効果をビューファインダ(VF)で確認できるように、VF回路の系統を工夫している。IR撮影用に波長890nmのIR-LEDを用いた小型照明装置を開発し、カメラの上部に取り付けられるようにした。また、カメラには100万分の1秒の高速ゲートシャッターやNTSCのダウンコンバータも搭載した。重量は5.8kg(レンズとVFを除く)、消費電力は約50Wであった。

このカメラの最大感度は、反射率89.9%の白を撮影して映像信号レベルが100%となる被写体照度が0.18lux、レンズ絞りF1.8、S/N57dB(ベデスタルレベル35mV)が得られた。この感度は通常のハイビジョンCCDカメラの約400倍となる。

7. 画質検証と撮像実験

7.1 NRによるS/Nの変化

今回のカメラに組込んだノイズ低減機能をS/Nの測定によって検証した。NRは図8に示すように、イオンノイズを低減させるメディアンフィルタと、光ショットノイズやアンプノイズを低減させるリカーシブフィルタがある。

図10は、メディアンフィルタの閾値変化によるS/Nの変化である。閾値が低い方がS/Nは高い傾向を示すことがわかる。

図11は、リカーシブフィルタ係数 α の変化に伴うS/Nの推移である。ノイズを除去するために過去データを累積加算することで、S/Nが向上することがわかる。しかし残像は多くなる。

図12は蓄積時間とS/Nの関係である。蓄積時間が長くなるに伴い、映像レベルは上昇する。そのため測定ではアイリスを絞り、入射光量を減らした。蓄積時間と入射光量の積が等しくなるため、白のS/Nにはほとんど変化がない。よって、静止画であれば、電気ゲインやMCPゲインを上げるより、蓄積機能を使用したほうがS/Nは良い。ただし、黒のS/Nは暗電流やCCD白傷などの増加により劣化が見られる。

蓄積機能などを使った時のカメラの最低被写体照度は0.0001ルクス(MCP=MAX, 電気ゲイン30dB-up, 蓄積時間1s)である。

7.2 低照度撮像実験

低照度での撮像比較を図13に示す。比較対照として、ハイビジョンCCDカメラ(12dBup)の映像を図13(a)に、本

図10 メディアンフィルタとS/N
SNR as function of Median filter.

図11 リカーシブフィルタとS/N
SNR as function of Recursive filter.

図12 蓄積時間とS/N
SNR as function of storage time.

カメラの映像を図13(b)～図13(d)に示す。図13(b)は通常の可視光領域の撮影に用いるVISIBLEモードで、図13(c)は、可視光とIRの両方の領域の撮影が可能なVISIBLE+IRモードである。両者を比較すると図13(c)の方がIR領域の光量が追加された分、輝度が高いことがわかる。また、植物の葉や人物の服は、IRを反射して赤く表現されている。図13(d)は、IR領域のみで撮影されたものである。多少光量は下がるが、夜間の屋外でIR領域の撮影が可能であった。

7.3 番組応用

実際の番組撮像例を図14に示す。NHKとBBCの共同制作による大型企画番組「プラネットアース・地球賛歌」のロケで、ボツワナのチョベ国立公園に生息するライオンや象をIRで撮影したものである。本カメラは、IRに対して十分な感度を有しているため、夜間遠くにいる野性動物をアップで撮影することができた。IR照明を使えば動物に気がつかれることがないため、自然な状態で動物の生態を観察し撮影ができることや、月明かりがあれば可視光モードで幻想的なカラー撮影ができることについて、BBCスタッフから

(a) 撮像例1

(b) 撮像例2

図14 IRモードによる番組撮像例

Sample images shot by IR mode.

(a) Sample image1, (b) Sample image 2.

も高く評価された。

8. む す び

月明かりのない闇夜においても、高画質でハイビジョン撮影をすることを目的に、カラーカメラのRchにIR感度の高いGaAs光電面のI.Iを用い、かつ光学系のIR透過率を高めることにより、可視光とIRの両方で撮影できる超高感度のハンディカメラを開発した。従来のI.Iカメラで課題となっていた焼き付き現象については、MCPの高抵抗化によって入出力に飽和特性をもたせることで改善し、IFBを軽減できる小型の回路を設計してカメラに内蔵した。カメラのフィールド試験では、闇夜で動物に気づかれることなく、明るく撮影できることを確認した。

今後、本カメラは動物の生態記録や緊急報道に威力を発揮するものと期待される。最後に、海外ロケなど実際の動物撮影で有益な助言をいただいたNHK情報番組技術の牟田CCに深謝いたします。

〔文 献〕

- 1) M.Miyazaki and J.Yamazaki: "Ultrahigh-sensitivity HDTV Camera using 3rd Generation Image Intensifiers", ABU Technical Committee Meeting, Kazakhstan (Sep. 2004)
- 2) 山崎, 宮崎, 渭原, 水野, 吉川, 金山, 松井, 蛭間, 西村: "GaAsP-I.Iを用いたVTR一体型ハイビジョン超高感度カメラ", 映情学誌, 58, 3, pp.362-368 (Mar. 2004)
- 3) J.Yamazaki, M.Miyazaki, T.Ihara, I.Mizuno, K.Yoshikawa, S.Kanayama, N.Matsui, T.Hiruma, and M.Nishimura: "An Ultra-High-Sensitivity HDTV Camcorder", IEICE TRANS. ELECTRON., E86-C, 9, pp.1810-1815 (Sep. 2003)

- 4) 砂崎, 山崎, 奥浦, 竹之下: "大口径ハイビジョンI.ICCDカメラ", 映情学誌, 21, 49, pp.7-12 (Sep. 1997)
- 5) J.Yamazaki, K.Majima, T.Andou, T.Hiruma and H.Nakamura: "Ultrahigh-sensitivity Color HDTV Camera for Shooting Heavenly Bodies", IAB, An International Workshop on HDTV Technology and Production, Switzerland (June 1999)
- 6) 山崎, 馬嶋, 砂崎, 金山, 中村, 蛭間: "天体撮影用の超高感度ハイビジョンカメラ", 映情学誌, 56, 3, pp.424-430 (Mar. 2002)
- 7) K.Majima, S.Sunasaki, J.Yamazaki, and T.Andou: "An Ultrahigh-Sensitivity Color HDTV Camera for Shooting Heavenly Bodies", SMPTE Journal Technical Paper, pp.564-567 (July 2000)
- 8) Y.Z.Liu, C.D.Holish and W.W. Stein: "LPE GaAs/ (Ga,Al) GaAs Transmission Photocathodes and a Simplified Formula for Transmission Quantum Yield", J. Appl. Phys, 44, 12, (Dec. 1973)

三橋 政次 1995年, 慶應義塾大学大学院理工学研究科計測工学専攻修了。同年, NHKに入局。報道技術センター, 制作技術センターを経て, 2003年, 技術局に転属し, 主にカメラの開発, 整備に従事。現在に至る。正会員。

宮崎 正之 1994年, 上智大学理工学部電気・電子工学科卒業。同年, NHKに入局。放送技術局番組送出センターに配属し, ニュース番組の制作・送出に従事。2000年より, 技術局開発センター転属, 以来, 主に局外制作設備の開発・整備を担当。現在に至る。

山崎 順一 1977年, 北海道大学工学部電子工学科卒業。同年, NHK入局。福島放送局, 制作技術局を経て, 1983年より, NHK放送技術研究所にて, 撮像デバイスの研究に従事。1996年より, 技術局で主にハイビジョンカメラの開発に従事。正会員。

水野 到 1981年, 静岡大学工学部卒業。同年, 浜松ホトニクス (株) に入社。電子管事業部にて, 主にイメージインテンシファイヤの開発に従事。現在に至る。

渭原 常夫 1980年, 明治大学工学部卒業。同年, 浜松ホトニクス (株) に入社。電子管事業部にて, 主にイメージインテンシファイヤの光電面の開発に従事。現在に至る。

吉川 和雄 1966年, 埼玉県大宮工業高校卒業。同年, 富士写真光機 (株) (現フジノン) に入社。1970年, 東京電機大学機械工学科卒業。光学設計部にて, 主にテレビカメラレンズと色分解プリズムの設計開発に従事。現在に至る。

斉田 有宏 1995年, 静岡大学大学院理学研究科物理工学専攻修了。同年, 富士写真光機 (株) (現フジノン) に入社。光学機器部にて, 主に色分解光学系の開発・設計に従事。現在に至る。

蛭間 位吉 1987年, 桐蔭学園工業高等専門学校電気工学科卒業。同年, 池上通信機 (株) に入社, 池上工場技術部に勤務し, 主にハンディカメラおよび特殊カメラの開発・設計に従事。現在に至る。

鈴木 拓弥 1994年, 玉川大学工学部情報通信工学科卒業。同年, (株) 芙蓉ビデオエージェンシーに入社。以来, 画像処理機器の設計・開発に従事。現在に至る。