

■8群 (情報入出力・記録装置と電源) - 4編 (画像入力とカメラ)

2章 カメラ

(執筆者：竹村裕夫) [2011年10月 受領]

■概要■

2章はカメラ技術について解説する。この分野では放送局用カメラを始めとして、ビデオカメラ、デジタルカメラ、携帯電話カメラと日本の技術が世界をリードし、その結果、これらのカメラが世界中に広く普及してきた。

カメラ自体、大きさは小さいが、その中身は撮像デバイスを中心に、レンズ、色、デジタル画像処理、高機能化、LSIを含む回路、マイコン、小型実装、照明と多岐にわたる高度な技術の結集で成り立っている。これらの技術を総合的に理解していないと真によいカメラを作ることができない。ここではこれらの技術のポイントを順次、説明していく。

■8群-4編-2章

2-1 カメラの基本

(執筆著：藤田欣裕) [2011年4月 受領]

2章では様々な種類のカメラについて詳しく述べられる。2-1節ではこれらのカメラを理解するうえで、必要となるカメラの基本について、その構成、光学系、信号処理について概説する。

2-1-1 構成

カメラは人物や風景など被写体の光学像を電気信号に変換し、画像信号として出力する装置である。出力信号は表示装置により被写体像として再現され、人間の目で観測することができる。図2・1は、被写体像がカメラで撮影され表示装置において、光学像として再現される基本的な流れを示している。

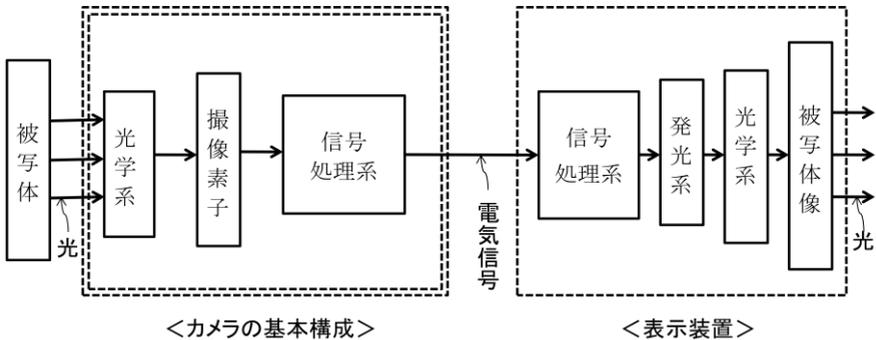


図2・1 被写体像再現の流れとカメラの基本構成

カメラの基本構成は、被写体の光学像を生成する光学系と、その光学像を電気信号に変換する機能を有する撮像素子、画像信号として出力する信号処理系の三つから成り立っている。

人物や風景から放射された光は、光学系により撮像素子の受光面で像を結ぶ。光学系には通常、絞り、フォーカス、ズームの可変機能があり、目的とする被写体像を捕らえやすくする重要な役割がある。光学系はカメラの感度や解像度などの画質とともに、撮影作業の運用性にも影響を与える。

撮像素子は光学像を電気信号に変換する。撮像素子は、カメラの性能を左右するキーデバイスであり、その用途や用いられる画像システムの仕様に応じて、適切なものが選択される。撮像素子の詳細については1章「撮像デバイス」を参照されたい。撮像素子の出力信号は信号処理系を経て、使用される画像システム仕様に応じた信号が出力される。

カメラは、その用途や要求される性能によって図2・2のように分類される。まず、カメラの画像が使われるシステムによって分類できる。例えば、動画像システムと静止画像のシステム、あるいは高解像度用途(走査線1125本)のHDTVカメラと、標準解像度用途(走査線525本)のSDTVカメラのように分類される。

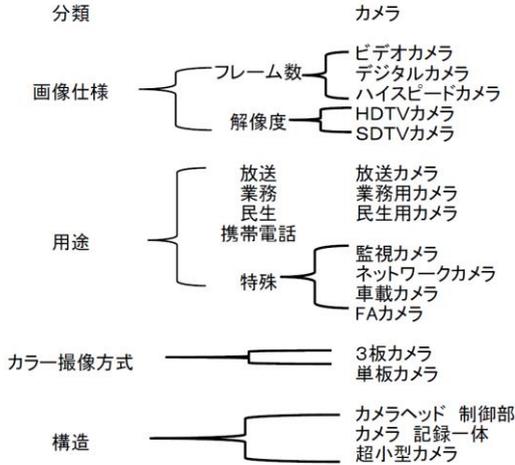


図 2・2 カメラの種類

各々のカメラの詳細については2章の中で述べられているので、そちらを参照されたい。ここではカメラの用途や要求される性能について、その特徴的なところを述べる。カメラは使用される用途によって要求性能が異なる。また、カメラの性能は一般に画質を決定する感度、解像度、ダイナミックレンジ、色再現などで規定され、その他に、運用性、信頼性、経済性などの評価項目があげられる。例えば、放送用カメラは最も高い画質や信頼性が求められる。更に、画質とともに緊急報道などにおける運用性も要求される。放送用カメラでは、カラー撮像方式として感度や色再現に優れる3板方式が使用される。他のカメラと比較し、光学系や信号処理系の仕様は大きく異なっている。

業務用ビデオカメラは、放送用に次ぐ高画質でかつ低コストが要求される。3板方式が多いが低コスト化のため光学系を小型化したカメラが多い。民生用カメラは、カメラの操作を専門家ではない一般の人が行うため、分かりやすい操作性などが求められる。性能面でも、より暗いシーンでも使われることがあるため、感度など業務用カメラより上回る性能が要求される場合もある。また、本体が小型なものが多いため、手ぶれが発生しやすいことからそのための特別な信号処理が必要となる。

特殊カメラの分類の中に、監視カメラや車載カメラがある。監視カメラは気温の変化など激しい環境での動作など信頼性が求められるほか、車載カメラはトンネル内外での明るさに同時に対応するため、広いダイナミックレンジが必要である。その他、特殊な用途に対応した、固有の信号処理系を必要とする場合が多い。

構造によってもカメラの分類が可能であり、カメラヘッドを超小型化したカメラヘッド分離型カメラなどは小型で特殊な光学系や撮像素子、信号処理系から成り立っている。

2-1-2 光学系

撮像素子に結像する光学像の性能は光学系を構成する各々の光学系の性能により決定され

る。光学系を構成する要素としては、撮像素子の受光面に結像させるためのレンズ、カラー撮像方式に対応した色分解光学系、偏光フィルタや色温度変換フィルタなど、その他の光学部品から成り立っている。カメラの光学系の一例を図 2・3 に示す。3 板式カメラの例で、入力光を RGB に分解する 3 原色分解プリズムが不可欠である。単板撮像方式の場合では、図 2・3 のような複雑な分解光学系は不要であるが、撮像素子の受光部に積層した色フィルタと色分離のための信号処理が必要となる。

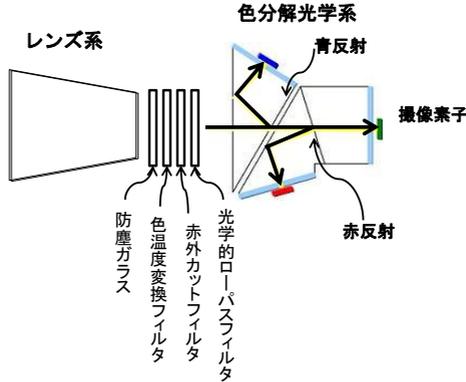


図 2・3 カメラの光学系の例

(1) レンズ系

レンズにより被写体像は撮像素子の受光面で結像する。レンズと撮像素子の受光面の間には色分解光学系のほか受光面の近傍に必要となる反射や拡散を防止するための光学部品など、屈折率が空気よりも大きい光学部品が必要となる。このため、レンズと受光面の間に多くの光学部品を必要としないフィルムカメラとは異なり、レンズと結像面までの距離であるバックフォーカスが長くなる。このため、レンズの設計においては、屈折率の高い材料や非球面レンズ技術を用いて、より小型化の工夫が求められる。そのほか3板式カメラでは、色収差の影響を受け、波長により赤、緑、青色用の撮像素子の出力で歪を生じ、色にじみなどの画質劣化をもたらす。色収差の影響を補正する工夫も必要となる。

(2) 色分解光学系

入力光を光の3原色である R, G, B に分解する。図 2・3 の例のようなプリズム型が多く用いられる。各プリズムブロックの端面に特定の波長域を反射するダイクロミック膜がコートされている。入射光はまず青光が選択して反射され、さらに赤光が選択して反射し、残った緑光成分の光が透過して撮像素子へ到達する。入力された可視光のすべての成分がロスすることなく撮像素子に到達し、また各色チャンネルでの波長透過特性を理想的な色再現特性に近づけることが可能で、感度、色再現性とも良いカメラ性能が得られる。

(3) 光学素子

その他、CCD など受光部が離散的に存在する撮像素子では、サンプリングによる折り返し

信号を防止するため、光学的フィルタが必要となる。折り返し信号は偽信号として画質劣化の要因となる。この信号を抑圧するため光学的ローパスフィルタが必要となる。また、色分解プリズムや光学的ローパスフィルタは入力光の偏向によって特性が変わってしまうことから、偏向特性を合わせるための偏向フィルタが必要となる。

また、カメラは被写体が色温度 3200 K の照明光で撮影された場合、色チャンネルのバランスがとれるように設計されている¹⁾。したがって、照明の色温度が著しく変わる場合、色温度を変換するフィルタにより各チャンネルのバランスを調整する。

2-1-3 信号処理

撮像素子から出力された信号は、用途に応じた出力信号を生成するため様々な信号処理が行われる。基本的なカメラの信号処理系の構成を図 2・4 に示す。

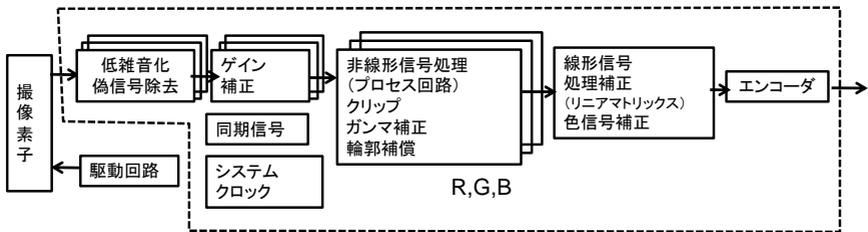


図 2・4 基本的なカメラの信号処理系の構成

(1) 低雑音化、偽信号除去

撮像素子の出力に対して様々な信号処理が行われるが、その一つに低雑音化がある。CCD 撮像素子では相関 2 重サンプル法 (CDS : Correlated Double Sampling)²⁾ と呼ばれる雑音低減法が多くの場合使用され、雑音特性の向上を図っている。また、撮像素子からの本来の信号成分ではない偽信号を除去する処理が行われる。例えば、画素欠陥やシェーディング、固定パターンノイズなどは画質劣化の要因となり、除去するための処理が行われる。

(2) ゲイン補正

非線形信号処理を行う前に信号の黒レベルを固定し、更に一定のレベルまで増幅する。多くの場合、AGC (Automatic Gain Control) と呼ばれる、自動ゲイン補正により処理される。

(3) 非線形信号処理 (プロセス回路)³⁾

ゲイン補正後の信号は、レベル軸と周波数軸で必要な非線形処理が行われる。各信号レベルは表示系で規定された白レベルを超えたり、規定された黒レベル以下にならないよう信号レベルを制限する処理を行う。ホワイトクリップ、ブラッククリップと呼ばれる処理のほか、中間のレベルの明るさについてもガンマ補正と呼ばれる処理が行われる。表示系において、信号レベルに対しての明るさの関係は線形ではないため、このガンマ補正が必要となる。ガ

シマ補正は安定度や経済性を考慮して、表示系ではなく送像側で補正を行うこととしている。更に周波数軸では、カメラの画像を鮮鋭化させるため高域を強調する輪郭補償処理が行われる。

これらの非線形信号処理はカメラに特有のものであり、プロセス回路とも呼ばれている。

(4) 線形信号処理補正 (リニアマトリクス)

各々の3原色信号にリニアマトリクスをかけ、色再現範囲を変えることや全体の色調を変化させるマスキング処理が行われる。

(5) エンコーダ

カメラを応用するシステムに応じた出力信号フォーマットとなるようにエンコードされる。多用途の信号出力が可能なマルチフォーマットを出力するカメラもある。

基本的なカメラの信号処理系の構成、各々の機能について述べたが、信号処理の多くは、デジタル化されマイコンにより制御、処理される。デジタル化により多機能化やフレキシビリティの高い信号処理が可能となっている。

2-1-4 カメラの解像度特性

カメラの特性は感度、雑音、解像度、階調など多岐にわたっている。解像度は、カメラの評価項目の中では、感度、雑音とともに、画質を決める重要な特性としてあげられる。解像度はどれだけ細かい部分まで分解し、画像として再現できるかという能力を表す物理量である。また、もう一つの物理量である MTF (Modulation Transfer Function) がどれだけ広域まで含んでいるかでも表現される。ここでは、カメラの解像度について、評価法を解説する。また、カメラシステム全体として解像度特性を決定する要因について解説し、更に MTF を補正するための技術や、解像度と関連する鮮鋭度 (シャープネス) を向上させるためのデジタル画像処理について補足する。

(1) 解像度の評価

カメラの解像度の表し方として、限界解像度ならびに MTF の変調度として示す方法がある。限界解像度は、白黒のパターンを撮像したときにどこまでの細かいパターンが映像として再現されるか、その限界で表現するものである。図 2・5 のような周期的に白と黒を繰返す縞模様のパターンが使用され、縞模様の間隔によって空間的な周波数が定義される。解像限界の測定方法として、明暗のパターンが画像上で識別できなくなる限界として表現される。解像度の単位としては、光学的な空間周波数として lp/mm (ラインペア・パー・ミリ) や、テレビの画面上の解像度として定義される TV 本、また電気信号として伝達できる最高周波数 (Hz) がある。

限界解像度は、パターンのコントラストや測定者の判断基準によって多少の誤差を生じる。一方で、空間周波数のレスポンスを MTF と呼び、解像度の評価に使用される。縞模様を撮影したときの明確さに相当し、レベルが大きいほどコントラストが高いことを示している。MTF は、伝達系としての特性を表現するもので、レンズ系、信号処理系を含めたカメラシス

テムを総合的に解析評価するのに適している。

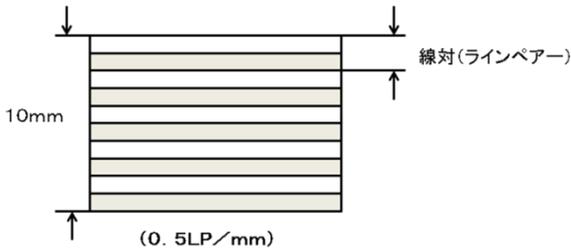


図 2・5 解像力チャート線パターンの例

具体的にレンズ系において MTF を求める方法を図 2・6 に示す。一つは、光学系におけるインパルス応答である点像分布関数をフーリエ変換して算出する方法、二つ目は正弦波チャートのコントラスト再現率、すなわち物体のコントラストと像のコントラストの比から求める方法である。信号処理系においても同様な方法で MTF が測定できる。このように、各空間周波数で得られた応答特性を図 2・7 ようにプロットし、MTF 特性が得られる。前述した限界解像度はおよそ 5% 程度の MTF に対応する空間周波数となる。

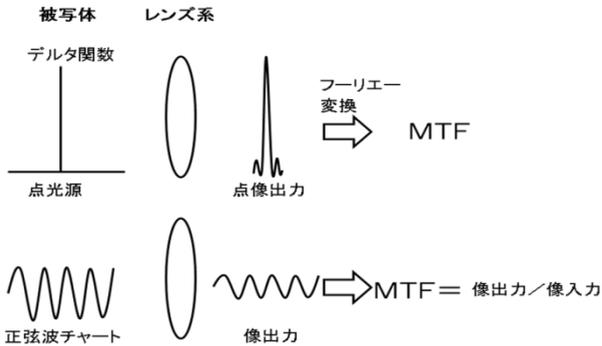


図 2・6 MTF の算出方法

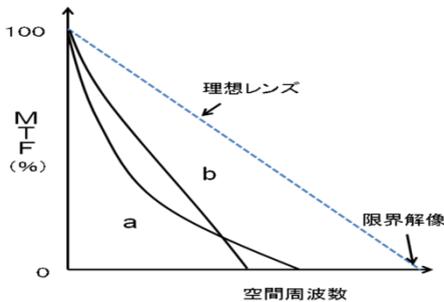


図 2・7 MTF の一例

(2) 解像度を決定する要因

限界解像度は、撮像素子の画素数や画像システムによって、ほぼ決まってしまう。したがって、カメラシステム全体として限界解像度について、改善のために考慮することは少ないと言える。一方で、MTF特性はカメラシステム全体の解像度特性や画質に大きな影響を与える。ここでは、総合的なカメラのMTF特性を決めるさまざまな要因について解説する。

時間関数をフーリエ変換し、周波数軸へ展開することにより、物理特性の解析が容易になることは一般的に知られている。撮像システムにおいては、空間的な位置関数を空間周波数に展開することにより、同様に解析が容易となる。カメラの基本構成(図2・1参照)における、被写体、撮像素子、信号処理、それぞれのブロックについて空間周波数特性(MTF)を解析することにより、画像および画像システムのもつ物理的性質を総合的に論じることが可能となる。カメラシステム全体のMTFは、各ブロックのMTFの掛け算で決定される。各要素のMTFを2次元座標 x, y で定義し、レンズ $f_1(x, y)$ 、撮像素子 $f_2(x, y)$ 、信号処理回路 $f_3(x, y)$ とすると、カメラ全体のMTF= $f(x, y)$ は $f(x, y) = f_1(x, y) \times f_2(x, y) \times f_3(x, y)$ で与えられる。各々のMTFが1であれば、劣化のない理想的なシステムとなる。

(a) レンズ系のMTF

一般にレンズは収差や回折によりMTFが劣化し、高い空間周波数でのコントラストが下がり、光学像はぼける。また、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点像は1点に集まらず、広がったものになり、MTFは劣化する。収差はレンズの製造上の誤差や波長により屈折率が異なるために生じるものである。しかしながら、通常解像度では大きく劣化することは少ない。一方で、高解像度を必要とする領域では、回折限界によるMTFの影響を考慮しなければならない。回折効果のみを考慮した理想レンズの解像度特性を図2・8に示す。絞りによって、回折の影響も異なりMTFが大きく変化している。

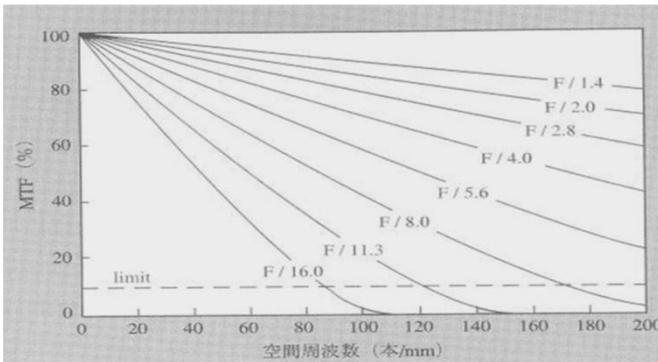


図2・8 理想レンズのMTF

通常解像度領域における光学系において、MTF劣化の大きな要因は、次項で述べる偽信号を抑圧するために必要となる光学的ローパスフィルタである。

(b) 撮像素子によるサンプリングとMTF

CCDのような固体撮像素子で撮像するという事は、2次元空間において離散系のサンプリングを行うことである。これは、デジタル信号処理における離散系のサンプリングを行

うことと類似している。図2・9に示すように、被写体の一次元の位置関数を $f_1(x)$ 、光学系 $f_2(x)$ 、撮像素子 $f_3(x)$ とし、フーリエ変換し空間周波数領域で得られる関数を各々 $F_1(\omega)$ 、 $F_2(\omega)$ 、 $F_3(\omega)$ とすれば図のように出力信号は位置領域では、 $f_1(x) * f_2(x) * f_3(x)$ (*コンボリューション)として、 $F_1(\omega)$ 、 $F_2(\omega)$ 、 $F_3(\omega)$ として表せる。

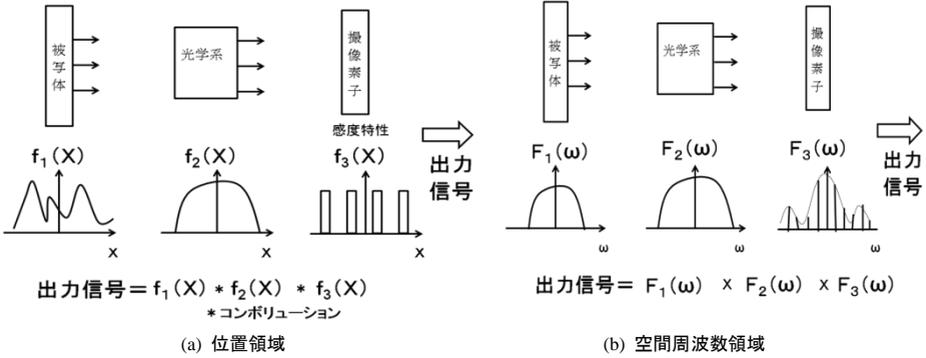


図2・9 撮像素子によるサンプリング

(c) 撮像素子の開口アパーチャとMTF

撮像素子で光を集める際、理論上は“無限に小さな点”(デルタ関数)でサンプリングすることになっているが、現実の撮像素子でそれは不可能であり、光を集めるための開口(アパーチャ)をもっている。撮像素系では画素の感度の広がりが多いほどMTFが劣化する。

図2・10に示すように、位置関数をフーリエ変換すると周波数軸上ではローパス効果となり、MTFが低下する。

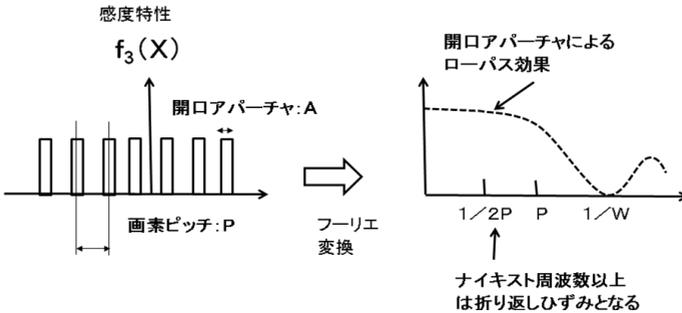


図2・10 開口アパーチャとMTF

(d) サンプリングによる折り返し信号

ナイキストの定理により、サンプリング周期の1/2で決定されるナイキスト限界以上の周波数成分をもつ信号は、低周波成分に折り返され、偽信号となる。偽信号はモアレやエッジとして観測され、画質に与える影響は極めて大きい。これを防ぐため、AD変換器の前にLPFを入れて折返し歪を軽減すると同様に、光学的なLPFを入れることで軽減している。光学

的ローパスフィルタは水晶フィルタが多く用いられるが、電気的なデジタルフィルタのように設計に自由度は少なく、また急峻な抑圧特性を得ることができない。光学的ローパスフィルタは水晶フィルタが多く用いられ、そのMTF特性は図2・11のように表される。撮像素子のサンプリング構造は2次元性であり、また単板カメラでは色信号のサンプリング構造に対応して、偽信号抑圧のポイントが決まり、水平垂直方向にそれぞれ光学的LPFが必要となる。MTFはLPFの掛け算となり、更に劣化することとなる。1層の水晶板によるフィルタ特性は以下のように算出される。水晶板に入射された光は、常光と異常光に分かれる。二つの光の干渉により、加算された出力が得られる。合成した式の減衰項の部分がローパス特性となる。振幅Aのsin波形を入射光とすると、異常光の干渉は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \omega &= A \sin 2\pi f T + A \sin 2\pi f (T-d) \\ &= A \sin 2\pi f (T-d/2) \cdot \cos \pi f d \end{aligned} \quad f: \text{空間周波数}$$

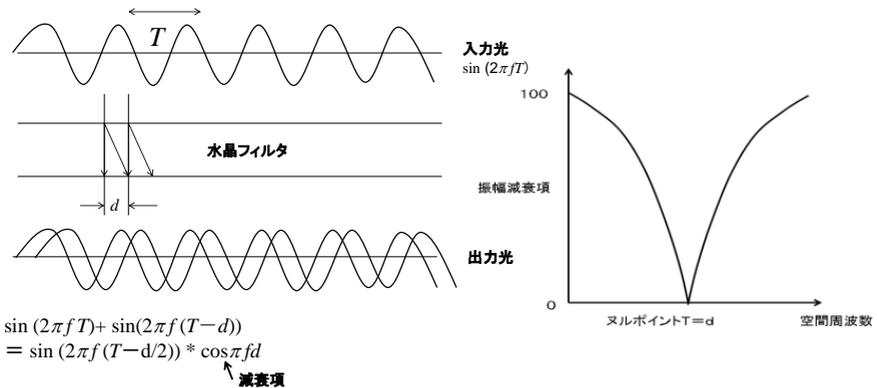


図2・11 水晶フィルタのMTF特性

(3) 解像度とデジタル信号処理³⁾

(a) MTFの補正と鮮鋭度

前節で説明したように、MTFはカメラの各ブロックで劣化する要因をもっている。MTFの劣化は結果としてボケ画像となるが、MTFを補正すると画質は改善される。MTFの劣化特性はローパス特性をもっており、図2・12のような考え方で、逆特性をもつハイパスフィルタにより補正を行い、MTFの改善を行っている。

また、鮮鋭度(シャープネス)を改善するため、特定の空間周波数領域を持ち上げ強調、補正する。鮮鋭度は見た目の解像感のことである。映像の周波数特性を制御して、輪郭の強調感やきめ細かい被写体の再現性を調整している。鮮鋭度を上げると中高域が強調され、映像がクッキリと再現されるが、一方でノイズが目立ちやすくなる欠点がある。

鮮鋭度を上げて解像度が良くなることはないが、一方で解像度の高い映像が鮮鋭に見えるとは限らない。非常に細かい部分は再現されていないのに鮮鋭に感じる映像がある。

鮮鋭度は、心理的な鮮鋭さに対する心理物理量として定義され、さまざまな定量化が提案されている⁵⁾。

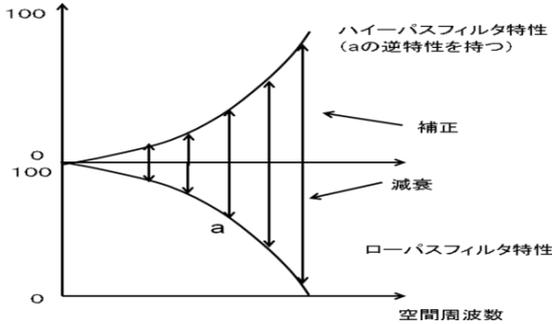


図 2・12 デジタル信号処理による補正の考え方

一般に図 2・13 に示す (b) のような MTF 特性をもった映像の解像度は、高くても鮮鋭度は低く、(a) のような MTF 特性をもった映像の解像度は低くても鮮鋭度は高い。(a) のような特性はテレビジョン映像に、(b) のような特性はフィルム映像に多く見られる。

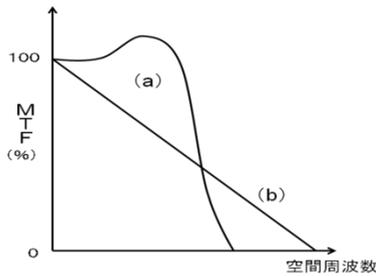


図 2・13 鮮鋭度と空間周波数⁴⁾

(b) アパーチャ補正, 輪郭補償⁶⁾

アパーチャ補正は、撮像素子で開口アパーチャによるローパス効果(細かい模様がぼける、アパーチャロス)を補正するものである。MTF の中高域部分についてハイパス特性をもつフィルタにより強調補正する。シャープネス処理と同じ演算で行われる。輪郭補償は映像の輪郭を強調し、同様に鮮鋭度を改善するものであり、エンハンスメントということもある。

見た目の精細感を向上させる技術は古く、銀板写真の時代から行われてきた。その多くは MTF の劣化した画像からエッジを検出し、ぼけた画像に加算する方式である。輪郭補償はカメラシステムだけでなく、放送受信機でも多用されている。特性の優劣は、エッジを検出するハイパスフィルタ特性による。図 2・14 にフィルタの例を示す。ハイパスフィルタは (-0.5, 1, -0.5) である。映像信号がサンプリング周波数の 1/2 となるナイキスト周波数周辺までのスペクトラムを有すれば、3 タップのハイパスフィルタでも十分実用に供する。映像帯域が少ない場合は 5 タップ以上のハイパスフィルタが必要になる。タップ数を大きくするとハイパスフィルタの帯域が低域まで伸びるため、低域からエッジ検出が可能となる。

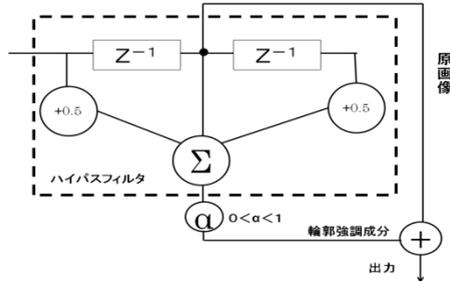


図 2・14 輪郭補償用ハイパスフィルタ

■参考文献

- 1) 日下秀夫(監修), “カラー画像工学,” 映像情報メディア学会編, オーム社, 1997.
- 2) M. White, D. R. Lampe, F. Blaha, and I. Mack, “Characterization of Surface Channel CCD Image Arrays at Low Light Level,” IEEE J. Solid State Circuits SC-9, vol.1, pp.1-12, 1974.
- 3) 江藤良純, 阿知葉征彦, “テレビ信号のデジタル化,” コロナ社, 1989.
- 4) 樋渡涓二, “視覚とテレビジョン,” pp.159-160, 日本放送出版協会, 1986.
- 5) 江森康文, “視覚の空間周波数特性と画像鮮鋭度,” テレビジョン学会誌, vol.33, no.12, pp.50-58, 1979.
- 6) 村上敬之助, 榎並和雅, “輪郭補償器,” テレビジョン学会誌, vol.33, no.4, pp.33-35, 1979.

■8群-4編-2章

2-2 カラー撮像方式

(執筆者：竹村裕夫) [2011年2月 受領]

カメラに使用される撮像デバイスは基本的には入ってくる光の強弱に感じて電気信号が変化するもので、光の波長選択性を有していない。一方、カラー画像を組み立てるには R (赤)、G (緑)、B (青) の 3 原色信号が必要になる。そこで、カメラでは 3 原色信号に分かれた電気信号を効率良く出力することが必要になる。

効率良くとは、感度、SN 比、解像度、ダイナミックレンジ、階調、色再現が優れていることである。更には、コントラスト、トーン、偽信号、ボケ効果、鮮やかさ、色艶、色調など、撮影・使用目的に応じた対応が必要になる。工業的にはこれら性能に加えて、各種の自動化機能を備え使いやすいカメラであること、安価、小型軽量、堅牢、低消費電力、しかも故障や修理の不要な信頼性が高いカメラに仕上げなければならない。

ここで少し解説を加えると、感度、SN 比、解像度、ダイナミックレンジ、階調、色再現はカメラの基本性能であり、一般的に、定量的尺度が明確で評価もしやすい。一方、コントラスト、トーン、偽信号、ボケ効果、鮮やかさ、色艶、色調など人間の感情や感覚、印象や情緒に訴える要因になると相互に複雑に絡み合い、性能や評価基準も単純ではない。コントラストやトーンは信号の振幅と複雑に値が変化するガンマ特性と考えられる。例えば、女優の顔を撮影する場合、その場の状況に応じた表情の変化、生き生きとした表情、色艶のにじみ出る表情を表現するにはどのような撮像特性が理想的なのか、どうすればよいか、そう単純なものではない。ものを撮るカメラと人を撮るカメラとでは特性が異なるのであろう。

撮像デバイスが与えられたとき、これを最も効率良く使いこなす技術がカラー撮像方式と言えよう。次に、カラー撮像方式を実行しようとするとき、すなわち、カメラを作ると、撮像デバイスはもっとこうして欲しいと、性能、機能面から要求が出てくる。これが撮像デバイス担当にフィードバックされると撮像デバイスの性能・機能の改善が進む。すると更によりカメラができる。このフィードバックループがうまく回転するところに、技術の進歩がある。撮像デバイス技術者、カメラ技術者がうまくかみ合って、新技術が次々に盛り込まれ、よい方向に進んできたところに、日本のカメラ産業が栄えてきた原点があると言えよう。

カラーフィルムの場合には、現在では、RGB の各色光に対して感光する膜が積層されていて、表面から見ると RGB のカラー画像や Mg (マゼンダ)、Ye (黄色)、Cy (シアン) の補色の画像が得られる仕組みになっている。しかし、写真フィルムでも最初は白黒フィルムで、当初からカラーフィルムがあったわけではない。このことは 1930 年代の学会誌、Optical Society of America を見ると色々なモザイク型のカラーフィルタの発表があることから理解できる。

一方、電子的に画像信号が得られる現在の CCD や CMOS イメージセンサでは、各画素に設けられたフォトダイオードが光電変換を行い、可視光の広帯域の光に対して感度を有するため、撮像デバイス単独ではカラー信号を分離して得ることができず、何らかの光学的手段を用いてカラー信号を得ることが必要になっている。

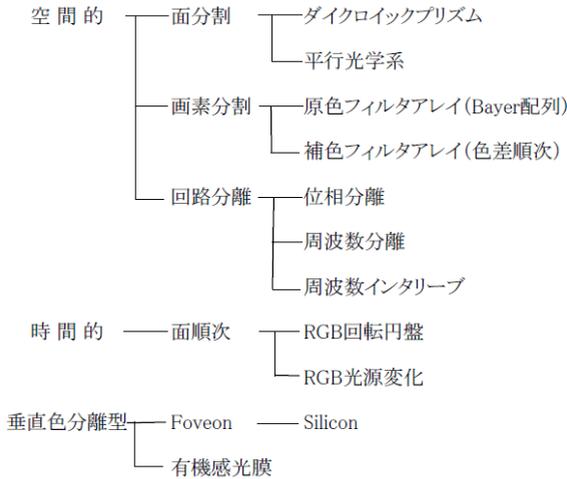
光学的手段には空間的手段と時間的手段がある。空間的手段では画素ごとに色情報を得る手段と複数画面でそれぞれ色情報を得る手段とがある。時間的手段では画面ごとに色情報を

得る。

更に最近では、光電変換面に波長選択性をもたせて、カラーフィルムのように積層型で色分離を行う試みが行われ、一部実用化された例もある。

これらを体系的に示したのが表2・1である。カラー撮像方式はアナログの撮像デバイスである、撮像管の時代から盛んに行われてきた。民生用単管式カラーカメラの出現が1974年であり、この頃から回路分離と名づけた各種方式が発表、製品化されてきた¹⁾。

表2・1 カラー撮像方式の分類



一方、カメラに使う撮像デバイスの数から分類すると図2・15に示すように、撮像デバイス1個でカラー情報が得られる単板式と、3個で得られる3板式に大別される。現在では、家庭用のビデオカメラ、デジタルカメラは色フィルタアレイを用いた同時式の単板式、放送用のカラーカメラはダイクロイックプリズムを用いた3板式が用いられる。業務用や監視用のカメラは目的に応じて両方式が混在している。

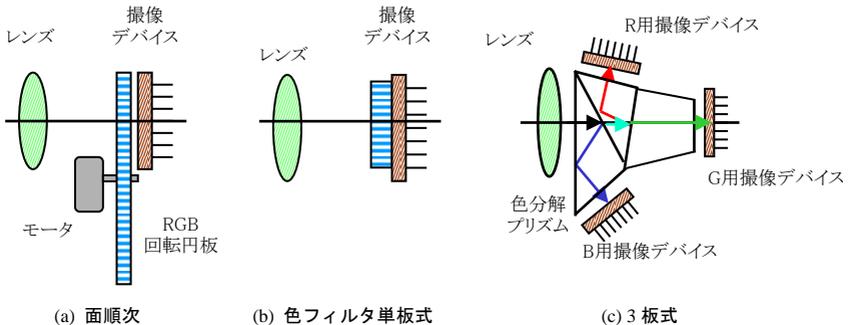


図2・15 カラー撮像方式

2-2-1 単板式

(1) 面順次

連続した画面ごとに RGB 信号を切り換えて得る方式である。通常のテレビジョン方式では 1/60 s で 1 枚の画面が構成されるので、1/180 s ごとに照明を切り換えて RGB の光を被写体に当てる。RGB の光学像が順次、イメージセンサ感光面に当るので、RGB 信号が分かれて出力され、RGB 3 枚で 1 画面ができる。なお、照明は変化させないで、イメージセンサの直前に回転円板を設けて、色フィルタを切り換えて RGB の光学像がイメージセンサ感光面に当るようにすることもできる。

この方式では、RGB の光が当たったら素早く読み取り、次の照明や色フィルタが入ってきて混色がないように注意する必要がある。光の切り換えは勿論、イメージセンサに残像があると混色が生じ、色分離が悪くなる。また、被写体やカメラが動くと色割れを生じるという本質的な課題がある。したがって、現在では一般用途に使うことは少ない。

(2) Bayer 方式

1976 年 Bayer (米国コダック社) によって提案され²⁾、原色フィルタの標準になっている単板式の色配列で、デジタルカメラ、ビデオカメラに広く用いられている^{3), 4)}。Bayer の発明の基本は、**図 2・16** に示すように、輝度信号に相当する色 Y を市松状に配列し、その残りの部分に 2 種類の色、 C_1 と C_2 を配列させるというものである。現在用いられているものは、**図 2・17** のように、輝度信号 E_Y に寄与の大きな G 透過フィルタを市松状に配列し、残りの部分に R 透過、B 透過のフィルタをそれぞれ市松状に配列したものである。

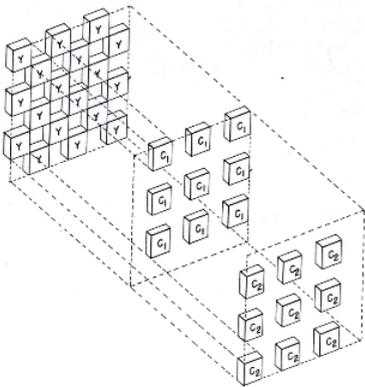


図 2・16 Bayer 方式の基本形²⁾

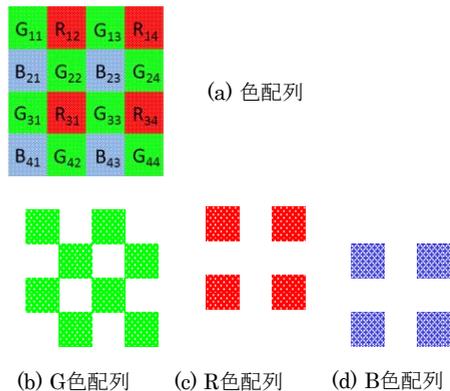


図 2・17 Bayer 配列

カラーテレビジョンの標準方式では E_Y の構成比は YUV 方式では

$$E_Y = 0.299 E_R + 0.587 E_G + 0.144 E_B \quad (1)$$

$$U = 0.7 (E_R - E_G) - 0.11 (E_B - E_G) \quad (2)$$

$$V = 0.3 (E_R - E_G) - 0.89 (E_B - E_G) \quad (3)$$

YC_rC_b方式では

$$E_Y = 0.299 E_R + 0.587 E_G + 0.144 E_B \quad (4)$$

$$C_r = 0.500 (E_R - E_G) - 0.081 (E_B - E_G) \quad (5)$$

$$C_b = -0.169 (E_R - E_G) + 0.500 (E_B - E_G) \quad (6)$$

1080i のデジタルテレビジョンでは

$$E_Y = 0.2126 E_R + 0.7152 E_G + 0.0722 E_B \quad (7)$$

$$P_b = 0.5389 (E_B - E_G) \quad (8)$$

$$P_r = 0.6350 (E_R - E_G) \quad (9)$$

であり、民生用ビデオカメラ、デジタルカメラ、いずれも E_Y に対して G 信号 E_G が 5 割以上を占め支配的である。したがって、 E_G が得られる G 透過フィルタを多く配列させている。

Bayer 配列では各色フィルタの配列が 2 次元的に対称であり、各種の画像処理を行う場合にも都合がよい。したがって、静止画像を主目的とするデジタルカメラでは、ほとんどすべてに Bayer 配列が用いられている。図 2・17 に示した Bayer 配列をそのまま上から順番に走査していくノンインタレース（順次走査）方式では、 R 、 B の色信号は走査線ごとに順番に得られていく。すなわち、線順次で R 、 B 信号が交互に得られていく。したがって、1 画面内で RGB 信号の処理が可能になる。

一方、動画像を主目的とするビデオカメラや放送用カメラは、周波数帯域を有効に活用するために、インタレース（飛び越し走査）方式が用いられている。走査線 1 本ごとに走査していくインタレースでは第 1 のフィールドは奇数番目で構成されるから、色信号は R 信号のみ、第 2 のフィールドは偶数番目で構成されるから、色信号は B 信号のみになる。すなわち、面順次で R 、 B 信号が交互に得られていく。したがって、画面内で RG 信号か BG 信号の処理しかできず、 RGB 信号を得るためには 1 フィールドメモリを用いて時間遅れが発生するという大きな課題があった。

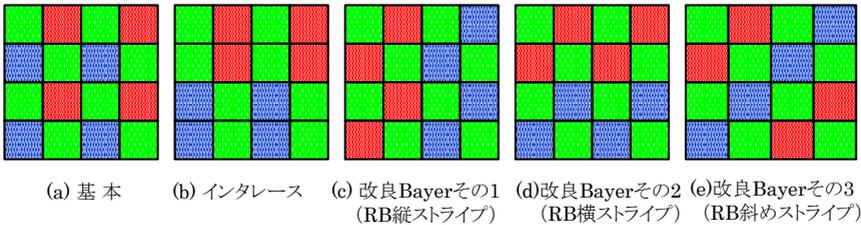


図 2・18 各種 Bayer 方式^{1),3)}

このため、インタレース用に図 2・18(b)に示すような、ダブル Bayer 配列などが提案され一部で実用化もされた。しかし、上下の相関が悪くなり、2 次元処理ができるメリットが低減されるため、大きく普及することはなかった。その他にも、図 2・18(c)～(e)のような各種フィルタ構成が考えられた。しかし、いずれの方式でも基本形に優る配列はない。最近では、イメージセンサの画素数が増えたこと、フレームメモリが安価に構成できること、回路処理技術が進歩したことなどから、動画像を得る場合にも基本形が採用されることが多い。

RGB 色フィルタによるイメージセンサの相対分光感度特性の一例を図 2・19 に示す。

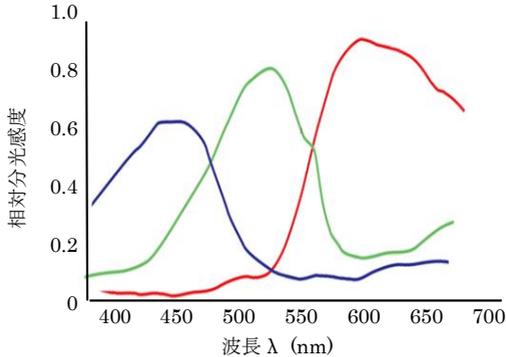


図 2・19 RGB フィルタによるイメージセンサの相対分光感度特性の一例

長期にわたって変色がないことなどで使われる顔料の特性も限られてくる。Bayer 方式では 3 原色画像がダイレクトに得られるため、複雑な回路処理を通さなくてもある程度の色再現が得られるという特徴がある。しかし、図 2・19 の特性では色再現が不十分なため、実際のカメラではマトリクス回路などで各種の色補正手段が採用されている。

Bayer 方式では図 2・17 (b)～(d) で分かるように、GRB の各色とも画素の欠如部分がある。この部分を如何に効率良くはめ込むかで再現される画質が大きく変化する⁵⁾。単純に線形補間すれば一応はめ込むことができる。すなわち、 G_{23} には G の画素が欠如されているので、この画素の周囲 G_{13} 、 G_{22} 、 G_{24} 、 G_{33} の画素の値を平均化処理する。

$$G_{23} = (G_{13} + G_{22} + G_{24} + G_{33}) / 4 \quad (10)$$

これで一応画素が補間されるが、これでは LPF になり、解像感が低下する。そこで、デジタル処理では垂直方向、水平方向を見て、どちらに相関が強いかを判断する。垂直方向の相関が強ければ、垂直方向に隣接した画素

$$G_{23} = (G_{13} + G_{33}) / 2 \quad (11)$$

で補間する。もし、水平方向の相関が強ければ水平方向に隣接した画素

$$G_{23} = (G_{22} + G_{24}) / 2 \quad (12)$$

で補間する。

ここでは一例を示したが、このような画像処理技術を駆使することによって、Bayer 方式の画像は一層、画質向上が図られるようになった。

更に、補間方式で埋め込むのではなく、画素を創生しようとする試みもある^{6),7)}。

G_{23} の画素部分には青の画素 B_{23} が存在する。この画素には本来、RGB 各光線が入ってきているが、色フィルタによって B 光線だけが選択されて、 B_{23} が得られている。そこで、 B_{23} の信号量を手がかりにして、ここに到達したであろう G_{23} の信号を推測する。色情報は近接した画素で相関が強いとすれば、青と緑の比率を算出できれば G_{23} を創出できる。

このような処理が可能なのも、Bayer 方式の画素配列が 2 次元に対称であり、画素が隣接して配置されていることによる。

(3) 色差線順次

上記, Bayer 方式では色再現性は良いものの, インタレースには不向きであった. そこで, 1980 年代にビデオカメラ用色フィルタとして各種の方式の提案があった. 当時はイメージセンサの画素数も限定されていたうえ, 感度も十分でなかった. そこで, 色フィルタ配列の条件として,

- ① 光の利用率が良く, 感度が高いこと
- ② 輝度信号の周波数帯域が広くとれ, 解像度が高いこと
- ③ 色再現性が良いこと
- ④ 折り返し歪みが小さく, 偽信号が出にくいこと

などが要求された.

色差順次方式は, 色信号が色差信号の形で走査線ごとに線順次で得られる方式で, 松下電器によって提案され^{8),9)}, 現在ではほとんどのビデオカメラで採用されている.

図 2・20(a)に示すように, 第 1 行は $Ye \cdot Cy$ の繰り返し, 第 2 行は $Mg \cdot G$ の繰り返し, 第 3 行は再び $Ye \cdot Cy$ の繰り返しとするが, 次の第 4 行は Mg と G の順序を変えて, $G \cdot Mg$ の繰り返しとする. 以下, この 2×4 の繰り返しで配列させていく.

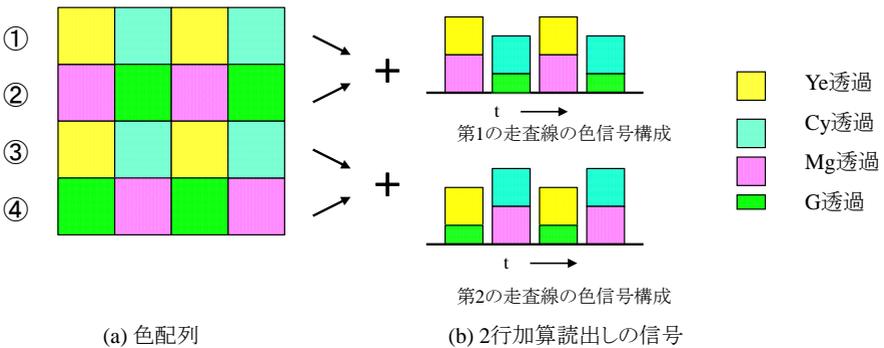


図 2・20 色差線順次色フィルタ

この配列はインタレース用なので, 2 行加算読み出しで行う.

第 1 の走査線は①+②, 第 2 の走査線は③+④, すると図 (b)に示すように, 第 1 の走査線では $Ye + Mg$, $Cy + G$ の信号が交互に得られ, 第 2 の走査線では $Ye + G$, $Cy + Mg$ の信号が交互に得られる. $Ye \cdot Cy \cdot Mg$ の各色フィルタは, 図 2・21 に示すように, 各々複数の原色成分を含み, $Ye = R + G$, $Cy = G + B$, $Mg = R + B$ となる.

そこで, 図 2・20(b)で得られた 2 行加算読み出し信号は, 原色信号で表すと図 2・22(b)に示すような構成になる. これを各原色信号別にまとめると図 (c)のようになる. これらの波形はパルス振幅変調と信号であるから, フーリエ級数で展開すると直流成分と基本波成分とで表すことができる. 第 1 の走査線 (奇数番目の走査線) では

$$S_0 = (2R + 3G + 2B) / 2 + \frac{1}{2} (2R - G) \sin 2\pi f_s t \quad (13)$$

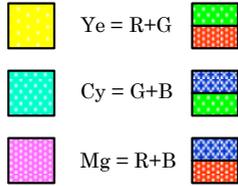


図 2・21 色フィルタの構成

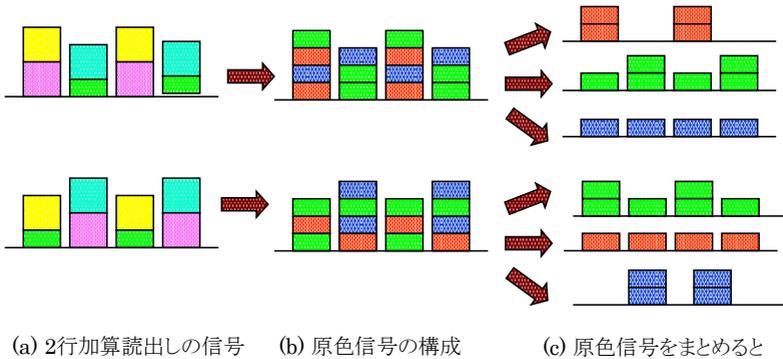


図 2・22 色差線順次方式の色分離

一方、第 2 の走査線（偶数番目）の走査線では

$$S_e = (2R + 3G + 2B) / 2 + \frac{1}{2}(2B - G) \sin 2\pi f_s t \quad (14)$$

ここで、 f_s は色フィルタのピッチで決まる基本周波数である。

上式より、LPF で分離することにより直流成分の輝度信号を、 f_s を中心とする BPF で高周波数成分を分離することにより二つの色差信号、 $(2R - G)$ 信号と $(2B - G)$ 信号を走査線ごとに線順次で得ることができる。ここで示した直流成分の R 、 G 、 B の信号構成は式(1)、(4)、(7)と若干異なる。一方、色差信号も本来は $(R - G)$ 、 $(B - G)$ 成分である。しかし、これらの差はわずかであり、マトリクス回路などで補正することができる。

もう少し基本的な話をすれば $Y_e = R + G$ 、 $C_y = G + B$ 、 $M_g = R + B$ となると説明してきたが、図 2・23 の各色フィルタによる分光感度特性から分かるように、 Y_e に含まれる R 成分と M_g に含まれる R 成分とは完全に等しいわけではなく、同様に、 Y_e に含まれる G 成分と C_y に含まれる G 成分、 C_y に含まれる B 成分と M_g に含まれる B 成分も完全には等しいとは言えない。したがって、上記説明は厳密な話ではなく、概念として理解していただきたい。実際にカメラを作る場合には数々の補正や工夫が施されている。

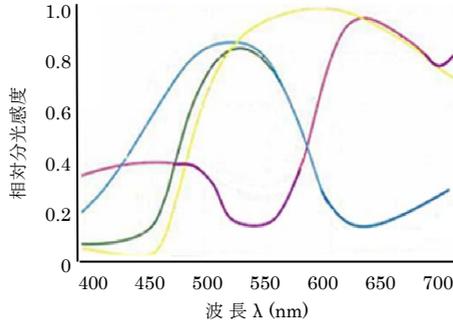


図 2・23 補色フィルタによるイメージセンサの分光感度特性の一例

(4) その他の方式

(a) WRGB 方式

Bayer 方式で光の利用率を向上しようとして、二つ配列されている G の一つを 図 2・24 に示すように W (透明) にしたものである。

W 部分の画素は色フィルタで遮光されることなく、入射した光がそのままフォトダイオードで光電変換されるので、感度向上が期待できる。このフィルタ配列を用いたイメージセンサが東芝とコダックから相次いで発表された^{10), 11)}。

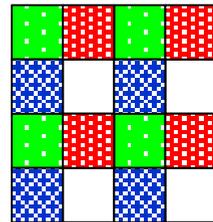


図 2・24 WRGB 配列

(b) 垂直色分離型

これまでの色分離を画素ごとに行う、すなわち、2 次元に色フィルタを配列させて画素ごとに異なる色情報を得る方法であった。これに対して、垂直色分離型は 1 画素の厚み方向に色分離を行おうとするものである。各層で吸収される光以外は、すべて透過しなければならない。したがって、配線層も含めて透明な物質で構成する必要がある。 図 2・25 にこの概念図を示す。

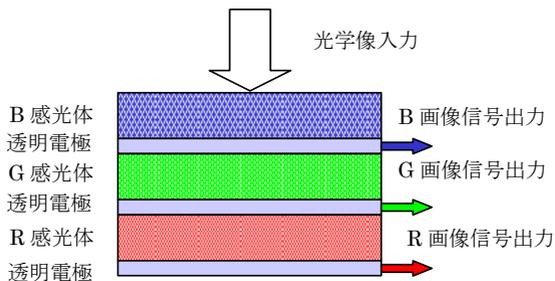


図 2・25 垂直色分離型の概念図

目的の色が分離できるような急峻な波長選択性を備えて、目的の色以外の波長についてはロスなく透過するような透明な物質が見つければ理想的なイメージセンサが作れるであろう。現時点で、この目的に近いのは、Siの波長選択性に着眼したものと、有機光導電膜を使うとするもの、大別して二つの方式がある。

フォトダイオードに光が入射する際に断面を見ると波長の短い青から順次吸収されていき、長波長の赤は最も深い部分に到達して光電変換される。そこで厚さ方向に分離して信号を取り出すことができれば、異なる波長の信号が分離して得られることになる。米国 Foveon 社がこの原理を用いたダイレクトイメージセンサを開発、シグマ社がデジタルカメラを製品化した^{12), 13)}。一方、波長選択性を有する有機材料を用いて透明な光電膜を作ることにより、厚さ方向に3色分解された信号を取り出す試みもある。NHK、富士フィルムで、それぞれ基礎的な研究開発が進められている^{14), 15), 16)}。

(c) ほかの色フィルタアレイ

カラー撮像方式は古くから各種方式が考えられてきた¹⁾。特に、撮像管時代は信号出力がアナログであり、画素の指定ができなかったので、後段の信号処理回路で工夫が施されていた。そのため、色フィルタとしては単純な構成が多く、ストライプ、周波数多重、周波数インターリーブなどが採用された。1974年に発売された民生用カラーカメラには周波数インターリーブ方式が用いられていた¹⁷⁾。

その後、CMOS イメージセンサ、CCD の出現により画素が指定できるようになり、**図 2・26**に示すような各種色フィルタアレイが出現し、一部で製品化された²⁵⁾。

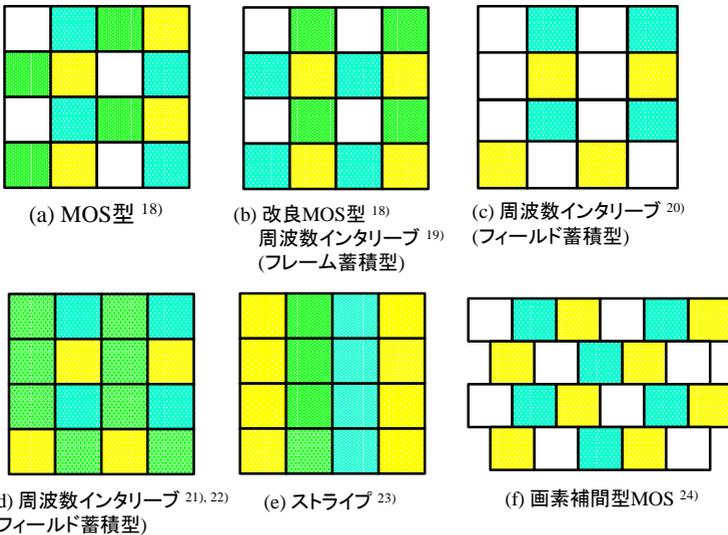


図 2・26 補色フィルタアレイ

図 2・26(a), (b)は 1981 年 4 月に初めて製品化された固体カメラに用いられた¹⁸⁾。また、図 (b)は第 1 行の信号と第 2 行の信号を加算すると B 信号が変調成分で、第 1 行の信号と第 2

行の信号を引き算すると R 信号が変調成分で得ることができる。すなわち、R 信号と B 信号は周波数インターリーブの関係にある¹⁹⁾。これはフレーム蓄積型であり、改良されてフィールド蓄積型にして製品化された^{21), 22)}。図(f)は画素補間型で第1行が $W \cdot Cy \cdot Ye$ の繰り返し、第2行も同じ繰り返しだが、W画素が第1行目の $Cy \cdot Ye$ の中間にくるように配列されている²⁴⁾。

2-2-2 3板式

図 2・27 に示すようなダイクロイックプリズムを撮像レンズのうしろに設けると、入射光が RGB の 3色に効率良く分割され、それぞれの結像位置に、イメージセンサを設けると RGB の 3色信号がそれぞれのイメージセンサから分離して得られる。

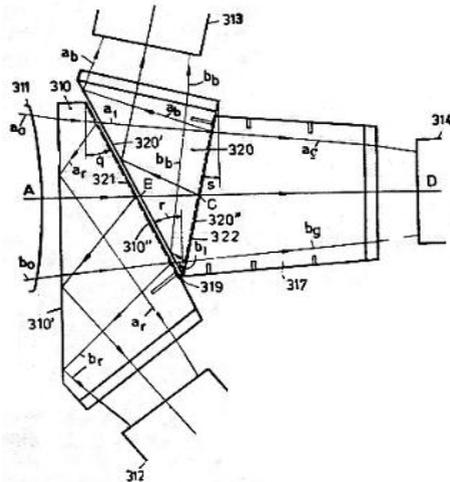


図 2・27 フィリップス社のダイクロイックプリズム²⁶⁾

このプリズムは三つのブロックからできていて、最初の接合部に形成された多層干渉膜で青光線が反射され、次の接合部に形成された多層干渉膜で赤光線が反射される。反射された光線はそれぞれ次のプリズム面で全反射され、それぞれのイメージセンサ上に青の光学像、赤の光学像となって結像される。透過光は緑になるからそのまま緑の光学像となってイメージセンサ上に結像される。

このダイクロイックプリズムは青、赤光線が全反射されるようにプリズムの角度が設定されていること、青、赤、緑の 3色光学像の光路長が等しいこと、青、赤の反射が 2回 (偶数) であることが特徴で、青、赤、緑の 3色光学像が同じ大きさで結像される。それぞれの結像位置にイメージセンサを精度良く固定することにより、コンパクトで色ずれのない 3板式カメラが安定に作れるようになった。

このダイクロイックプリズムはフィリップスで発明され²⁶⁾、全世界の放送用カメラに採用されてきた。また、3板式カメラを作る場合、このダイクロイックプリズムに優るものはない。

2-2-3 その他

イメージセンサの画素数が足りない場合に、輝度信号の主成分である G の画素を増やす目的で、イメージセンサを 4 個用いる 4 板式や 2 個用いる 2 板式が採用された。

4 板式では G の光学像を分割して二つに分けることにより、実質的に G 画像を 2 倍に増やし、解像度を向上する。デュアル G 方式ともいわれ、HDTV より解像度を高めた UDTV 用カメラに用いられる。

2 板式は G と RB または Y と RGB に分けて G または Y 画像の解像度を上げようとするものである。

しかし、これらは中間的な存在で、イメージセンサの画素数が増えてくると 3 板式が単板式に向かうことになる。

■参考文献

- 1) 竹村裕夫, “CCD・CMOS カメラ技術入門,” コロナ社, Apr. 2008.
- 2) B. E. Bayer, “Color Imaging Array,” U. S. Patent, 3,971,065, Jul. 20, 1976.
- 3) P. L. D. M. Lewis, and F. G. Kaspar, “Color Imaging System using a Single CCD Area Array,” IEEE Trans. Electron Devices, ED-25, 2, pp.102-106, Feb. 1978.
- 4) M. Onga, T. Nishimura, S. Komuro, Makoto Onga, Toshimichi Nishimura, Shigeo Komuro, Tetsuya Iizuka, Masaaki Tsuruta, Toshiharu Kondo, and Seisuke Yamanaka, “Signal Processing ICs Employed in a Single-chip CCD Color Camera,” IEEE Trans. Consumer Electronics, CE-30, 3, pp.374-380, Aug. 1984.
- 5) Behadir K. Gunturk, John Glotzbach, Yucel Altunbasak, Ronald W. Schafer, and Russel M. Mersereau, “Demosaicking; Color filter Array Interpolation,” IEEE Signal Processing Magazine, pp.44-54, Jan. 2005.
- 6) Tetsuya Kuno, Hiroaki Sugiura, and Narihiro Matoba, “New Interpolation Method using Discriminated Color Correlation for Digital Still Cameras,” IEEE Trans. CE, vol.45, no.1, pp.259-267, Feb. 1999.
- 7) 竹村裕夫, “Bayer 配列色フィルタの新しいデモザイキング方式,” 2010 映情学年次大会, 19-2.
- 8) 曾根賢郎, 石川清次, 橋本 進, 黒田隆男, 大久保祥雄, “フィールド蓄積モード CCD の単板カラー化方式,” テレビ誌, vol.37, no.10, pp.855-862, Oct. 1983.
- 9) 森村 淳, “改良形色差線順次単板カラー方式,” テレビ誌, vol.37, no.10, pp.847-854, Oct. 1983.
- 10) Hiroto Honda, Yoshinori Iida, Go Itoh, Yoshitaka Egawa, and Hiromichi Seki, “A Novel Bayer-like WRGB Color Filter Array for CMOS Image Sensors,” Proc. Of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE, vol.6492, pp.6492I J1-J10, 2007.
- 11) Eastman Kodak News Release, Jun. 14, 2007.
- 12) FOVEON 社 home page, <http://www.foveon.com/>
- 13) Paul M. Hubel, “Foveon Technology and Changing Landscape of Digital Cameras,” 13th IS & T Color Imaging Conference, pp.314-317, 2005.
- 14) 瀬尾北斗, 相原 聡, 難波正和, 渡部俊久, 大竹 浩, 久保田節, 江上典文, 平松孝浩, 松田時宜, 古田 守, 新田浩士, 平尾 孝, “有機光電膜と ZnOTFT 回路の積層構造を用いた有機撮像デバイスの原理実証実験,” 映情学誌, vol.64, no.3, pp.365-371, 2010.
- 15) 相原 聡, “有機光電膜のイメージセンサへの応用,” 映情学誌, vol.60, no.3, pp.291-294, 2006.
- 16) 井浜三樹男, 三ツ井哲朗, 野村公篤, 前原佳紀, 猪俣 浩, 後藤 崇, 竹内 豊, “画素サイズの微細化に適した新有機 CMOS イメージセンサ,” FUJIFILM RESEARCH & DEVELOPMENT, no.55, pp.14-17, 2010.
- 17) 竹村裕夫, “家庭用単管式カメラの開発,” 映情学誌, vol.60, no.6, pp.879-882, 2006.
- 18) 佐藤和弘, “固体カラーカメラ,” テレビ誌, vol.37, no.2, pp.104-111, 1983.
- 19) Yasuo Takemura and Kazushige Ooi, “New Frequency Interleaving CCD Color Television Camera,” IEEE Trans. Consumer Electronics, CE-28, 4, pp.618-624, Nov. 1982.
- 20) Yoshinori Takizawa, Hiroaki Kotaki, Kikuo Saito, Tadashi Sugiki, and Yasuo Takemura, “Field Integration Mode CCD Color Television Camera using a Frequency Interleaving Method,” IEEE Trans. Consumer

Electronics, CE-29, 3, pp.358-364, Aug. 1983.

- 21) 小滝弘昭, 瀧澤義順, 竹村裕夫, “CCD を用いたフィールド蓄積周波数インタリーブ撮像方式,” テレビ誌, vol.37, no.10, pp.833-839, 1983.
- 22) Yasuo Takemura, Kazushige Ooi, Masanobu Kimura, Kiyofumi Sanda, Akihiko Kubota, and Minami Amano, “New Field Integration Frequency Interleaving Color Television Pickup System for Single-Chip CCD Camera,” IEEE Trans. Electron Devices, ED-32, 8, pp.1402-1406, Aug. 1985.
- 23) 箕谷宣広, 土橋友次, 古沢俊洋, 富田義教, 佐久間誠一, 渡辺 透, 頼 泰樹, “クロスゲート構造 FTCCD 固体撮像素子および単板カラー化方式,” テレビ誌, vol.37, no.10, pp.769-775, 1983.
- 24) 増田美智雄, 野田 勝, 鮎沢 巖, “PAL 方式 MOS 形単板カラーカメラ,” テレビ誌, vol.37, no.10, pp.840-846, 1983.
- 25) Kenneth A. Parulski, “Color Filters and Processing Alternatives for One-Chip Cameras,” IEEE Trans. Electron Devices, ED-32, 8, pp.1381-1389, Aug. 1985.
- 26) ヘンドリーグ・デ・ラング, ジースベルタス・ブーフイス, “対物レンズ背後に配設した色分解プリズム系を具えるテレビジョン撮像装置,” 特公昭38-23724, 1963年11月7日, 1960年8月2日優先権主張(オランダ).

■8群-4編-2章

2-3 放送用カメラ (3板式)

(執筆者：島本 洋) [2011年1月 受領]

従来、放送用カメラでは感度、信号雑音比 (SN比)、ダイナミックレンジなど、高い基本性能が要求されていたが、近年では民生用カメラの性能も向上し、また放送番組内容によっては小型・軽量であることが撮像特性に優先される場合もあり、撮影の一部に民生用カメラを使用するなど、以前と比べて放送用カメラと民生用カメラの区別は少なくなっている。

一方、放送番組では、通常複数のカメラを用いることが多い。特にスタジオ収録などでは、複数のカメラによって様々なアングルで被写体を撮影し、スイッチャーにより映像を切り替えていく、マルチカメラ収録が行われる。その場合、複数のカメラ間の映像品質を同等に保つことが重要となる。つまり、カメラをスイッチングしても映像の違いが気にならない程度に調整できるよう、多くの調整項目や広い調整範囲が、放送用カメラには求められる。

このように、放送用カメラには、カメラ単体の性能の高さ、安定性、堅牢性、メンテナンスの容易さ、などに加え、豊富なカメラ調整機能も要求される。その他、放送用カメラはスタジオで用いられるものやロケーション撮影に用いられるものなど様々な用途があり、大きさや構成も使用形態によって変わる。

また、放送用カメラは、基本的には異なるメーカーの機器でも相互に接続できるよう、カメラヘッドとレンズ、カメラケーブルなどのインターフェースは、規格で定められている¹⁾。通常、光学サイズは2/3インチ光学系が用いられ、HDTV用の場合、カメラに使用される撮像素子は、有効面積が9.6mm×5.4mm、全画素数は220万画素(有効1920×1080)である。撮像素子には従来、高い性能が得られるFIT型CCDが用いられてきたが、近年では性能が向上したIT型CCDやCMOS撮像素子も用いられるようになってきた。

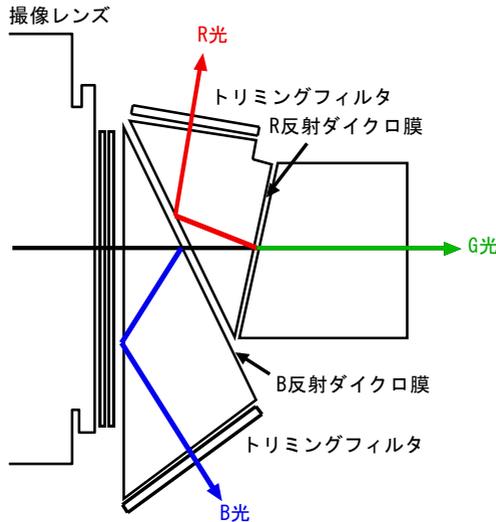


図 2・28 放送用カメラの色分解光学系

放送用カメラではカラー信号の高画質・高感度の要求性能を満たすため、3板撮像方式を用いている。これは、カラー信号を得るために、色分解光学系（光学プリズム）を用い、レンズ側から入射した光は RGB 三原色に分光され、プリズムの各色の出口には前述の撮像素子が貼付けられ、それぞれのカラー信号を撮像する仕組みとなっている。（図 2・28, 2-1-2 項, 2-8-2 項参照）

放送用カメラの代表的な性能を表 2・2 に示す。放送用カメラの性能（撮像特性）は、民生用カメラと表示の仕方が少し異なる。感度は、2000 ルクスの照明下で反射率 89.9% の標準白色を撮影したときのレンズ絞り値で示される。SN 比は、100% の信号出力に対して暗時撮影時のノイズレベルで示す。ダイナミックレンジは、100% の信号出力を得る入射光量に対してその何倍の光量まで映像が飽和せずに撮影可能かを示す。例えば 600 % であれば、6 倍の入射光量まで飽和せずに撮影可能であることを示す。解像度特性は、800 TV 本におけるアパーチャーレスポンス（白黒の矩形波形の解像度チャートを撮影したときの相対信号強度）で示される。限界解像度は、垂直解像度はほぼ走査線数で定まるため、水平方向について、レスポンス検知可能な解像度を TV 本に換算して示す。

表 2・2 放送用カメラの代表的な仕様と性能

撮像素子の種類	FIT 型 CCD, IT 型 CCD, CMOS
光学サイズ	2/3 インチ
有効受光面積	9.6 mm × 5.4 mm
有効画素数	1920 × 1080
画素サイズ	5 μm × 5 μm
感度	F8~F11@2000 lux
信号雑音比 (SN 比)	54~60 dB
ダイナミックレンジ	600 %
走査方式	毎秒 60 フィールド、インタレース走査
解像度特性	800 TV 本にて 45 % 以上
限界解像度	1000 TV 本

2-3-1 スタジオ用カメラ

標準形カメラ、または標準カメラとも呼ばれ、放送用カメラの中でも最も高画質のカメラに位置づけられている。主な特徴としては、カメラと CCU (Camera Control Unit : カメラ調整回路) が分離されており、カメラ映像調整機能はその CCU で行うため、様々な映像調整を行うことが可能である。また、マルチカメラ運用を可能とする機能として、カメラ選択を示すタリー表示機能、スタジオ副調整室と音声通信を行うためのインカム通信、撮影者が放送映像やスイッチャー選択映像を確認するための送り返し映像（リターン映像）などの機能も有しており、システムカメラとしても高い機能を有している。

スタジオ用カメラは通常、スタジオフロアを自在に移動可能なペダスタルまたは三脚とともに設置され、ズームレンズ（場合によってはズーム比の高い箱形レンズ）、レンズのリモートコントロール装置、7~9 インチサイズの大型ビューファインダなどが装備される。カメラヘッドと CCU 間を結ぶケーブルには、BTA S-1005 などの規格で定められた小型コネクタを

備えた標準ケーブルが用いられ、撮影映像の送信とリターン映像の受信のための2本の光ファイバーケーブルと電源線及び制御線が1本にまとめられている。スタジオの副調整室にはカメラのリモートオペレーションパネルが設置され、スタジオ内のカメラを一元的に調整する(図2・29)。

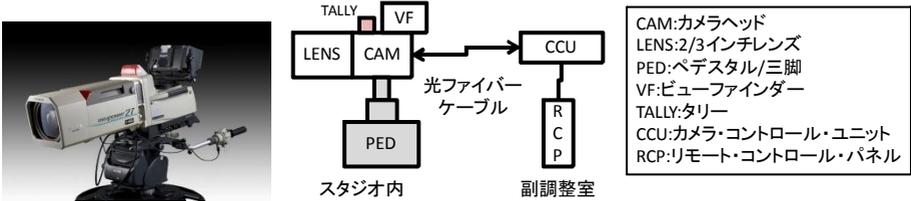


図2・29 スタジオ用カメラ例とシステム図

2-3-2 ENG 用カメラ

ENGとはElectric News Gatheringの略で、本来の意味は従来フィルムで行われていた取材システムが電子化(VTR化)されたことを指す。現在では、主にENG用カメラとはニュース取材に用いられるVTR一体型カメラを意味する。また、ニュース以外の番組制作にも用いるため、EFP(Electric Field Production)カメラやVロケカメラ、ハンディカメラとも呼ばれる。映像の撮影・記録に必要な回路やVTR、バッテリーなどをカメラヘッドに内蔵しており、レンズも小型化された筒型(ENG)レンズを使用する。ビューファインダは小型の接眼型を用い、撮影者が肩に担げるようにコンパクトな構成となっており、報道取材や局外での撮影に多用されている(図2・30)。

記録媒体は、これまでVTRテープがほとんどであったが、近年ではフラッシュメモリや光ディスクを記録媒体としたテーブルスカメラも用いられるようになってきた。



図2・30 ENG用カメラの例

2-3-3 特殊カメラ

放送用カメラには、これまで述べたような一般的なものだけではなく、番組目的によっては特殊な機能を備えたカメラも用いられる。

(1) 超高感度カメラ

事件や事故、また自然番組や科学番組などにおいて、通常のカメラ感度をはるかに超えた

超高感度カメラは大きな威力を発揮する。放送に用いられている高感度カメラには主に、蓄積型高感度 CCD カメラ、EM (Electron Multiplying) CCD カメラ、I.I. (Image Intensifier) カメラ、HARP (High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) カメラなどがある。

蓄積型 CCD カメラは、撮影のフレーム周波数を遅くして蓄積時間を長くする(フレーム蓄積モード)ことによって、信号雑音比(SN比)の良い高感度映像を取得するものである。通常、カメラで暗いところを撮影すると、アンプゲインを上げるため信号と雑音が同時に増幅され、ザラザラとした映像となってしまう。一方、蓄積時間を伸ばすと、信号量は比例して増える。その際、CCDに含まれる暗電流によるショット雑音も増えるが、その増え方は蓄積時間の平方根に比例してするため、全体として高感度化が図れる。ただし、蓄積型 CCD カメラではフレーム周波数が遅くなるので、コマ落ちしたような映像となる。

EMCCD は、Electron Multiplying CCD の略で、CCD の読み出し部に電子増倍の機能が付加された CCD であり、2001 年に J. Hynecek によって発表された Impactron (IMPACTRON CCD はテキサス・インスツルメンツ社の商標) がその原理となっている²⁾。図 2・31 に構造図を示す。CCD の水平転送部の最終部分に、電子増倍転送部(電子増倍レジスタ)が設けられており、電子を転送するための電極に通常よりも高い電圧を印加する。この高電圧によって電子が加速され、もう一個の電子-正孔対が発生する。これをインパクトイオン化効果という。その発生確率は1段当たり1~2%程度であるが、転送段数を多くすることによって、数百倍~2000 倍もの増倍率を得ることができる。増倍率は転送部の電圧で可変でき、1倍にも設定可能である。またこの増倍率は、冷却温度が低くなるほど高くなる。したがって、CCD 自体の低雑音化と電子増倍率の安定のためにも、冷却温度が安定していることが望ましい。

最近、HDTV 用カメラが開発され、今後自然番組の夜間撮影や科学番組などで活躍が期待される。

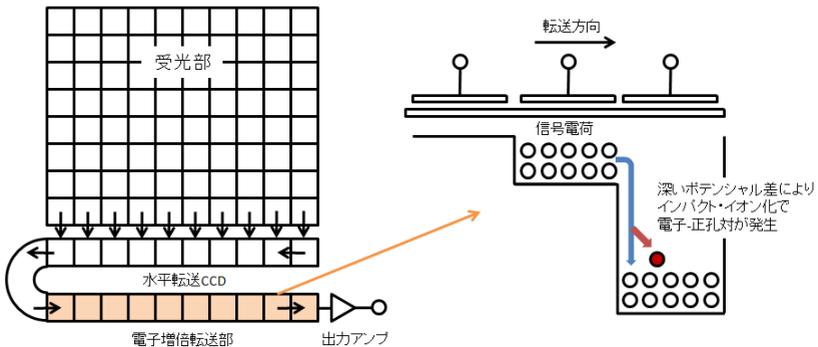


図 2・31 EM-CCD の仕組み

I.I.カメラは、電子増倍管と CCD を組み合わせたカメラである。電子増倍管の構造は、光を電子に変換する光電面、電子を増倍するマイクロチャンネルプレート(MCP)、電子を光に変換する蛍光面より構成されている(図 2・32)。MCP では電子は約 1 万倍に増倍される。光電面に GaAs や GaAsP のような半導体結晶を用いることにより、可視光領域や IR 領域で更に効果的に高感度化が可能となった³⁾。

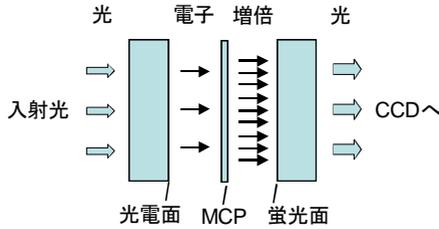


図 2・32 I.1.電子増倍管の仕組み

HARP カメラは、光電変換した電荷を光導電膜内で増倍する HARP 膜を形成した撮像管を用いたカメラである。HARP 膜に光が入ると、光が電荷に変換されて、その電荷が膜の中であたかもなだれ (Avalanche) のように増えていく現象が起こる。これによって、わずかな光でも大きな電流に転換されるので、光を高感度で捉えることができる (1-6 節参照)。

(2) 高速度カメラ

通常のビデオレート (1 秒間に 60 フィールド) を超える速度で撮影するカメラのことで、放送に用いられる主な高速度カメラとしては、毎秒 180 フィールドの CCD カメラ、毎秒 300 フレームの CMOS カメラ⁴⁾、毎秒 100 万フレームの CCD カメラなどがある⁵⁾。また放送用途以外では、工業計測用として爆発現象などの解析に用いる超高速のものや、デジタルカメラに内蔵された民生用カメラもある。

毎秒 180 フィールドの CCD カメラは、画素数 220 万画素、素子サイズ 2/3 インチ、3 板式で構成されているため、従来の放送用レンズが使用できる。また、毎秒 180 フィールドを連続で撮影可能で、通常のハイビジョン撮影にも用いることが可能なため、各種スポーツ中継番組に多用されている。

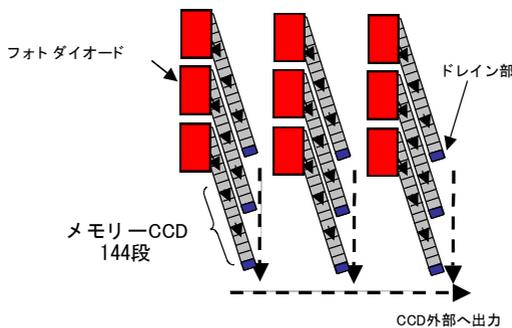


図 2・33 IS-CCD の仕組み

毎秒 300 フレームの CMOS カメラは、高速駆動可能な 400 万画素 CMOS 撮像素子から HDTV の画素数を部分読み出し、カメラ筐体に内蔵されたメモリレコーダに一旦収録したのち、スローモーション映像としてカメラから再生する。一般に、CMOS 撮像素子は CCD に

比べて高速駆動しやすく、近年では、毎秒 2000 フレーム程度的高速カメラも発売されている。

毎秒 100 万フレームの CCD カメラは、特殊な構造の超高速 CCD (In-Situ Charge Coupled Device : IS-CCD) を用いている。この CCD は、**図 2・33** に示すように、画素ごとに電荷転送路を利用したシーケンシャルメモリを備えている。すべての画素で生成された電荷を同時に隣接するメモリに転送し記録するため、電荷転送の時間を短くでき、超高速撮影が可能となっている。一方、撮影画像を CCD 内部に記録するため、画素数は 30 万画素、高速撮影できるフレーム数は 144 フレーム程度となっている。

(3) ロボットカメラ

ロボットカメラの定義は明確ではないが、放送用カメラでは、屋外や高所、遠方での無人撮影など、いわゆるリモートコントロール可能なカメラをロボットカメラと呼ぶことが多い。一方、近年では、高速な雲台や高精度なセンサを用い、パン、チルト、ズーム、フォーカス、移動などのすべての動きを高精度に制御するロボットカメラが可能となってきた。このようなロボットカメラは、人間と近い動きが可能だけでなく、例えば何回も同じシーンの撮影を繰り返した場合でも、まったく同じカメラワークを再現できる利点がある。特に、CG との合成などには頻繁に用いられる。また、ロボットカメラにプロの撮影者のカメラ操作を模した追尾撮影アルゴリズムを導入し、カメラ側に撮影テクニックをもたせるような、「知的ロボットカメラ」の開発も進められている⁹⁾ (**図 2・34**)。



図 2・34 スタジオ内の移動ロボットカメラの例

(4) その他 (超望遠、衛星搭載、デジタルシネマ・大判撮像素子カメラ)

(a) 超望遠カメラ

現在、放送用ズームレンズとしては、望遠端 930 mm (エクステンダと呼ばれる、内蔵の拡大レンズを使用時は更に 2 倍) が最大である。これは、35 mm フィルム換算でおおよそ 3700 mm に相当する。それ以上の超望遠カメラとしては、天体望遠鏡と組み合わせたものがあり、低軌道衛星自動追尾ハイビジョン撮影システムを用いて、宇宙ステーション補給機 (HTV) や

国際宇宙ステーション (ISS) の地上からの撮影が行われた⁷⁾。

(b) 衛星搭載カメラ

2007年、ハイビジョンカメラシステムが月周回衛星かぐや (SELENE) に搭載され、美しい月面映像や、月の地平線から上る地球の出の動画撮影など、数多くの印象的な美しい映像、また科学的にも貴重な映像を撮影した⁸⁾。このカメラは通常の放送用ハイビジョン機材を改修し開発されたものであり、宇宙用機材として機能し、更に衛星寿命の最後まで稼働するなど、放送用カメラ機材の性能の高さを示した例でもある。カメラの試験には、真空試験、放射線 (ガンマ線、粒子線)、振動 (16 G を 80 秒間)、衝撃 (1000 G)、熱真空 (-30 ~ +60 °C) など、厳しい試験が行われた。レンズは広角用に 10 mm と望遠用に 35 mm の固定焦点距離レンズが搭載され、2 台のカメラで撮影した (図 2・35)。映像は HDCAM 圧縮され 1 GB の EEPROM メモリに一旦記録され、7.6 Mbps の通信回線で地球へパケット送信された。

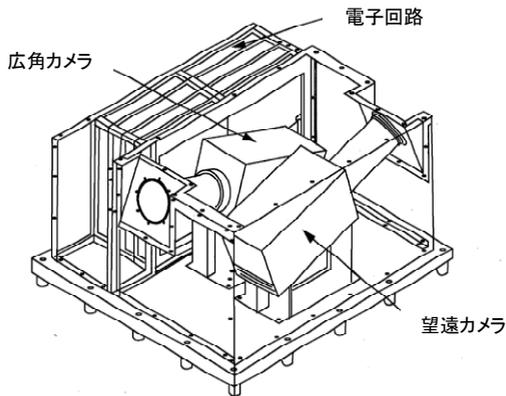


図 2・35 月周回衛星「かぐや」搭載ハイビジョンカメラ

(c) デジタルシネマカメラ・大判撮像素子カメラ

従来、映画の撮影・上映はフィルムで行われていたが、これをビデオ信号で行う、いわゆるデジタルシネマが増えてきた。そのカメラには、放送用と同じく 2/3 インチ撮像素子の HD カメラをベースにしたものや、35 mm 映画フィルムサイズの大判撮像素子を用いたものがある。映画フィルムとは撮像特性が若干異なるが、その雰囲気表現のために、フレーム周波数は 24 や 30 コマ/秒の順次走査 (プログレッシブ、24 p・30 p) と、フィルム特性のガンマカーブ (シネガンマ) が用いられる。これらのフレーム周波数は HDTV の放送規格⁹⁾にも採用され、ドラマ番組などの撮影にも用いられる。

更に大判撮像素子では意図的に浅い被写界深度を得ることができるため、高画質レンズと合わせてボケ味のある映像が撮影可能である。1.25 インチやスーパー35 mm サイズの撮像素子と映画用 PL マウントレンズを用いた、高画質単板ハイビジョンカメラ¹⁰⁾やデジタルシネマカメラ¹¹⁾が開発されている。また、デジタル一眼レフカメラの動画撮影機能を利用した高画質な映像も、映画やドラマ番組で使われ始めている。

■参考文献

- 1) BTA S-1005B, “高精細度テレビジョン方式スタジオ機器の相互接続.”
- 2) Jaroslav Hyneczek, “Impactron - A New Solid State Image Intensifier,” IEEE Trans. Electron Devices, vol.48, no.10, 2001.
- 3) 三橋政次, 宮崎正之, 山崎順一, 水野 到, 渭原常夫, 吉川和雄, 斉田有宏, 蛭間位吉, 鈴木拓弥, “ノイズ軽減機能内蔵 IR 対応 HDTV 超高感度ハンディカメラ,” 映情学誌, vol.60, no.3, pp.378-383, 2006.
- 4) 小笠原俊英, 山内正仁, 戸村義男, 山崎順一, 後藤正勝, 橋本洋二, 長 秀雄, 高地栄一, 金山茂弘, “每秒 300 フレーム順次走査 HDTV 高速度カメラ,” 映情学誌, vol.60, no.3, pp.358-365, 2006.
- 5) T. G. Etoh, “A CCD Image Sensor of 1Mframes/s for continuous Image Capturing of 103 Frames,” Proceedings 2002 IEEE International Solid State Circuits Conference, pp.46-47, 2002.
- 6) 津田貴生, 武藤一利, 柳澤 斉, 奥田 誠, 井上誠喜, “スタジオ番組用移動ロボットカメラの開発,” 映情学誌, vol.62, no.1, pp.84-91, 2008.
- 7) 都築俊満, “低軌道衛星撮影システムによる宇宙ステーション補給機 (HTV) のハイビジョン撮影,” 放送技術, 63 (2), pp.134-139, 兼六館出版, Feb. 2010.
- 8) Junichi Yamazaki, Seiji Mitsuhashi, Masahito Yamauchi, Junichi Tachino, Rie Honda, Motomaro Shirao, Kazuo Tanimoto, Hiroyuki Tanaka, Nobuaki Harajima, and Asako Omori, et al., “High-Definition Television System Onboard Lunar Explorer Kaguya (SELENE) and Imaging of the Moon and the Earth,” SPACE SCIENCE REVIEWS, vol.154, no.1-4, pp.21-56, 2010.
- 9) ITU-R Rec. BT.709-5, “Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange,” and SMPTE standard for Television 274M, “1920 x 1080 Scanning and Analog and Parallel Digital Interfaces for Multiple Picture Rates.”
- 10) 島本 洋, 大和谷豪, 伊藤泰宏, “890 万画素放送用単板 HV カメラを用いたドラマ番組撮影実験,” 映情学大会, 2-1, 2010.
- 11) <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201011/10-152/>