テレビにおける色再現(1)

撮像系の色設計

正会員 藤田 欣裕[†], 正会員 中野 豊之^{†*}

1. ま え が き

カラーテレビシステムは大きく分けると入力、伝送、出力の3つの部分から成り立っている。前回の講座ではその中の伝送系における色の理論、実際のテレビ方式の規格などが解説された。今回は入力系(カメラ)にかかわる色の問題とスタジオ照明について触れる。

テレビカメラといえば、テレビが誕生したころは放送局の一部専門家のものであったが、現在では家庭用のビデオカメラが普及し、多くの人が取り扱うようになってきている。また、専門用語であったホワイトバランスという言葉もすでに一般的に知られた用語となっている。当然、ビデオカメラの色の問題についても関心が高く、色設計の悪いカメラの売れ行きは芳ばしくないといわれる。本講では、ビデオカメラの色設計について、まずカメラの色再現に影響を及ぼす要因について解説し、さらに具体的な放送用カメラにおける測色計算を基礎とした色再現の検討例について紹介する。

ビデオカメラの色再現は測色学的にベストなもの、と好まれる色再現とは実際には異なる場合もあり、理論通りには行かない部分もある。しかし測色学的に基本からはずれたカメラは良い色再現性を持たないことは事実である。今回は測色学の基礎の部分については、前回までの講座を参照することとし、具体的な事例を取り上げ解説する。

2. カラーテレビ系と撮像系

カラーテレビ系における色が再現されるシステムを模式的に図1に示す。出力側に三原色を発光させる機構があり、入力を持つ役割すなわち撮像特性は、被写体のもつ色と出力のモニタ上での色をできるだけ合わせることである。このことは、測色学的に言えば、被写体要素の画面上での色刺激を(F)とすれば、受像側の三原色の単位量が(R), (G), (B)であればモニタ上でのベストな色再現は

$(F) = R_i(R) + G_i(G) + B_i(B)$ で等色できる R_i , G_i , B_i を得ることで、実際の被写体要素の色に等しくなるように、カメラの出力がこの特性になればよい。

被写体の分光反射率を $\rho(\lambda)$ 、照明光源の分光組成を $P(\lambda)$ とすれば

$$R_i = c \int P(\lambda) \rho(\lambda) r d\lambda$$

$$G_i = c \int P(\lambda) \rho(\lambda) g d\lambda$$

$$B_i = c \int P(\lambda) \rho(\lambda) b d\lambda$$

を満たせばよい。ただし r , g , b はこの表色系に対する三刺激値で、 c は比例定数である。 R_i , G_i , B_i はカメラの出力であるから、忠実な色再現を行うにはカメラの分光感度を受像三原色のスペクトル三刺激値に合わせればよいことがわかる。前回の講座にも示されているように、NTSC方式の受像側の三原色の色度点や基準となる光源被写体の光源は規格により決められており、それらの値を代入すればNTSC方式のカメラの理想的な分光特性が求められる(図2)。

この三原色を元にして得られる曲線は、あるスペクトル色を再現するに必要な受像管のR, G, B蛍光体の輝度を示しており、受像度の特性を直線とすれば(実際には直線ではないのでガンマ補正が必要となるが)、そのまま必要な受像管の入力信号を示している。

[†] NHK 放送技術研究所

^{†*} NHK 技術局

"Fundamentals and Applications of Color Image Processing Technology: (7) Color Reproducibility in Television Cameras" by Yoshihiro Fujita (NHK Science & Technical Research Laboratories, Tokyo) and Toyoyuki Nakano (Engineering Administration Department, NHK, Tokyo)

図 1 カラーテレビシステム模式図

図 2 NTSC 理想撮像特性

図 3 ズームレンズの分光透過特性例

通常の被写体の色は単一スペクトルではなく、その集合であるから、図2の特性は、必要なカメラの出力レベルを示していることになる。必要なカラーカメラの各チャンネルの出力レベルは、各スペクトルに対する出力レベルの積分値となる。

3. カメラの色再現を決める要因

図1に示すように、カメラの色再現を決める要因は、照明光源、レンズ、色分解プリズム、撮像素子の分光特性があげられる。

3.1 レンズ特性

ズームレンズの分光透過特性の例を図3に示す。ズームレンズは構成枚数が多く、光学ガラスによって短波長の光が吸収されるので青の透過率が悪い。エクステンダ付きや高倍率のような構成の複雑なレンズほど影響が大きく、青の出力が下がる。

3.2 プリズム特性

3色分解光学系はプリズム面に蒸着された多層干渉膜により行われ、図4に示すように、それぞれBおよびR反射のダイクロイック多層膜が蒸着されている。

図 4 色分解プリズム系

る。これで3つの色信号に分解されるが、このままではそれぞれの色特性として満足できる形状のカーブは得られないので、トリミングフィルタや赤外カットの

図 5 プリズム分光透過特性の例

図 6 CCD カメラ総合分光特性

図 7 撮像素子の分光感度特性例

追加を必要とする。CCD カメラ用プリズムの例を図 5 に示す。

総合的な分光特性を理想特性すなわち図 2 に近づけるためには、分光特性が自由に変わることが望ましい。そこで、このプリズムで理想特性にできるだけ近づくように分光特性を設計する。しかし、大幅にその特性を理想撮像特性に合わせるために変えることは現状、必ずしも良い選択とはいえない。カメラにおいては感度も性能の重要なパラメータであり、色再現を多少犠牲にしても、感度が優先される場合が多い。この点については本講の意図とは異なる部分であるが、撮像系の色設計を考える場合には重要な要素である。例えば、CCD カメラの総合分光特性(図 6)では、青チャンネルの分光感度特性が理想撮像特性に比べてグリーン方向へずれている。これは CCD が短波長側の感度が不足しているためで、短波長側を持ち上げるとその分 SN 比が劣化するからである。

3.3 撮像素子特性

サチコン管および CCD の分光感度特性を図 7 に示す。CCD とは異なり、サチコン管は、波長による感度の偏りが大きいため赤用の管が用意され使用される。また CCD では分光感度特性が近赤外領域にも達するため、赤外カットフィルタが必要となる。撮像素子により分光感度の形と同時に新たな要因が加わることも見逃せない。赤外フィルタは容易に変更しやすい位置にあるため、実際に CCD カメラでは赤側の色再現性をこのフィルタで微調整することが多い。

3.4 リニアマトリックス

カメラの出力を理想撮像特性に合わせるため電子的なマトリックス回路が使用される。すなわち 3×3 の RGB 三原色の 1 次変換マトリックスにより、色再現特性を微調整することが可能である。この変換はリニアな領域で行う必要があり、ガンマ補正前に行う。カメラの色設計においては重要な部分で、細かな色再現検討に必要とされる。

このマトリックスの決定方法として、

- (1) 理想撮像特性との差を色度計算し、最小 2 乗法により求める¹⁾。
- (2) ある色領域の改善が可能な係数を求める。例えば記憶色と関連の強い、肌色、緑の葉の色、青空の色などいくつかの色を選定し、(1)の方法により求める。
- (3) 熟練したオペレータが、受像管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ックス係数を求める。

など、さまざまな方法がある。

しかし、実際にはリニアマトリックスの効果は顕著でなく、前述のようにカメラの他の仕様を優先させる場合も多い。

4. 色再現性評価のための測色計算

色再現の基礎検討には、特定の色紙を用いた測色計算が多く用いられる。できるだけ色度座標空間に均等に分布するように複数の色紙を選択する。あらかじめ測定した色紙の分光反射特性をもとにカメラの色再現座標を算出する。この時、前述の NTSC の理想撮像特性を同時に計算し、再現誤差を検討する²⁾。

赤外カットフィルタを含めたレンズの分光特性を $L(\lambda)$ 、プリズムの分光特性を $P_r(\lambda)$ 、 $P_g(\lambda)$ 、 $P_b(\lambda)$ 、撮像素子の分光感度を $S_r(\lambda)$ 、 $S_g(\lambda)$ 、 $S_b(\lambda)$ とする。

ランプの光源の分光特性を $A(\lambda)$ 、被写体の分光反射率を $R(\lambda)$ とした時、撮像素子の出力は

$$R = \int L(\lambda) P_r(\lambda) S_r(\lambda) A(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$G = \int L(\lambda) P_g(\lambda) S_g(\lambda) A(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$B = \int L(\lambda) P_b(\lambda) S_b(\lambda) A(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

で与えられる。

積分の結果の R, G, B 出力は基準の白色において 1:1:1 となるようにし、CIE の XYZ 座標, xy 座標, uv 座標を順次計算により求める。これらの座標, および変換方法については、前回までの講座を参照していただきたい。計算結果の評価方法は現在までに種々の方法が提案されているが、なかでも CIE が採用している ULCS (Uniform Lightness and Chromaticness Scale) LUV 座標で評価する場合が多い。

この座標系では距離が色再現誤差を表すため、評価が行いやすい。

また色再現誤差を測色計算から求める場合、重要な点は評価する対象の色である。

5. 撮像方式と色設計

カメラの R, G, B の色チャンネルの各出力レベルは色分解方式により、その色再現要因が異なる。図 1 は模式的な例として各色チャンネルに各々 1 つ、合計 3 つの撮像素子を有する方式であるが、撮像系ではこのほか、撮像素子が 1 つの場合から、複数(実際の例としては 4 つ)まで考えられる。その方式によって色再現の要因が異なる。

5.1 3板(管)方式カメラ

放送用のカメラとしてポピュラーなこの方式は、最良の色再現性を有するカメラである。

放送用カメラでは色再現性の要求が厳しい。とくに多くのカメラを用いて番組制作を行うため、カメラ間

図 8 カメラによる色再現比較

で同様な色再現性が必要で、特性を得るための管理が重要である。理想撮像特性に近づけることがひとつの目標であるが、同時にカメラの撮像素子が変わったことや、あるいは照明条件により、極端に色再現性が変わらないような考慮が必要である。

そのひとつの例として、放送用カラーカメラの撮像素子は、プランビコン、サチコンなどの撮像管から CCD へと変遷し、特にカメラが変わる過渡期には、その色再現の問題が表面化しやすい³⁾。各カメラの色再現例を図 8 に示す。CCD カメラは比較的赤側の色再現性に優れている。

5.2 単板方式カメラ

1 個の固体撮像デバイスから三原色信号を得る方式で、2 次元に配列された画素おのおのに色フィルタを重ね合わせ、色情報を輝度情報に多重した形で取り出す。効率良く色分離を行い、高解像度の輝度信号を得るため、いわゆるミックスドハイ方式がとられている。さまざまな信号処理方式があり、文献 4)などを参考とされたい。輝度信号の低域成分は色再現に影響するので、所定の RGB 原色成分より形成し、高域成分は解像度に影響を与えるので、色信号形成比は無視して帯域を延ばしている。単板方式の色設計で重要なことは、色フィルタの特性ならびに色分離方法である。色フィルタについては、CCD の表面にのせるため製造上の制約から、フィルタ特性のばらつきなどの問題を生じる。

単板方式の R, G, B 原色フィルタは光の利用率が約 1/3 と悪く、光の利用率の良い補色フィルタが用いられることも多い(図 9, 図 10)。しかし図に示すように、フィルタの特性が R, B チャンネル間で混合する部分が生じ、色再現性は 3 板方式と比べると悪くなる(図 11)。

図9 原色フィルタの分光透過特性

図10 補色フィルタの分光透過特性例

図11 補色フィルタ方式単板カメラによる色再現例

6. スタジオ照明

近年のテレビカメラの感度の向上や CCD の開発等、安定性の向上によって、テレビ照明はかつてテレビの創世期にあったような、照度を得ることに多くの力をついやす作業から次第に解放され、光の演出に関わる作業に集中することができるようになってきた。光の演出は、被写体に当てる光の方向や陰影のつけ方等、ライトセッティングによるものと、被写体の色をどれだけ忠実に再現できるかといった、光源の選択に関わる問題があるが、ここでは色再現に関わる問題について述べることにする。

さて、色再現の流れの中で照明の果たす役割は、被写体の持つ色が正確に人間の目に認識されるようにすることであるが、テレビ照明の場合は、被写体の色がテレビカメラや受像機など、テレビのシステムを経て人の目に認知されることになるため、それらのシステムの特性によっては色再現が大きく影響を受けることを認識しておく必要がある。

一般にテレビスタジオの照明に使われている光源は、白熱電球であるハロゲンランプがほとんどであるが、テレビ照明にこうした光源が使われるのは、物体の見え方を決定する光源の性質である演色性が高いことによるものである。演色性は、資料となる光源の色温度に近い基準光源による色の見え方と資料光源による色の見え方を比較し、両者の色ずれの程度を定量的に表したものであり、CIE や JIS でその定量化の方法が制定されている。

白熱電球はフィラメントをあたためて熱放射を得ている光源であるが、この種の光源の演色性は極めて良い。これは光源の波長成分を表す分光分布が、可視光域内にまんべんなくならかに分布している特性によるものである。

最近では白熱電球以外にも蛍光灯やメタルハライドランプ、キセノンランプといった種類の光源で、白熱電球には及ばないものの、演色性の比較的良好い光源が開発され、テレビの照明にも使われている。

分光特性の異なるメタルハライドランプを例に、演色性の違いをみると図12のようになる。

演色性の良い光源を使った場合には、光源の色温度に合わせてカメラのホワイトバランスを調整することで、色再現は忠実なものとして行うことができる。

しかし、演色性の良くない光源を用いた場合には、テレビカメラが RGB のマスキングによる補正しか行っていないために、分光スペクトルの突出や欠落に対応する補正ができず、破綻をきたした結果、色再現

メタルハライドランプの色温度と平均演色評価数

	色 温 度 (K)	平均演色評価数 (R_a)
Na-Tl-In 系	4200~5500	65~70
Sc-Na 系	3800~4200	65~70
Dy-Tl 系	4300~6000	90
Sn 系	5000	92

図 12 メタルハライドランプの特性

が一樣でなくなってしまう。また、演色性の良い光源を使った場合でも、色温度の異なる光源を同一被写体に用いた場合、カメラのホワイトバランスに合わない光源によって被写体の色再現の不一致が発生し、時として演出意図を大きく崩してしまうライティングとなることがある。

このように、テレビ照明においては肉眼で被写体を見る時と異なり、記憶色による補正がテレビシステムの介在によっていったん断ち切られることになるため、演色性に関わる光源の選択や、ホワイトバランスに関わる色温度の違う光源の扱いについては、特段の注意を払う必要がある。

7. む す び

撮像系の色再現性に影響を与える要因、ならびに色紙を用いた色計算法、また演出性に関わる照明の問題

について触れた。現状、テレビ系の色再現は実際の被写体の色とのずれを生じている。これは、受像機の明るさの制約から三原色点を理想点とすることができないことや、カメラにおいては青感度の制約から理想特性とはずれるなどの理由からで、理想系からのずれは他の特性とのトレードオフとなっている。またサチコンカメラと CCD カメラの色再現のように、赤系の特性が微妙に合わない例もある。これらの色再現性の違いは放送用カメラとして、現状は大きな問題となっていない。

しかし今後、マルチメディアの発展するなか、他のフィルム画像やスキャナから取り込んだ画像と共存することも多くなり、微妙な色再現も大きな課題となると考えられる。

またテレビはハイビジョン時代を迎え、さらなる照明光源や撮像素子の改良とともに、被写体の色に忠実

な色再現性をもつ撮像装置の重要性が増加する予想される。

【参 考 文 献】

- 1) 守田, 佐藤: “カラーカメラの撮像特性と色度ひずみ”, テレビ誌, 23, 1, pp. 44-50 (1969)
- 2) 斉藤利也: “カラーカメラの色再現”, テレビ誌, 23, 1 (1969)
- 3) 加納, 川崎, 宮川, 牛山: “プランビコンカラーカメラの色再現の向上”, テレビ学会方式回路研究会 (1972)
- 4) 竹村: CCD カメラ技術, ラジオ技術社

ふじ た よしひろ
藤田 欣裕 昭和 51 年, 東京大学工学部電気工学科卒業。同年, NHK に入局。大阪放送局を経て, 56 年より, 同放送技術研究所に勤務し, 現在に至る。固体撮像素子の評価, 固体カメラの研究に従事, 正会員。

なか の とよゆき
中野 豊之 昭和 50 年, 千葉工業大学工学部電子工学科卒業。同年, NHK に入局。大阪放送局, 制作技術局を経て, 61 年より, 技術局に勤務し, 現在に至る。番組制作設備などの開発に従事, 正会員。

テレビジョン学会教科書シリーズ⑧

信号処理工学 —信号・システムの理論と処理技術—

今井 聖 著

画像, 通信, 情報工学の基礎を取り扱う「テレビジョン学会教科書シリーズ」の第 8 弾として, デジタル信号処理工学の解説書がコロナ社から発行された。

本書は, 今井先生の受け持たれている大学院の授業科目「デジタル信号処理」の講義ノートの基礎部分を抜粋して一部追加した内容とのことであり, 特別の予備知識なしに気軽に読むことができる。デジタル信号処理の基礎が大変明解に解説されており, デジタル信号処理入門の教科書として好適である。

内容は, 全 11 章から構成されており, 第 1 章の信号処理の概要説明に続き, 第 2 章と第 3 章ではアナログ(連続時間)信号の表現方法としてフーリエ級数, 直交級数, 解析方法としてフーリエ変換などが説明されている。これに続き, 第 4 章, 第 5 章では, デジタル信号の数学的表現として z 変換, デジタルシステムの解析方法として離散時間システムのインパルス応答, 伝達関数などが解説されている。第 5 章までは信号処理の最も基礎的な部分である。さらに, 第 6 章ではアナログ信号の標準化とデジタル信号の再標準化の方法につい

て, 第 7 章では離散フーリエ変換とその高速演算法について, 第 8 章ではデジタルフィルタの回路構成と設計方法, 第 9 章では不規則信号の解析方法について説明されている。

また, 第 10 章では信号処理の具体例としての音声信号処理について, 第 11 章では画像などの 2 次元信号処理について説明されている。信号処理の基礎技術の解説書とはいえ, 第 10 章では, 音声合成, 音声認識などの具体的な応用例も述べられており, 大変参考になる。第 11 章では 2 次元信号処理の基礎から, その応用例としての画像圧縮, 画像復元, 画像強調などについても触れられている。

なお, 教科書という性格柄, 各章の最後には演習問題が設定されているが, 大変詳しくかつわかりやすいその回答例が添付されている。これは, デジタル信号処理を学ぶ読者にとって大変有益であり, 本書の特徴の一つと言える。

繰り返しになるが, 本書はデジタル信号処理の基礎が大変明解にかつ易しく解説されており, 肩を張ることなく気軽に読むことができる。この点が本書の大きなセールスポイントと言えよう。筆者も, 画像のデジタル信号処理, 画像圧縮の研究開発に携わっており, 本書を大変興味深く拝読させて頂いたが, デジタル信号の復習としても大いに役立った。入門者のみならず多くの方々に読まれることを期待したい。

紹介 如澤裕尚 (NTT)

コロナ社刊 (1993 年 5 月 20 日発行), A 5 判, 214 頁
定価 2,678 円 (本体 2,600 円)