

カラー画像の計測と表示における理論的制約条件

Theoretical Conditions For Measurement and Generation of Colored Images

富永 昌治

Shoji Tominaga

(大阪電気通信大学)

(Osaka Electro-Communication Univ.)

ABSTRACT

This paper describes theoretical conditions for measuring colored images and generating the original colors exactly. An extended imaging system with more than three image sensors is analyzed. Necessary conditions are determined for designing sensors which satisfy the color matching property of human color vision. The analysis is developed on a vector space approach by Horn. The basic condition shows that the spectral sensitivity curves of the human visual system must be described as linear transforms of the spectral response curves of the sensors. The results are applied to a drum scanner system. Finally a color generation problem is discussed.

1. はじめに

最近Horn¹⁾はカラー画像を計測してそれを正確に再現するための測色系の理論的検討を行った。これは、人間の色覚系と機械的な視覚系と対比し、色覚系の特性を満足するように機械系の条件を定めたもので、数学的にはベクトル空間論に基づいて解を導出した。これらの解には、すでに経験的に知られた事実もあるが、難解な色彩用語を用いずに、人間の基本的な等色性のみを定式化して数学的に論理を展開してゆく方法は明快で、結果も有用である。

カラー画像計測の原理は色知覚の3色性(trichromacy)を基盤にしている。すなわち任意の色は適当な3つの色を用いて再現できるので、それらの3原色の強さのみを色の尺度として計測すればよい。図1の系において、

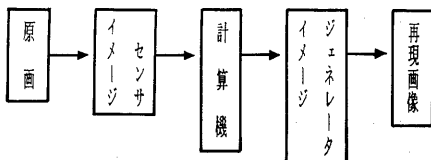


図1 カラー画像の計測表示系

センサ(受光器)は3個で、互いに独立したスペクトル応答曲線をもたなければならぬ。これらの応答曲線が視覚系の分光感度に正確に一致すれば、色知覚を予測するための十分な色情報が得られる。現実にはこのような適合は困難で、またセンサ数を3に限定することも本質的でない。

本論文ではセンサを3個以上用いる拡大したカラー画像計測系を想定し、その理論的解析を行う。センサ数の拡大は理論の一般化のみならず、測色精度の向上や設計の単純化などの利点もある。ここではHornの論理展開に従って、まずセンサの条件を求め、次にこれを実際のシステムに適用する。またカラー表示についても検討を行う。

2. 観測モデル

図2のように原画内の領域を m 個のセンサを使って観測するものとし、人間の視覚系との対比を行う。まず原画からの入射光のスペクトル分布を $S(\lambda)$ とし、視覚系はこれによって3種類の E_1, E_2, E_3 の色刺激レベルを生じる。視覚系のスペクトル応答曲線(分光感度曲線)を $e_1(\lambda), e_2(\lambda), e_3(\lambda)$ とす

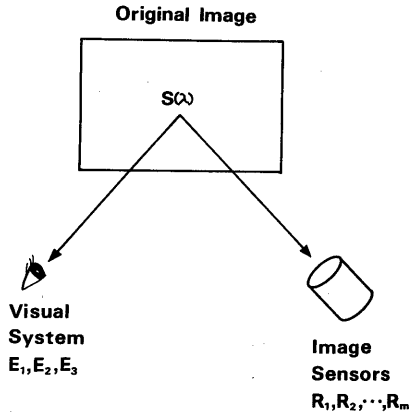


図2 観測モデル

これは、色の刺激値は次式で与えられる。

$$E_i = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} S(\lambda) e_i(\lambda) d\lambda, \quad i=1,2,3 \quad (1)$$

ここで積分区間は可視光の波長領域で $[400, 700(\text{nm})]$ とする。他方、イメージセンサのスペクトル応答曲線を $r_1(\lambda), r_2(\lambda), \dots, r_m(\lambda)$ とすれば、センサ出力 R_1, R_2, \dots, R_m は次式となる。

$$R_i = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} S(\lambda) r_i(\lambda) d\lambda, \quad i=1,2,\dots,m \quad (2)$$

これらの積分をベクトルの内積表現に置き換えて、離散的に記述すれば、

$$E_i = S^T e_i, \quad i=1,2,3 \quad (3)$$

$$R_i = S^T r_i, \quad i=1,2,\dots,m \quad (4)$$

となる。ベクトルは n 次元縦ベクトル

$$S = \begin{bmatrix} S(\lambda_0) \\ \vdots \\ S(\lambda_1) \end{bmatrix}, \quad e_i = \begin{bmatrix} e_i(\lambda_0) \\ \vdots \\ e_i(\lambda_1) \end{bmatrix}, \quad r_i = \begin{bmatrix} r_i(\lambda_0) \\ \vdots \\ r_i(\lambda_1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

で、 T は転置を示し、また簡略化のため波長のサンプル幅の項は無視する。 S, e_i, r_i は物理的実現性から要素は非負であるが、解析の都合上この制限は無視している。

ここでいくつかの空間を定義する。

n 次元ベクトル空間 V とし、この部分空間で、 m 個のセンサのスペクトル応答曲線の線形結合で作られる全応答曲線の集合を考える。これは集合 $\{r_i\}$ と基底ベクトルとする m 次元空間

$$S_r = \left\{ r \mid r = \sum_{i=1}^m a_i r_i, a_i \in \mathbb{R} \right\} \quad (6)$$

である。 R は度数全体の集合とする。同様に視覚系の応答曲線の集合 $\{e_i\}$ の張る 3 次元部分空間 S_e とする。

$$S_e = \left\{ e \mid e = \sum_{i=1}^3 b_i e_i, b_i \in \mathbb{R} \right\} \quad (7)$$

S_r と S_e をそれぞれセンサの応答空間及び視覚系の応答空間と名付ける。

また応答空間の直交補空間を定める。

$$V_r = S_r^\perp = \left\{ v \mid v^T r_i = 0, i=1,2,\dots,m \right\} \quad (8)$$

$$V_e = S_e^\perp = \left\{ v \mid v^T e_i = 0, i=1,2,3 \right\} \quad (9)$$

V_r はセンサの出力が全て零となるような仮想的な入射スペクトル分布の全体を表す。同様に V_e は全く刺激を受けないような分布の全体を表す。

3. 制約条件の導出

3.1 カラーマッチング

等色 (color matching) の現象は人間の色知覚の重要な性質である。一般に色覚は色光のスペクトル分布から色刺激空間への写像とみなすことができる。この写像は多対1の関係で、空間 E_1, E_2, E_3 の3次元空間とすれば、 $S(\lambda) \rightarrow [E_1, E_2, E_3]$ と書ける。そこで色光のスペクトル分布が $S_1(\lambda)$ と $S_2(\lambda)$ と異なるにもかかわらず、等色 $[E_1, E_2, E_3]_1 = [E_1, E_2, E_3]_2$ と判断されることか起り得る。

色彩の用語でいえば、2つの光源からの色光、または1つの光源で照明された2つの物体からの反射光が、スペ

クトル組成が異なるにもかかわらず、それらの色刺激が観測者にとって等色と知覚される現象をメタメリック・マッチまたは条件等色という。

3.2 センサの条件

人間の視覚系で異なって見えるような色光のスペクトル分布はセンサで必ず異なった出力値として区別できなければならない。さもなくば、2つの物体色のイメージセンサの出力が同じであっても、人間の眼には異なって見えるようなことが起こる。言い換れば、センサ出力が $[R_1, R_2, \dots, R_m]_1 = [R_1, R_2, \dots, R_m]_2$ と一致して区別できないスペクトル分布 $S_1(x), S_2(x)$ はメタメリックでなければならない。すなわち観測者にとって2つの色刺激は等色と判断されなければならない。

いまスペクトル分布をベクトル S_1, S_2 で表わせば、この関係は

$$S_1^T V_i = S_2^T V_i, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (10)$$

が成り立てば、

$$S_1^T e_i = S_2^T e_i, \quad i=1, 2, 3 \quad (11)$$

が成り立つことを意味する。ここで $S \equiv S_1 - S_2$ とおけば、

$$S^T V_i = 0, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (12)$$

ならば、

$$S^T e_i = 0, \quad i=1, 2, 3 \quad (13)$$

の関係の成立を意味する。直交補空間の定義より、任意のベクトル $v \in V_r$ に対して、 $v \in V_e$ が成立する。空間の包含関係では $V_r \subset V_e$ となり、元の応答空間に於ては $S_e \subset S_r$ である。

[定理1] イメージセンサの応答空間 S_r は視覚系の応答空間 S_e を包含していなければならない。

センサ数を特に $m=3$ とした場合、 S_r は3次元空間で2つの応答空間は

$S_r = S_e$ と一致しなければならない。またこのとき、メタメリックなスペクトル分布に対するセンサ出力は一致する(文献1)系1)。

次に、集合 $\{V_i\}$ と $\{e_i\}$ は S_r と S_e の基底ベクトルであることより次の結果が得られる。

[系1] 視覚系のスペクトル応答曲線はセンサのスペクトル応答曲線の線形変換として表現できなければならない。

$$e_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} V_j, \quad i=1, 2, 3 \quad (14)$$

3.3 等色関数の使用

色覚のメカニズムを解明する研究は盛んであるが、視覚系のスペクトル感度曲線の正確な姿はまだ知られていない。しかし多くの実験によってその一般的な概形のヒントは手えられており、最近 Smith-Pokorny の網膜の錐体の分光感度曲線が視覚系の感度曲線としてしばしば引用されている。

さて視覚系のスペクトル感度曲線に代わり得るものとして、CIE (国際照明委員会) の等色関数が存在する。等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ は網膜のスペクトル感度に直接対応するものではないが、多くの観測者による等色実験に基づいて定められており、密接な関係を有する。等色関数がスペクトル感度曲線の線形変換である理由は文献1)又は3)で示されている。

したがって、 $e_1(\lambda), e_2(\lambda), e_3(\lambda)$ の代わりに、等色関数を用いて制約条件を述べることができる。

[系2] CIE の等色関数はセンサのスペクトル応答曲線の線形変換として表現されなければならない。

$$\bar{x} = \sum_{j=1}^m a_{1j} V_j, \quad \bar{y} = \sum_{j=1}^m a_{2j} V_j,$$

$$\bar{z} = \sum_{j=1}^m a_{3j} V_j, \quad (15)$$

\bar{x} , \bar{y} , \bar{z} は等色関数のベクトル表現である。

現実の画像計測系において、線形変換で完全に一致させることはできない。これは任意のスペクトル応答曲線を実現する技術がないためで、曲線の適合はあくまでも近似表現にとどまる。この場合 [定理1] の $\sum C S_r$ の条件が満足されないで、図3のように e_i が S_r なるスペクトル感度が存在する。

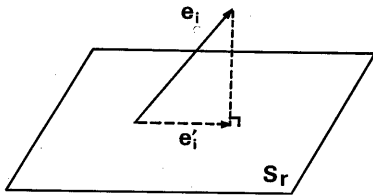


図3 空間 S_r と感度 e_i の関係

この応答曲線の適合問題を最小2乗法で取り扱えば直接的な解が得られる。センサの応答曲線 v_1, v_2, \dots, v_m の線形結合で近似した視覚系の応答曲線 e_1', e_2', e_3' と書き、

$$J = \sum_{i=1}^3 \|e_i - e_i'\|^2 \quad (16)$$

を最小にするような解を求める。幾何学的には、これは図3のように e_i から空間 S_r への直交射影成分である。

実際は等色関数が対象となる。(15)式において応答行列の係数ベクトルを

$$R = [v_1, v_2, \dots, v_m]^T$$

$$a_i = [a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{mi}]^T$$

$i = 1, 2, 3$

で定義し、記号 R^+ で R の擬似逆行列 $[R^T R]^{-1} R^T$ を表す。 a_i の最小2乗推定値 \hat{a}_i はこのとき

$$\hat{a}_1 = R^+ \bar{x}, \quad \hat{a}_2 = R^+ \bar{y},$$

$$\hat{a}_3 = R^+ \bar{z} \quad (17)$$

で与えられる。これより次の定理を得る。 [定理2] センサの応答曲線の線形変

換で等色関数を表現するとき、それの最小2乗誤差は次式で与えられる。

$$J = \text{trace} [\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}] [I - R^+ R] \times [\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}]^T \quad (18)$$

記号 trace は行列のトレースを示す。したがって J が評価尺度になり、この値が小さなものを採用することになる。

4. 実システムへの適用

4.1 計測量

印刷物や写真印画紙上のカラー画像を計測するドラムスキャナを使用する。光源はハロゲンランプで、試料からの反射光を色分解し、ホトマルチで検出している。このスキャナは本来B/W, R, G, Bの4成分を計測するように設計されている。すなわちセンサの数は、 $m=4$ である。しかしここでは、各センサがどのような色成分に対応するかは問題にしておらず、全体として視覚系の等色性の一条件を模倣させることを目的としている。

表面色を観測する場合、光源からの照明光が物体表面で反射し、その反射光が色光として眼やセンサに入射する。そのため色光の物理的性質は、同一光源ならば、物体の分光反射率というスペクトル情報で定まる。いま光源の分光エネルギー分布と分光反射率を $E(\lambda)$ と $\rho(\lambda)$ で表わせば、センサ出力は

$$R = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} E(\lambda) \rho(\lambda) r(\lambda) d\lambda \quad (19)$$

と書ける。しかしこのような色光の絶対量を測定することは現実には不可能で、白色板あるいは直接光で基準化した相対量を求められる。ここでは次式で定義される実効反射率を計測量として使用した。CIEの刺激値は直接計測することになりますが、また必ずしも必要としなかった。

$$P_i = R_i / R_{i0}$$

$$= \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_1} E(\lambda) P(\lambda) r_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_1} E(\lambda) r_i(\lambda) d\lambda}$$

$i = 1, 2, 3, 4$ (20)

R_{i0} は基準白紙 $P(\lambda) = 1$ に対する出力で、実効反射率 P_i は濃度の指数変換より直ちに求まる。

4.2 応答曲線の設定

実効反射率の定義より、 R_i から P_i への写像は、分光反射率に依存せず、1対1の関数である。(したがって前章の R_i を実効反射率で置き換えて、センサの条件はこの定システムにのみそのまゝ相当である。

現実のスペクトル応答曲線は、スキヤタの色分解系の分光透過率と検出器の感度を結合した総合分光感度分布として算出できる⁽⁴⁾。これの直接測定は困難である⁽⁵⁾。数値計算にはミラー、フィルタ、ホトマルの分光データを使用し、フィルタを可変にした。応答曲線の適合の対象としたのはCIEの10度視野等色関数である。応答曲線の一例を図4(a)に適合結果を図4(b)に示す。

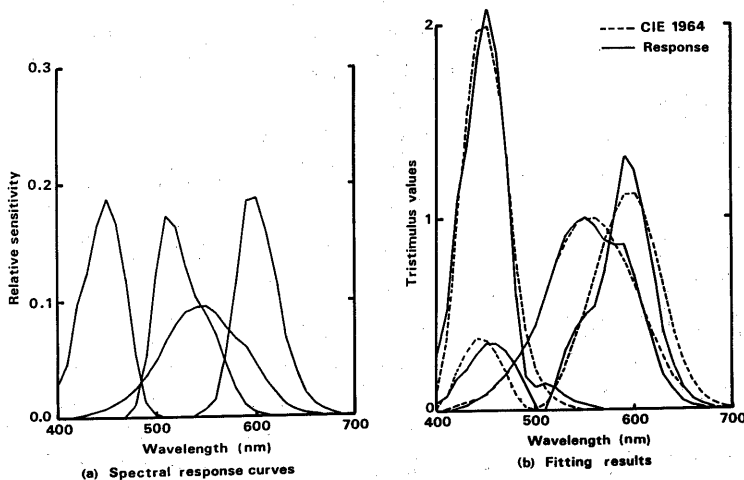


図4 スペクトル応答曲線の例

5. カラー表示の検討

カラー画像を図5のように3光源のモニタ上に表示する場合を想定し、正確な色再現の原理について若干の検討を行う。

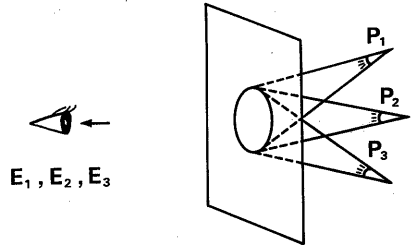


図5 表示系のモデル

光源のスペクトル分布 $P_1(\lambda), P_2(\lambda), P_3(\lambda)$ で、それらの制御入力を P_1, P_2, P_3 で表す。このとき加法混色によって表示されるモニタからの色光は

$$O(\lambda) = P_1 P_1(\lambda) + P_2 P_2(\lambda) + P_3 P_3(\lambda)$$

又は

$$O = \sum_{i=1}^3 P_i P_i \quad (21)$$

と書ける。これに対する視覚系の色刺激値は

$$E_i = O^T e_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (22)$$

である。ここで

$$C = [C_{ij}]$$

$$C_{ij} \triangleq e_i^T P_j$$

の 3×3 行列 C を定義すれば、色刺激値と制御入力の関係が簡潔に表わされる。

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

一方、原画を観測したとき、原画のス

パクトル分布 S に対する刺激値は

$$E'_i = S^T e_i, \quad i=1, 2, 3 \quad (24)$$

である。また原画に対するセンサ出力は(4)式で与えられる。ここで [系1] の関係より、原画について色刺激値とセンサ出力の関係を得ることができる。

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \\ E'_3 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} \quad (25)$$

ここで $n \times m$ 行列 A の要素は(4)式の A $\equiv [a_{ij}]$ である。

さて、正確な色再現とは、表示装置上で再現した色と原画の色が視覚的に区別できないことを意味する。すなわち $E'_i = E_i$ ($i=1, 2, 3$) が成り立つことである。これを達成するために次の定理がある。

[定理3] 表示装置の制御入力とセンサ出力との間には、一意な写像関係が存在する。

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} \quad (26)$$

ただし $B \equiv C^{-1}A$

この定理は表示装置への制御入力を理論的に定めるものであるが、この場合、光源のスペクトル分布については制約条件がない。(したがって $p_1(\lambda)$, $p_2(\lambda)$, $p_3(\lambda)$ で表示可能な色領域だけが対象となる。また、行列 B を求めるには、視覚系のスペクトル応答曲線 e_i が必要であるが、代わりに CIE の等色関数を用いて同様に計算することができる(文献1)系を参照)。

現実にカラー表示装置を見る環境は、原画を観測する環境と異なっている場合が多い。例えば照明が異なれば、色

光の輝度レベルが異なる。このような状況においては視覚系の色順応効果を考慮する必要がある。

6. おわりに

本論文では、カラー画像を計測してそれを正しく再現するために、測色系の満たすべき制約条件を求めた。系としてセンサを3個以上使用する拡大したカラー画像計測系を想定した。人間の視覚系と対比し、その等色性を損わないことがセンサの設計条件であった。

センサに関する最も基本的な条件は、視覚系のスペクトル感度曲線がセンサのスペクトル応答曲線の線形変換によって表現できるければならないことである。このスペクトル感度曲線は等価的に CIE の等色関数に置き代えることができ、その場合の定量的な評価法も与えた。これらの結果をドラマスキマナに適用し、スペクトル応答曲線の実際例を提示した。さらに、カラー表示についても条件を求めた。これは理想的な場合で、視環境の変化やカラーモニタの特性は考慮していない。技術的問題について田島ら⁶⁾の報告がある。

文献

- 1) B.K.P. Horn: Exact Reproduction of Colored Images, CVGIP, 26, 135-167 (1984).
- 2) 納谷: 産業色彩学, 朝倉 (1980)
- 3) 池田: 色彩工学の基礎, 朝倉 (1980)
- 4) 富永: コンピュータ・カラー・ビジョンのための写像法, 信学会技報, PRL 83-87 (1984)
- 5) W.K. Pratt, et al.: Spectral Estimation Techniques for the Spectral Calibration of a Color Image Scanner, Applied Optics, 15, 73-75 (1976)
- 6) 田島, 他: カラー印刷の再現色シミュレーション, 信学会技報, IE 84-78, (1984)