

3.4 カラーアピランスモデルと国際標準化動向

矢口博久

千葉大学

1. ま え が き

社会の情報化とネットワーク化が進み、色彩画像をインターネットをとおしてやり取りするようになり、同一の色情報を異なる画像メディアに表示することが頻繁になっている。このような背景から、同じ色情報を同じ色に見えるように表示するためのカラーマネージメントが画像システムの開発が要求されてきた。

従来の画像工学における色再現では写真、印刷、テレビなどそれぞれの画像表示メディアあるいはデバイスに閉じた中でカラーマネージメントが行われてきた。それぞれの画像メディア、デバイスだけに通用する色情報の表現方法をとってきた。いわゆるデバイス・ディペンデント色再現である。色情報を異なる画像デバイス間でやり取りするようになると、デバイスに依存しない方法、デバイス・インディペンデント色再現が要求されるようになる。更に、同じ画像デバイスに表示された色でも照明などの環境により色の見え方が異なることがあり、そのような状況では更に環境にも依存しない色表示が要求される。この環境にも依存しない色表現方法を実現しようとするものが色の見えモデルである。本稿では、まず従来の表色系の概念を確認し、その上で最新のCIEによる色の見えモデルであるCIECAM 02について解説する。

2. 異なる色空間の概念

色空間あるいは表色系は大きく三つのタイプに分けられよう。第1はCIE XYZ表色系に代表される色を特定、明示するためのもの、第2は均等色空間、すなわち色差を色空間の距離で表わしたものでCIELABが代表的である。そして、第3が色の見えを属性を表現しよう

とするもので、ここで述べるCIECAMがこれに相当する。

XYZ表色系では三刺激値 X , Y , Z で色を標記するが、この三刺激値は3種類の錐体に吸収された光の量（ここでは錐体刺激値と呼ぶ）と数学的には等価である。厳密には、三刺激値は錐体刺激値の線形結合で表現される。従って、三刺激値は光強度と比例関係ある量である。視覚のみならず、人間の五感の強さは、一般にエネルギー量とは非線形な関係にある。従って、三刺激値も明るさや色差の感覚とは間隔尺度としては一致しない。CIELABでは、三刺激値に $1/3$ 乗という指数関数を導入することでエネルギーと感覚量の非線形性を表現し、均等色空間としている。更に、色が表示されている環境での白色を規定し、その白色の三刺激値で正規化することによって、環境による順応の変化も考慮している。

3. CIECAM 02 の概要

図1にCIECAMの計算の流れをCIELABの構造と比較して示す。CIECAMでは色の見えをはかる対象の色刺激とそれを取り巻く周囲の環境条件を入力として与え、モデルの出力として色の見えの三属性である明度、彩度、色相に関連する種々の感覚量を数値として得るのである。入力対象とする色刺激の三刺激値 X , Y , Z 、その対象物が置かれた環境の基準白色の三刺激値 X_w , Y_w , Z_w 、その環境における明るさの順応レベルを規定する順応輝度 L_A 、更に対象の置かれた周囲の条件など観察条件に依存する種々のパラメータである。これらの数値をモデルに入力することにより、3種類の錐体の相対的感度の変化を表わす色順応効果、錐体の入出力特性の非線形を表わすダイナミックレンジ変換を経て、輝度の成分である無彩色応答と色の成分である反対色応答が得られ、最終的な出力として、色の属性が得られる。出力である色の属性は、色相の属性として、色相角(hue angle) h と色相成分(hue quadrature) H 、明るさ

“International Standard of Color Appearance Model” by Hirohisa YAGUCHI (Department of Information and Image Sciences Faculty of Engineering, Chiba University).

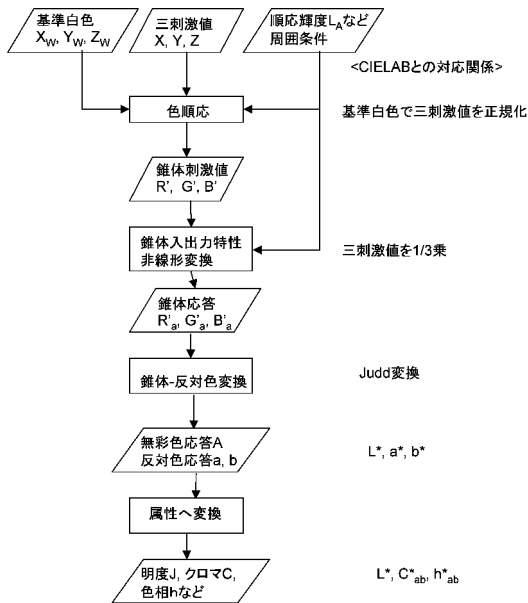


図1 CIECAM02とCIELABの比較

の属性として、明るさ(brightness) Q 、明度(lightness) J 、そして、彩度の属性として、飽和度(saturation) s 、クロマ(chroma) C 、カラフルネス(colorfulness) M である。明るさとカラフルネスは絶対的な感覚量であり、順応輝度が高くなると大きくなる。それに対し、明度、クロマは相対的な感覚量であり、順応輝度による変化は少ない。これらの感覚量を数式で表現すると以下の式(1)から式(3)のようになる¹⁾。ここで、添字 W は基準白色を意味している。

$$[J]=[Q]/[Q_w] \quad (1)$$

$$[C]=[M]/[Q_w] \quad (2)$$

$$[s]=[M]/[Q]=[C]/[J] \quad (3)$$

CIECAM02の計算過程はCIEの技術報告²⁾に示されている。ここでは、その内容の一部を紹介する。まず、対象とする色刺激の三刺激値を測定する。実際に分光放射輝度計、色彩輝度計などを用いて測定する場合や、画像表示機器の測色の校正データを基に決める場合がある。次に、その色刺激が置かれている環境の基準白色の決定をする。何を基準の白色にするかはCIELABの白色の決め方と同じでユーザーに任せられるが、一般にモニターや自発光ディスプレイの場合は、そのデバイスの白色を基準白色とし、その三刺激値を測定する。プリントやハードコピーでは、照明ブースや観察照明で完全白板あるいはメディアの白の三刺激値を測定する。色の見えモデルでは視覚系が順応している輝度レベルを決めるこ

表1 CIECAM02の観察パラメータ

観察条件	c	Nc	F
平均的周囲($S_R > 0.2$)	0.69	1.0	1.0
薄暗い周囲($S_R < 0.2$)	0.59	0.9	0.9
暗黒周囲($S_R = 0$)	0.525	0.8	0.8

とが重要である。画像全体が明るいもの、暗いものもあり、またどこを見ているかによって視覚系の順応レベルもダイナミックに変化し、視覚系がどの輝度に順応しているかを定めることは難しい。そこで、一般的には基準白色の輝度の20%の値を順応輝度 L_A (cd/m^2) として用いる。また、順応輝度 L_A については、そのサンプルにおける照度(lx)を 5π で割った値としても得られる。対象物が置かれた周りの明るさによっても対象物の色の見え方が変わる。CIECAMでは、周囲条件について、周囲比 S_R を式(4)を用いて計算する。

$$S_R = L_{SW}/L_{DW} \quad (4)$$

L_{SW} は周囲の白色輝度で、周辺領域の白色から測定する。 L_{DW} はデバイスの白色輝度で、対象としているデバイスの白色を測定する。両方とも単位は cd/m^2 である。 S_R が0の場合は暗黒周囲、0.2未満の場合は薄暗い周囲、0.2以上の場合は平均的周囲に相当する。この周囲条件により、観察条件のパラメータが表1のように与えられる。中間的な周囲条件の場合は、補間した値を用いてもよい。

CIE 1931三刺激値 X, Y, Z から色順応を説明するための中間的なRGB色空間への変換は式(5)で与えられる。等色関数に式(5)を適用した R, G, B の分光感度を図2の実線で示す。負の領域があることから、錐体の分光感度とは異なるものであり、これは色順応を説明するための中間的な産物である。

三刺激値にはデバイスの白に依存した相対値を用いる。基準白色についても式(5)を適用するが、 Y_w は100より低い値でもよい。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{CAT02}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_{\text{CAT02}} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix} \quad (6)$$

等エネルギー白色からデバイス白色への順応の度合いとなる順応ファクタ D は次式で計算され、完全順応である1から順応なしの0の間の値をとる。現実的な最小値は約0.6である。

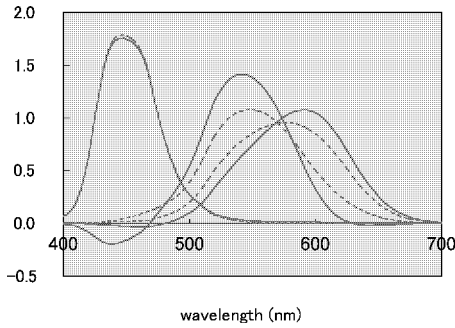


図 2 RGB および R' G' B' の分光感度

$$D = F \left[1 - \left(\frac{1}{3.6} \right) e^{\left(\frac{-(L_A + 42)}{92} \right)} \right] \quad (7)$$

この D ファクタを次式のように色順応式に適用する.

$$R_c = [(Y_w D / R_w) + (1 - D)] R \quad (8)$$

$$G_c = [(Y_w D / G_w) + (1 - D)] G \quad (9)$$

$$B_c = [(Y_w D / B_w) + (1 - D)] B \quad (10)$$

ここで, R_w, G_w, B_w は白色点の RGB 値である. 次に, 以下の式から観察条件に依存する係数を計算する.

$$k = 1 / (5L_A + 1) \quad (11)$$

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1 - k^4)^2(5L_A)^{1/3} \quad (12)$$

$$n = Y_b / Y_w \quad (13)$$

$$N_{bb} = N_{cb} = 0.725(1/n)^{0.2} \quad (14)$$

$$z = 1.48 + \sqrt{n} \quad (15)$$

錐体応答の入出力特性を意味する順応後の非線形圧縮をする前の処理として, 色順応を説明するための中間的な RGB 値を Hunt-Pointer-Estevéz の錐体刺激値 $R' G' B'$ 値に変換する. 図 2 の破線の曲線は式(16)で定義される錐体の分光感度を示している.

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{HPE}} \mathbf{M}_{\text{CAT02}}^{-1} \begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{M}_{\text{HPE}} = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{M}_{\text{CAT02}}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.096124 & -0.278869 & 0.182745 \\ 0.454369 & 0.473533 & 0.072098 \\ -0.009628 & -0.005698 & 1.015326 \end{bmatrix} \quad (18)$$

ここで, 以下の錐体応答の非線形変換を適用する. これは錐体の入出力特性に対応するものである.

$$R'_a = \frac{400(F_L R' / 100)^{0.42}}{27.13 + (F_L R' / 100)^{0.42}} + 0.1 \quad (19)$$

表 2 ユニーク色相のデータ

	赤	黄	緑	青	赤
i	1	2	3	4	5
h_i	20.14	90.00	164.25	237.53	380.14
e_i	0.8	0.7	1.0	1.2	0.8
H	0.0	100.0	200.0	300.0	400.0

$$G'_a = \frac{400(F_L G' / 100)^{0.42}}{27.13 + (F_L G' / 100)^{0.42}} + 0.1 \quad (20)$$

$$B'_a = \frac{400(F_L B' / 100)^{0.42}}{27.13 + (F_L B' / 100)^{0.42}} + 0.1 \quad (21)$$

もし, R', G', B' が負の値をとるなら, その絶対値で計算し, R'_a, G'_a, B'_a を負の値にする.

ここで, 離心率や知覚的属性を計算する前に, 一時的な表現としてデカルト座標系で a と b , および色相を計算する.

$$a = R'_a - 12G'_a / 11 + B'_a / 11 \quad (22)$$

$$b = (1/9)(R'_a + G'_a - 2B'_a) \quad (23)$$

$$h = \tan^{-1}(b/a) \quad (24)$$

色相角 h は度で表す.

次に, 次式により離心率を計算する. ユニーク色のデータを表 2 に示すが⁸, ユニーク色の色相角で計算される e_i はこの表の e_i とは精確には一致していない近い値となる.

$$e_i = 1/4 \left[\cos \left(h \frac{\pi}{180} + 2 \right) + 3.8 \right] \quad (25)$$

色相成分 (hue quadrature) H は表 2 のデータを線形補間して得られる. $h < h_1$ の場合は $h' = h + 360$, その他は $h' = h$ で, i は $h_i \leq h' < h_{i+1}$ となるように選ぶ.

$$H = H_i + \frac{100(h' - h_i)/e_i}{(h' - h_i)/e_i + (h_{i+1} - h')/e_{i+1}} \quad (26)$$

無彩色応答 A は次式で与えられる.

$$A = [2R'_a + G'_a + (1/20)B'_a - 0.305]N_{bb} \quad (27)$$

明度 J を刺激の無彩色応答 A と白の無彩色応答 A_w から次式により求める.

$$J = 100(A/A_w)^{c_2} \quad (28)$$

明るさ Q を次式より求める.

$$Q = (4/c) \sqrt{J/100} (A_w + 4) F_L^{0.25} \quad (29)$$

一時的な値 t を計算し, これを用いてクロマ C , カラフルネス M を以下の式で計算する.

$$t = \frac{(50000/13)N_c N_{cb} e_i (a^2 + b^2)^{1/2}}{R'_a + G'_a + (21/20)B'_a} \quad (30)$$

$$C = t^{0.9} \sqrt{J/100} (1.64 - 0.29^n)^{0.73} \quad (31)$$

$$M = C F_L^{0.25} \quad (32)$$

更に, 飽和度 s は次式で与えられる.

$$s = 100 \sqrt{M/Q} \quad (33)$$

必要に応じて、以下のデカルト座標も計算できる。

$$a_c = C \cos(h) \quad (34)$$

$$b_c = C \sin(h) \quad (35)$$

$$a_M = M \cos(h) \quad (36)$$

$$b_M = M \sin(h) \quad (37)$$

$$a_s = s \cos(h) \quad (38)$$

$$b_s = s \sin(h) \quad (39)$$

J 軸, a_c 軸, b_c 軸を直交軸にもつ三次元色空間は相対的な CIECAM 02 色空間となり, Q 軸, a_M 軸, b_M 軸を用いれば絶対的な CIECAM 02 色空間となる。

以上が CIECAM 02 の順方向の計算過程であるが、属性から三刺激値を得る逆方向の計算過程も TC 8-01 の技術報告では示されている。また、計算例もあるので、CIECAM 02 を実際に適用する際に CIE 技術報告を参考にされたい。

4. CIECAM 02 の画像色再現への応用

CRT に表示された画像をプリントする場合などに、両者間での色の見えの一致が求められる。異なる画像メディアで色を見る場合は、その観察条件も異なるので、 X, Y, Z の三刺激値の一致を目標とした測色的色再現では、必ずしも色の見えは一致しない。このような場合、観察条件に依存しない色の三属性を数値で表わせる CIECAM 02 が有効である。例えば、CRT に表示されたものを画像 1、プリントしたいものを画像 2 とすると、画像 1 の三刺激値等の測色的データから CIECAM 02 の変換により三属性を得る。これらの三属性を CIECAM 02 の逆変換をして画像 2 の三刺激値を得る。また、画像 1 と画像 2 で色域の異なる場合は、CIECAM 02 の色空間で色域圧縮を行う。同じ画像表示デバイスでも輝度、白色条件などの観察条件を変えることによって、色域の拡張や変形もある程度できるので、CIECAM 02 は色域圧縮にも効果的な色空間であるといえる。

5. 今後の国際標準化動向

最初の CIE 色の見えモデルは 1997 年に発行された CIECAM 97 s³⁾ である。その後、CIECAM 97 s の不具合が指摘され、当時設立された CIE の 8 部会「画像技術」の最初の技術委員会 TC 8-01「カラーマネージメント応用のための色の見えのモデル」で、CIECAM 97 s 改良の作業を進め、2002 年にその作業が終了し、CIECAM 02 が発表され、現在は様々な画像産業関連分野でその利用が進んでいる。その評価については、CIE レポーター R 8-06「CIECAM 02 の結果」でまとめられているようにしている。

CIECAM 02 は主に色順応、周囲との対比、視覚系の非線形性を考慮したものである。しかし、画像の中の色の見えは画像自体のもつ色の空間的分布、パワースペクトルなどに大きく依存する。この問題に関しては、現在、TC 8-08「空間情報を考慮した色の見えモデル」で検討が始まっており、その活動に注目したいものである。

参考文献

- 1) M. Fairchild: "Color Appearance Models", Addison Wesley (1998).
- 2) CIE 159-2004: A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM 02
- 3) CIE 131-1998: The CIE 1997 Interim Colour Appearance Model (Simple Version) CIECAM 97 s

矢口博久



1974 年、千葉大学工学部写真工学科卒。1980 年東京工業大学大学院博士課程修了。同年東京工業大学助手、1982 年、National Research Council Canada, RA, 1986 年千葉大学助手、助教授を経て、1995 年同大学工学部教授、現在に至る。視覚工学、色彩工学、画像情報工学の研究に従事。工博。日本照明委員会会長、応用物理学会(日本光学会)、日本視覚学会、照明学会、日本色彩学会、OSA、IS & T 等会員。