

ブロック色素を用いた最明色の簡便な色域生成法と視覚の分光応答

A Simple Method for Generating Optimal Color Gamut with Block Dye and Consideration on Visual Spectral Responses

小寺宏暉 Hiroaki Kotera

小寺イメージング研究室 Kotera Imaging Laboratory

Keywords: 最明色, 色域生成, 視覚, 分光応答.

1. はじめに

一定色度で明度が最大となる色を最明色¹⁾と言い、再現色域の限界を示す目標とされる。最明色が2つの遷移波長で変化するブロック色素から生成されることは Schrodinger²⁾が予測し、MacAdam³⁾が証明している。最明色の色域は *MacAdam limits* と呼ばれ、色材の性能評価に用いられる。最近には、E. Perales ら⁴⁾が波長分解能を 0.1nm に向上し

探索を行い、高精度の色域を形成している。分解能を上げれば精密化が可能であるが、探索と色域形成に要する計算量も増大する。現実の色素の評価には簡便な手法が望まれる。一方、ブロック色素の測色値は容易に計算できるが、ブロック色素に対する視覚系の分光応答は知られていない。

以上から本稿では、次の2点について検討した。

- [1] 色域記述子(GBD)を用いた最明色の色域抽出
- [2] ブロック色素に対する視覚の分光応答

図1に提案手法による色域形成の流れを示す。

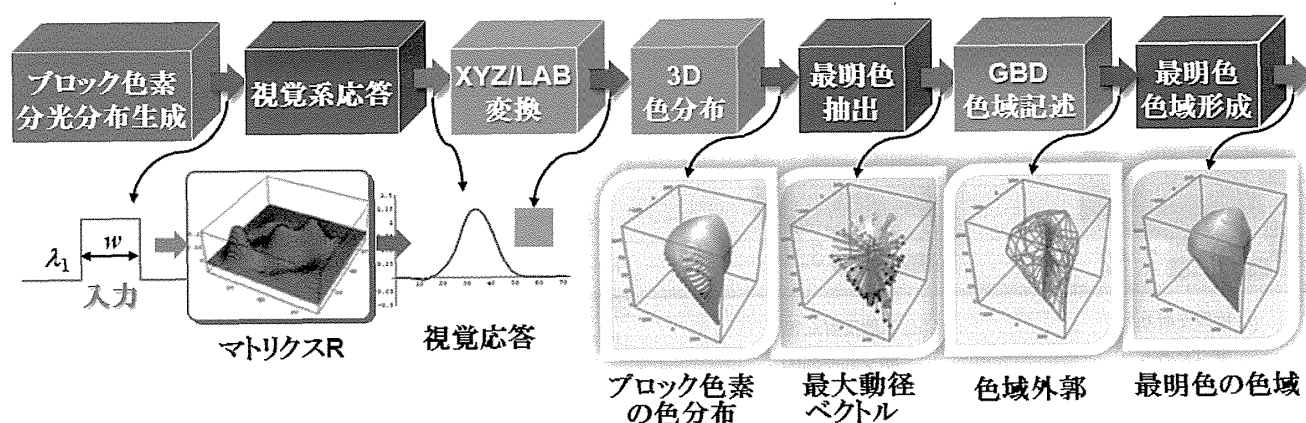


図1 提案モデルによる最明色の色域形成処理の流れ

2. ブロック型分光特性をもつ理想色素の生成

最明色は、図2に示す凸型と凹型のブロック色素の、遷移波長(λ_1, λ_2)を変化させた色分布から求められる。ここでは可視域 380~730nm を 5 nm 間隔で離散化して、 $n=71$ 次元の凸と凹の分光反射率を生成した。遷移波長 λ_1 とブロックの幅 w は

$$\lambda_1 = 380 + 5(j-1): j = 1 \sim (n-1) \quad (1)$$

$$w = 730 - \lambda_2 = 5k: k = 1 \sim (n-j) \quad (2)$$

に制限される。形状の総数は凸凹各 $n(n+1)/2=2556$ 色、合計 $N=5112$ 色の色票 $C_m(m=1 \sim N)$ を生成した。

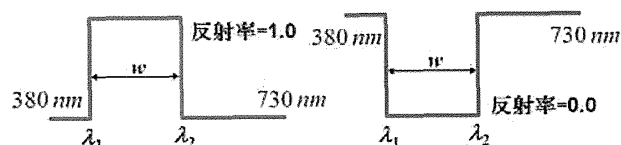


図2 最明色を与える凸型と凹型のブロック色素

3. ブロック色素に対する視覚の分光応答

分光空間から視覚空間への射影理論^{5),6)}によれば、分光刺激 C_m は、射影マトリクス R を通して、人に見える成分 Q_m (fundamental) と見えない成分 B_m (metameric black) に分解される。

$$C_m = Q_m + B_m, \quad Q_m = RC_m, \quad B_m = C_m - Q_m$$

$$R = A(A'A)^{-1}A', \quad A = [\bar{x}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \bar{z}(\lambda)]: \text{等色関数} \quad (3)$$

図3にブロック色素に対する分解例を掲げる。

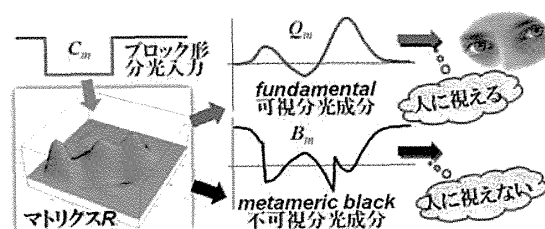


図3 ブロック色素に対する視覚の分光応答例

A には 10 度視野の CIE1964 等色関数を用いた。

$fundamental\ Q_m$ はブロック色素 C_m の XYZ 三刺激値 T_m を担っており、 B_m の三刺激値は零である。

$$T_m = A' C_m = A' Q_m \text{ and } T_{Bm} = A' B_m = 0 \quad (4)$$

さて Q_m を R の要素を用いて表わせば

$$Q_m = R C_m = [u_1 \ u_2 \ \cdots \ u_j \ \cdots \ u_n]' C_m : t \text{ は転置} \\ u_j = [u_j(\lambda_1) \ u_j(\lambda_2) \ \cdots \ u_j(\lambda_n)]: \text{行ベクトル} \quad (5)$$

R の行要素 u_j は波長 λ_j の単色光の $fundamental$ からなる。 R は対称行列で列ベクトルも行に等しく $u_m(\lambda_n) = u_n(\lambda_m)$ の関係にある。即ち、視覚の応答 Q_m は各単色光の応答 u_j を入力 C_m の要素 $C_m(\lambda_j)$ で加重して得られることを意味する。

図 4 は、波長 $\lambda = 480 \sim 500$ nm の区間の単色光に対する R の 5 行分の $fundamental\ u_j$ ($j=21 \sim 25$) のプロファイルを示す。この区間を透過させる凸型ブロック色素に対しては、この 5 行分の単色光応答 u_j を積算した過渡応答が現れると解釈できる。

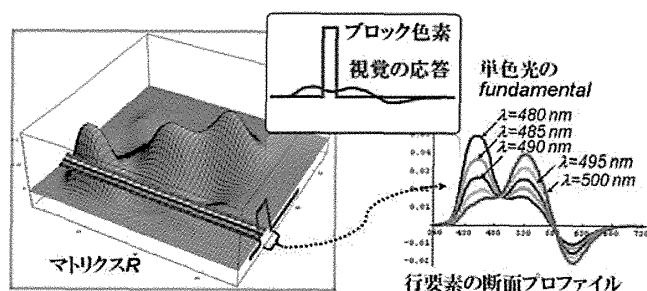


図 4 マトリクス R の解剖による分光応答の解釈

4. 色域記述子による最明色の抽出

図 5 に生成した凸と凹合計 5112 色のブロック色素の色分布を示す。最明色はこの最外殻の色域表面色に対応し、GBD を適用して求められる。

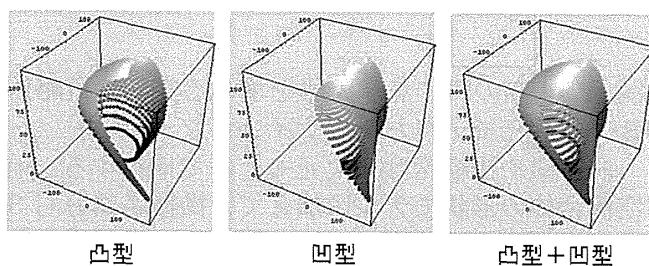


図 5 ブロック色素の CIELAB 色分布

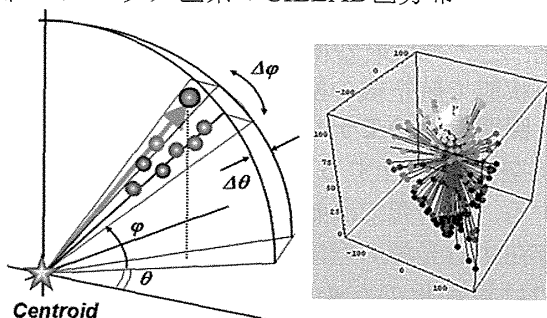


図 6 極座標空間での最大動径ベクトル抽出

図 6 のように色点 m の LAB 値 $Q_m^{LAB} = [L_m^*, a_m^*, b_m^*]$ の重心 $r_0 = [L_0, a_0, b_0]$ からの動径 $r_m = Q_m^{LAB} - r_0$ を、極座標におけるベクトル $r_m(\theta_m, \phi_m)$ として表す。

ここで空間を $(\Delta\theta, \Delta\phi)$ の扇形領域に分割し、各領域内の $\{r_m\}$ の最大動径ベクトル $r_{GBD}(\theta_p, \phi_q)$ を抽出すれば GBD となり、表面色が最明色を与える。図 7 に色域表面の最明色、ワイヤフレームによる色域と表面色で着色した色立体を示す。動径ベクトル $r_{GBD}(\theta_p, \phi_q)$ は、領域分割数 $P \times Q$ ($p=1 \sim P, q=1 \sim Q$) に離散化されている。 $P \times Q = 16 \times 16$ の場合、ブロック色素の総数 $N=5112$ に対して、 $M=214$ 色の最明色が抽出された。図 8 に抽出した最明色と視覚の分光応答例を掲げる。波長応答のずれが色の見えに反映している。

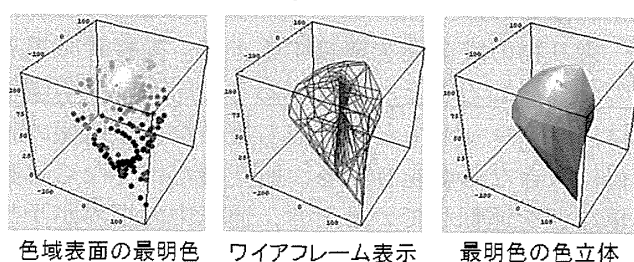


図 7 最明色の抽出結果と色域の 3D 表示

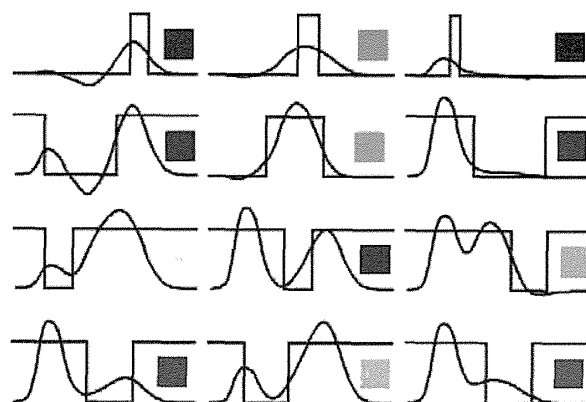


図 8 最明色の視覚の分光応答と再現色 (E 光源)

5. まとめ

広色域化が進む画像メディアの理想目標としての最明色について考察した。射影理論を用いて人に見える分光応答としての $fundamental$ の挙動が多少明らかとなった。ブロック色素は現実には存在しないが、メタメリックな擬似最明色の色材開発に繋がることを期待したい。

参考文献

- 1) 大田 登：色彩工学，東京電機大学出版局 (1993)
- 2) G. West and M. H. Brill: JOSA 73 (1983)
- 3) D.L. MacAdam: JOSA 25, 249-252 (1935)
- 4) E. Perales et al: Proc. AIC Colour 05, 737-740 (2005)
- 5) J. B. Cohen: Col. Res. Appl., 13, 5, 5-39 (1988)
- 6) J. B. Cohen: Visual Color and Color Mixture: The Fundamental Color Space, Illinois Press (2001)