

連続スペクトルをもつ色光からメタメリックブラックを分離する手法について

Extraction of Metameric Black from Spectral Distribution of a Color Light

小林 光夫 Mituo Kobayasi

K カラーラボラトリ

K Color Laboratory

電気通信大学

The University of Electro-Communications

国立新美術館

The National Art Center, Tokyo

鈴木 卓治 Takuzi Suzuki

国立歴史民俗博物館

National Museum of Japanese History

キーワード: 等色関数, メタメリックブラック, 正規直交基底, 数理色彩学.

Keyword: color matching functions, metamerick black, orthonormal basis, mathematical color science.

1. はじめに

色光の分光分布は, 色に寄与する成分と寄与しない成分(メタメリックブラック)に分けて考えられることが知られている[1, 3.8節など]. ところで小寺[2]によれば, 色に寄与しないはずのメタメリックブラックと色票(IT8チャート)のCIEXYZ値との間には強い相関があるという. 筆者はこのことに興味をもち, まずメタメリックブラックの性質を, 等色関数に基づく正規直交基底関数を用いて数学的に明らかにすることを試みた. その結果, 多くの色票において, メタメリックブラック成分は, 数少ないほぼ共通の直交基底成分で表わされることがわかった.

2. 等色関数の正規直交化

等色関数 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ が一次独立であることは, グラムの行列式が正となることにより確かめられる. そこで, 等色関数が張る空間を考え, この空間に属する任意の関数を正規直交基底で表わすことにする. 等色関数は正規でなく($\int_{\Lambda} \{\bar{x}(\lambda)\}^2 d\lambda \neq 1$ など, Λ は可視光波長域), 互いに直交もしていない($\int_{\Lambda} \bar{x}(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \neq 0$ など). したがって, 等色関数をそのまま用いるよりも, 正規直交基底を用いて議論するほうが見通しがよくなる.

正規直交基底を構成するために, グラム・シュミットの直交化法を用いることにする[3]. 2度視野等色関数を用いて $\bar{y}, \bar{x}, \bar{z}$ の順に直交化を行なうと, 図1に示す u_1, u_2, u_3 が得られた.(直交化の順番により得られる基底は異なる.)

u_1, u_2, u_3 を用いれば,

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 6.449 & 5.512 & 0 \\ 8.787 & 0 & 0 \\ 0.9679 & 3.516 & 11.27 \end{bmatrix}$$

と表わすことができる.

3. 色光からのメタメリックブラックの分離方法

CIEXYZ値が (X, Y, Z) である任意の色光 p を, 色に

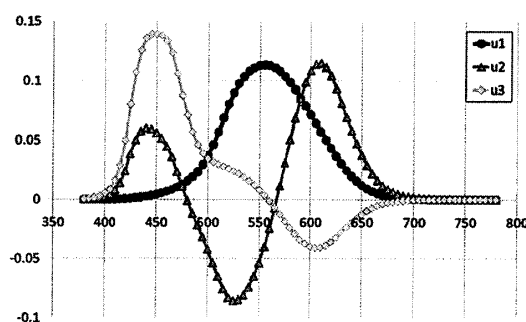


図1 等色関数から得られる正規直交基底の例

寄与する成分 p^* と色に寄与しない成分(メタメリックブラック) p_0 の和

$$p = p^* + p_0$$

に分解する. すなわち p^* と p_0 は, それぞれ

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{\Lambda} p^*(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda, \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \int_{\Lambda} p_0(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda$$

を満たすものとする.

p^* を, u_1, u_2, u_3 を用いて $p^* = p_1 u_1 + p_2 u_2 + p_3 u_3$ のように展開すれば, 係数 p_1, p_2, p_3 は

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

により一意に定まる. (u_i が正規直交していないと, このように簡単には定められない.)

等色関数から導ける正規直交基底は無数に存在するが, p^* および $p_0 = p - p^*$ は基底によらず一意に定まることに注意する.

4. メタメリックブラックの分析

いくつかの色票の分光反射率から(その色票をE光で照らして得られる色光とみなして)メタメリックブラック成分を求める.

用いた色票データは以下のとおりである.

- (1) JIS標準色票[4]に収録された色票のうち(色相環チャートを除く)2,133個の色票の測色データ.
- (2) マンセル色票(無光沢版)[5]に収録された色票のう

ち(20色相分の)714個の色票の測色データ。

- (3) 日本伝統色復元色票データベース[6]に収録された岩絵具見本帳[7]の720色票の測色データ
- (4) 天然染料標本染色参考資料[8]に収録された色布100枚の測定色データ。
- (5) 水彩絵具を白および黒の台紙に濃度を変えて塗って作った47枚の色票の測色データ(台紙のみのデータを含む)[9]。
- (6) 油絵具をキャンバスに十分厚く塗って作った色票58枚の測色データ[9]。

一例として JIS 標準色票 5R 5/12 の分光反射率 p ならびにそこから求めた p^* , p_0 を図2に示す。

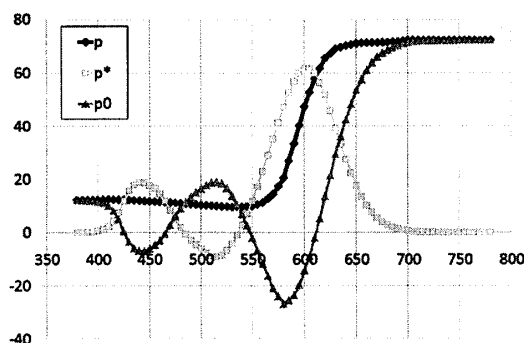


図2 JIS 標準色票 5R 5/12 の p , p^* , および p_0

メタリックブラックの傾向をみるため、各色票集ごとに、得られた p_0 について(QR 法による)主成分分析を試みた。表1に累積寄与率を示す。どの色票集についても、3つの主成分ベクトル(関数)で95%を超えることがわかる。このことは、「物体の分光反射率がたかだか5~6の分光関数の線形和で表せる」という事実[10]に合う。

表1 主成分ベクトルの累積寄与率

No.	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分	第5主成分
1	81.6%	94.8%	98.0%	99.1%	99.5%
2	73.5%	92.2%	97.1%	98.8%	99.3%
3	61.2%	84.7%	96.2%	97.9%	99.3%
4	78.2%	88.8%	97.0%	98.6%	99.4%
5	64.6%	92.7%	98.1%	99.0%	99.4%
6	69.8%	91.0%	95.0%	97.2%	98.9%

なお、得られた主成分ベクトル(関数)は直交化されており、かつ u_1, u_2, u_3 とも直交する。

図3に、マンセル色票(無光沢版)から求めた6次元の正規直交基底を示す。先に示した6種類の色票集について同様のグラフを作成したところ、得られた正規直交基底はどれもよく似ていた。図4は、各色票集について求めた基底のうち u_4 を図示したものであるが、よく一致している。 u_4 は430nm付近、465nm付近、540nm付近、610nm付近でゼロ点をもっており、これは「メタマーの関係にある色光の分光関数は特定の波長で交点をも

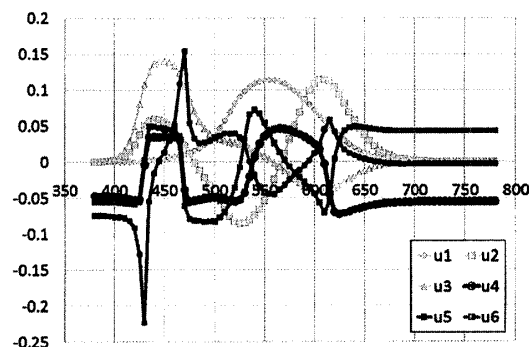


図3 マンセル色票(無光沢)の正規直交基底

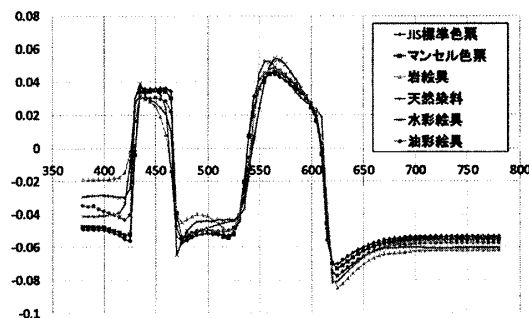


図4 各色票集における基底 u_4 のグラフ

つ」という事実[1, p.195]に相応する結果であり、興味深い。

5. おわりに

ここで提案した正規直交基底を用いた分光分布の解析は、簡潔で基本的であり応用範囲の広い手法であろう。さまざまな対象への応用を試みたい。

参考文献

- [1] G. Wyszecki, W.S. Stiles: Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, Second Edition, John Wiley & Sons, 1982.
- [2] 小寺宏暉: 視覚空間への射影に基づく3刺激値からの分光推定, カラーフォーラム JAPAN2007 論文集, pp.129-132 (2007-11).
- [3] 伊理正夫: 線形代数II, 岩波講座応用数学, 基礎1, 岩波書店, 1993.
- [4] 日本規格協会 JIS 色票委員会(監修): JIS 標準色票 光沢版【第8版(JIS Z 8721 準拠)】, (財)日本規格協会.
- [5] Munsell Book of Color Matte Collection, GretagMacbeth.
- [6] 小林光夫, 鈴木卓治: 日本伝統色復元色票データベース, 電気通信大学小林光夫研究室, 国立歴史民俗博物館情報資料研究部, 2004.
- [7] 日本画材料 岩絵具見本帳, 喜屋.
- [8] 衣生活研究会: 天然染料標本 染色参考資料, 衣生活研究会, 1973.
- [9] 武末加菜子: 絵の具の色再現に関する理論と実験の比較, 電気通信大学情報通信工学科平成17年度卒業論文, 2006.
- [10] M. J. Vrhel, et al.: Measurement and analysis of object reflectance spectra, Color Research and Application, Vol.19, pp.4-9. 1994.