

## 特集「美術館・博物館の展示空間における照明と色彩」

Light and Color for Exhibition Space in Museum

## 多色LED照明のスペクトルの制御による色彩調整

Operation of color appearance by controlling spectral power distribution of illumination using multicolor LEDs

土田 勝

Masaru Tsuchida

NTTコミュニケーション科学基礎研究所, 日本電信電話株式会社

NTT Communication Science Laboratory, NTT Corporation

キーワード：色彩強調, 白色の見え, 照明光スペクトル, 色彩強調成分, 多色LED

Keywords: color enhancement, metamerism white, spectral power distribution of illumination, color enhancement factor, multicolor LED

## 1. はじめに

被写体の色は、観察する人間の感じ方に大きな影響を与える。生鮮食品(肉類・魚介類・野菜・果物)の色は、新鮮さはもちろん、歯ごたえや旨みを来店者に想像させる重要な要素である。工業製品ではその見栄えが売れ筋にも大きく影響する。しかし、試作の際に多くのカラーバリエーションを用意し、微調整が必要な度に試作品を作り直すのは現実的でない。美術品の補修においては、たとえ経年劣化による変色であっても安易に再着色することは許されず、実施の前には綿密な検討が行われる。それでも実際に実物に塗ってみなければ最終的な色の見えが確認できない。

実物上での色の見えを編集する方法として、プロジェクションマッピングは有望な技術の1つである。ただ現状では、普及に向けたいくつかの問題がある。①導入コスト、②被写体ごとにプロジェクタの配置の調整が必要、③プロジェクタに入力する画像の自動生成が困難、④影が発生する、といった問題を解決する必要がある。プロジェクションマッピングでは最初カメラで被写体を撮影し、得られた画像上で領域を分割し、それぞれの領域で投影する画像の色を計算する。次に、プロジェクタからの出力画像が実物にピタリと重なるよう画像の変形を行う。そのためには、カメラとプロジェクタの幾何的なキャリブレーションも行う必要がある。これらの画像処理を自動化するのは現状では困難である。加えて通常は一方向から光を投射するため、被写体の配置によっては影が生じてしまう。

そこで、画像処理や機器類のキャリブレーション無しに実物上で色の見えを編集する方法として、照明光のスペクトルを目的に合わせて最適化する技術が開発された<sup>1)</sup>。照明光スペクトルの調整は色彩強調成分と名付けられたスペクトル成分の重みの値を変化させる

だけでよく、利用者はスペクトルの形状を意識する必要はない。この技術では、白色の色の見え(色味と明るさ)は保持しつつ、対象の色の見えのみを強調もしくは抑制させることが可能である。対象色の強調の前後で白色の見えを維持することで、対象物を含むシーン全体の色の見えのバランスが保たれる。所望の色の見えに最適な照明光スペクトルの合成には多色LED照明装置を使用し、それぞれのLEDの明るさを調整することにより実現している。

## 2. 最適な照明光スペクトルの合成

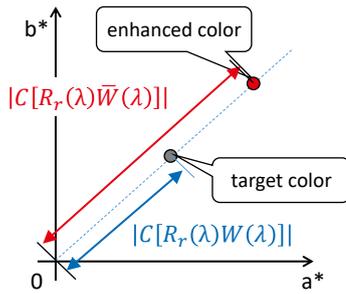
赤、緑、青の3色の色の見えをそれぞれ強調する場合について説明する。最初に、色票(もしくは被写体)から赤・緑・青に相当する領域を設定する。標準白色板と各色の反射スペクトルを分光放射輝度計により計測し、照明光スペクトル $W(\lambda)$ と、各色の分光反射率 $R_r(\lambda)$ ,  $R_g(\lambda)$ ,  $R_b(\lambda)$ を算出する。LEDを用いて合成する照明光スペクトル $W(\lambda)$ は、N種類の単色LEDの分光スペクトルの重み付け線形和として次式のように表現される。

$$\bar{W}(\lambda) = \sum_{i=1}^N k_i s_i(\lambda), \quad 0 \leq k_i \leq 1. \quad (1)$$

$s_i(\lambda)$ は*i*番目のLEDの分光スペクトル、 $k_i$ はその重みである。分光スペクトルからCIE  $u^*v^*$ , CIE  $a^*b^*$ , 輝度 $L$ を算出する演算オペレータをそれぞれ $M[\ ]$ ,  $C[\ ]$ ,  $L[\ ]$ とする。また、 $u^*v^*$ 平面上での色差の許容値を $\sigma_M$ (白の色の見えの評価で使用)、 $L^*a^*b^*$ 色差の許容値を $\sigma_c$ , 輝度の許容値を $\sigma_L$ とする。

以下では赤色のみ強調する場合を例に説明する。白(標準白色板)の色の見えに関する拘束条件、

$$|M[W(\lambda)] - M[\bar{W}(\lambda)]| \leq \sigma_M, \quad (2)$$


 図1 CIE  $a^*b^*$ 平面上における色の变化

$$|L[W(\lambda)] - L[\bar{W}(\lambda)]| \leq \sigma_L, \quad (3)$$

および緑と青の拘束条件

$$|C[R_g(\lambda)W(\lambda)] - C[R_g(\lambda)\bar{W}(\lambda)]| \leq \sigma_c, \quad (4)$$

$$|C[R_b(\lambda)W(\lambda)] - C[R_b(\lambda)\bar{W}(\lambda)]| \leq \sigma_c, \quad (5)$$

のもと、式(6)、(7)を満たす重み係数  $[k_1, k_2, \dots, k_N]$  を求める。

$$|C[R_r(\lambda)W(\lambda)]| < |C[R_r(\lambda)\bar{W}(\lambda)]|, \quad (6)$$

$$|C[R_r(\lambda)W(\lambda)] - C[R_r(\lambda)\bar{W}(\lambda)]| \rightarrow \max. \quad (7)$$

図1は  $a^*b^*$ 平面上での強調前と強調後の位置関係を表しており、対象の色の見えを強調した場合には原点からの距離が大きくなる。これが式(6)の状態である。一方で色の見えを抑制する場合には原点からの距離が小さくなるため、式(6)は次式のように不等号の向きが逆になる。

$$|C[R_r(\lambda)W(\lambda)]| > |C[R_r(\lambda)\bar{W}(\lambda)]|, \quad (8)$$

緑もしくは青の見えを強調や抑制する場合にも、式(2)~(8)と同様の処理を行う。

赤、緑、青を同時に強調する場合には、各色の  $a^*b^*$ 平面上における原点からの距離  $\varepsilon_i$  の和、 $\varepsilon$  が最大となる  $[k_1, k_2, \dots, k_N]$  を見つければよい。

$$\varepsilon = (\varepsilon_r + \varepsilon_g + \varepsilon_b), \quad (9)$$

$$\varepsilon_i = \sqrt{(u'_i)^2 + (v'_i)^2}, \quad i = r, g, b$$

$$[u'_i, v'_i] = M[R_i(\lambda)W(\lambda)].$$

### 3. 色彩強調成分による強調度合いの調整

前節で述べた手法により特定の色の見えを、白の見た目の色と明るさは維持した状態で、最大に強調（もしくは抑制）することは可能となった。だが強調度合



図2 多色LED照明装置

いを調整する都度、それぞれの状態における重み係数  $[k_1, k_2, \dots, k_N]$  を求める必要があり、効率的でない。そこで、対象の色の見えのみに影響を与えるスペクトル成分（以降、色彩強調成分と呼ぶ）を見つけ、それに掛ける重みを変えることで、対象の色の強調度合いの調整を可能とした。以下に色彩強調成分の求め方を述べる。

初めに前節の方法により、対象の色を最大に強調できる照明光スペクトル  $\bar{W}(\lambda)$  を求める。次に、 $\bar{W}(\lambda)$  と強調前の照明光スペクトル  $W(\lambda)$  との差分  $e(\lambda)$  を求める。

$$e(\lambda) = \bar{W}(\lambda) - W(\lambda). \quad (10)$$

一部の波長では負の値となる。この  $e(\lambda)$  が色彩強調成分である。その重みを  $t$  とすると、対象色を強調するために合成される照明光スペクトル  $\tilde{W}(\lambda)$  は次式のようになる。

$$\tilde{W}(\lambda) = W(\lambda) + t \cdot e(\lambda), \quad 0 \leq t \leq 1. \quad (11)$$

実は  $t$  を負の値まで可変にすれば色の見えの抑制が実現するのだが、 $e(\lambda)$  は負の値をもつため  $t = -1$  となる前に照明光スペクトル  $W'(\lambda)$  の一部の波長において値が0となってしまう。その結果、強調と比較して色の抑制効果が弱くなる。そこで色の抑制に関する成分を強調とは別に求め、 $-1 \leq t < 0$  の範囲ではこちらを使用する。式(6)の代わりに式(8)を拘束条件に加えて得られた、色を最大に抑制する照明光スペクトルを  $\bar{W}'(\lambda)$  とすると、

$$e'(\lambda) = W(\lambda) - \bar{W}'(\lambda), \quad (12)$$

$$\tilde{W}'(\lambda) = W(\lambda) + t \cdot e'(\lambda), \quad -1 \leq t < 0. \quad (11)$$

以上のように、色の見えを最大に強調する照明光スペクトル  $\bar{W}(\lambda)$  と、最大に抑制する照明光スペクトル

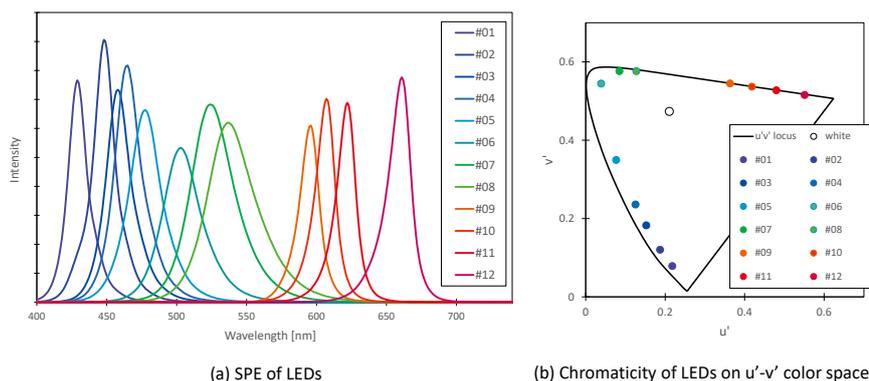


図3 (a)各LEDの分光スペクトル, (b) 各LEDの  $u' v'$  平面上での分布

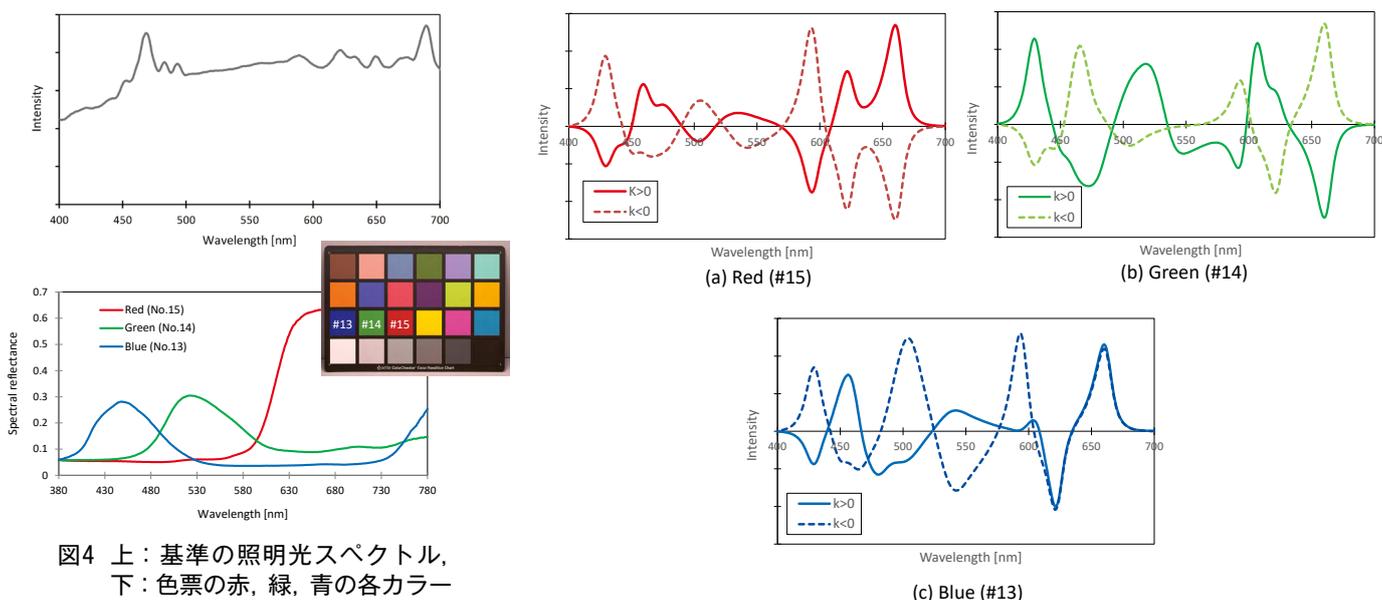


図4 上：基準の照明光スペクトル，  
下：色票の赤，緑，青の各カラーパッチの分光反射率

図5 各色の色彩強調成分（実線：強調時，破線：抑制時）

$\bar{W}'(\lambda)$  を予め求めておき，これらから色彩強調成分（色の抑制もある意味強調と言える）を算出することで，対象の色の強調度合いを容易に調整することが可能である。パラメータは色彩強調成分の重みだけで計算量も少ないことから，インタラクティブな色彩調整が実現できる。

#### 4. 実験

図2に示す多色LED照明を用いて色の見えの強調，抑制を行った。内部には12種類のLEDが組み込まれており，それぞれの明るさは独立に調整可能である。各LEDの分光スペクトルと  $u' v'$  色度図上での分布を図3に示す。赤と青に関しては  $u' v'$  色度図上で概ね等間隔になる4種類のLEDが組み込まれているが，緑に関しては今回，分光スペクトルの半値幅が他色より広い3種類のLEDしか選択できなかった。図4には基準とする照明光（人工太陽灯照明，SERIC）のスペ

クトルと，色彩強調成分の算出に使用する色票（x-rite ColorChecker™）の赤，緑，青の各カラーパッチの分光反射率を示す。得られた色彩強調成分を図5に示す。それぞれ実線が強調時，破線が抑制時であり，それらは概ね上下に对称のスペクトル形状となった。対象色以外の色の変化に対する許容値  $\sigma_c$  は3.0とした。

図6に色票を対象物体とし赤，緑，青の各色をそれぞれ強調・抑制した結果の写真を示す。最下段のグレースケールの色味と明るさは変わっておらず，強調・抑制の対象以外の色の見えも概ね変化していない様に見える。赤，緑，青の見えの変化具合を確認するため，処置前・強調後・抑制後の色を  $a^* b^*$  色度図上で確認した。強調時と抑制時の色の変化はそれぞれ，赤が17.1, 29.0，緑は14.6, 7.1，青は13.6, 12.0であった。赤と緑は彩度方向に変化しているが，青は色相が変化している。なお青色の強調に関してはその変化量を他の色に近づけるため，緑が変化しないという拘束



図6 色票の色の見えを強調・抑制した結果(左：実際に観察された画像, 右：色度図上での色の分布変化)

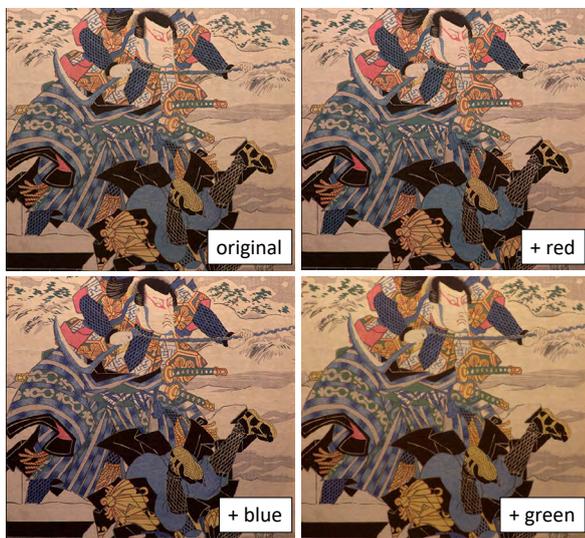


図7 退色した浮世絵の色の強調

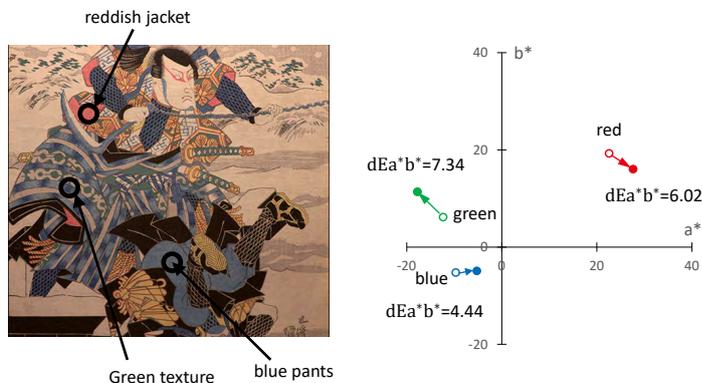


図8 浮世絵上の色の $a^*b^*$ 平面上における変化量

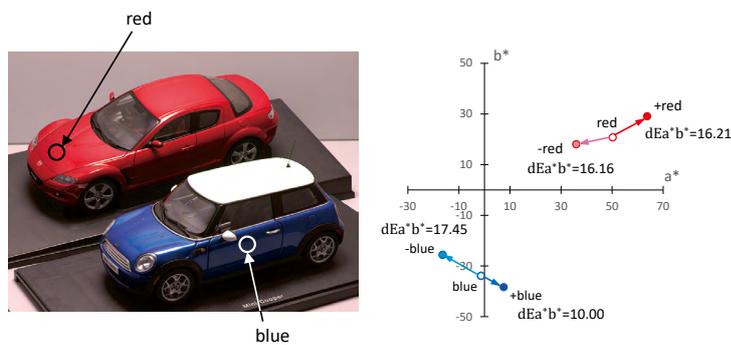


図9 自動車の色の $a^*b^*$ 平面上における変化量

条件を緩和している。

次に美術品の仮想修復の想定で、経年劣化で褪色した浮世絵に対し本手法を適用した。図7は人物部分を抜き出したもので、中央下には逆さになった人の両足が見えている。背景が白色でないためその色が多少変化しているものの、上着の赤、袴の模様緑、逆さになった男のズボンの青などの色の見えが強調できたことが分かる。図8ではそれぞれの箇所の色の変化を $a^*b^*$ 色度図上にプロットした。その変化量はそれぞれ6.02, 7.34, 4.44である。また色彩強調成分の算出に用いた各色とは異なるため、赤と青は彩度ではなく色相が変化している。最後に工業デザインへの応用を想定して、自動車の模型に対して色の強調・抑制を行った。強調・抑制時の $a^*b^*$ 平面上での変化量は赤が16.21および16.16、青が10.00と17.45であった。

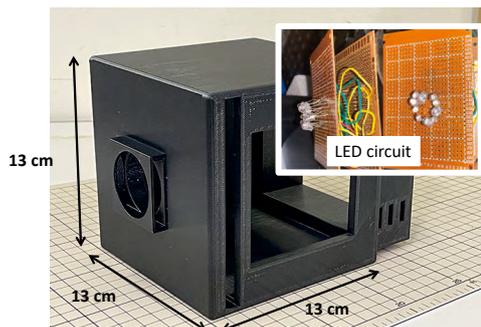


図10 試作中の小型LED照明装置

## 5. おわりに

目の前にある実物の色の見えを調整する手段として、彩度強調成分を用いて照明光スペクトルを変化させる手法を提案した。この手法では、白の見えと明るさを維持した状態で、対象の色の見え方のみを変化させることができる。色の強調・抑制度合いの調整は色彩強調成分の重みを変えるという軽い計算で行えるため、実物を見ながらのインタラクティブな作業が可能である。

実験では色票を用いての原理の確認に加え、経年劣化で退色してしまった美術品の仮想修復の想定と、工業製品の模型（もしくは試作品）の色を調整する想定の実験を行い、その色の見えの変化量を定量的に評価した。対象物を観察する部屋の照明または照明ブースの照明を本実験で用いた多色LED装置に置き換えることにより、本技術を活用することができる。また多くの観察者が同時に見ることができる為、作業の段取りなどを考える共同作業での有効なコミュニケーションツールとしても活用が期待される。

現在、懐中電灯をイメージした小型の照明装置の開発も進めており（図10）、ここでは5種類のLEDを組合せ使用している<sup>2)</sup>。LED自体は安価であるため、近い将来、本技術の導入コストが大幅に軽減される見込みである。

## 参考文献

- 1) M.Tsuchida, etc., "Color Enhancement Factors to Control Spectral Power Distribution of Illumination", J. Electronic Imaging, vol.30 (6), pp.063022-1 -23, (2021)
- 2) C. Kabore, etc., "Prototyping of low-cost color enhancement lighting using multicolor LEDs.", Proc. Electronic Imaging, pp.376-1 -3, (2021) .