

論文 Article

多色 LED を用いた低価格な色彩強調照明の試作

原稿受付 2022 年 9 月 26 日

ものづくり大学紀要 第 12 号 (2022) 1~4

Camille KABORE^{*1}, 土田勝^{*2}, 鈴木郁宣^{*1}, 菅谷諭^{*3}^{*1} ものづくり大学 技能工芸学部 総合機械学科 学生^{*2} 日本電信電話株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所^{*3} ものづくり大学 技能工芸学部 情報メカトロニクス学科

概要 低価格かつ色が異なる数種類の LED を用いて、白色の見えは保ちつつ目的の色を強調する照明装置を試作した。候補の各 LED の分光スペクトルを計測・評価し、自然な色味を観察する際の照明光の合成に 5 つの LED を、強調した色彩を観察する際の照明光の合成には先に選んだ 5 つの LED のうちの 3 つを使用した。実験では、LED で合成した 2 種類の光で色票を交互に照明し、白を含む無彩色の色の見えと明るさは維持されたまま、赤と緑のカラーパッチの色が強調できていることを確認した。

キーワード：色彩強調, 照明光スペクトル, 多色 LED

Prototyping of low-cost color enhancement lighting using multicolor LEDs

Camille KABORE ^{*1}, Masaru TSUCHIDA ^{*2}, Ikunori SUZUKI ^{*1} and Satoshi SUGAYA ^{*3}^{*1} Student, Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*2} NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation^{*3} Dept. of Information Science and Mechatronics Engineering, Institute of Technologists**Abstract**

We used low-cost multicolor LEDs to prototype a lighting system for color enhancement with white appearance maintained. We bought LEDs of several colors at local electronic parts shops, and evaluated their spectral power distributions for synthesizing lights for illumination. Five LEDs were chosen for natural color observation of the object, and three of them were used for color enhancement. Experiments conducted using the assembled LED lighting system and a color chart showed that reddish and blueish color patches were enhanced with white appearance chromatically maintained.

Key Words : color enhancement, illumination spectrum, multicolor LED

1. はじめに

食料品販売の分野や医療分野において、特定の色のみを強調することは観察者の印象を高め、注意を引くために重要である。この目的に対し、照明光スペクトルの最適化により実現する方法がいくつか提案されている¹⁾⁴⁾。しかし、いずれの報告でも高価な照明機材が用いられており、該当技術の

普及に向けては安価な装置による実装が望まれる。

我々の目標は、対象物の自然な色の見えと、強調した色の見えとを切り替えながら観察できる懐中電灯の様な照明機器の開発である。本論文では、市販の安価な 5 種類 (5 色) の LED を用いて試作した照明装置について述べる。自然な色の観察には 5 種類の LED を、強調した色の観察には 3 種類の LED を使用した。また、それぞれの照明下で白 (無

彩色) の色の見えが一致するよう、LED の明るさの組合せ、すなわち照明光スペクトルの最適化を行った。

以下では、対象物が自然な色に見える LED の組合せと、強調された色の実現する LED の組合せの、それぞれの決定方法と、色票を対象とした色彩強調の効果の評価実験の結果について述べる。

2. LED の組合せの決定方法

最初に、自然な色の観察、および強調した色の観察のそれぞれの照明環境下で白の色の見えが同じになる LED の組み合わせの決め方について述べる。LED により合成される照明光スペクトルを $\mathbf{x} = [x_{380}, \dots, x_{780}]^T \in \mathbb{R}^{401}$ と表す。 \mathbf{x} が k 番目の LED の分光放射輝度分布 \mathbf{n}_k の線形和としてモデル化できる場合には、 \mathbf{x} は以下のように書き表される。

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^N \alpha_k \mathbf{n}_k, \quad (1)$$

ここで α_k は k 番目の LED の明るさを、 N は必要な LED の個数を示している。全ての色の LED に関する α_k を求めることで、照明光スペクトル \mathbf{x} が決定される。基準とする照明光 (太陽光など) のスペクトルを $\mathbf{w} = [w_{380}, \dots, w_{780}]^T \in \mathbb{R}^{401}$ 、 t 番目の物体表面の分光反射率を $\mathbf{R}_t = \text{diag}(\mathbf{r}_t)$ で表す。自然な色の実現するための LED の組合せは、 \mathbf{x} と \mathbf{w} の最小二乗誤差 (RMSE) を最小とする \mathbf{x} 、すなわち α_k の組合せを見つけることである。加えて白色の見た目 (明るさと色味) を一致させるために、 \mathbf{x} と \mathbf{w} で CIE Y , u' と v' が等しくなるよう制約条件を加える。これらを式で表すと以下ようになる。

$$\underset{\mathbf{x}}{\text{minimize}} \left\{ \sum_{i=380}^{780} (w_i - x_i)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \{(\delta u'_{\text{white}})^2 + (\delta v'_{\text{white}})^2\}^{\frac{1}{2}} < 0.004,$$

$$\delta Y_{\text{white}} = \|\mathbf{C}_Y \mathbf{R}_{\text{white}} \mathbf{w} - \mathbf{C}_Y \mathbf{R}_{\text{white}} \mathbf{x}\| = 0$$

ここで $\delta u'_{\text{white}}$ と $\delta v'_{\text{white}}$ は次式で定義される。

$$\delta u'_{\text{white}} = \|U'(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{white}} \mathbf{w}) - U'(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{white}} \mathbf{x})\|,$$

$$\delta v'_{\text{white}} = \|V'(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{white}} \mathbf{w}) - V'(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{white}} \mathbf{x})\|.$$

$U'(\cdot)$ と $V'(\cdot)$ は CIE u' と v' を算出する演算子、 $\mathbf{C} = [\mathbf{C}_X, \mathbf{C}_Y, \mathbf{C}_Z]^T$ で $\mathbf{C}_X, \mathbf{C}_Y, \mathbf{C}_Z \in \mathbb{R}^{401}$ は国際照明委員会 CIE が定める等色関数を表す。

次に、赤色、緑色、青色を同時に強調する場合について述べる³⁾。ここでは次式を満たす照明光スペクトル \mathbf{x} を計算により求める。

$$\underset{\mathbf{x}}{\text{maximize}} \{ \|L(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{blue}} \mathbf{w}) - L(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{blue}} \mathbf{x})\| + \|L(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{green}} \mathbf{w}) - L(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{green}} \mathbf{x})\| + \|L(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{red}} \mathbf{w}) - L(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{red}} \mathbf{x})\| \}, \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \|L(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{red}} \mathbf{w})\| < \|L(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{red}} \mathbf{x})\|,$$

$$\|L(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{green}} \mathbf{w})\| < \|L(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{green}} \mathbf{x})\|,$$

$$\|L(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{blue}} \mathbf{w})\| < \|L(\mathbf{C} \mathbf{R}_{\text{blue}} \mathbf{x})\|,$$

ここで $L(\cdot)$ はスペクトルから CIE a^*b^* 値を計算する演算子、 $\|L(\cdot)\|$ は a^*b^* 平面上での原点からの距離 $\{(a^*)^2 + (b^*)^2\}^{1/2}$ を算出する演算子である。

3. 実験

3.1 LED の選択

今回候補として選定した 29 種類の LED の分光

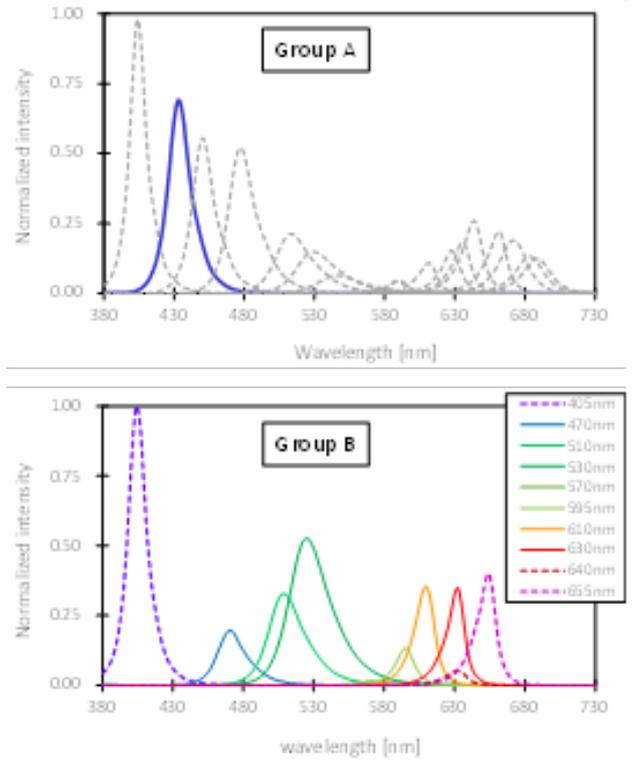


Fig. 1 Spectral power distribution of LEDs.

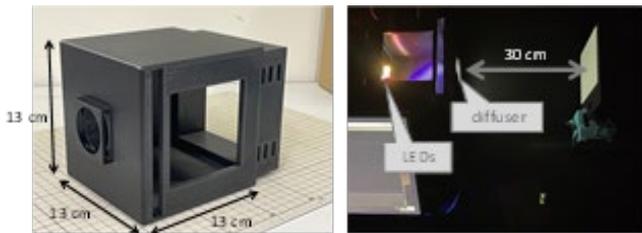


Fig. 2 Case for prototyped electronic torch and its experimental

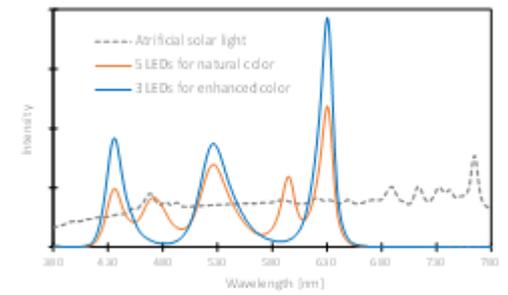


Fig. 3 SPDs of artificial solar light and synthesized

スペクトルを図 1 に示す。いずれの LED にも樹脂製のレンズがついている。グループ A (REVOX Inc.) と B (unknown makers) の平均価格はそれぞれ 500 円/個と 15 円/個である。低価格を実現するため、今回は主にグループ B から LED を選択した。ただ、グループ B では 400~450 nm (深い青色) に中心波長をもつ LED が無いため、グループ A の中心波長 435nm の LED を選択肢に含める。またグループ B の中心波長 405nm と 665nm の LED は、人間の目の感度が低い波長であり、選択された場合には必要な個数が増えることから候補より除外した。また中心波長 570 nm の LED は他と比べて大変暗く、また中心波長 510nm と 530nm の LED はスペクトルの重なりが大きいことから、いずれも除外した。これらの結果、今回の試作では 5 種類の LED (中心波長: 435nm, 470nm, 530nm, 610nm, 630nm) を用いることとした。2 色の青色, 1 色の緑色, 2 色の赤色である。

赤系の色を強調する場合には、中心波長が長い方の LED を明るくし、中心波長が短い方を暗くする。赤系の色を抑制する場合には、その逆の操作を行う。これらの操作は、白の色の見えを保ちながら、赤色の制御を可能にしている。青系の色に関しても同様のことが可能である。

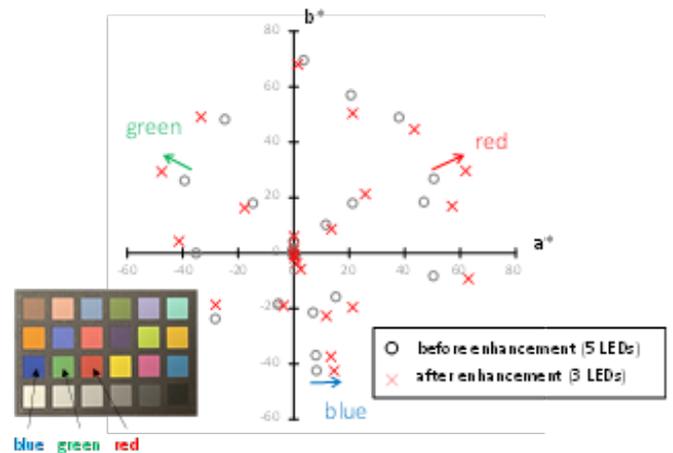


Fig. 4 Color of each patch plotted on CIE a*b* color plane.

3.2 懐中電灯型の試作

懐中電灯を想定し、各辺 13 cm の箱型のケースを 3D プリンタ (F120, Stratasys Ltd.) で作成し、5 種類の LED とその制御回路を格納した。出力光をより均一にするため、ケースの射出光には拡散板を取り付けた。図 2 にケースの外観と、以降で述べる計測実験でのレイアウトを示す。拡散板と標準白色板の間隔は 30 cm とした。LED の明るさはパルス幅変調 (PWM) により制御を行い、Raspberry Pi で実装した。PWM による明るさ制御では、電流変調とは異なり、明るさを変化させても発光スペクトルの中心波長は変化しない。

3.3 色票を用いた色彩強調の効果の評価

色票を使用し、試作した照明装置による色彩強調の効果の評価を行った。この実験では人工太陽灯照明 (SOLAX, セリック) を自然な色を観察する際の基準照明とした。図 3 に基準照明 (灰色の破線) と、5 種類の LED で合成した光のスペクトル (橙色の実線)、そして 3 種類の LED で合成した光 (青色の実線)、それぞれの分光スペクトルを示す。基準照明と LED で合成した光の CIE u' v' 空間上における色差は、式(2)で設定した上限値である 0.004 となった。照明光スペクトルの設計と、その照明下での色の評価には GretagMacbeth Mini ColorChecker™ を使用した。

設計した照明でそれぞれ、色票を照明した際の各パッチの色を CIE a*b* 平面上にプロットした結果を図 4 に示す。赤 (#15)、緑 (#14)、青 (#13)

の色の変化量はそれぞれ、11.8, 8.8, 6.4 であった。以上の結果により、今回試作した照明装置を用いて、白（無彩色）の色見えを保ちつつ、色票の赤、緑、青の色見えを同時に強調できることが確認できた。色の変化の傾向を見ると、赤と緑は色相がほぼ保たれたまま彩度が増える方向に変化している一方で、青の彩度はあまり変わらず、色相的には赤み加わる方向に変化している。これは色票の赤色パッチ（#15）の分光反射率が青色と赤色の両方の波長領域にピークを持っており、その影響と考えられる。

4. まとめ

スイッチで発光モードを切り替え、対象物体を自然な色、もしくは鮮やかさを強調した色で観察することができる小型の照明装置を試作した。照明装置の光源は5種類のLEDで構成されており、内3種類のLEDを用いることで対象物体の見え目

の色味を強調できる。なお発光モードを切り替えても、白の色見えは変わらない。今後は、照明光スペクトルを特定の用途、例えば医療分野や食品流通分野における異常箇所の強調に合わせて最適化し、その効果を実験的に確認する計画である。

文 献

- 1) S. Nakauchi et al., "An Efficient Designing Method of Spectral Distribution of Illuminant for the Enhancement of Color Discrimination," Proc. 19th Color and Imaging Conference, pp. 304-309, 2011
- 2) K. Ito et al., "Spectral-Difference Enhancing Illuminant for Improving Visual Detection of Blood Vessels," Proc. 2nd International Conference on Advanced Informatics: Concepts, Theory and Application, pp. 1-4, 2015
- 3) M. Tsuchida et al., "Designing Spectral Power Distribution of Illumination with Color Chart to Enhance Color Saturation," Proc. 24th Color and Imaging Conference, pp. 278-282, 2016.
- 4) M. Tsuchida et al., "Color enhancement factors to control spectral power distribution of illumination", SIGGRAPH Asia 2018 Posters, no. 17, pp. 1-2, 2018.