

ルータ条件を満たす光電色彩計の試作

Prototyping of a colorimeter fulfilling the Luther condition

鈴木 均 Hitoshi Suzuki ノブオ電子株式会社 NOBUO Electronics Co., LTD

Keywords: 光電色彩計, ルータ条件, 測色, 色差, LED.

1. はじめに

三刺激値直読型色彩計（以下色彩計）の分光感度を、等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ に一致させることは困難である。光学フィルタ製造上の制約によるが、結果として測定される三刺激値は誤差を必ず伴っている。市販されているほとんどの色彩計（以下市販色彩計）は、 $\bar{x}(\lambda)$ の短波長側の信号出力を、 $\bar{z}(\lambda)$ に対応する信号に係数を乗じたもので代替している（以下代替法）。これが誤差の原因である。この問題を解決し、より高精度な色彩計実現のために、3バンドで分光感度特性がルータ条件を満足する色彩計（以下試作色彩計）を試作したので報告する。

2. 色彩計の測定原理

(1) 測定原理

市販色彩計は光学フィルタ、センサそしてアンプで構成される光電変換部を3組持ち、それらの総合分光感度となるべく $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ に一致するように設計されている。市販色彩計の三刺激値 X, Y, Z は、各アンプ出力を V_x, V_y, V_z とすると(1)式で表される。 aV_z が $\bar{x}(\lambda)$ の短波長側に相当する代替信号である。なお、 a, b, c, d はアンプ出力を三刺激値に変換するときの係数である。

$$\begin{aligned} X &= aV_z + bV_x \\ Y &= cV_y \\ Z &= dV_z \end{aligned} \quad (1)$$

試作色彩計も光電変換部を3組もつ。それらの分光感度 $S_1(\lambda), S_2(\lambda), S_3(\lambda)$ は、等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ の1次結合となるように、つまりルータ条件を満足するように設計されている^{1), 2)}。三刺激値 X, Y, Z と、各アンプ出力 V_{S1}, V_{S2}, V_{S3} との関係は(2)式で表される。 $k_{11}, k_{12}, \dots, k_{33}$ はアンプ出力を三刺激値に変換するときの係数である。

(1)式と(2)式の係数 a, b, c, d と $k_{11}, k_{12}, \dots, k_{33}$ は、三刺激値が既知である光源あるいは色票を測定したときの信号出力とその三刺激値から最小

二乗法などの方法により求められる。

$$\begin{aligned} X &= k_{11}V_{S1} + k_{12}V_{S2} + k_{13}V_{S3} \\ Y &= k_{21}V_{S1} + k_{22}V_{S2} + k_{23}V_{S3} \\ Z &= k_{31}V_{S1} + k_{32}V_{S2} + k_{33}V_{S3} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 数値計算による測色精度の比較

本色彩計を試作する前に、LED発光による19個のスペクトルに対して、市販色彩計と試作色彩計それぞれの分光感度を適用したときの三刺激値を数値計算により求め、CIEDE2000色差式で比較した。なおこれら19個のLED発光の色度は、すべてsRGB色域内である。ルータ条件を満たす3バンドの分光感度による色差は、必然的にゼロである。一方、代替法による分光感度では平均色差0.99、最大色差3.78となった。

3. 色彩計の評価方法と結果

試作色彩計のルータ条件への近似の良さと測色精度を評価するために、Neugebauerのq-factor³⁾とLED発光色票による38個の色票学習時の色取得特性を評価した。

(1) Neugebauerのq-factor

カラーフィルタ1枚の分光感度がどれだけルータ条件を満足しているかを示す評価指標として、Neugebauerのq-factorがある。q-factorは0から1の範囲の値を取り、1に近いほどルータ条件を満足していることになる。ここでは試作色彩計の分光感度のq-factorを求めた。計算のための分光感度は、分光器を用いて単色光にしたキセノンランプの光を積分球に入射し、出射ポートの光を試作色彩計と分光放射輝度計（コニカミノルタCS-2000）で測定し、それらの波長毎の出力比から得た。q-factorを表1に示す。測定した規格化分光感度を図1に理論分光感度とともに示す。

表1 Neugebauerのq-factor

	S1	S2	S3
試作色彩計	0.995	0.997	0.986

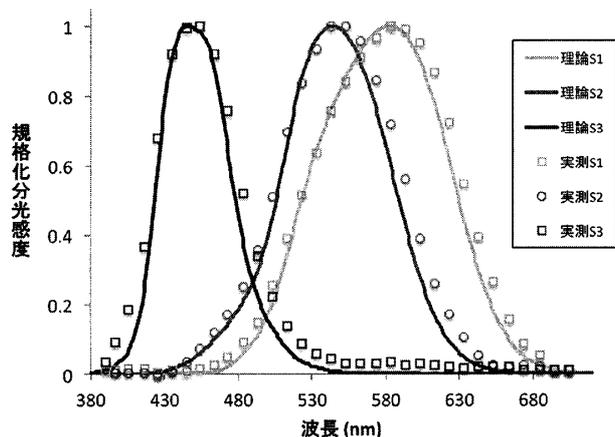


図1 理論分光感度と実測分光感度

(2) 色取得特性の評価

400nm から 700nm の可視域で 1 2 種類の異なる波長で発光する LED の光を混色して 38 個の学習用色票をつくり、試作色彩計の測色精度を評価した。また、分光放射輝度計で LED 色票を測色し、三刺激値の基準とした。(2) 式の係数は、分光放射輝度計で得た三刺激値と試作色彩計の出力値から準ニュートン法により計算した。結果を図 2 に示す。38 色票の CIEDE2000 色差の平均値と最大値はそれぞれ 1.19、3.93 であった。

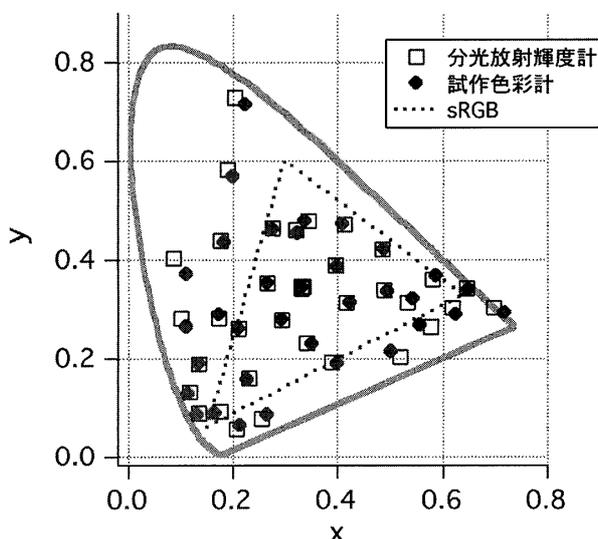


図2 試作色彩計の色取得特性

4. 考察

色差が大きくなる原因を調べた。38 色票中、 $2.0 \leq \Delta E < 3.0$ が 3 色票、 $3.0 \leq \Delta E < 4.0$ が 2 色票あった。彩度 C^* と色差 ΔE の相関を計算したところ、寄与率は 0.18 でありほとんど相関はなかった。色票スペクトルと分光感度の関係を調べた。図 3 に示す太い実線で示された色票は $\Delta E=2.17$ であ

り、破線の色票は $\Delta E=0.64$ である。信号値は破線の色票のほうが一桁以上小さい。図中の斜線パターン領域は、分光感度が理論分光感度と 5% 以上の誤差がある波長領域である。色差の大きな実線の色票スペクトルは、誤差の大きな波長域との重なりが多いことがわかる。 $\Delta E 3$ 以上の 2 色票も同様であった。以上よりスペクトルが、理論分光感度との誤差の大きな波長域に重なる色票は、色差が大きくなる傾向があることがわかった。

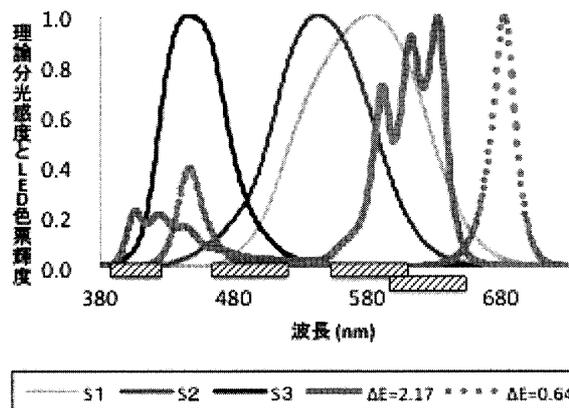


図3 分光感度と LED スペクトルの関係

5. まとめ

ルータ条件をほぼ満足する色彩計を試作した。理論上市販色彩計よりも測色精度はすぐれているが、試作の結果、理論分光感度との誤差が大きな波長域に分布するスペクトルを持つ色票の測色誤差は大きくなる傾向があることがわかった。今後の改善点である。

本研究の一部は、経済産業省の平成 22 年度戦略的基盤技術高度化支援事業の助成金により行われた。

参考文献

- 1) Noboru Ohta: Practical Transformations of CIE Color-Matching Functions, Color Res. Appl. 7-1 (1982) p.53-56
- 2) T. Ejaz, Y. Shimodaira et al: Development of an image capturing system for the reproduction of high-fidelity color, Proc. of SPIE-IS&E Electric Imaging, 5667 (2005) p.146-154
- 3) H. N. J. Neugebauer: Quality Factor for Filters Whose Spectral Transmittances are Different from Color Mixture Curves, and Its Application to Color Photography, J. Opt. Soc. Am., 46 (1956) p.821-824