

光シミュレーション用レイトレーシング法の 光スペクトルを用いた色再現性の向上

蔵野 裕己

Yuki KURANO

1 はじめに

照明の配置設計, 照明制御の研究などにおいて, 時間的, 金銭的成本削減の観点から, 計算機上でのシミュレーションが広く行われている¹⁾. 既存の光シミュレータは, シミュレーション結果を数値で表現する. 数値だけではその光環境を想像することが難しいため, 3DCG を用いた光環境の可視化の必要性が存在するといえる.

3DCG の品質は, モデル形状の正確さ, および色の正確さによって決定される. 光環境の設計を行う際には, 微妙な色合いを正確に表現できる必要があるため, 光シミュレータで用いる 3DCG は, 色の正確さについて重要視すべきである. 本稿では, 正確な色表現が可能なる 3DCG 生成のために, 光の振る舞いを模擬した色算出手法を提案し, その正確度を検証する.

2 光シミュレーション

光シミュレータは, 目的に応じて様々な光のパラメータをシミュレーションする. 例えば, ある空間における任意の点の照度を求める場合には, 光源の光度, 測定点と光源の位置関係, 壁面での反射などを考慮し, 光の明るさを計算する. 同様に, 任意の点の色を求める場合には, 光源や物体の色情報から, 光の色を計算する.

3 光の波長を用いた色の表現手法

3.1 光の波長成分を用いた色の算出方法

我々は, 光の色を正確に再現するために, 色の性質, およびヒトの視覚の仕組みに着目した. 光の色は, その光の各波長成分の強さによって決まる. 光の波長成分は測定可能であり, 分光分布 $S(\lambda)$ というパラメータで表現される. 分光分布を用いて色を表現することで, 正確度の高い色計算が可能であると考えられる. また, ヒトが何らかの物体を見るとき, その物体が反射した光が目に入射している. 物体が光を反射する際, 波長によって反射する強さが異なり, その強度は分光反射率 $R(\lambda)$ というパラメータで表現される. 最終的に目に入射した光の分光分布は, 光源の分光分布と物体の分光反射率の積 $S(\lambda)R(\lambda)$ として表現される. この光によって, 網膜に含まれる 3 種類の錐体細胞が刺激を受け, この刺激を組み合わせると, ヒトは色を知覚する.

3 種類の錐体細胞が各波長成分を知覚する感度は, 等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ と呼ばれる関数として, CIE (International Commission on Illumination: 国際照明委員会) により定義されている. 目に入射した光の分光分布と各等色関数の積を, 波長方向に積分することで, 各錐体を受ける刺激を算出できる. この刺激は, 三刺激値 X, Y, Z と呼ばれる. 式 (1), および式 (2) より, 三刺激値を算出可能である.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} R(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

三刺激値は RGB 値に変換可能であり, この値を画像生成に用いる.

4 提案手法の正確性検証

4.1 検証手法

本検証に用いた LED 照明は, RGBY 各色の独立した LED を 1000 段階の強度で調光して組み合わせ, 1000 の 4 乗の点灯パターンを実現可能である. シミュレータで用いる分光分布は, 分光分析器を用いて実測した値を基にしている. またシミュレータと比較する実測値として, 色彩照度計を用いて照明の光の三刺激値を測定した. 本検証においては, LED 照明の RGBY 各色を 100 から 1000 まで 100 刻み, 10 通りの強度で組み合わせ, 合計 10000 通りのパターンで調光し, 三刺激値を測定した.

シミュレーション値と実測値の比較には, 色差 ΔE^*_{ab} と呼ばれる単位を用いた, 色差 ΔE^*_{ab} は, 三刺激値 X, Y, Z を変換して得られる $L^* a^* b^*$ 値を用いて算出される. 式 (3) に, $L_1^* a_1^* b_1^*$ と $L_2^* a_2^* b_2^*$ の色差の算出方法を示す.

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (3)$$

4.2 検証結果

検証結果の 10000 個のデータから, 各色の点灯強度が 100, 600, 1000 のときのデータを抽出して, Y の点灯強度が 100 の時の結果を Fig.1 に, Y の点灯強度が 600 の時の結果を Fig.2 に, また Y の点灯強度が 1000 の時の結果を Fig.3 に示す. また以下では, 簡単のために点灯強度を 100=Lv.1, 600=Lv.6, 1000 = Lv.10 とする.

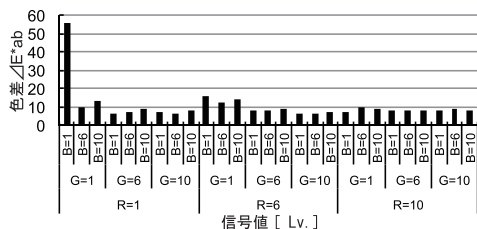


Fig. 1 シミュレーション値と実測値の色差 (Y=1)

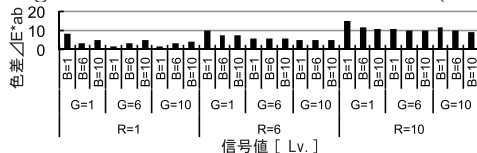


Fig. 2 シミュレーション値と実測値の色差 (Y=6)

RGBY 全ての点灯強度が Lv.1 の際には、大きな色差が確認できる。これは、光量が少ないためにセンサが取得するデータに含まれる雑音成分が相対的に大きいことが原因と考えられる。また、R の点灯強度が大きくなった際にも、色差が増大しており、R の点灯強度と色差に比例関係が確認できる。一方で、Y および G の点灯強度と色差には、反比例の関係が確認できる。B については、Y および R の点灯強度が小さい場合にのみ、色差との比例関係が確認できるが、それ以外では相関が無い、もしくは反比例の関係が確認できる。以上のように、R のみ、点灯強度と色差が常に比例関係にある。

R のみ点灯強度と色差が比例関係にある理由として、等色関数と R の分光分布の関係が考えられる。Fig.4 に LED 照明の RGBY 各色を Lv.10 の点灯強度で点灯させた際の分光分布と、等色関数の比較を示す。Fig.4 より、R の分光分布のみ等色関数との交差する面積が小さいことがわかる。すなわち、本実験に用いた LED 照明の R の光は、三刺激値の算出結果に与える影響が少なく、点灯強度の増大は、三刺激値の精度向上にはつながらず、むしろ雑音成分となり、色差が増大したと考えられる。

色差の評価基準は、色許容差というもので定められている。色許容差を Table1 に示す。検証の結果から、Y の点灯強度が Lv.6 以上、かつ R の点灯強度が Lv.6 以下の条件においては、ほぼ全ての色差が 6.5 以下であり、B 級許容差の範囲に収まることがわかる。すなわちこの条件下では、提案手法を用いることで、印象レベルで同じ色を再現可能と考えられる。

本 LED 照明を生活の中で利用する際、全ての成分を Lv.1 のような低照度で点灯させることや、R 成分のみ強く点灯させることは行わない。すなわち、通常の照明利用を想定した場合、その照明の色を高い精度で再現できる可能性が高い。

5 提案手法のレイトレーシング法への適用

通常のレイトレーシング法では、光源および物体に RGB 値を設定する。光の波長により色計算を行うレイ

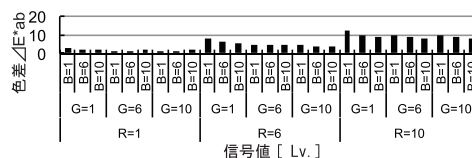


Fig. 3 シミュレーション値と実測値の色差 (Y=10)

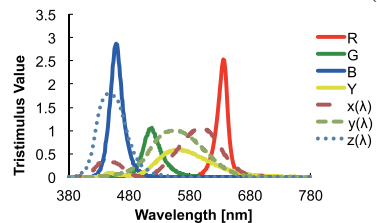


Fig. 4 等色関数と RGBY の分光分布



Fig. 5 R=Lv.1, G=Lv.10, B=Lv.1, Y=Lv.10 時の比較



Fig. 6 R=Lv.6, G=Lv.10, B=Lv.10, Y=Lv.10 時の比較

トレーシング法では、光源に分光分布を設定し、物体に分光反射率を設定して視点に入射する光の分光分布を算出する。視点に入射する光の分光分布は、RGB 値に変換され、この RGB 値をもとに画像を生成する。

光の波長により色計算を行うレイトレーシング法を用い、実験室の状況を再現したモデルの壁面をレンダリングし、実際の実験室の壁面の写真との比較を行った。比較結果の一部を Fig.5, および Fig.6 に示す。Fig.5, および Fig.6 より、概ねの色合いは等しくなったが、画像の明るさに違いが見られることがわかった。レイトレーシング法の色付け処理の際に、照明の実際の配光特性を考慮していないなど、光の明るさの再現性が低いことが、画像の明るさの違いの主な原因と考えられる。

参考文献

- 1) 牧静香, 赤川貴雄. 3次元 cg による光環境シミュレーションの特性に関する比較研究 (都市計画). 日本建築学会研究報告. 九州支部. 3, 計画系, Vol. 1, No. 48, pp. 585-588, 2009-03-01.
- 2) 日本電色工業株式会社. 色の許容差の事例. http://www.nippondenshoku.co.jp/web/japanese/colorstory/08_allowance_by_color.htm.

Table 1 色許容差²⁾

呼び名	色差 ΔE^*_{ab} の範囲	知覚される色差の程度
A 級許容差	1.6 - 3.2	色の隣接比較では、ほとんど気づかれない色差のレベル. 一般的には同じ色だと思われているレベル.
B 級許容差	3.2 - 6.5	印象レベルでは同じ色として扱える範囲. 塗料業界やプラスチック業界では色違いでクレームになることがある.
C 級許容差	6.5 - 13.0	JIS 標準色票, マンセル色票などの 1 歩度に相当する色差.