

光シミュレーション用レイトレーシング法の色再現度向上に関する研究

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、金銭的コスト削減の観点から、計算機上でのシミュレーションが広く行われている^{1) 2)}。このような光シミュレータは、定義された空間における任意の点の明るさや、色などを算出する。算出結果を数値化して表現することは、照明制御のアルゴリズム開発などには有効であるといえる。しかし、数値だけではその光環境を想像することが難しいため、光環境を可視化する必要性も存在するといえる。特に、実環境における体験に近い形で光環境を提供するためには、3DCG を用いた光環境の可視化が有効であると考えられる。

3DCG は、定義されたモデルの形状、およびモデル表面の色を算出することで生成される。そのため、3DCG の品質は、形状の正確さ、およびモデルの色の正確さによって決定されるといえる。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。そのため、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 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

2.1 光シミュレーションの概要

光は、明るさ、色など、様々なパラメータを有する。そのため、光シミュレーションは、目的に応じた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。

2.2 既存の光シミュレータ

Fig.1 に既存の光シミュレータの表示画面の例を示す。この光シミュレータは、光源を任意の光度で点灯させ、照度センサ設置位置での照度値を計算するものである。照明の周りの円は、その大きさにより照明の高度を表現している。

このシミュレータの表現能力では、照明の知識を有さない者にとっては、実際の光環境を想像することが難しい。そこで、3DCG で光環境を表現することで、実際の光環境を容易に想像することが可能になると考えられる。

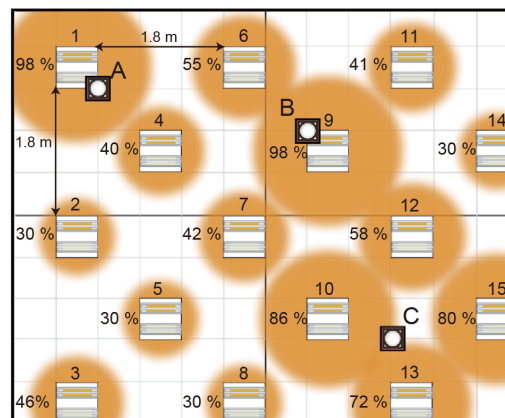


Fig.1 既存の知的照明システムシミュレータ

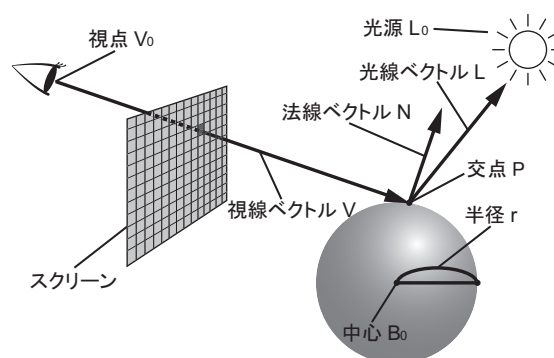


Fig.2 レイトレーシング法の概要

3 レイトレーシング法

レイトレーシング法は、光線の振る舞いを再現することで、高品質な 3D 画像を生成可能なアルゴリズムである。光シミュレータでは、高い表現能力が必要となるため、レイトレーシング法を採用した。

Fig.2 にレイトレーシング法の概要図を示す。レイトレーシング法の計算手順は以下の通りである。まず Fig.2 のように、視点からスクリーン上の 1 つの画素に向けてレイ (光線) を発射する。このレイを視線ベクトルと呼ぶ。計算により、視線ベクトルと、空間中に定義される物体との交点を求める。交点が複数存在する場合、視点に最も近い交点を選択する。これらの計算を、交点計算と呼ぶ。交点は、視線が到達した場所であるため、交点における物体の色、光の色や強さ、反射や屈折の有無などから視点に届く色を算出する。この色を、視線ベクトルが通過するスクリーン上の画素の色とする。これらの、色を求める計算をシェーディングと呼ぶ。

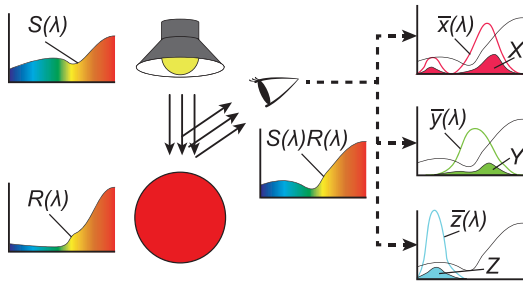


Fig.3 ヒトの光の波長の知覚を等色関数で再現する様子

4 光の波長を用いた色の表現手法

4.1 RGB 値による色の表現

光を表現する際、明るさは 1 次元の数値として表現可能である。一方で、色は 1 次元の数値として表現不可能である。例えば、計算機上で色を扱う場合に広く用いられる RGB カラーモデルでは、R,G,B という 3 つの色成分を定義し、それらを組み合わせた 3 次元の数値として色を表現する。一般的な 3DCG においても、RGB を用いて光源や物体に色を設定し、それらを用いて色計算を行う。しかし、RGB 値はあくまで色の表現方法の 1 つであり、照明や物体から RGB 値を計測することはできない。そのため、実世界の色を正確に再現するような色計算は不可能であるといえる。

4.2 色の性質と人間の視覚

我々は、実際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。光は、ヒトの目で認知可能な波長の電磁波である。光の色は、各波長成分の強さによって決まる。例えば、赤色の波長成分のみが強い光は、赤い光としてヒトに認知される。光の波長成分は測定可能であり、これ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。

ヒトが何らかの物体を見ると、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る。例えば、赤色の物体は赤色の波長成分を強く反射し、その他の色の波長成分は吸収、もしくは弱く反射する。最終的に目に入射した光は、網膜に含まれる錐体細胞によって色として知覚される。錐体細胞は 3 種類存在し、それぞれが特定の波長成分を刺激として知覚する。具体的には、赤色の波長成分、青色の波長成分、および緑色の波長成分の、それぞれのみに強く反応する 3 種類の錐体細胞が混在する。これら全ての錐体細胞が受けた刺激を組み合わせ、色を知覚する。

4.3 光の波長成分を用いた色の算出方法

光が持つ各波長成分の強さは、分光分布 $S(\lambda)$ というパラメータで表現される。また、物体が各波長成分を反射する強度は、分光反射率 $R(\lambda)$ というパラメータで表現される。各波長毎の、光源の分光分布と物体の分光反射率の積 $S(\lambda)R(\lambda)$ が、物体が反射した光の分光分布である。ヒトが物体を見る時には、この $S(\lambda)R(\lambda)$ の分光分布が目に入射する。

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、各錐体がかか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。Fig.3 に、ヒトの目に光が入射する様子と、それを等色関数を用いて再現の様子を示す。式 (1)、および式 (2) より、三刺激値を算出可能である。

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

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

なお、式 (2) で求める K は、比例定数である。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。

4.4 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する。これらのパラメータから、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。

5 提案手法の正確性検証

5.1 目的

光の波長の情報から色を算出する手法は、光とヒトの目の仕組みを基にした手法であるが、算出された色の正確性は保証されていない。そのため、提案手法により算出した色と実測値の比較を行い、色の正確性を確認することを目的とし、検証を行った。

5.2 検証手法

実験に用いた照明は、RGBY 各色を 1000 段階の強度で調光できる LED 照明である。この LED 照明は、RGBY 各色の独立した LED を組み合わせ、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。LED 照明を、RGBY 各色のみそれぞれ 1000 段階の強度で点灯し、4000 通りの分光分布を測定した。そして、RGBY 各色の分光分布を足しあわせることで、1000 の 4 乗の点灯パターンにおける分光分布を再現可能である。例えば $R=1000, G=500, B=500, Y=0$ の強度で点灯させた際の光の分光分布は、 $R=1000, G=500, B=500, Y=0$ の時のそれぞれ分光分布を足しあわせて表現する。

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。LED 照明は、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。なお、JIS 規格などにより、許容できる色差の範囲が定められており、この基準を用いて色の正確度を評価可能である。この基準の詳細については、後述する。

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

5.3 検証結果

検証結果を Fig.4 に示す。ここでは、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示す。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。

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増加した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、色差が増大している。すなわち、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.5 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.5 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、三刺激値の算出に大きく貢献していない。そのような R の点灯強度の増大は、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。Fig.4 の検証結果から、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、多くの場合において、全ての成分を Lv.1 のような低照度で照明を点灯させることや、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。

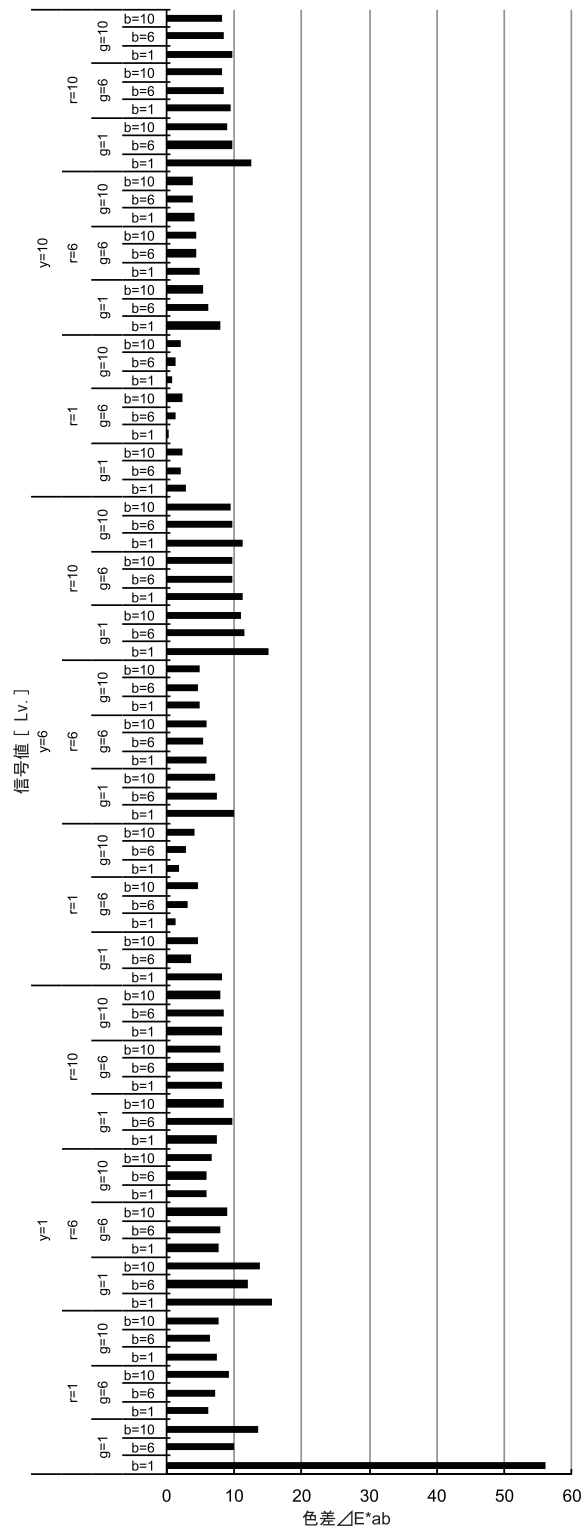


Fig.4 シミュレーション値と実測値の色差

6 提案手法のレイトレーシング法への適用

光の波長から色を算出する手法を、レイトレーシング法に適用した。そして、この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.6, および Fig.7 に示す。Fig.6, および Fig.7 より、概ねの色合いは等しくなったが、画像の明る

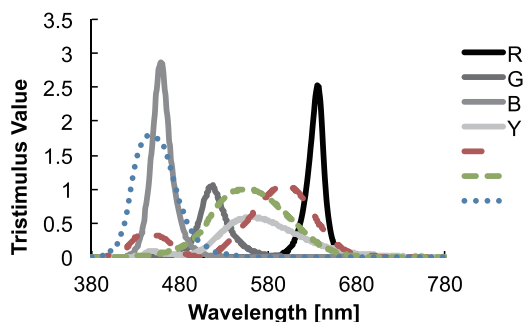


Fig.5 等色関数と RGBY の分光分布

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。

7 まとめと今後の展望

照明制御に関する研究や動作解析において、光環境シミュレーションの需要が高まっている。そこで我々は、3DCG で光環境を表現可能な、シミュレータを開発して

Table1 色許容差³⁾

呼び名	色差 ΔE^*_{ab} の範囲	知覚される色差の程度
評価不能領域	0.0 - 0.2	特別に調整された測色器械でも誤差の範囲にあり、人が識別不能。
識別限界	0.2 - 0.4	十分に調整された測色器械の再現精度の範囲で、訓練を積んだ人が再現性をもって識別できる限界。
AAA 級許容差	0.4 - 0.8	目視判定の再現性から見て、厳格な許容色差の規格を設定できる限界。
AA 級許容差	0.8 - 1.6	色の隣接比較で、わずかに色差が感じられるレベル。一般の測色器械間の器差を含む許容色差の範囲。
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。
D 級許容差	13.0 - 25.0	細分化された系統色名で区別ができる程度の色の差で、この程度を超えると別の色のイメージになる。



Fig.6 R=Lv.1,G=Lv.10,B=Lv.1,Y=Lv.10 時の比較



Fig.7 R=Lv.6,G=Lv.10,B=Lv.10,Y=Lv.10 時の比較

いる。再現性の高い3DCG 生成には、照明の明るさ、および色を正確に再現することが重要である。

本稿では、色の再現度向上に重点をおき、光の波長から色を算出する手法の提案やその正確度の検証を行った。検証の結果、現実的な色合いの照明環境においては、提案手法により、印象レベルで同じ色と判断可能な色の再現が可能であることがわかった。また、本手法をレイトレーシング法に適用し、3DCG の生成を行った。生成された画像と実際の写真を比較したところ、画像の明るさの違いが確認できた。これは、光の強さの再現性が低いことが原因と考えられる。

今後の展望として、光の強さの再現性向上が考えられる。また、3DCG 生成に膨大な時間がかかるため、計算の高速化も必要と考えられる。レイトレーシング法、および波長を用いた色計算手法は高い並列性を持つ。そこで、GPU や PC クラスタを用いて並列処理することで、高速化が可能と考えられる。

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) 栗木茂, 大阪谷彰, 三浦寿幸, 村江行忠. 40275 高窓を有する小学校の室内照度分布の実測とシミュレーションの比較(視覚環境設計ツール, 環境工学 i). 学術講演梗概集. D-1, 環境工学 I, 室内音響・音環境, 騒音・固体音, 環境振動, 光・色, 給排水・水環境, 都市設備・環境管理, 環境心理生理, 環境設計, 電磁環境, Vol. 2008, pp. 581-582, 2008-07-20.
- 3) 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.