

建築 VR 空間の再現性に関する課題

照明光の分光分布と物体の分光反射率について

上原 光太

1. はじめに

近年のデジタル技術およびバーチャルリアリティ技術(以下 VR 技術と称す)の発展に伴って、商用分野および研究分野において、それらが積極的に取り入れられている。商業分野では、VR システムを用いて空間イメージの共有を行う際などに用いられており、研究分野では、現実空間を再現し、様々な条件を VR システム上で反映させた実験研究などに用いられている。研究分野で VR システムを用いる場合は、商業分野よりも精度の良い再現が求められる。しかし、オフィスや会議室などの空間を再現する際に、ヘッドマウントディスプレイ(以下 HMD と称す)が表示可能な輝度およびダイナミックレンジが限られているため、例えば昼光が差し込むような、輝度のダイナミックレンジがディスプレイよりも大きい空間は再現できない。

色の再現を行う場合では、光源の分光分布および物体の分光反射率または分光透過率を考慮する必要があるが、それを考慮できるソフトは Mitsuba や RADIANCE などに限られる。

VR 建築空間の再現や VR 空間での照明シミュレーションを行う際に、ディスプレイ上で現実空間と同じダイナミックレンジは再現できない。また、色の現実にも忠実な再現も出来ていない。ダイナミックレンジについての課題は技術的に解決可能と考えられる。一方で、色の再現性についての課題および解決策については明らかではない。そこで、本研究では現存する色の再現を行う際に、光の計算を行うレンダリングソフトを用いて、色についてシミュレーションを行い、VR システムを用いる際の色の再現性についての課題を明らかにした。

2. 照明研究における VR システムの課題

VR システムを研究に用いる場合、提示する画像刺激の作成では、建築空間のモデリング、照明計算、照明された建築空間のレンダリングが必要である。建築空間のモデリングでは材質ごとの色や粗さなどを決定することでテクスチャの設定を行う。実空間の再現を行う際には、分光分布や分光反射率などは測定データを用いることが好ましいが、それが出来るソフトは

Mitsuba や RADIANCE などに限られている。建築分野でよく用いられるソフトとして Twinmotion や Lumion がある。これらのソフトではあらかじめ用意されたデータを用いてテクスチャの設定を行うため、測定したデータを用いることが出来ないため、現実空間の忠実な再現を行うことが出来るとは言えない。また、多くのソフトは物体色の設定を RGB 値によって行うため、測定データから RGB 値を計算する必要がある。しかし、この方法でも光源の分光分布と物体の分光反射率を考慮したことにはならないため、現実にも忠実な再現が出来るとは言えない。

レンダリングで色の計算を行う際には N-step 法が用いられる。N-step 法では、通常連続的な光源の分光分布や物体の分光反射率を N 個の帯域に分割し、各帯域の分光反射率の平均値を用いて計算を行う。例えば物体の色を RGB 値で設定した場合、R,G,B の 3 つの帯域によって色を考慮したことになるため、N=3 となる。この方法では、N=9 以上の時で色の再現は正確に行うことが出来ると Alexa らによって結論されている⁴⁾。

Blender や DIALux といったレンダリングソフトを用いた場合では、光源からの光の量の設定を行う際に用いる物理量は異なる。DIALux では標準視感度である光束を用いて設定を行うが、Blender では放射量を用いる。このように扱う物理量が違うため、光源からの光の量を同じに設定出来ず、異なるソフトで同じ画像刺激を作成することは難しい。

レンダリングの方法には、計算に用いるレンダリング方程式の違いから様々なレンダリング方法がある。画像作成の際に、一般的に用いられるレンダリング方法として、Mitsuba で使用されるパストレーシング^{注1)}や、Blender の Cycles で使用されるレイトレーシング^{注2)}がある。ゲームなどのリアルタイムでのレンダリングが要求される場合では、レンダリング方程式を簡略化することでレンダリングにかかる時間を短くしたラスタライズ方式^{注3)}が用いられており、Blender の Eevee ではこれが用いられる。また、ラジオシティ方式^{注4)}では、陰影などについてさらに現実空間にも忠実な再現を行うことが出来る。しかし、レンダリング方程式がかなり複雑なため、単に画像刺激を作成する場合でもあ

まり用いられていない。今後、VRシステムを用いて建築空間を評価する際にはリアルタイムでレンダリングを行う必要がある。しかし、ラスタライズ方式によるレンダリング画像は、現実空間を忠実に再現しているとは言えない。そのため、少なくともレイトレーシングによるリアルタイムレンダリングを可能にする性能がコンピューターに求められると言える。

レンダリングされた画像をVRシステム専用のディスプレイを用いて表示する方法の他に、スマートフォンをHMDの代わりとして用いて、VRシステムで表示されるような動画を再生し、疑似的なVR空間を表示方法がある。この方法を用いることで、レンダリングにかかる時間の問題は一部解決可能である。

他にもディスプレイの色の再現度に関わる要因としては経年劣化による性能の衰えが指摘されている⁴⁾。

以上のことから、照明環境をVR空間で再現するには測定データの適用方法、レンダリング方法およびディスプレイの性能といった条件を考慮しなければならない。本研究では、それぞれ考慮できる条件の異なるソフト3種(Mitsuba、Blender および DIAlux)を用いて、色の再現性について検証を行った。

3. 色の再現性に関するシミュレーション

3.1 Mitsuba を用いた物体色の再現

特殊演色性評価数の計算に用いられる色票のうち、R9、R10、R11、R12を用いて色のシミュレーションを行った。色票の色度を $L^*a^*b^*$ 空間上で表した。 $L^*a^*b^*$ 空間では L^* は明度、 a^*b^* は色度(a^* 正方向は赤、 a^* 負方向は緑、 b^* 正方向は黄、 b^* 負方向は青)を表している。光源は色温度が5500Kの紫色LED励起型白色光源(以下v-LEDと称す)と青色LED励起型白色光源(以下b-LEDと称す)、および標準イルミナントD55とした。LED光源の測定データは1nmずつであるが、標準イルミナントの分光分布は5nmずつであるため、1nmずつに線形補完をして計算を行った^{8,9)}。計算は380nm~780nmの401個の値を用いて行ったため、N-step法においてN=401で計算を行ったこととなる。各色票の計算結果を図1に示す。

Mitsubaはパストレーシングによって物理的に正確なレンダリングを行うソフトとされる。また分光分布と分光反射率または分光透過率を考慮できるため、理論値による4色票の色度とMitsubaでの計算による色度とを比較し、Mitsubaが各色票をどの程度現実に忠実な再現を行うことが出来るのかを検証した。

Mitsuba上で簡単な部屋とR9,R10,R11,R12の色票と

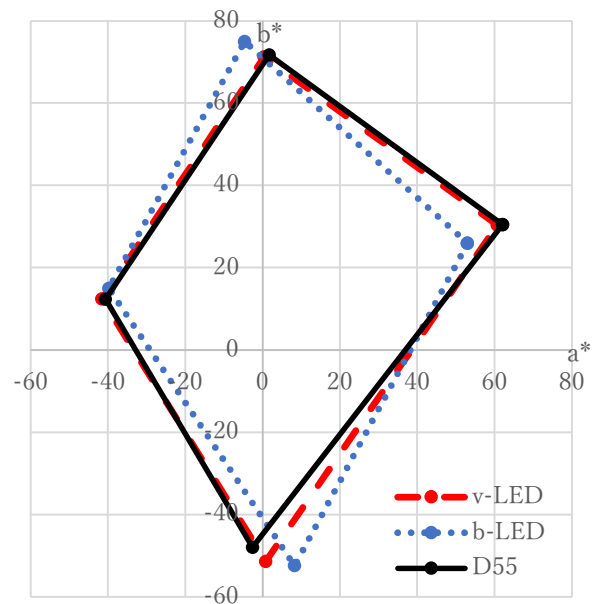


図1 4色票の色度の理論値

同じ分光反射率を持つ均等拡散面を用意してレンダリングを行った。レンダリング画像から、画像中央部の200×200の範囲を切り抜いてRGB値の平均を求め、sRGBの規格に従って行列変換を行い、三刺激値XYZを計算した⁷⁾。

その後、先ほどと同じ色空間上の色度を計算した。作成した画像を図2に、図3にMitsubaによる計算結果を示す。

図1と図2より、理論値とMitsubaによる計算では、両者の色の見え方の違いはほとんど見られないことが分かる。しかし、R12の色票についてはMitsubaの方が理論値と比べて、全体的にやや紫色に近づいていることが分かる。

検証より、演色評価についての結果はMitsubaを用いて作成された建築VR空間と現実空間とではほぼ同じ結果を得ることが可能であると言える。

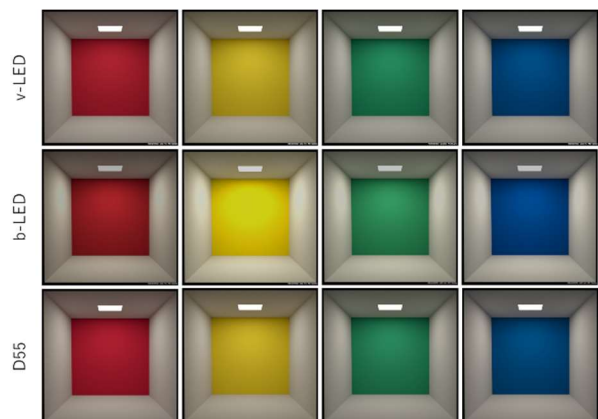


図2 Mitsubaで作成した画像

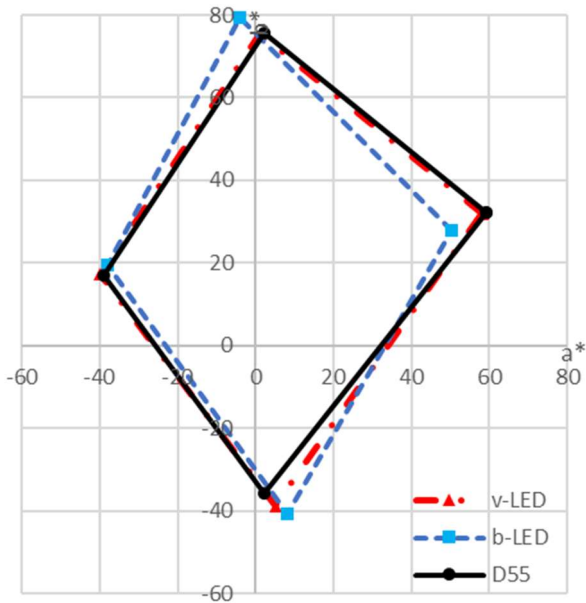


図3 Mitsuba で計算した4色票の色度

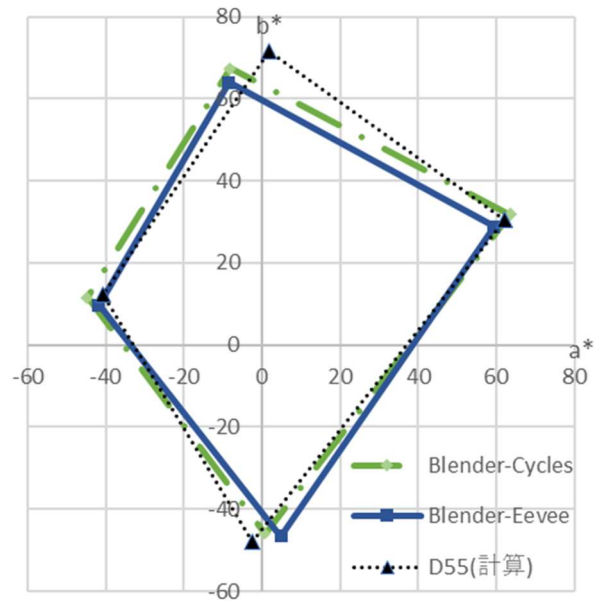


図5 Blender で計算した4色票の色度

3.2 Blender による物体色の再現

Blender は分光分布や分光反射率を考慮できない。そのかわりに光源色は色温度によって設定を行い、物体色は RGB 値によって設定する。また、Blender ではカラーマネジメントの際に用いられる γ 値を考慮できる。

Blender にて Mitsuba の時と同様の画像を作成し、4色票の色度を計算した。ただし、青の色票は RGB 値の R の値が負となるため、0 として設定した。レンダリングは Eevee と Cycles の両方を用いた。作成した画像を図4に示す。図5に Blender による色票の色度を、標準イルミナントを用いた際の理論値の計算結果を合わせて示す。

図5よりレンダラーによる色の違いが出ることが分かった。理論値に近いのは Cycles となっていることからレイトレーシングを用いてレンダリングを行う方がラスターライズ方式を用いたときよりも色は忠実に計算できるといえる。

色ずれは大きくないものの、黄色については Mitsuba の時と同様に黄緑の方向にずれている。

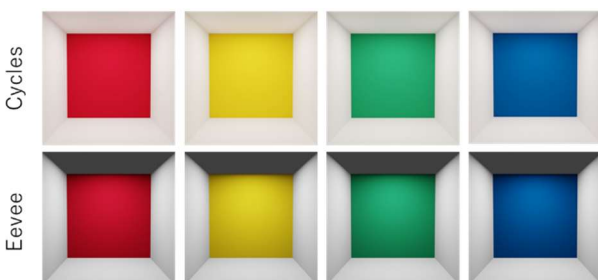


図4 Blender で作成した画像

3.3 DIALux による物体色の再現

DIALux では光源の分光分布をあらかじめ用意されているものの中から適用することが出来る。しかし、分光反射率および分光透過率は考慮できない。また、 γ 値についても考慮できない。レンダリングはレイトレーシングによって行う。光源の分光分布の設定は、DIALux 内の 5500K の青色 LED および同じ色温度のプランク放射体(黒体放射)を用いた。物体色の設定は Blender と同様に、RGB 値によって設定を行った。作成した画像を図6に示す。図7に DIALux による4色票の色度を、標準イルミナントを用いた際の理論値と合わせて示す。

DIALux でも Blender と同様に、光源の分光分布による色の違いがほとんど反映されないことが分かった。また Mitsuba、Blender にくらべて理論値からの色ずれも大きい。 γ 値での補正を行っていないことが要因の一つとして考えられる。

以上のことから、DIALux を用いて VR 建築空間の再現し、研究を行うには適していないと考えられる。

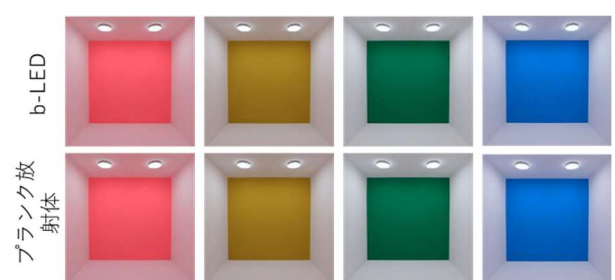


図6 Blender で作成した画像

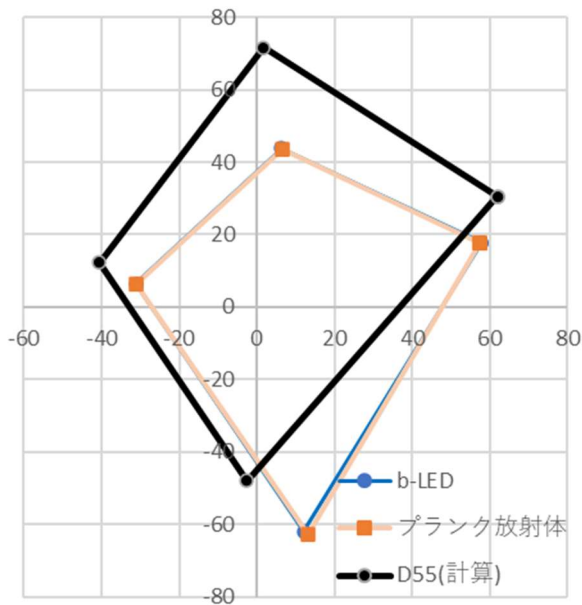


図7 DIALux で計算した4色票の色度

4. おわりに

本研究では VR 建築空間を再現する際に生じる課題の整理、および色の再現についてのシミュレーションを行った。

Mitsuba によって分光分布と分光反射率を考慮して計算を行った場合でも、理論値と比べると色の再現が上手く出来ていないことが分かった。光源の分光分布の差によって生じる色の違いについても Mitsuba によるレンダリングでは理論値ほどの差は生じず、また赤と青については色度の変化の仕方も異なることが分かった。

Blender によるレンダリングでは、レイトレーシングとラスタライズ方式とを用いてシミュレーションを行い、レンダラーの違いによって色の差が生じることが明らかとなった。

DIALux を用いたシミュレーションでは分光分布を考慮できるものの、色度は変わらないことが分かった。また、理論値からの色ずれもとても大きいため DIALux では実空間に忠実な再現することは難しい。

分光反射率を RGB 値に変換する際に青色における R の値が負となった。そのため、R12 のような青い色の設定は RGB 値で正確に行うことが出来ない。また、Blender ではカラーマネジメントでも用いられる γ 値の補正が可能であったが、DIALux ではできないことも色度が大きく変わった要因と考えられる。

VR 建築空間は今後も商用や研究など様々な場面で用いられるが、その際に色についての再現性は現状では高くないことを考慮する必要がある。

謝辞

本研究にあたって九州大学システム情報科学研究所の岩口堯史助教に多大なるご協力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

注

- 1) パストレーシングとは視点からランダムな方向にいくつかの光線を飛ばし、反射や透過を繰り返して光源にたどり着いた光線について計算を行うレンダリング方式。一面素ごとに計算を行うため画質が高いのが特徴。
- 2) レイトレーシングとはパストレーシングで行った方法を光源から光線を飛ばすことで行うレンダリング方式。
- 3) ラスタライズ方式とは物体面を全て三角形の面に置き換えて、それを一つずつ2次元画像に変換するレンダリング方式。計算は速いが反射や屈折を考慮するには向いていない。
- 4) ラジオシティ方式とは光源からの光線を追跡し、物体表面で拡散反射した光線が他の物体を照らす現象を再現できるもの。より現実に近い再現が可能だが、計算に時間がかかる。

参考文献

- 1) 大田登：色彩工学 第2版,東京電機大学出版局, (2001)
- 2) 山本竜也, 三宅博行, 山口秀樹, 吉澤望: 建築内部空間における光・視環境を考慮した開放感の定量評価研究, 日本建築学会環境系論文集 第86巻 第783号, pp451-461, (2021)
- 3) Fedaa, A-A., Kent, M. Christopher, B., John, C. and Yupeng, W: Developing an Innovative Method for Visual Perception Evaluation in a Physical-Based Virtual Environment doi:10.1016/j.buildeenv.2019.106278, (2019)
- 4) Alexa I., Ruppertsberg. and Marina, B : Creating physically accurate visual stimuli for free: Spectral rendering with RADIANCE Behavior Research Methods 2008, 40 (1), pp304-308 doi: 10.3758/BRM.40.1.304, (2008)
- 5) Mehlika, I., Martin, B., and Edward, C : SPECTRAL DAYLIGHTING SIMULATIONS: COMPUTING CIRCADIEN LIGHT, University of Washington, Department of Architecture, Seattle, WA, USA 2ZGF Architects, Seattle, WA, USA
- 6) Aicha, D-K., Priji, B., Stanislav D., David, G-M., Alstan, J., Martine, K., Tao, L, Gunther, S., Mario, T., Taoning, W., Gregory J., and Ward, J-W : Spectral sky models for advanced daylight simulations, T61.C.3 – A Technical Report of Subtask C doi: 10.18777/ieashc-task61-2021-0005, (2021)
- 7) 犬井正男：色度図の着色 東京工芸大学工学部紀要 vol.36 No.1, pp55-62, (2013)
- 8) JIS Z 8720:2012, 測色用の標準イルミナント(標準の光)及び標準光源
- 9) JIS Z 8781-3:2016, 測色-第3部: C I E 三刺激値