

# 多波長・多方向光源下の画像を用いた 拡散・鏡面反射物体の写実的画像生成

小屋松 孝治<sup>1,a)</sup> 岡部 孝弘<sup>2,b)</sup>

**概要:** 本研究では、様々な色・方向の光源下で撮影された実画像を組み合わせる Image-Based Rendering (IBR) の枠組みで、任意照明環境における写実的画像生成に取り組む。従来の IBR に基づく任意照明環境における画像生成では、実画像を撮影する際の光源色も全方位光源分布を計測するカメラも RGB の 3 バンドで波長分解能が低いため、生成された画像の色再現性が低かった。そこで本研究では、多波長・多方向光源下で撮影された実画像を、全方位スペクトル光源分布に基づいて組み合わせることで、色再現性の向上を目指す。シミュレーション実験を行い、拡散反射物体と鏡面反射物体の各々について、写実的な画像を生成するのに必要な多波長・多方向光源の数を実験的に明らかにする。

**キーワード:** 任意照明環境, 写実的画像生成, Image-Based Rendering, マルチスペクトルイメージング

## 1. まえがき

物体の見えは、物体の形状や反射特性だけでなく、物体を照らす光源の方向（角度分布）と色（分光分布）にも依存する。したがって、任意照明環境における物体の写実的な画像の生成は、コンピュータグラフィックス (CG) やコンピュータビジョン (CV) における重要な研究課題の一つである。

任意照明環境における画像生成には、Image-Based Modeling (IBM) により被写体の精緻な幾何学的・光学的モデルを獲得して CG への入力として用いるものと、様々な方向・色の光源下で撮影した実画像を組み合わせる Image-Based Rendering (IBR) に基づくものの 2 つのアプローチがある。前者に比べて後者は、多数の画像を必要とするものの、被写体のモデルを介さずに画像から画像を生成するために、より写実的な画像を得ることができる。

Debevec ら [2] の従来研究では、3 色の光源を 156 方向に配置した光源装置を用い、実シーンの全方位光源分布 [1] に応じて光源装置の各光源の強度を調整することで、IBR に基づく任意照明環境における画像生成を実現している。しかしながら、実画像を撮影する際の光源色も全方位光源分布を計測するカメラも RGB の 3 バンドで波長分解能が低いため、生成された画像の色再現性には限界がある。

そこで本研究では、全方位スペクトル光源分布 [5] を用いるとともに、光源装置の光源色も 4 バンド以上のマルチバンドに拡張することで、任意照明環境における画像生成の色再現性の向上を目指す。このとき、光源装置の光源色と光源方向を増やせば増やすほど、色再現性が向上すると考えられる。その一方で、光源装置を製作するための費用や画像を撮影するのに要する時間もまた増大してしまうという問題がある。

本稿では、Lambert モデルに従う拡散反射物体と Phong モデルに従う鏡面反射物体を被写体として、IBR の枠組みで任意照明環境における画像を生成するシミュレーション実験を行い、写実的な画像の生成に必要な光源色の数と光源方向の数を実験的に明らかにする。Sato ら [6] の先行研究が必要な光源方向の数を理論的・実験的に明らかにしているのに対して、光源方向の数と光源色の数の両方を検討することが本研究の特色である。

## 2. 提案手法

分光強度の異なる  $C$  個の LED からなるクラスタを  $D$  個の異なる方向に配置した多波長・多方向光源装置（例えば Kitahara ら [4]）を仮定する。このとき、光源装置の  $d$  番目 ( $d = 1, 2, 3, \dots, D$ ) の方向の  $c$  番目 ( $c = 1, 2, 3, \dots, C$ ) の色の光源のみを点灯して撮影した被写体の画像を、基底画像  $I_{c,d}$  とする。

提案手法では、任意照明環境における被写体の画像  $I$  を、基底画像の線形結合

<sup>1</sup> 九州工業大学 大学院情報工学府 先端情報工学専攻

<sup>2</sup> 九州工業大学 大学院情報工学研究院 知能情報工学研究系

a) k.koyamatsu@pluto.ai.kyutech.ac.jp

b) okabe@ai.kyutech.ac.jp

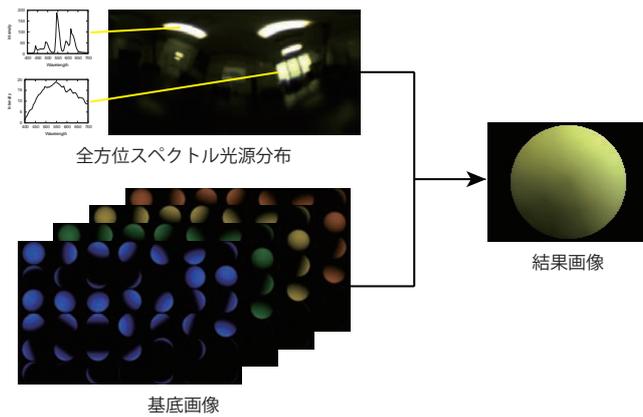


図 1 IBR に基づく任意照明環境における画像生成の概念図。

$$I = \sum_{c,d} \alpha_{c,d} I_{c,d} \quad (1)$$

で表現する。ここで  $\alpha_{c,d}$  は結合係数であり、全方位スペクトル光源分布 [5] に基づいて、以下のように計算する。

具体的には、まず、球座標の  $(\theta, \phi)$  方向から被写体に入射する光の分光強度  $l(\theta, \phi, \lambda)$  を、 $C$  個の LED の分光強度  $l_c(\lambda)$  の線形結合

$$l(\theta, \phi, \lambda) = \sum_c \beta_{\theta,\phi,c} l_c(\lambda) \quad (2)$$

で表現する。ここで結合係数  $\beta_{\theta,\phi,c}$  は、最小二乗法を用いて求める。次に、Debevec ら [2] と同様にして、光源装置の  $D$  個の方向の中から  $(\theta, \phi)$  方向に近いものを 3 つ求め、重心座標に基づいて 3 つの光源方向の重み  $\gamma_{\theta,\phi,d}$  を計算する。最後に、 $\beta_{\theta,\phi,c}$  と  $\gamma_{\theta,\phi,d}$  の積和により、 $\alpha_{c,d}$  を

$$\alpha_{c,d} = \sum_{\theta,\phi} \beta_{\theta,\phi,c} \gamma_{\theta,\phi,d} \sin \theta \quad (3)$$

のように計算する。なお、全方位スペクトル光源分布を球座標  $(\theta, \phi)$  に関して等間隔にサンプルするときは、面積要素  $\sin \theta$  を掛ける必要がある。

### 3. 実験

#### 3.1 概要

光源装置の光源色の数  $C$  と光源方向の数  $D$  を変えたときに生成される画像の精度を評価することで、拡散反射物体と鏡面反射物体の各々について、写実的な画像を生成するのに必要な光源数を調べた。光源色については、 $C = 3, 4, 9, 16$  とし、400[nm] から 700[nm] の範囲に等間隔に配置した狭帯域のガウス分布に従う分光強度を仮定した。なお、ガウス分布の標準偏差は、実際の LED のデータに基づいて 8.86[nm] とした。光源方向については、正二十面体およびその分割により得られる頂点を用いて、 $D = 12, 42, 92, 162$  とした。

図 1 に、実験に用いた全方位スペクトル光源分布 [5] を示す。この光源分布には、鋭いピークを持つ蛍光灯やなだらかな分布を持つ屋外からの入射光などが含まれる。IBR に

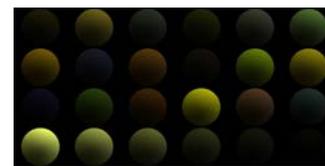


図 2 拡散反射球の真値画像。

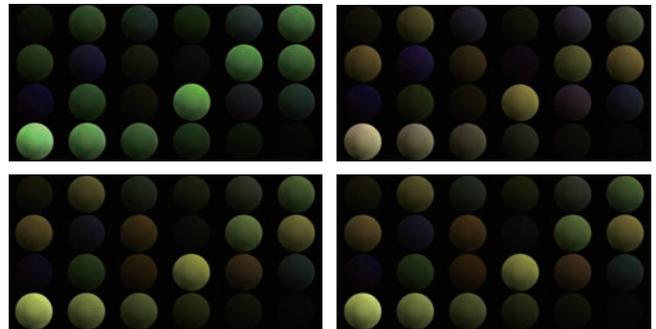


図 3 光源方向の数  $D = 12$  のときに光源色の数を変えたときの拡散反射球の生成画像 :  $C = 3$  (左上), 4 (右上), 9 (左下), および, 16 (右下)。

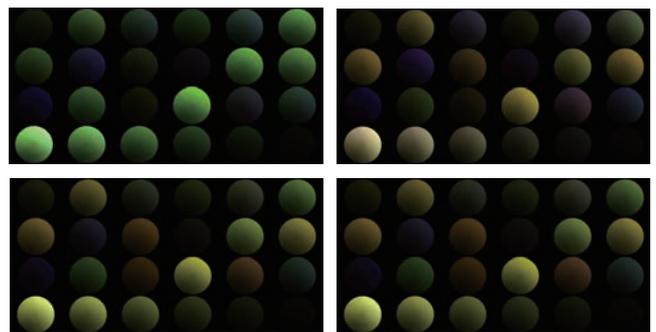


図 4 光源方向の数  $D = 42$  のときに光源色の数を変えたときの拡散反射球の生成画像 :  $C = 3$  (左上), 4 (右上), 9 (左下), および, 16 (右下)。

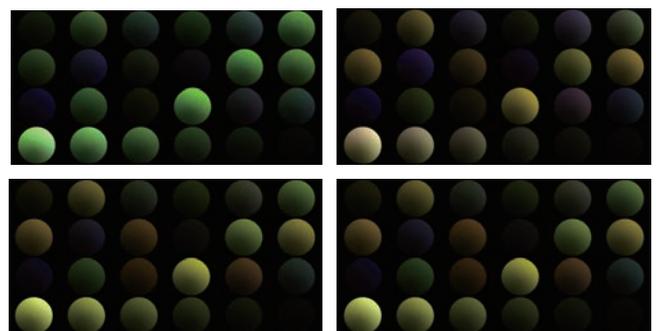


図 5 光源方向の数  $D = 92$  のときに光源色の数を変えたときの拡散反射球の生成画像 :  $C = 3$  (左上), 4 (右上), 9 (左下), および, 16 (右下)。

基づいて生成された画像の精度を評価するために、 $L^*a^*b^*$  色空間における真値画像との色差 [7] を計算した。

#### 3.2 拡散反射物体

Lambert モデルに従う 24 色の拡散反射球の真値画像を

表 1 光源色と光源方向の数を変えたときの拡散反射球の色差.

色\方向	12	42	92	162
3	29.28	29.18	29.16	29.15
4	16.63	16.22	16.18	16.16
9	4.94	3.92	3.73	3.67
16	4.55	3.29	3.06	2.98

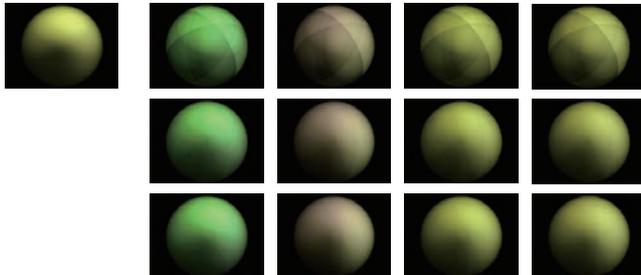


図 6 鏡面反射球 ( $n = 1$ ) の真値画像 (左上) と生成画像 : 左から順に  $C = 3, 4, 9, 16$ , 上から順に  $D = 12, 42, 92$ .

表 2 光源色と光源方向の数を変えたときの鏡面反射球の色差 ( $n = 1$ ).

色\方向	12	42	92	162
3	85.50	84.60	84.44	84.42
4	50.85	50.43	50.16	50.13
9	14.68	11.90	11.41	11.27
16	13.25	10.23	9.57	9.37

図 2 に, IBR に基づく生成画像を図 3 ( $D = 12$ ), 図 4 ( $D = 42$ ), および, 図 5 ( $D = 92$ ) に示す. 表 1 に真値画像と生成画像の色差を示す.

定性的にも定量的にも, 光源色を 4 色から 9 色に増やすことで精度が大幅に向上していることが分かる. また, 光源方向を 42 方向から増やしてもあまり効果がないことも分かる. これは, 拡散反射が鈍い反射であり, 光源の角度分布の高周波数成分が寄与しないためであると考えられる. Sato ら [6] は, 標本化定理に基づいて, Lambert モデルに従う凸物体に対して, 36 方向の光源が必要であることを示している. 本実験の 42 方向という結果は, 光源の配置が最適でないことを考慮すると, 36 方向という理論的な知見と矛盾しないと考えられる.

### 3.3 鏡面反射物体

Phong モデルに従う鏡面反射球について, 光源色と光源方向の数を変えたときの生成画像と真値画像の色差を求めた. Phong モデルの輝度は, 正反射方向と視線方向のなす角度を  $\psi$  とすると,  $\cos^n \psi$  で与えられる. ここで  $n$  は反射の鋭さを決める指数であり,  $n$  が大きいほど鋭い反射になる.

図 6 と表 2 に,  $n = 1$  のときの真値画像と生成画像, および, 色差を示す. 拡散反射球の場合と同様に, 4 色から 9 色に増やすことで精度が大幅に向上する一方で, 光源方

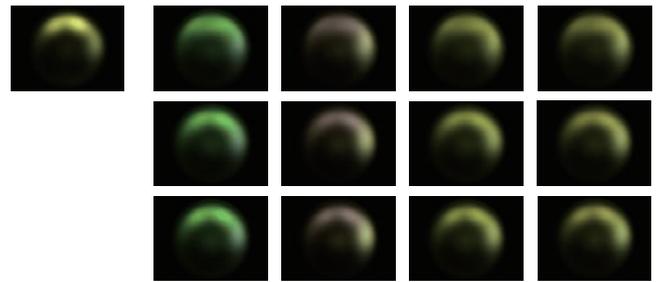


図 7 鏡面反射球 ( $n = 10$ ) の真値画像 (左上) と生成画像 : 左から順に  $C = 3, 4, 9, 16$ , 上から順に  $D = 42, 92, 162$ .

表 3 光源色と光源方向の数を変えたときの鏡面反射球の色差 ( $n = 10$ ).

色\方向	12	42	92	162
3	90.63	87.25	86.83	86.70
4	61.09	54.93	54.24	53.96
9	31.49	18.05	16.25	15.81
16	31.50	17.38	15.27	14.70

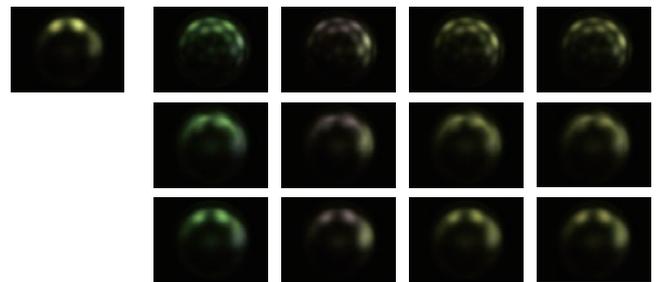


図 8 鏡面反射球 ( $n = 30$ ) の真値画像 (左上) と生成画像 : 左から順に  $C = 3, 4, 9, 16$ , 上から順に  $D = 42, 92, 162$ .

表 4 光源色と光源方向の数を変えたときの鏡面反射球の色差 ( $n = 30$ ).

色\方向	12	42	92	162
3	102.53	90.52	88.63	87.95
4	82.60	60.46	57.42	56.24
9	65.32	27.24	20.16	18.00
16	65.52	27.09	19.64	17.20

向を 42 方向から増やしてもあまり効果がないことも分かる. 光源方向に関しては,  $n = 1$  のときは拡散反射と同じ鈍い反射であるからだと考えられる.

図 7 と表 3 に,  $n = 10$  のときの真値画像と生成画像, および, 色差を示す. 定性的にも定量的にも, 必要な光源色の数は  $n = 1$  のときと同じであることが分かる. 一方で, 光源方向に関しては, 42 方向から 92 方向に増やしたときの精度も改善していることが分かる. これは,  $n = 1$  のときと比べて鋭い反射になるためであると考えられる.

図 8 と表 4 に,  $n = 30$  のときの真値画像と生成画像, および, 色差を示す. 光源色の数の変化による精度の変化は, これまでと同じ傾向がみられる. 光源方向に関しては,  $n = 30$  のときはさらに鋭い反射になるため, 42 方向のとき

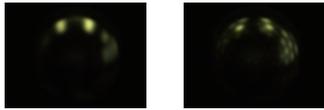


図 9 鏡面反射球 ( $n = 100$ ) の真値画像 (左) と  $C = 16$ ,  $D = 162$  のときの生成画像 (右).

に明らかなアーティファクトが観察され、92 方向から 162 方向に増やしたときの精度も改善していることが分かる。

以上のことから、 $n$  が大きくなるにつれて、つまり、鏡面反射が鋭くなればなるほど必要な光源方向の数が増加することが分かる。例えば、 $n = 10$  のとき 92 方向、 $n = 30$  以上になると 162 方向以上の光源が必要であると考えられる。さらに図 9 から分かるように、 $n = 100$  になると 162 方向の光源を用いても明らかなアーティファクトが観察される。このことから、 $n$  が大きい場合は膨大な数の光源が必要になることが分かる。

#### 4. むすび

本研究では、様々な色・方向の光源下で撮影された実画像を組み合わせる Image-Based Rendering (IBR) の枠組みで、任意照明環境における写実的画像生成に取り組んだ。具体的には、多波長・多方向光源下で撮影された実画像を、全方位スペクトル光源分布に基づいて組み合わせることで、色再現性の向上を目指した。シミュレーション実験を行い、拡散反射物体と鏡面反射物体の各々について、写実的な画像を生成するのに必要な多波長・多方向光源の数を実験的に明らかにした。

本稿で提案した線形結合 (線形補間) に基づく枠組みでは、鋭い鏡面反射を扱うために膨大な数の基底画像が必要になってしまう。非線形補間 [3] を用いた光源数の削減、および、蛍光物体への拡張は今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 (No. 25280057, および, No. 16H01676) の助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] P. Debevec, “Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography”, In Proc. ACM SIGGRAPH 1998, pp.189–198, 1998.
- [2] P. Debevec, A. Wenger, C. Tchou, A. Gardner, J. Waese, and T. Hawkins, “A lighting reproduction approach to live-action compositing”, In Proc. ACM SIGGRAPH 2002, pp.547–556, 2002.
- [3] M. Fuchs, H. Lensch, V. Blanz, and H.-P. Seidel, “Superresolution reflectance fields: synthesizing images for intermediate light directions”, In Proc. EG2007, pp.447–456, 2007.
- [4] M. Kitahara, T. Okabe, C. Fuchs, and H. Lensch, “Simultaneous estimation of spectral reflectance and normal from a small number of images”, In Proc. VISAPP2015, pp.303–313, 2015.
- [5] M. Miura, T. Okabe, and I. Sato, “Is spectral lighting

environment necessary for photorealistic rendering?”, In Proc. VRCAI 2015, 2015.

- [6] I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, “Appearance sampling of real objects for variable illumination”, IJCV, 75(1), pp.29–48, 2007.
- [7] J. Schanda, Colorimetry: understanding the CIE system, John Wiley & Sons, 2007.