

半透明物体の分光学的特性のモデリング

平安 奈苗 北原 雅啓 岡部 孝弘
九州工業大学 情報工学部/情報工学府

1 はじめに

不透明物体に入射した光は同じ位置から出射するため、不透明物体の反射特性は、入射光の方向（2自由度）と出射光の方向（2自由度）に依存する4自由度のBRDF（双方向反射率分布関数）で記述される。一方、半透明物体に入射した光は、表面下散乱により、一般に入射位置とは異なる位置から出射する。半透明物体の反射特性は、入射光の方向と出射光の方向に加えて、それらの位置（各々2自由度）に依存する8自由度のBSSRDF（双方向散乱面反射率分布関数）で記述される。

透明度の低い半透明物体については、物体内部で多重散乱が起こるため、BSSRDFは入射光と出射光の方向に依存しなくなる。このとき、表面下散乱により入射光がにじむ様子は、ぼけカーネルを用いた畳み込みで表現できることが知られている。したがって、ぼけカーネルを計測・推定することは、半透明物体の形状復元 [1, 2] や写実的画像生成などにおいて重要である。

一般に、レイリー散乱などの散乱の強度は、散乱を起こす粒子の大きさや光の波長に依存することが知られている。したがって、ぼけカーネルは、被写体の材質だけでなく光源の色（波長）にも依存する。ところが、白色光源を用いた従来研究 [1, 2] では、ぼけカーネルの波長依存性を十分に考慮しているとは言えない。例えば、特定の波長の光を吸収してより長い波長の光を放出する蛍光を捉えることはできない。

そこで本研究では、半透明物体の分光学的特性を明らかにするために、様々な波長でぼけカーネルを計測する。具体的には、不透明物体と半透明物体に様々な単一波長のレーザー光を入射したときの画像を手掛かりにして、逆畳み込み演算により、各波長におけるぼけカーネルを求める。また、得られたぼけカーネルの写実的画像生成への応用についても紹介する。

2 ぼけカーネルの計測

図1のように、平面状の不透明物体と半透明物体のそれぞれにレーザー光を入射したときの画像を撮影する。ホモグラフィ変換を用いて、各々の画像を被写体と正対する方向（真上）から観察したときの画像に変換する。

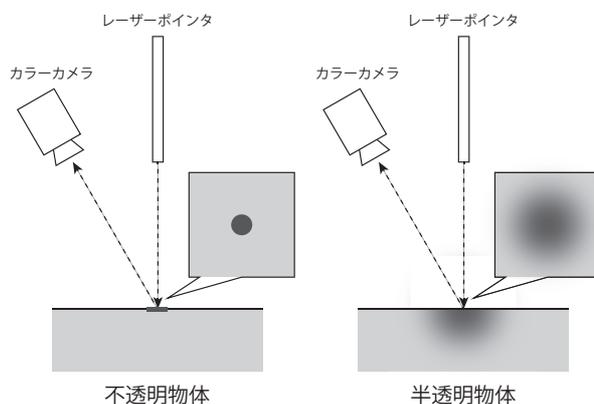


図1: ぼけカーネルの計測方法. 不透明物体と半透明物体にレーザー光を入射したときの画像をカラーカメラを用いて撮影。

変換後の不透明物体の画像と半透明物体の画像をそれぞれ $i(x, y)$ と $j(x, y)$ とすると、半透明物体の画像は、不透明物体の画像とぼけカーネル $k(x, y)$ の畳み込み

$$j(x, y) = i(x, y) * k(x, y) \quad (1)$$

で表現される。ここで $*$ は畳み込みを表す演算子である。

式(1)の両辺をフーリエ変換すると、畳み込みのフーリエ変換はフーリエ変換の積で表現されることから、

$$J(u, v) = I(u, v)K(u, v) \quad (2)$$

が得られる。ここで $I(u, v)$, $J(u, v)$, および $K(u, v)$ は、それぞれ $i(x, y)$, $j(x, y)$, および $k(x, y)$ のフーリエ変換である。

式(2)から、ぼけカーネルのフーリエ変換は

$$K(u, v) = \frac{J(u, v)}{I(u, v)} \quad (3)$$

のように計算されるので、これを逆フーリエ変換することで、ぼけカーネルを求めることができる。本研究では、入射光の波長ごとに、上記のようにしてぼけカーネルを求める。

3 実験

実験では、レーザーポインタの光を樹脂製の消しゴムに入射したときの画像を撮影した。光の波長は650nm、

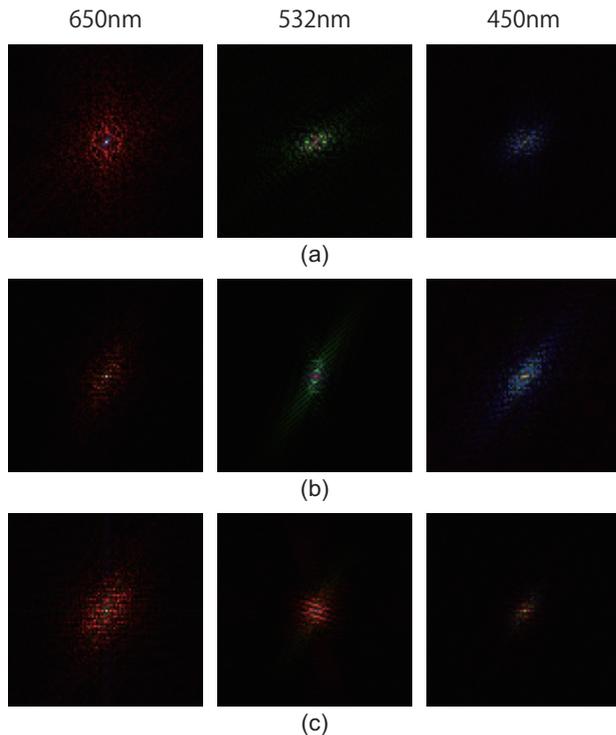


図 2: 計測したぼけカーネル. (a) 白色の消しゴム, (b) 青色の消しゴム, および, (c) オレンジ色の消しゴム. 左から順に, 入射光の波長が 650nm, 532nm, および, 450nm のときの計測結果.

532nm, および, 450nm の 3 種類, 消しゴムは白色, 青色, および, オレンジ色の 3 種類を試した. 画像に含まれるノイズを除去するために, 各条件で 100 枚の画像を撮影してその平均を取った.

図 2 に, 3 つの被写体について, 3 つの波長で計測したぼけカーネルを示す. ここでは, 撮影画像の RGB バンドごとに求めたぼけカーネルを重ね合わせて, カラー画像で表示している.

(a) の白色の消しゴムに関しては, 入射光の色とぼけカーネルの色が一致しており, 650nm におけるぼけカーネルの拡がりも最大であることが分かる. (b) の青色の消しゴムに関しても, 入射光の色とぼけカーネルの色が一致しており, 物体色に近い 450nm におけるぼけカーネルの拡がりも最大であることが分かる. (c) のオレンジ色の消しゴムに関しても, 物体色に近い 650nm におけるぼけカーネルの拡がりも最大であることが分かる. 一方, 入射光の色とぼけカーネルの色が一致しておらず, 532nm と 450nm の光を入射したときに, より長波長の赤色の光が射出していることから, この消しゴムには蛍光物質が含まれていると考えられる. 以上のことから, 様々な単一波長の入射光を用いて, 蛍

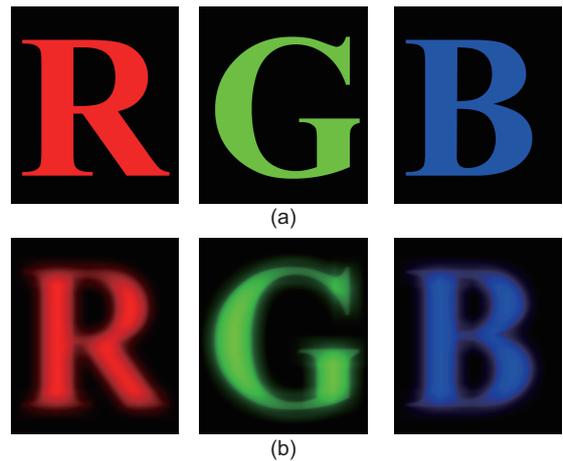


図 3: 照明シミュレーション. (a) 白色の不透明物体, および, (b) 白色の消しゴムに R (650nm), G (532nm), B (450nm) の文字を投影したときの画像.

光を含む半透明物体の分光学的特性を計測できることが分かる.

4 応用

前節で計測したぼけカーネルを用いて, 簡単な照明シミュレーションを行った. 具体的には, 被写体に 650nm の光で R, 532nm の光で G, および, 450nm の光で B の文字を投影したときの画像を, ぼけカーネルを用いて生成した.

図 3 に結果を示す. 主観的な評価ではあるが, (a) 白色の不透明物体に投影したときの生成画像と比較して, (b) 白色の消しゴムに投影したときの生成画像が, 半透明の質感を持つことが分かる.

5 むすび

本研究では, 透明度の低い半透明物体のぼけカーネルを様々な単一波長で計測して, ぼけカーネルが被写体の材質だけでなく光源の色にも依存する様子を調べた. より複雑な物体・シーンの照明シミュレーションや形状復元への応用は, 今後の課題である.

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費 JP16H01676 の助成を受けた.

参考文献

- [1] B. Dong, K. Moore, W. Zhang, and P. Peers, "Scattering parameters and surface normals from homogeneous translucent materials using photometric stereo", In Proc. IEEE CVPR2014, pp.2299–2306, 2014.
- [2] C. Inoshita, Y. Mukaigawa, Y. Matsushita, Y. Yagi, "Surface normal deconvolution: photometric stereo for optically thick translucent objects", In Proc. ECCV2014, pp.346–359, 2014.