

パターン光投影による半透明物体の反射率と散乱特性の推定

田中 奈津美 岡部 孝弘

九州工業大学 情報工学部

1 はじめに

半透明物体では、入射光と同一の点から出射する反射成分と、一般に入射光とは異なる点から出射する散乱成分の両方が観察される。透明度の低い半透明物体において、入射光が散乱によりにじむ様子は、不透明物体の見えに点拡がり関数を畳み込むことで表現できることが知られている [1]。半透明物体上で観察される反射成分と散乱成分を分離して、反射率と点拡がり関数を推定することは、半透明物体に対する形状復元の精度向上や質感編集などにおいて重要である。

Inoshita ら [2] は、細い光線で物体表面を照らしたときの画像から、点拡がり関数を推定している。ところが、この手法では、入射光と同一の点から出射する散乱成分と反射成分を区別することができない。そのため、得られる点拡がり関数には反射成分の寄与も含まれる。Nayar ら [3] は、高周波パターン光を物体に投影して、直接成分（反射成分）と大域成分（散乱成分）を分離している。ところが、この手法で得られるのは被写体を一様に照明したときの散乱成分であり、高周波成分が失われているために、点拡がり関数を推定することは困難である。

そこで本研究では、パターン光の投影により半透明物体の反射率と点拡がり関数の両方を推定する。具体的には、高周波パターン光の投影による直接・大域成分の分離と細い光線の投影による点拡がり関数の推定を組み合わせる。また、推定した反射率と散乱特性を質感編集に用いて、半透明物体の質感編集を実現する。

2 提案手法

2.1 直接・大域成分の分離

光源に照らされたシーンの画像は、拡散反射や鏡面反射などによる直接成分と、散乱などによる大域成分で構成される。直接・大域成分を分離し、半透明物体の直接成分を取り出すことで反射成分を得る。

半透明物体に、ある白と黒のチェッカーパターンとその明るさを反転させたチェッカーパターンの2枚を投影し撮影する。画像の各画素において、白が照射されているときの画素値を L^+ 、黒が照射されているときの画素値を L^- とすると、画像の p 番目の画素の値は

$$\begin{aligned} L_p^+ &= D_p + \frac{1}{2}G_p \\ L_p^- &= \frac{1}{2}G_p \end{aligned} \quad (1)$$

で表される [3]。ここで、 D_p と G_p は各画素における直接成分と大域成分の画素値を表す。式 (1) に各画素の画素値を代入した連立方程式を解くことで、半透明物体の直接・大域成分の明るさが得られる。反射率が既知である不透明物体を照らしたときの画素値と、半

透明物体の直接成分の画素値の比によって半透明物体の反射率を推定する。

2.2 点拡がり関数の推定

半透明物体における入射光の表面下散乱の様子は、不透明物体の画像に点拡がり関数を畳み込むことで近似することができる。半透明物体の画像より、前節で推定した反射成分を除去する。不透明物体の画像と半透明物体の散乱成分の画像をそれぞれ $i(x, y)$, $j(x, y)$ とすると、 $j(x, y)$ は $i(x, y)$ と点拡がり関数 $k(x, y)$ の畳み込み

$$j(x, y) = i(x, y) * k(x, y) \quad (2)$$

で表される。ここで、 $*$ は畳み込みを表す演算子である。 $i(x, y)$, $j(x, y)$, $k(x, y)$ のフーリエ変換をそれぞれ $I(u, v)$, $J(u, v)$, $K(u, v)$ とすると、畳み込みのフーリエ変換はフーリエ変換の積で表されることから、式 (2) の両辺をそれぞれフーリエ変換すると

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

が導かれる。式 (3) から、ぼけカーネルのフーリエ変換 $K(u, v)$ は

$$K(u, v) = \frac{J(u, v)}{I(u, v)} \quad (4)$$

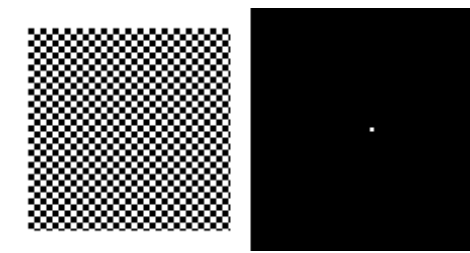
と求められる。 $I(u, v)$ にゼロ交差が含まれている場合、 $K(u, v)$ は発散し、正しい結果が得られない。そこで、Wiener フィルタを用いて、式 (4) を次の式のように変形する。

$$K(u, v) = \frac{1}{I(u, v)} \frac{I^*(u, v)}{|I(u, v)|^2 + c} J(u, v) \quad (5)$$

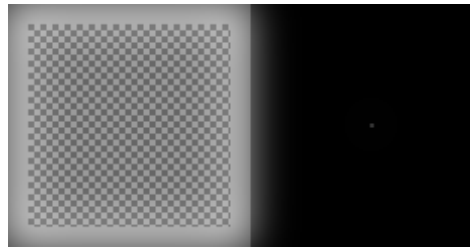
ここで、 $I^*(u, v)$ は $I(u, v)$ の複素共役を表し、 c は定数とする。 $K(u, v)$ を逆フーリエ変換することにより点拡がり関数を推定する。

3 合成画像を用いた実験

実験では、パターン光そのものを不透明物体の画像とした。また、半透明物体は散乱成分と反射成分を持つことから、パターン光を Gaussian フィルターでぼかした画像と、不透明物体の画像の定数倍を足し合わせた画像を半透明物体の画像とした。図 1 に、CG で作成した半透明物体と不透明物体の画像を示す。Gaussian フィルターの標準偏差を 10 画素とし、反射成分と散乱成分の比率を 1:4 とし半透明物体の画像を作成した。反射散乱成分の分離のために、パターンの明るさを反転させた場合の画像も用意し、実験を行った。まず、二つの画像を使用して反射・散乱成分を分離し、半透明物体の画像から反射成分を除去したのから点拡がり関数を推定した。次に、得られた反射成分と、不



(a) 不透明物体



(b) 半透明物体

図 1: CG 画像



(a) 反射成分

(b) 散乱成分

図 2: 反射・散乱成分の分離

透明物体の画素値の比から半透明物体の反射率を推定した。このとき、不透明物体の反射率は1とした。

図に、反射・散乱成分の分離結果を示す。また、反射成分の画素値と不透明物体の画像における白い部分の画素値(255)との比より、反射率 $\rho=0.200$ と推定された。半透明物体の画像作成時に反射・散乱成分の比率を1:4としたことより、定量的に良好な結果が得られたといえる。図3に、半透明物体の散乱成分と点拡がり関数の推定結果、またその真値である Gaussian フィルターを示す。推定した点拡がり関数と真値との比較により、定性的に良好な結果が得られたといえる。

4 質感編集への応用

前節で推定した点拡がり関数と反射率を用いて、半透明物体の質感編集に応用した。図4に、推定した点拡がり関数を変形した場合の画像(d)(g)とその点拡がり関数を畳み込んだ画像(e)(h)、(d)(e)の点拡がり関数と変更した反射率を使用した画像(f)(i)を示す。具体的には、反射率は0.9とした。点拡がり関数の形や反射率を変えることで、物体の見えが変わることがわかる。

5 まとめ

本稿では、パターンを光を投影したときの不透明物体と半透明物体の見えから、半透明物体の反射率と散

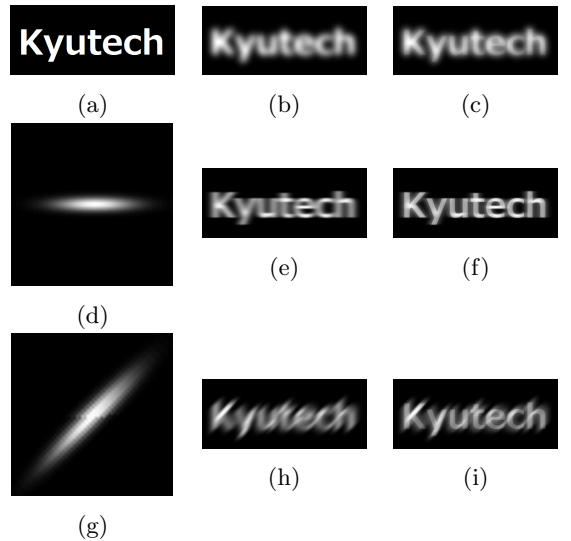


(a) 散乱成分

(b) 推定した点拡がり関数

(c) 点拡がり関数の真値

図 3: 点拡がり関数の推定



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

図 4: 応用シミュレーション. (a) 作成したCG画像 (b) 推定した点拡がり関数を畳み込んだ画像と (c) その反射率を変更した画像 (d)(g) 推定した点拡がり関数を変形させた点拡がり関数 (e)(h) 変形させた点拡がり関数を畳み込んだ画像と (f)(i) その反射率を変更した画像

乱特性の両方を推定する手法を提案した。特に、パターン光を用いてシーンの反射・散乱成分を分離することで、反射成分を含まない点拡がり関数を推定した。実画像実験、ならびに、非一様な反射率・散乱特性を持つ物体への拡張は、今後の課題である。

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

参考文献

- [1] A. Munoz, J. Echevarria, F. Seron, and D. Gutierrez, "Convolution-based bimationulation of homogeneous subsurface scattering," Computer Graphics Forum, Vol.3, No.8, pp.2279-2287, 2011.
- [2] C. Inoshita, Y. Mukaigawa, Y. Matsushita, and Y. Yagi, "Surface normal deconvolution: photometric stereo for optically thick translucent objects," In Proc. ECCV2014, pp.346-359, 2014.
- [3] S. Nayar, G. Krishnan, M. Grossberg, and R. Raskar, "Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination," In Proc. ACM SIGGRAPH2006, pp.935-944, 2006.