

パターン光投影による半透明物体の反射・散乱特性の頑健な推定

柴田 青 岡部 孝弘

九州工業大学情報工学部

1 はじめに

半透明物体においては、入射位置と同じ位置から出射する反射光と、一般に入射位置とは異なる位置から出射する表面下散乱光の両方が観察される。不透明物体に近い半透明物体では、これらの光学的特性はまとめて点拡がり関数により近似的に記述される。このような反射・散乱特性を推定することは、半透明物体の形状復元や画質改善、質感編集等において大変重要である。

Nayar ら [1] は、チェッカーパターンなどの高周波パターンを被写体に投影することで、反射成分と表面下散乱成分を分離する手法を提案している。しかし、この手法では被写体を一様に照らしているため、点光源に対する応答を示す点拡がり関数を推定するには適していない。一方、Cuccia ら [2] は、正弦波パターンを投影することで点拡がり関数を推定する手法を提案している。しかし、この手法では点拡がり関数に含まれている反射成分を分離することができない。

そこで本稿では、プロジェクタ-カメラシステムにより、反射光と表面下散乱光の各々の光学的特性を獲得するための手法を提案する。具体的には、高周波パターン光の投影による反射成分と表面下散乱成分の分離と、正弦波パターン光の投影による点拡がり関数の推定を組み合わせることで、半透明物体の反射率および反射成分を含まない点拡がり関数を頑健に推定する。

2 提案手法

2.1 反射成分と表面下散乱成分の分離

白と黒のチェッカーパターンとその反転のチェッカーパターンの2枚を作成し、それらのパターンを投影した半透明物体の画像を撮影する。画像の各画素において、大きい方の画素値 L^+ と小さい方の画素値 L^- は、

$$L^+ = L_d + \frac{1}{2}L_g, \quad (1)$$

$$L^- = \frac{1}{2}L_g, \quad (2)$$

のように表せる。ここで L_d と L_g は、シーン中の直接成分と大域成分である。よってこれらの連立方程式を解くことで、シーン中の直接成分と大域成分を求められる [1]。直接成分には拡散反射や鏡面反射、大域成分には表面下散乱が含まれているため、これにより反射成分と表面下散乱成分を分離することができる。

2.2 点拡がり関数の推定

点拡がり関数を推定するために、まず変調伝達関数 (MTF) の推定を行う。MTF はある空間周波数におけるコントラストの減少率のことで、値が1に近いほどボケの程度が小さくなる。また、MTF は一般的に点拡がり関数をフーリエ変換したものの絶対値に等しくなる。同じ空間周波数で位相が $0, 2\pi/3, 4\pi/3$ の3つの正弦波パターンを投影して撮影した画像から、その空間周波数におけるある画素のコントラスト減少率は、

$$M = \frac{\sqrt{2}}{3} [(a-b)^2 + (b-c)^2 + (c-a)^2]^{1/2} \quad (3)$$

で求められる。ここで、 a, b, c は位相をシフトした画像における注目の画素値である。また、各空間周波数におけるコントラスト減少率を求めることで MTF が獲得でき、それを逆フーリエ変換することで点拡がり関数が推定できる。

2.3 反射・散乱特性の推定

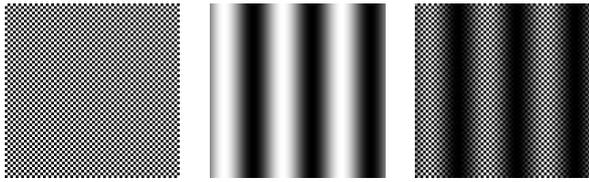
これらの原理をもとに、チェッカーパターンと正弦波パターンを組み合わせたものを投影することで、半透明物体の反射率および点拡がり関数の推定を行う。図1はチェッカーパターンと正弦波パターンを組み合わせたパターンである。実際には、白と黒を反転させた2枚のチェッカーパターンと位相をずらした3枚の正弦波パターンの組み合わせにより6枚の複合パターンを用いる。

これらの6枚のパターン画像を用いて、まずシーンを反射成分と表面下散乱成分に分離する。その後、反射成分を用いて反射率を推定し、表面下散乱成分に Cuccia ら [2] の手法を用いることで反射成分を含まない点拡がり関数の推定を行う。

このパターン作成からコントラスト減少率推定までの一連の手法を各空間周波数ごとに行うことで、空間周波数とコントラスト減少率の関係を表す MTF が得られる。そして、得られた MTF を逆フーリエ変換することで反射成分を含まない点拡がり関数を推定する。

3 合成画像を用いた実験

反射成分と表面下散乱成分をもつ合成画像を作成し実験を行った。この手法が一様でない反射・散乱特性をもつ物体にも適用できることを示すため、上部が反射率0.5でぼけが比較的小さく、下部が反射率0.3でぼけが比較的大きい物体を仮定し実験を行った。



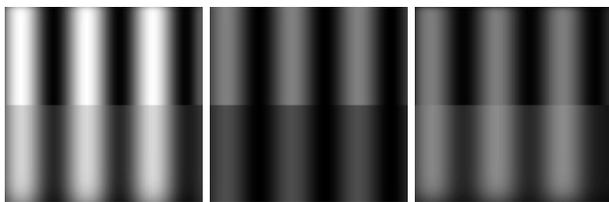
(a) チェッカーパターン (b) 正弦波パターン (c) 複合パターン

図 1: 使用するパターン

まず、パターンを投影した6枚の画像のうち、位相等しくチェッカーの明るさが反転された2枚の画像3セットを用いて反射成分と表面下散乱成分の分離を行った。図2に推定した反射成分と表面下散乱成分を示す。この結果より、物体上部は物体下部に比べ反射成分がより多く観察され、表面下散乱成分は物体下部の方がより多く観察されることが分かる。

その後、分離した反射成分と表面下散乱成分を用いて、それぞれの成分のMTFを求めた。図3に各空間周波数における反射率およびMTFの推移を示す。(a)は反射成分のMTFを表した図である。どの空間周波数においても物体上部の反射率はおよそ0.5で物体下部の反射率はおよそ0.3と分かるので、比較的良好に反射率が推定できていることが確認できた。また、(b)は表面下散乱成分のMTFであり、物体の上部も下部もガウス分布のような結果が得られた。また、物体上部は物体下部に比べ滑らかな曲線になっており、ボケが小さいことが確認できた。

最後に、この表面下散乱成分のMTFを逆フーリエ変換することで反射成分を含まない点拡がり関数を獲得した。図4に推定した点拡がり関数を示す。(a)、(c)はそれぞれ物体上部および物体下部に畳み込んだ点拡がり関数であり、(b)、(d)はそれぞれ推定した物体上部および物体下部の点拡がり関数である。この結果より、反射成分を含まない点拡がり関数が比較的良好的に推定できていることが定性的に確認できた。

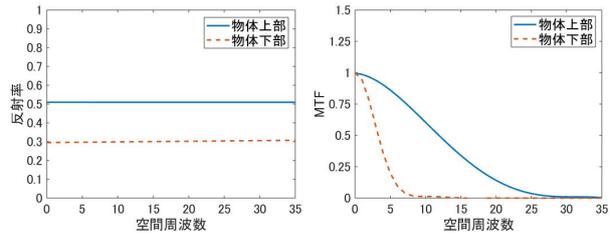


(a) 元のシーン (b) 推定した反射成分 (c) 推定した表面下散乱成分

図 2: 反射成分と表面下散乱成分の分離

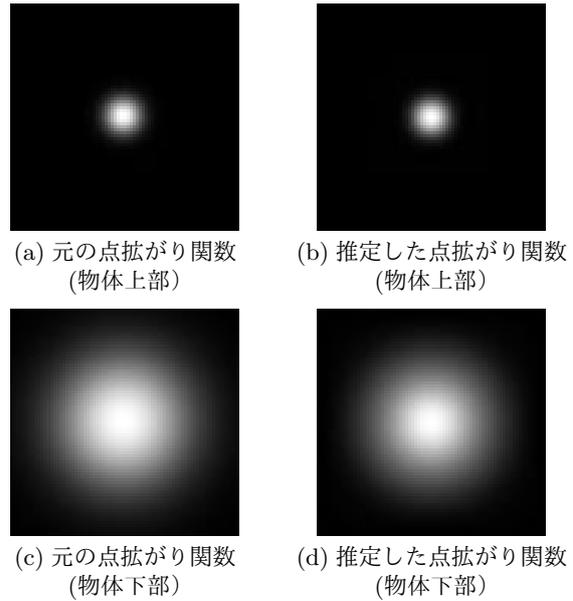
4 まとめ

本稿では、プロジェクタ-カメラシステムにより、反射光と表面下散乱光の各々の光学的特性を獲得するための手法を提案した。具体的には、高周波パターンと正弦波パターンを投影することで、半透明物体



(a) 反射成分の MTF (b) 表面下散乱成分の MTF

図 3: 各周波数における反射率および MTF の推移



(a) 元の点拡がり関数 (物体上部) (b) 推定した点拡がり関数 (物体上部) (c) 元の点拡がり関数 (物体下部) (d) 推定した点拡がり関数 (物体下部)

図 4: 反射成分を含まない点拡がり関数の推定

の反射率および点拡がり関数を頑健に推定した。特に、シーン中の反射成分と表面下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の推定ができた。また、この手法が非一様な反射・散乱特性を持つ物体にも用いることができることを示し、各画素ごとに反射率および点拡がり関数を得ることができるという有用性を示した。実画像での実験および異方的点拡がり関数の推定への拡張などは今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP18H05011, および、JP17H01766 の助成を受けた。

参考文献

[1] 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. CVPR2010, pp.1157-1164, 2010.

[2] D. Cuccia, F. Bevilacqua, A. Durkin, and B. Tromberg, "Modulated imaging: quantitative analysis and tomography of turbid media in the spatial-frequency domein", Opt. Lett., Vol.30, No.11, pp.1354-1356, 2005.