Vol.2020-CG-179 No.3
2020/9/19

照明パラメータの最適化を用いた半透明物体の質感再現

工藤 寛樹[1,a)]　土橋 宜典[1,b)]

概要：CG を用いて目的の質感を表現するためには，物体の材質や照明に関するパラメータを適切に設定する必要がある．しかし，そのためにはパラメータや輝度計算アルゴリズムに関する知識と経験が必要となる上，様々なパラメータを設定して結果を確認しながら調整するという試行錯誤が避けられない．CG 画像の生成は計算コストが高いため，この作業には膨大な手間と時間がかかる．特に，半透明物体は物体内部での複雑な散乱現象を計算しなければならない．そこで，本研究では，目的の質感を疑似的に表現するための手法を提案する．目的の質感は画像として与えられるものとし，3 次元物体の周辺に配置した光源環境を最適化する．これにより，質感表現に関する知識や経験，試行錯誤を不要とする．光源環境の最適化には微分レンダラを使用する．

キーワード：半透明物体，インバースレンダリング，照明環境，微分レンダリング

Abstract: A realistic image of a virtual object can be synthesized by using computer graphics techniques. It is often requested to produce the desired visual appearance of the object for entertainment applications such as movies and video games. To meet such requirements, we often adjust the material and the lighting parameters that reproduce the desired appearance. However, this task often requires us sufficient knowledge on the parameters and the computation algorithms used for calculating the intensities of the object. For a translucent object, however, the appearance is determined through the complicated optical phenomena called sub-surface scattering, which makes it difficult to predict the appearance obtained from a certain set of the parameters. Therefore, a tedious trial-and-error process is inevitable. Furthermore, the computational cost for computing the intensity is very expensive, making the parameter adjustment process extremely time-consuming. We address this problem and propose a method for generating the desired appearance automatically by optimizing the lighting environment. We use a derivative renderer for the optimization.

Keywords: Translucent object, Inverse rendering, lighting environment, derivative rendering.

1. まえがき

半透明物体は現実世界のあらゆるところに存在しており，典型的な例としては皮膚や大理石，牛乳などがある．これらの半透明物体の特徴的な質感はいずれも表面下散乱によるものである．コンピュータグラフィックス（CG）において，このような半透明物体の質感の再現は重要な研究課題の一つとなっている．半透明物体では表面に入射した光は内部で散乱したのちに再び表面から放出される．半透明物体の質感をリアルに再現するためには，このような散乱過程を正確に計算する必要がある．

映画やゲームなどへの CG 応用では，与えられた目的の質感を再現することが求められる．多くの場合，材質パラメータを調整することで目的の質感を再現する．そのためには材質の反射率や透過率といった各パラメータの詳細や輝度計算アルゴリズムについての知識が要求される．半透明物体の場合は，光の散乱に関する材質情報（密度や位相関数、アルベド、減衰率など）やそれらに基づく光の多重散乱の計算について熟知していることが望ましい．しかし，そのような知識を持つ場合であっても，どのパラメータを調整すれば目的の結果が得られるかを予想することは困難で，適切なパラメータを見つけるために繰り返し出力を確認しながら調整する試行錯誤的な作業は避けられない．半透明物体の輝度計算には多重散乱の計算が含まれるため，計算コストが高く，このようなパラメータの調整作業には膨大な手間が必要となる．さらに，アーティストやデザイナによって与えられる目的の質感に物理的な整合性があるとは限らず，半透明物体の材質情報を調整するだけで再現できない場合もありうる．

本研究では、これらの問題を解決するため、半透明物体の材質パラメータではなく、光源環境を最適化する手法を

1 北海道大学
Hokkaido Uniersity
a) kudo@ime.ist.hokudai.ac.jp
b) doba@ime.ist.hokudai.ac.jp

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

提案する。これによって、材質パラメータの調整だけでは表現できない質感の表現を可能とする。ユーザによって与えられる目的の質感を持つ画像から自動的に光源環境を推定することで，知識や経験のないユーザであっても容易に目的の質感を再現できる．

半透明物体の質感を再現する手法はこれまでにも研究されてきた．Khan らや Todo らは実写画像における物体の質感を編集する手法を提案した [1], [2]．しかし，これらは画像の編集であり，3 次元物体の質感を調整することはできず，カメラ位置や照明条件を変更した画像を生成することはできない．Adolfo らは照明パラメータや形状が不明な条件の下で，単一画像から散乱パラメータを推測する手法を提案した [3]．また，Che らは同様な条件の中で深層学習を利用することにより，さらに高精度に散乱パラメータを推定する手法を提案した [4]．これらの手法が推定するのはいずれも半透明物体が持つ散乱パラメータである．そのため，散乱パラメータのみでは再現できない質感を表現することはできない．我々は照明パラメータを推定することでこの問題を解決する．本稿では一枚の画像から照明パラメータを推定する逆レンダリング問題を解き，目的の質感を再現する実験を行った報告をする．

2. 関連研究

質感の編集とパラメータの逆問題に関する関連研究について議論する．

2.1 質感の編集

目的の質感を持った物体を得るために，レンダリング後の画像を編集することで画像内の物体の材質を変える手法が提案されてきた．Khan らは物体の写った画像と物体の輪郭を描くアルファマットを入力として与えると，物体に元とは異なる材質を適用した新しい画像を生成する手法を提案した [1]．Todo らは単一の参照画像，入力画像のペアを基に画像ベースで半透明質感を転写する手法を提案した [2]．これにより，参照画像を用意すれば様々な半透明の質感を再現できるようになった．

しかし，これらの手法では，散乱の輝度計算のためのパラメータを推定しているわけではないため，カメラを新たな視点に移した別の画像を生成した際には異なる結果を得る可能性がある．

2.2 散乱パラメータの逆レンダリング問題

一方で，これらの課題を散乱パラメータの逆レンダリング問題として解く手法もこれまでに提案されている．Adolf らは厚く均質な物体における散乱パラメータの推定を単一の画像から行う手法を提案した [3]. 彼らは形状や照明についてのデータがない場合でも，視覚的な外観が近似できる結果を示した．Che らは独自のネットワークを利用した深層学習を散乱パラメータの逆レンダリング問題に適用し，完全に未知の形状と照明を持つ画像に対しても高精度な推定結果を得ることに成功した [4]．

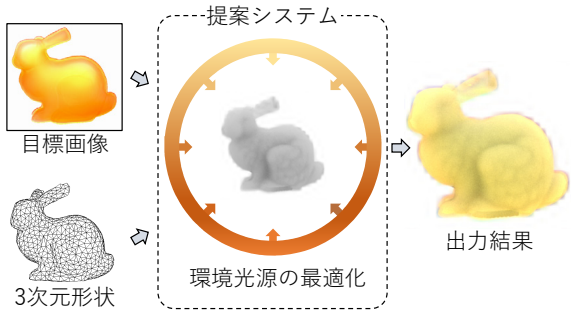

図 1: 提案法の概要.

我々は照明パラメータの逆レンダリングを解くことで，散乱パラメータのみでは表せない質感の再現を解決する．

3. 提案法の概要

提案法の概要を図 1 に示す．提案法に対する入力は，3 次元物体の形状とその物体に対する目的の質感が表現された画像である．提案法は，この画像を再現するような照明条件を決定する．3 次元物体の内部は一様な散乱媒質で構成されているとし，表面下散乱を考慮して半透明物体としてレンダリングする．3 次元物体の周囲に仮想的な球面状の環境光源を配置し，この光源情報を推定することで目的の質感を再現する．物体内部の媒質の散乱パラメータ（密度，アルベド，消散係数）は事前に与えられるものとする．

提案法の基本的な考え方は，レンダリング処理によって得られた画像と目的として与えられる画像の誤差を最小化するよう環境光源を表す球面上の各点の輝度を最適化することである．最適化には微分レンダラである Mitsuba 2[5] を用いる．

4. 環境光源の推定

ユーザにより与えられる目標画像を I_{usr}，レンダリングによって生成される画像を I_{cg} とすると，本研究では，次式を最小化するよう光源環境 L を推定する．

$$E = \sum_{p}^{N} (I_{usr}(p) - I_{cg}(p, L))^2 \tag{1}$$

ここで，p は画素，N は画素数を表す．$I_{cg}(p, L)$ は次式により表すことができる (図 2)．

$$I_{cg}(p, L) = \int_{\Omega} \int_{S} L(\omega) T(x_p, \omega_p, x, \omega) dx d\omega \tag{2}$$

ただし，x_p は画素 p に対応する物体上の点，ω_p は点 x_p から視点方向へ向かう単位ベクトル，$x \in S$ は物体表面 S 上の任意の点，$L(\omega)$ は ω 方向の環境光源の輝度を表す．Ω は球面上のすべての方向を表す．$T(x_p, \omega_p, x, \omega)$ は点 x_p に

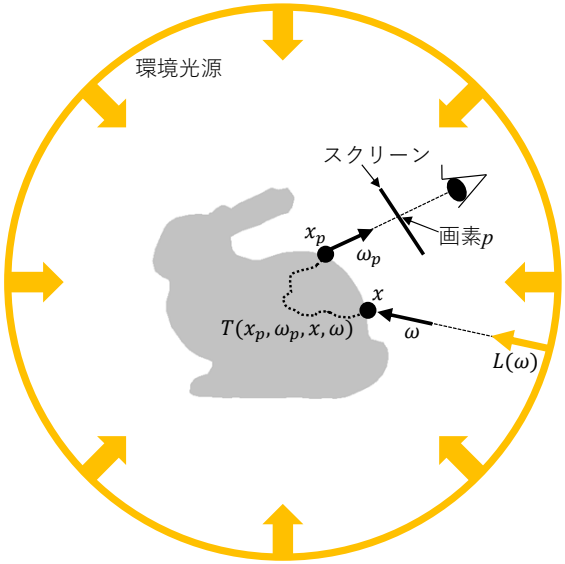

図 2: 輝度計算.

ω 方向から入射した光が物体内部で散乱した後，点 x_p から ω_p 方向に射出する割合である．本研究では，ω を離散化し，次式により計算する．

$$I_{cg}(p, L) = \sum_{i=1}^{n} L_i \Delta\omega_i \int_S T(x_p, \omega_p, x, \omega_i) dx \qquad (3)$$

ここで，L_i は方向 ω_i の光源の輝度，$\Delta\omega_i$ は i 番目の方向の立体角を表す．

提案法では，式 1 を最小化する $L_i (i = 1, 2, \cdots n)$ を最急降下法により求める．すなわち，次式を繰り返し計算することで最適解を算出する．

$$\mathbf{L}^{(k+1)} = \mathbf{L}^{(k)} - \alpha \nabla E \qquad (4)$$

ただし，$\mathbf{L}^{(k)} = (L_1^{(k)}, L_1^{(k)}, \cdots, L_n^{(k)})^t$ は k 回目の繰り返しにおける各方向の環境光源の輝度をまとめたベクトル，α はユーザにより指定する定数である．$\nabla E = (\frac{\partial E}{\partial L_1}, \frac{\partial E}{\partial L_2}, \cdots, \frac{\partial E}{\partial L_n})^t$ は L に関する目的関数の勾配を表し，次式で計算される．

$$\frac{\partial E}{\partial L_i} = -2 \sum_{p}^{N} (I_{usr}(p) - I_{cg}(p, L)) \frac{\partial I_{cg}(p, L)}{\partial L_i} \qquad (5)$$

提案法では，上式の末尾に現れる微分画像を Mitsuba2 を用いて計算する．

5. 実験

提案手法を用いた実験を行った結果を示す．実験には 8 コア CPU@3.60GHz(16GB RAM) および GPU(NVIDIA TITAN RTX) を搭載した計算機を使用した．式 1 の最小化に GPU が使用されている．画像サイズを 256 × 256 として最適化を実行し，平均 30 分を要した．最適化の目標となる画像については Todo らの手法 [2] を使用して，半透明物体の質感を持つ画像を作成した．図 3 に提案法を用いて環境照明を最適化した結果を示す．提案法により目標画像に類似した結果を出力できていることがわかる．しかし，照明パラメータの最適化のみでは完全に目標画像に一致する結果は得られない．そこで、散乱パラメータの影響について検討した．図 4 は図 3 下段の半透明物体が持つ散乱パラメータを変化させた場合の出力である．図 3 下段の最適化後の画像よりも，影が濃くない部分や，形状が詳細まで表されていない点で目標画像により近づいた結果となっていることが確認できる．このことから，照明パラメータの変化のみで目標画像へ近づけることは難しく，散乱パラメータも併せて最適化する必要があると考えられる．

図 3: 目標画像の再現実験結果

図 4: 材質パラメータを変化させた場合の影響．左は sigmaT=1.0 右は sigmaT=0.5

図 5 は図 3 下段の実験例に対して，最適化により得られた環境照明を示す．図 5 から，部分的に不連続に変化している領域がある．これは，半透明物体の背景部分にあたる光源であると推測される．このことから，環境マップ全体を最適化するのではなく，物体の周囲のみにより細かく光源を設置して最適化すれば，より精度の高い結果が得られるのではないかと考えられる．

6. まとめ

我々は目標画像に示された所望の質感の再現を実現するために，照明パラメータを最適化する手法を示した．実験により，照明パラメータを最適化することで目標画像に類似した結果が出力できることを示した．一方で，影の付き方や形状の詳細さのような観点においては物体が持つ散乱パラメータを変化させていく必要があることも確認して

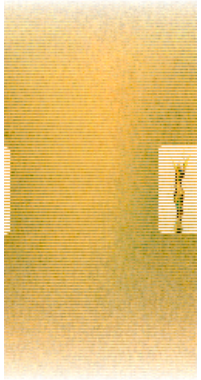

図 5: 最適化した環境マップ

いる．

今後の課題として，散乱パラメータと環境照明を同時に最適化する手法の開発が挙げられる．また，提案手法を応用し，実物体の質感の操作についても検討したい．

参考文献

[1] Erum Arif Khan, Erik Reinhard, Roland W. Fleming, and Heinrich H. Bülthoff. Image-based material editing. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 25, No. 3, p. 654–663, July 2006.

[2] Hideki Todo, Tatsuya Yatagawa, Masataka Sawayama, Yoshinori Dobashi, and Masanori Kakimoto. Image-based translucency transfer through correlation analysis over multi-scale spatial color distribution. *The Visual Computer*, Vol. 35, pp. 811–822, 2019.

[3] Adolfo Munoz, Jose I. Echevarria, Francisco Seron, Jorge Lopez-Moreno, Mashhuda Glencross, and Diego Gutierrez. BSSRDF estimation from single images. *Computer Graphics Forum*, Vol. 30, pp. 455–464, 2011.

[4] C. Che, F. Luan, S. Zhao, K. Bala, and I. Gkioulekas. Towards learning-based inverse subsurface scattering. In *2020 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pp. 1–12, 2020.

[5] Merlin Nimier-David, Delio Vicini, Tizian Zeltner, and Wenzel Jakob. Mitsuba 2: A retargetable forward and inverse renderer. *Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH Asia)*, Vol. 38, No. 6, December 2019.

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan