

分離型畳み込みカーネルを用いた 非均一表面下散乱の効率的推定法

谷田川 達也^{1,a)} 山口 泰^{2,b)} 森島 繁生^{3,c)}

概要: 本稿では、非均一な半透明物体内部で起こる表面下散乱を数値計算に有利な次元畳み込みにて表現することにより、効率的な散乱パラメータの推定を可能とする新たな双方向拡散面反射分布関数 (BSSRDF) の表現法を提案する。本稿で提案する BSSRDF 表現は散乱プロファイルの異方性といった物理的に重要な性質を維持しつつも、表面下散乱方程式を畳み込み積分と要素積だけで評価することを可能とする。畳み込み積分で表される関数はその微分も同じく畳み込み積分で表現できるため、提案の表現法は最急降下法やニュートン法などの勾配に基づく最適化計算と相性が良く、散乱パラメータを求めるための最適化計算を大きく効率化できる。結果として、従来法で数時間かかっていた測定を撮影・数値計算をあわせて一時間以内で実現することに成功した。

1. はじめに

人の肌や多くの有機物を含む半透明物体の見目は物理的には表面下散乱と呼ばれる物体内部での光の散乱により得られる。これらの半透明物体の表現は今日の写実的な CG 映像には不可欠な物となっており、これらの物体が有する物理パラメータの計測が長年研究されてきた [5, 8, 9, 14, 15, 17, 20, 22]。しかしながら、半透明物体でも特に複数の物体が互いに混ざり合っ構成され、非均一性を有するものについては、その性質を記述するパラメータの多さから依然、その散乱の性質の取得が困難である。

従来、非均一半透明物体を対象とする散乱パラメータの計測システムはレーザ光やプロジェクタなどの光源とカメラにより構成されてきた [9, 17]。これらのシステムにより物体表面上の微小な点が照らされ、その時の物体の見目をカメラで撮影する。この物体の見目は、表面下散乱を記述する双方向拡散面反射分布関数 (BSSRDF) の低次元スライスに対応しており、上記の撮影を細かく光源やカメラの位置を変更しながら繰り返すことで、完全な BSSRDF が復元される。しかしながら、これらの手法は比較的小さな

物体に対しても数時間の計測時間を必要とするため、多くの物体を計測するには適さない。

もう一つの手法に少数の異なる光源環境下で撮影された物体の見目を元に物理シミュレーションに基づいた最適化計算から散乱パラメータを推定する手法も提案されている [22]。これにより撮影時間自体は大幅に短縮できるが、この手法は光の散乱をシミュレーションするために GPU を用いても数時間の時間を要するため、計測にかかる時間全体に注目すると、やはり効率的とは言えない。また、実時間に人の肌の散乱パラメータを取得する方法 [20] も提案されているが、この手法は本来非等方的な散乱プロファイルを等方的なもので近似して測定するため、人の肌を含む一部の均質性の高い物質にしか適応ができない。

以上のように、非均一半透明物体の散乱パラメータの測定は (i) 測定時間の多さ、(ii) 計算時間の多さ、(iii) 不適切な物理現象の近似という三つの問題があることが分かる。

これらの問題を解決するため、本稿では畳み込み積分に基づく新たな BSSRDF の表現法を提案する。提案法は経験的な BSSRDF の近似法である Song らの表現法 [19] を、一定の条件下で拡張し、半透明物体の見目を評価するのに用いられる表面下散乱方程式を数値計算に有利な畳み込み積分と要素同士の積だけで表す。散乱パラメータの推定では、カメラで撮影された物体の見目を再構成するようパラメータを最適化するのが一般的だが、この最適化計算の目的関数の評価は上記の近似により大幅に効率化される。また、畳み込み積分ならびに要素積で表現される関数はその微分も同様に畳み込み積分と要素積で表現できるため、

¹ 東京大学大学院工学系研究科
School of Engineering, the University of Tokyo

² 東京大学大学院総合文化研究科
Graduate School of Arts and Sciences, the University of Tokyo

³ 早稲田大学 理工学術総合研究所
Waseda Research Institute of Advanced Science and Engineering

^{a)} Email: tatsy@den.t.u-tokyo.ac.jp

^{b)} Email: yama@graco.c.u-tokyo.ac.jp

^{c)} Email: bshigeo@waseda.jp

最適化計算に必要な目的関数の微分についても同様に効率的な評価が可能となる。これにより、最急降下法やニュートン法などの勾配に基づく最適化計算の一回の反復にかかる計算が大幅に短縮され、短時間での散乱パラメータの推定を実現する。

2. 関連研究

表面下散乱の物理的な性質を記述する表現法は数多くあるが、ここでは特に物体表面上の位置関係によって、その性質を記述する BSSRDF に焦点をあてて関連研究を紹介する。BSSRDF は物体表面上の一点に対してとある方向から入射した光の放射束と、同じく物体表面上の別の点からとある方向へと出射した光の放射照度の比によって表される。物体が単一の半透明材質で構成されるような均一材質においては物体中を伝わる光の振る舞いが拡散近似と呼ばれる理論によって精度良く記述できることが知られている [12]。Jensen らは拡散近似から導いた解析的な表現により光の散乱を記述する双極子モデル [14] により BSSRDF を近似した。このモデルは CG 分野において広く用いられており、それを拡張したモデルが多数提案されている [2,4,6,7]。このような均一材質に対しては、固体 [14]、液体 [8,15] ともに有効な測定法が提案されている。

一方で、材質が非均一である場合には、その性質を解析的な関数で表すことは難しく、一般的な BSSRDF そのものか、それを一定の条件下で緩和した拡散反射関数を用いて表すのが一般的である [5,9,14,17]。いくつかの従来法 [9,17] では、物体表面上の微小な領域にレーザ等を用いて光を照射し、その時の見た目をカメラで撮影することで BSSRDF の低次元スライスを取得した。この方法は、遮蔽等がなく撮影が可能な限りにおいて正確な BSSRDF が復元できる一方、光源環境を変えながら撮影を繰り返さねばならず、比較的小さな物体であっても数時間から十数時間の計測時間が必要である。一方で Tariq らは人間の肌を対象に構造化光源を用いた実時間の散乱パラメータ計測を提案した [20]。しなしながらこの手法は人間の肌が比較的均質で、ある地点に入射した光が等方的に散乱することを仮定しているため、一般的な非均一材質に用いることはできない。また Donner らは同じく人間の肌を対象に比較的少量の撮影から肌内部の光の非等方的な散乱を復元する手法を提案した [5]。しかしながら、この手法も散乱パラメータの推定にあたり肌の標準的な散乱パラメータを前提知識として用いているため、一般的な非均一材質に用いることは難しいと言わざるを得ない。

3. 分離型畳み込み積分による効率的散乱パラメータ測定法

本研究の目的は比較的短い撮影時間で、非均一半透明物体の有する非等方性の散乱を再現する散乱パラメータ計測

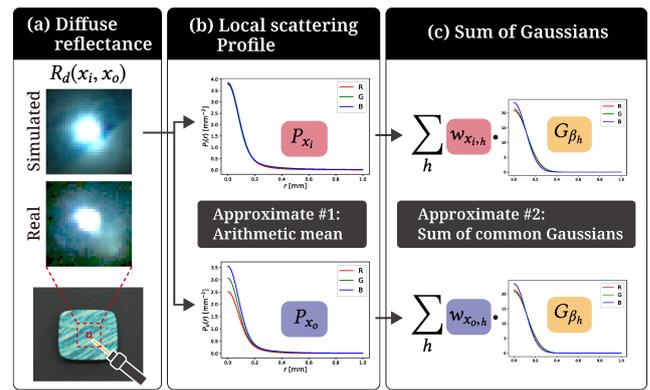


図1 提案法で用いる BSSRDF の表現法。

を実現することである。本研究ではまず、計測対象の撮影時間を短くするために少数の光源環境下で撮影された画像の組から散乱パラメータの推定を試みる。この際、推定に係る最適化の計算時間を短縮しつつも、物理的な性質を過度に損なわない BSSRDF の表現法が必要となる。図1に本研究で提案する BSSRDF 表現の概要を示す。BSSRDF は透明度が低い材質に対しては拡散反射関数 $R_d(x_i, x_o)$ (図1(a)) により精確に近似できることが知られている。さらに拡散反射関数を近似する一手法である Song らの表現に一定の条件を課すことで、拡散反射関数は二つの滑らかな単調減少の関数である局所散乱プロファイル P_x により近似できる (図1(b))。各局所散乱プロファイルをさらにガウス関数の重み付き和により近似する (図1(c))。上記の近似により、BSSRDF そのものがガウス関数の重み付き和になるわけではなく、あくまで異なる二点間での光の減衰がガウス関数の重み付き和で評価できることに注意してほしい。本節では、表面下散乱を含む半透明物体における光の振る舞いを BSSRDF を用いた表した表面下散乱方程式から、より計算に有利な畳み込み積分を用いた表現を導出する。

3.1 背景

$BSSRDF_S(x_i, \omega_i; x_o, \omega_o)$ は物体表面上の位置 x_i に方向 ω_i から入射した光の放射束と、その光が別の物体表面上の点 x_o から方向 ω_o に出射した時の放射照度の比によって表される。BSSRDF を用いる、物体表面上の位置 x_o から方向 ω_o に出射する光の放射輝度 $L(x_o, \omega_o)$ は入射光の強度 $L_i(x_i, \omega_i)$ を用いて以下のように表せる。

$$L(x_o, \omega_o) = \int_A \int_{\Omega} S(x_i, \omega_i; x_o, \omega_o) L_i(x_i, \omega_i) |n_i \cdot \omega_i| d\omega_i dx_i. \quad (1)$$

ただし、式中の A は物体表面全体を Ω は半球上の立体角全体を表す。BSSRDF はその成分を手法な三つの成分である輝度減衰 (reduced intensity)、単一散乱、多重散乱に分けて考えることが一般的である [10]。特に、透明度が比較的少ない対象については多重散乱の成分のみを用いて、その性質を精度良く近似できる。この場合、多重散乱の成分で

ある $S_d(x_i, \omega_i; x_o, \omega_o)$ は散乱 BSSRDF と呼ばれ、さらに低次元の関数の積により以下のように表現できる [4, 14].

$$S_d(x_i, \omega_i; x_o, \omega_o) = \frac{1}{\pi} F_{dr}(x_o) R_d(x_i, x_o) F_t(x_i, \omega_i). \quad (2)$$

この式において、 F_t ならびに F_{dr} は光が物体に入射する時、物体から出射する時のフレネル項の影響を表す。従って、上記の式で表面下散乱に関与するのは拡散反射関数と呼ばれる R_d のみである。物体表面の屈折率が既知であれば F_t ならびに F_{dr} は物体の散乱性能に依存しないため、この R_d を正しく計測できれば BSSRDF を復元することが可能となる。ここで、式 (2) を式 (1) に代入して整理すると、

$$L(x_o, \omega_o) = \frac{1}{\pi} F_{dr}(x_o) \int_A R_d(x_i, x_o) E(x_i) dx_i, \\ E(x_i) = \int_{\Omega} F_t(x_i, \omega_i) L_i(x_i, \omega_i) |n(x_i) \cdot \omega_i| d\omega_i. \quad (3)$$

が得られる。実際の計測において、カメラが物体に対して一定の方向から撮影をしているとすると ω_o は固定であり、カメラで撮影した際には物体の見た目は画素の集まりで表されるため、式 (3) を以下のように離散化する。

$$L(x_o) = \frac{1}{\pi} F_{dr} \sum_{x_i} R_d(x_i, x_o) E(x_i) dA(x_i) \\ = \sum_{x_i} R_d(x_i, x_o) \hat{E}(x_i), \quad (4) \\ \text{ただし } \hat{E}(x_i) = \frac{1}{\pi} F_{dr} E(x_i) dA(x_i).$$

今、 $L(x_o)$ の値は撮影で得られる画素に対応しており、既知の光源状態から R_d を未知数として得られる推定の見た目と実際に撮影で得られた見た目を最小化する問題を解くことで R_d が推定できる。しかしながら、 R_d はその定義から物体に対応する領域が含む画素の二乗に比例する未知数を持つため、これを少数の画像からそのまま推定することは困難である。そこで、提案法では R_d を特定の条件下でさらに近似し、未知数を減らすとともに式 (4) を高速に評価可能な形へと変形する。

3.2 分離型畳み込み BSSRDF

拡散反射関数を近似する手法には因子分解に基づく手法 [19]、半透明部材質が層状に連なっていることを仮定する手法 [5, 11]、異物質間で物理量を平均化する手法 [18] が提案されている。今回は一般的な非均一材質を対象とするため、層状の構造を仮定することはできない。また物理量を平均化する Sone らの手法 [18] は実際に BSSRDF の値を評価する際にモンテカルロ法を用いるため、高速な評価という観点からは適用が難しい。これらの考えから、提案法は経験に基づく拡散反射関数の因子分解法である Song らの手法 [19] を拡張することを試みる。

Song らの手法では、物体表面上の各点 x に局所散乱プロフィールと呼ばれる放射基底関数 $P_x(r)$ を割り当てる。

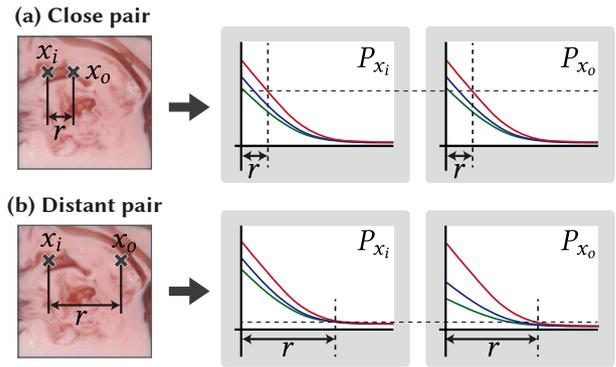


図2 拡散反射関数が簡略化される条件の概念図。

R_d を評価する際には、以下のように二点間で局所散乱プロフィールの値の幾何平均を取る。

$$R_d(x_i, x_o) = \sqrt{P_{x_i}(r) P_{x_o}(r)}, \quad r = \|x_i - x_o\| \quad (5)$$

元々の手法では各局所散乱プロフィールは区間線形の関数で表現される。その一方で、物体中を進む光の性質を考えれば、局所散乱プロフィールは単調減少の関数であり、なおかつ材質が不連続に切り替わらないと仮定すれば連続な関数であると考えられる。また、均一材質においては光の広がりガウス関数の重み付き和で表現されることが知られている [2]。これらの観察に基づき、提案法では局所散乱プロフィールを同じくガウス関数の重み付き和によって、以下のように表現する。

$$P_x(r) = \sum_{h=1}^{N_G} w_{x,h} G_{\sigma_h}(r), \quad w_{x,h} \geq 0. \quad (6)$$

主に人の肌を対象とした従来法 [3, 5] では予め決まった組の σ_h を用いてきたが、提案法はより一般的な物体に対応するため σ_h についても同時に推定することを試みる。従って、上記の式において散乱の性質を決めるパラメータは重み $w_{x,h}$ ならびに σ_h である。

Song らの表現によって、最適化されるべき未知数の数は大幅に減らすことができたが、我々は彼らの表現が特定の条件下でさらに簡略化できることを発見した。式の簡略化は幾何平均と算術平均の大小関係を表す不等式に基づく。一般的な2つの実数 x_1, x_2 に対して、幾何平均と算術平均には $(x_1 + x_2) \geq \sqrt{x_1 x_2}$ の関係があることは広く知られている。この不等式は x_1 と x_2 が等しいときに等式を満たすため、仮に P_{x_i} と P_{x_o} が互いに等しいと見なせるなら、式 (5) は単純な局所散乱プロフィールの算術平均により表せる。実際、非均一の材質同士がなめらかに混ざりあっており、不連続に材質が切り替わらないとすると、図 2(a) に示す通り、二点間の距離が小さいときには二つの散乱プロフィールの値は概ね等しいと考えられる。また、現在は物体の透明度が比較的小さい場合を仮定しているため、二点間の距離が大きときには、図 2(b) に示すとおり、両散乱プロ

ファイルはゼロに近い値を取ると考えられる。これらの観察に基づくと、物体がなめらかに混ざり合っており、なおかつ透明度がそれほど高くない場合においては二つの散乱プロファイルの値が概ね等しいと仮定できる。この結果、式 (5) は、より単純な算術平均により、以下のように近似できる。

$$R_d(x_i, x_o) \approx \frac{1}{2} (P_{x_i}(r) + P_{x_o}(r)). \quad (7)$$

詳細については割愛するが、式 (5), 6 ならびに 7 を式 (4) に代入すると以下の近似式が得られる。

$$L(x_o) \approx \frac{1}{2} \sum_h \left(G_{\sigma_h} * (W_h \odot \hat{E}) \right) (x_o) + \frac{1}{2} \sum_h \left(W_h \odot (G_{\sigma_h} * \hat{E}) \right) (x_o). \quad (8)$$

なお、式中の W_h , \hat{E} はそれぞれ $w_{x,h}$ ならびに $\hat{E}(x)$ を画素 x について平面上に並べた画像に対応する。この式は画像の畳み込み積分と画素同士の要素積といういずれも計算機にとって扱いやすい演算のみで構成されており、高速に評価可能である。

3.3 散乱パラメータの推定

ここまでの結果を用いて散乱パラメータを推定するには、既知の光源環境とその際に得られた物体の見た目の組を用いる必要がある。このそれぞれを光源環境を表す添字 l を用いて \hat{E}_l , L_l と表す。すると散乱パラメータを求めるための最適化問題は以下の形で定義される。

$$\begin{aligned} \text{minimize : } & \sum_{l=1}^{N_l} F_l(R_d), \\ \text{where } & F_l(R_d) = \frac{1}{2} \sum_{x_o} \|I_l(x_o) - L_l(x_o; R_d, \hat{E}_l)\|^2, \end{aligned}$$

この問題の目的関数は $L(x_o)$ が高速に評価できる限りにおいて、同じく高速に評価が可能である。また、興味深いことに畳み込み積分と要素積の性質を考慮すると、目的関数の未知変数に対する勾配も同様に畳み込み積分と要素積によって表現できる。実際、目的関数を未知数である W_h について偏微分すると、以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_l(R_d)}{\partial w_{x,h}}(x) &= \frac{1}{2} \left(\hat{E}_l \odot (G_{\sigma_h} * D_l) \right) (x) \\ &+ \frac{1}{2} \left(D_l \odot (G_{\sigma_h} * \hat{E}_l) \right) (x), \end{aligned}$$

$$\text{ただし } D_l(x) = L_l(x) - I_l(x),$$

同様に σ_h についても偏微分すると、以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_l(R_d)}{\partial \sigma_h}(x) &= \sum_x \left(D_l \odot \frac{\partial L_l}{\partial \sigma_h} \right) (x) \\ \text{ただし } \frac{\partial L_l}{\partial \sigma_h}(x) &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial G_{\sigma_h}}{\partial \sigma_h} * (W_h \odot \hat{E}_l) \right) (x) \\ &+ \frac{1}{2} \left(W_h \odot \left(\frac{\partial G_{\sigma_h}}{\partial \sigma_h} * \hat{E}_l \right) \right) (x), \end{aligned}$$

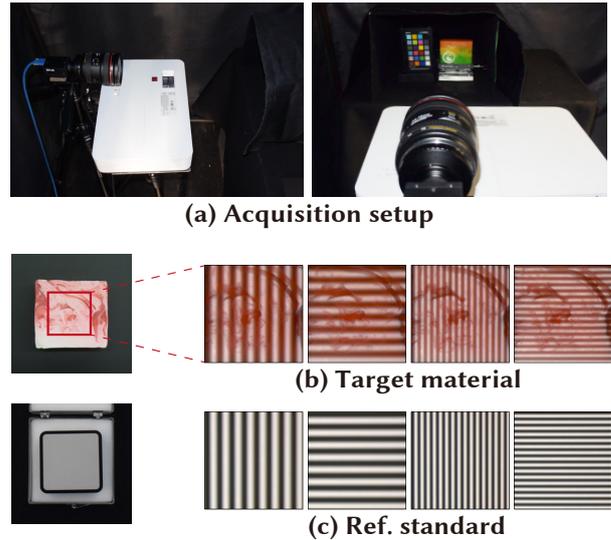


図3 本研究で用いた撮影システムと取得した画像群。

以上から、提案の BSSRDF 表現を用いることで最適化問題における目的関数ならびにその勾配が単純な畳み込み積分と要素積によって高速に評価できることが分かる。これにより最急降下法やニュートン法などの勾配情報を利用するような最適化法で一回の反復にかかる時間を大幅に削減でき、結果として最適化時間全体も短縮できる。

提案法では、上記の最適化問題について $\sigma_h, h = 1, \dots, N_G$ が降順にならび、重み係数が非負であるという不等式制約の元で目的関数を最小化する。この問題は等式・不等式の両制約を含む最適化問題の解放の一種である拡張ラグランジュ法と準ニュートン法により解くことができる。我々が行った実験の結果、重み係数 $w_{x,h}$ と各 σ_h はその数に大きな違いがあるため、同時に最適化するよりも、それぞれを交互に最適化の方がより目的関数の値が小さく、なおかつ、より制約を満たした解に収束することが分かった。

4. 撮影システム

本研究では前節で紹介した理論を検証するため、通常のカメラとプロジェクタのみからなる撮影システムを用いた実験を実施した。本研究で用いた撮影システムを図 3(a) に示す。提案法を用いて BSSRDF を推定するためには、物体にあたっている光の強さと、その際の物体の見た目が必要である。前者は標準反射板に対して、後者については測定対象物体に対してプロジェクタから構造化光を投影することで取得する。取得された画像の一部を図 3(b) および (c) に示す。しかしながら、本研究で用いた式 (8) は表面下散乱の成分だけを考慮しており、物体表面で直接反射される光については考えていない。そこで撮影時に表面下散乱光だけを取り出すため、構造化光源の作り方に改良を加える。

提案法で用いる構造化光源のパターンは推定パターン (estimation pattern) と分離パターン (separation pattern) の二

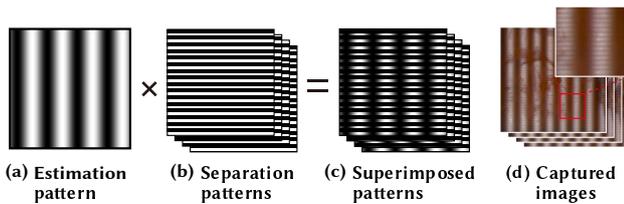


図4 撮影に用いた構造化光源のパターン。

種類に分けられる。推定パターンは最適化問題の入力となる光源パターンであり、分離パターンは推定パターンを当てたときに得られる反射光から表面下散乱の成分だけを取り出すために用いられるパターンである。推定に用いるパターンの候補は無数に考えられるが、半透明物体内部で光が散乱して拡がる様子を周波数解析によって明らかにする手法に変調画像法 (modulated imaging) という手法が知られている [1]。この手法では周波数の異なる正弦波のそれぞれについて 0 度, 45 度, 90 度位相をずらした三枚の画像を撮影することで、散乱光を周波数分解する。我々はこの手法に従い、物体上の撮影領域における周波数が 4, 8, 16, 32 となる 4 種類の正弦波について位相を 0, 45, 90, 135 度ずらした合計 16 種類の画像を撮影した。また正弦波の方向を x 方向と y 方向の二種類について撮影するため、最終的な推定パターンの数は 32 とした。一方で、分離パターンには推定パターンで用いた正弦波と直行する矩形波を用いた。これは Nayar らによって提案された直接反射光と関節反射光の分離法 [16] に基づく。矩形波は撮影領域内の周波数が 64 となるものを用い、その位相を 0, 90, 180, 270 度ずらした 4 種類のパターンを用いた。

提案法では、これらの二つのパターンを図 4 に示す形でパターン同士の積をとって合成する。分離パターンの方向は推定パターンの方向から一意に決定されるため、測定対象物に対する構造化光源のパターン数は $32 \times 4 = 128$ 種類である。これを同じ推定パターンごとに 4 枚ずつの画像の組に分けて Nayar らの手法を適用することで、単一の推定パターンを当てた時の表面下散乱光の成分だけを抽出する。ただし、入射光の強さを測定する目的で撮影している標準反射板については表面下散乱の成分を分離する必要がないため、推定パターンをそのまま照射して画像を撮影した。

5. 結果と考察

本研究で用いた撮影システムはカメラに FLIR 社の Grasshopper3 GS3-U351S5-C をプロジェクタにソニー社の VPL-DW 240 を用いた。提案法で撮影する材質の画像 128 枚と標準反射板の画像 32 枚の計 160 枚は、それぞれ 0.16 秒から 3.0 秒までの露光時間で 5 枚の画像を撮影し、それをハイダイナミックレンジ合成して入力画像とした。これらの画像の撮影に要する時間は材質の入れ替え等の

時間を含めても 30 分程度であった。また、散乱パラメータを推定するシステムは CPU に Intel Core i9-9980XE を備え、128GB の RAM を有する計算機上で実装・テストを実施した。今回のテストでは入力画像は材質、標準反射板のそれぞれが 32 枚ずつで 8 つのガウス関数を用いて局所散乱プロファイルを近似した。各入力画像は対象物体の測定領域を 256×256 画素の画像として切り出したものになっており、最適化に要した時間は平均 17 分 23 秒であった。従って、撮影対象領域の切り出しなど、画像の前処理に係る時間を含めても 1 時間程度で測定を完了できることが分かる。

図 5 に提案法を用いて測定した BSSRDF を用いたパストレーシング法によるレンダリング結果を示す。レンダリングにあたってはオープンソースの物理ベースレンダラである Mitsuba レンダラ [13] 上にプラグインを作成した。また、提案法においては鏡面反射率ならびに物体表面の粗さパラメータを同時に測定することはできないため、鏡面反射率については反射率を 0.1、粗さを (a)Heart soap, (b) Red soap の二つについては 0.5, (c) Green stone, (d) White stone の二つについては 0.05 として GGX モデル [21] により反射光を計算した。この図が示すとおり、環境光源下はもちろんのこと、点光源のような局所的に光が当たるケースにおいても、良好な見目が得られていることが分かる。

提案法の精度をより厳密に評価するため、我々は、Peers らが提案した点拡がり関数に基づく厳密な BSSRDF の測定法により得られたデータを用いた評価実験を実施した。この実験では図 6 に示した三種類のデータに対して、提案の BSSRDF を直接フィッティングしたもの (Ours (fitting)), 撮影時と同様の構造化光源を当てて得られる入力画像として提案法により BSSRDF を推定したもの (Ours (estimate)), 提案法の直接の従来法である Song らの手法 [19], ならびに元の測定データを比較した。

図 6 には各データについて上から一様な光を当てた場合、直線状の光を当てた場合、円状の光を当てた場合の見目のシミュレーション結果、ならびに元データとの誤差を示す平均二乗誤差値 (RMSE) と構造的類似度 (DSSIM) をプロットした画像を示した。また、表 1 に各手法、各データにおける RMSE と構造的類似度 (SSIM) の最小値、最大値、平均値ならびに中央値を示した。この結果を観察すると、提案法は既存手法である Song らの手法と同等程度に光の散乱の様子を再現しており、本研究で新たに提案した近似法が大きく BSSRDF の品質を損なわないことが分かる。しかしながら、Jade の例のように散乱プロファイルの非等方性が強く、Song らの手法でも再現することが難しい場合には、同様に提案法でも表現が難しいことが分かる。

RMSE ならびに SSIM について見てみると、表 1 から分かるように、提案の BSSRDF を直接フィッティングしたものが従来法である Song らの手法よりも良い近似精度を示

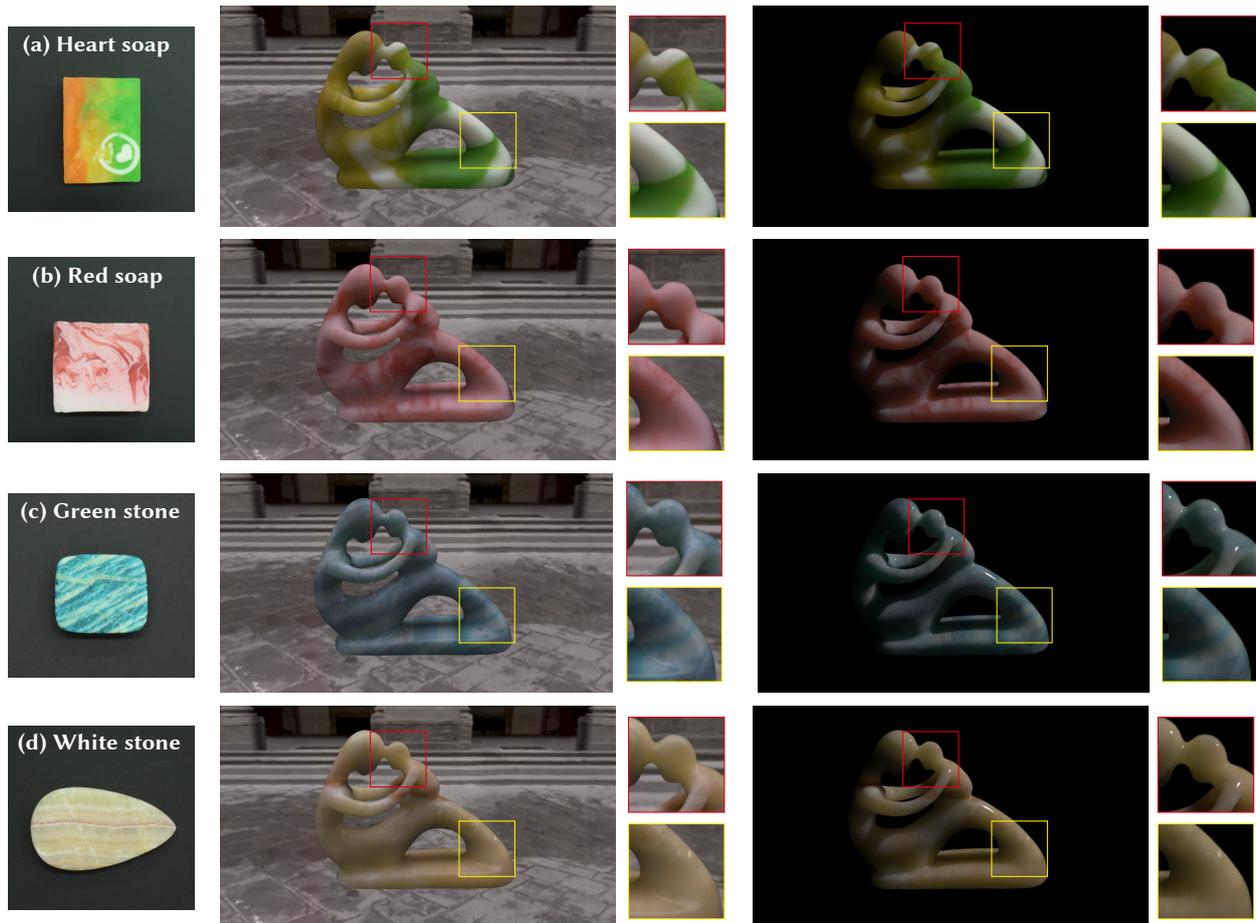


図5 提案法を用いて測定された BSSRDF を用いたレンダリング結果。

すことが分かる。これは Song らの従来法が式 (5) に現れる平方根を和として扱う目的で対数領域で最適化を行っているためと考えられる。対数領域の最適化では 0 に近い微小な値が強く最適化されるため、特に材質があまり散乱を示さず、散乱プロファイルが比較的大きな値を取る場合に誤差が大きくなる傾向がある。入力画像を通して BSSRDF を推定した場合にはフィッティングほどの精度を出すことは難しいものの、Song らの従来法と同等程度の精度が達成できることが図 6 ならびに表 1 から分かる。

最後に、実際の推定で得られた BSSRDF から復元した光の散乱の様子と、実際に撮影した画像との比較を図 7 に示す。この画像に示す通り、推定で得られた結果であっても、実画像に見られる散乱の非等方性を一定程度再現できていることが分かる。しかしながら、提案法は点拡がり関数そのものを測定しているわけではないため、その分解能には限界があり、実画像と比べるとややボケた結果となっている。しかしながら、この結果が約 30 種類という疎な光源環境のサンプリングにより得られた結果であること、映像制作等において大きな問題とはなりづらいことなどを考慮すると実用的には十分な有用性を保っていると考えられる。

6. まとめ

本稿では、観察に基づき BSSRDF をガウス関数の重み付き和によって近似することで、半透明物体中での光の散乱を表す表面下散乱方程式を計算に有利な畳み込み積分と要素積だけで評価することを可能とした。また畳み込み積分ならびに要素積の性質上、それらで表される関数の微分もまた畳み込み積分と要素積によって表現できる。これにより、表面下散乱方程式そのものだけでなく、散乱パラメータの推定に必要な目的関数とその勾配についても効率的な評価が可能となった。結果として、非均一材質における複雑な散乱現象を比較的短時間の最適化処理により推定することに成功した。実験の結果、提案法は 30 枚程度という少数の入力画像のみから、提案の BSSRDF 表現法の直接の従来研究である Song らの表現法と同等程度の精度で BSSRDF を再現できることが分かった。一方で、対象物体が強い非等方性を示すような散乱プロファイルを持つ場合には従来法である Song らの表現法と同様に精度が限定的になることも分かった。今後は分離型の畳み込みカーネルを持つ関数の中で最も標準的なガウス関数だけを用いたが、用いる関数の種類を増やすことにより、より異方性の

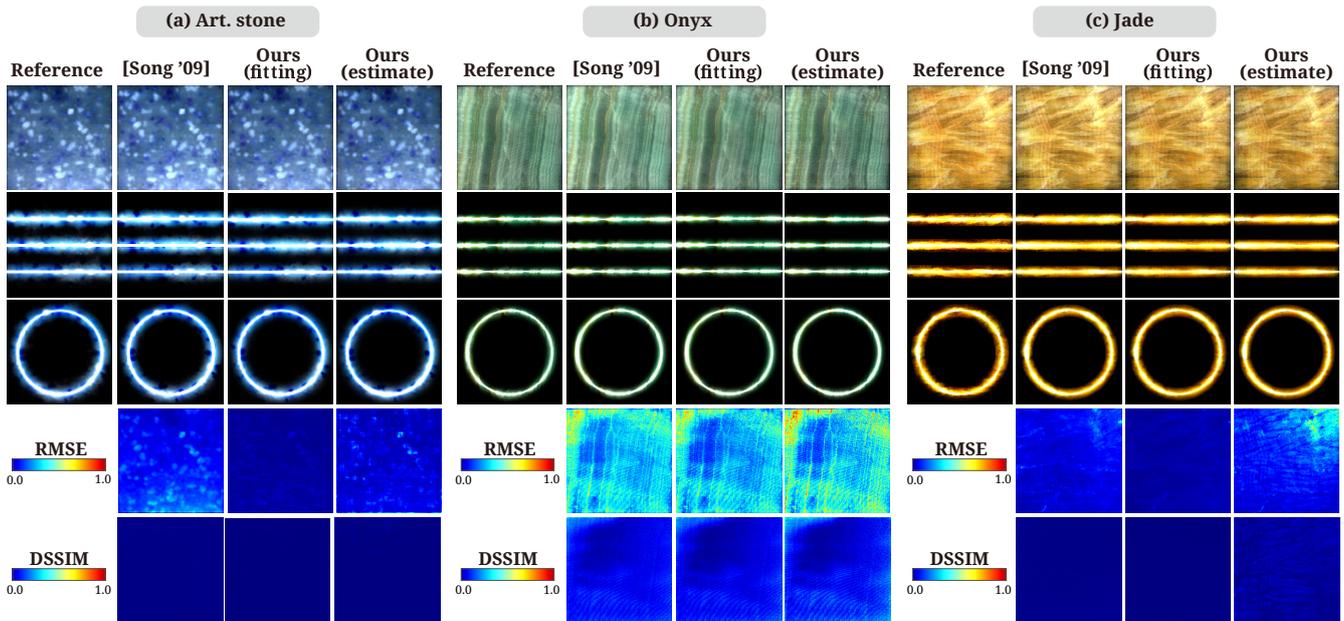


図 6 Peers らの手法 [17] で測定された参照データを用いた画像再構成結果の比較.

表 1 Peers らの手法 [17] で測定された参照データを用いた数値評価実験の結果.

Material	Metric	[19]	Ours (fitting)	Ours (estimate)
		Min / Max / Avg. / Med.	Min / Max / Avg. / Med.	Min / Max / Avg. / Med.
ArtStone	RMSE	0.0310 / 0.3804 / 0.1430 / 0.1322	0.0077 / 0.1054 / 0.0284 / 0.0262	0.0245 / 0.4166 / 0.0851 / 0.0773
	SSIM	0.9608 / 0.9976 / 0.9862 / 0.9867	0.9740 / 0.9999 / 0.9989 / 0.9993	0.8165 / 0.9990 / 0.9923 / 0.9954
Onyx	RMSE	0.1307 / 1.0017 / 0.3492 / 0.3401	0.0579 / 1.0274 / 0.3271 / 0.3197	0.0354 / 1.3653 / 0.3767 / 0.3678
	SSIM	0.0800 / 0.9727 / 0.7633 / 0.7620	0.1203 / 0.9957 / 0.7835 / 0.7854	0.0249 / 0.9913 / 0.7321 / 0.7358
Jade	RMSE	0.0228 / 0.4980 / 0.1028 / 0.0945	0.0118 / 0.2482 / 0.0395 / 0.0380	0.0406 / 0.8535 / 0.1673 / 0.1461
	SSIM	0.9484 / 0.9965 / 0.9800 / 0.9811	0.9545 / 0.9998 / 0.9963 / 0.9971	0.3779 / 0.9965 / 0.9380 / 0.9423

強い散乱プロファイルを表現する手法についても検討して行きたい。また、今回は物体の表面が平面であるような物体のみを対象として実験を行ったが、今後は物体形状と散乱パラメータを同時に推定するようなシステムの開発にも取り組みたい。

謝辞 本研究は日本学術振興会科研費 (JP18K18075, JP16H02818), 科学技術振興機構 ACCEL (JPMJAC1602) ならびに早稲田大学理工学術総合研究所の支援により得られた成果です。この場を借りて関係者の皆さまに感謝申し上げます。また、実験に際してデータを提供していただいた William & Mary 大学の Pieter Peers 氏, Microsoft Research Asia の Xin Tong 氏, Yue Dong 氏にもこの場を借りて感謝申し上げます。本研究の遂行にあたり、多大なる助言をいただいた奈良先端科学技術大学院大学の久保尋之氏, 筑波大学の青砥隆仁氏, Nothumbria 大学の Hubert Shum 氏にこの場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Cuccia, D. J., Bevilacqua, F. P., Durkin, A. J., Ayers, F. R. and Tromberg, B. J.: Quantitation and mapping of tissue optical properties using modulated imaging, *Journal of Biomedical Optics*, Vol. 14, No. 2, pp. 1–13 (online), DOI: 10.1117/1.3088140 (2009).
- [2] d'Eon, E. and Irving, G.: A quantized-diffusion model for rendering translucent materials, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 30, No. 4, p. 56 (online), DOI: 10.1145/2010324.1964951 (2011).
- [3] d'Eon, E., Luebke, D. and Enderton, E.: Efficient Rendering of Human Skin, *Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques*, pp. 147–157 (online), DOI: 10.2312/EGWR/EGSR07/147-157 (2007).
- [4] Donner, C. and Jensen, H. W.: Light Diffusion in Multi-layered Translucent Materials, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 24, No. 3, pp. 1032–1039 (online), DOI: 10.1145/1073204.1073308 (2005).
- [5] Donner, C., Weyrich, T., d'Eon, E., Ramamoorthi, R. and Rusinkiewicz, S.: A Layered, Heterogeneous Reflectance Model for Acquiring and Rendering Human Skin, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 27, No. 5, pp. 140:1–140:12 (online), DOI: 10.1145/1409060.1409093 (2008).
- [6] Frederickx, R. and Dutré, P.: A Forward Scattering Dipole Model from a Functional Integral Approximation, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 36, No. 4, pp. 109:1–109:13 (online), DOI: 10.1145/3072959.3073681 (2017).

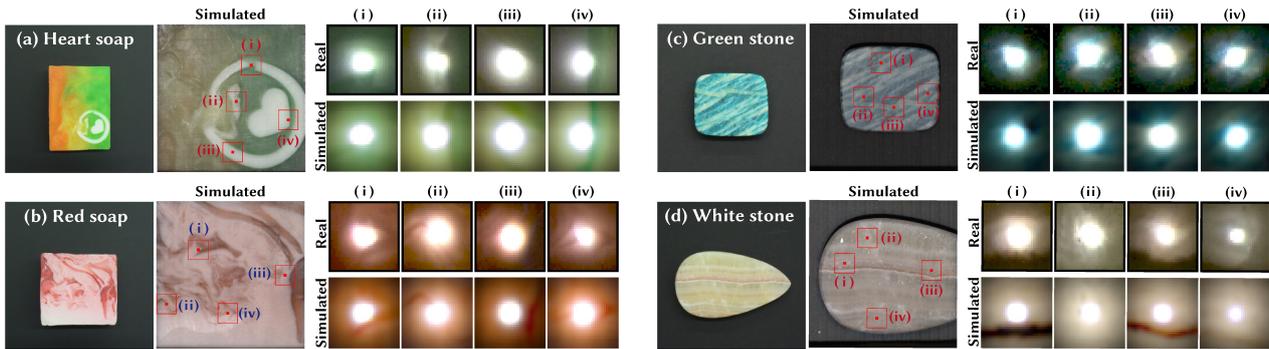


図7 提案法を用いた測定結果による点拡がり関数の再現結果と実画像との比較.

- [7] Frisvad, J. R., Hachisuka, T. and Kjeldsen, T. K.: Directional Dipole Model for Subsurface Scattering, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 1, pp. 5:1–5:12 (online), available from <http://doi.acm.org/10.1145/2682629> (2014).
- [8] Gkioulekas, I., Zhao, S., Bala, K., Zickler, T. and Levin, A.: Inverse Volume Rendering with Material Dictionaries, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 6 (online), DOI: 10.1145/2508363.2508377 (2013).
- [9] Goesele, M., Lensch, H. P. A., Lang, J., Fuchs, C. and Seidel, H.-P.: DISCO: Acquisition of Translucent Objects, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 23, No. 3, pp. 835–844 (online), DOI: 10.1145/1186562.1015807 (2004).
- [10] Hanrahan, P. and Krueger, W.: Reflection from Layered Surfaces Due to Subsurface Scattering, *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '93, pp. 165–174 (online), DOI: 10.1145/166117.166139 (1993).
- [11] Hašan, M., Fuchs, M., Matusik, W., Pfister, H. and Rusinkiewicz, S.: Physical Reproduction of Materials with Specified Subsurface Scattering, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 29, No. 4, pp. 61:1–61:10 (online), DOI: 10.1145/1778765.1778798 (2010).
- [12] Ishimaru, A.: *Wave Propagation and Scattering in Random Media*, Academic Press (1978).
- [13] Jakob, W.: Mitsuba renderer (2010). <http://www.mitsuba-renderer.org>.
- [14] Jensen, H. W., Marschner, S. R., Levoy, M. and Hanrahan, P.: A Practical Model for Subsurface Light Transport, *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '01, pp. 511–518 (online), DOI: 10.1145/383259.383319 (2001).
- [15] Narasimhan, S. G., Gupta, M., Donner, C., Ramamoorthi, R., Nayar, S. K. and Jensen, H. W.: Acquiring Scattering Properties of Participating Media by Dilution, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 25, No. 3, pp. 1003–1012 (online), DOI: 10.1145/1141911.1141986 (2006).
- [16] Nayar, S. K., Krishnan, G., Grossberg, M. D. and Raskar, R.: Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene Using High Frequency Illumination, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 25, No. 3, pp. 935–944 (online), DOI: 10.1145/1141911.1141977 (2006).
- [17] Peers, P., vom Berge, K., Matusik, W., Ramamoorthi, R., Lawrence, J., Rusinkiewicz, S. and Dutré, P.: A Compact Factored Representation of Heterogeneous Subsurface Scattering, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 25, No. 3, pp. 746–753 (online), DOI: 10.1145/1179352.1141950 (2006).
- [18] Sone, H., Hachisuka, T. and Koike, T.: Parameter estimation of BSSRDF for heterogeneous materials, *Eurographics Short Papers* (2017).
- [19] Song, Y., Tong, X., Pellacini, F. and Peers, P.: SubEdit: A Representation for Editing Measured Heterogeneous Subsurface Scattering, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 3, pp. 31:1–31:10 (online), DOI: 10.1145/1576246.1531337 (2009).
- [20] Tariq, S., Gardner, A., Llamas, I., Paul, A. J., Debevec and Turk, G.: Efficient Estimation of Spatially Varying Subsurface Scattering Parameters, *Proc. of the 11th International Fall Workshop on Vision, Modeling, and Visualization* (2006).
- [21] Walter, B., Marschner, S. R., Li, H. and Torrance, K. E.: Microfacet Models for Refraction Through Rough Surfaces, *Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques*, pp. 195–206 (online), DOI: 10.2312/EGWR/EGSR07/195-206 (2007).
- [22] Wang, J., Zhao, S., Tong, X., Lin, S., Lin, Z., Dong, Y., Guo, B. and Shum, H.-Y.: Modeling and Rendering of Heterogeneous Translucent Materials Using the Diffusion Equation, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 27, No. 1, pp. 9:1–9:18 (online), DOI: 10.1145/1330511.1330520 (2008).