

半透明物体に対する表面下散乱モデルの当てはめ

鈴木和哉 向川康博 八木康史

大阪大学 産業科学研究所

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1

{k-suzuki,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

あらまし

半透明物体では、表面下散乱と呼ばれる媒質内部における光の散乱が発生する。本研究では、媒質が均一な半透明物体を対象とし、一般照明下で撮影された画像から、表面下散乱を解析する手法を提案する。提案手法では、物体表面をパッチで表現し、その距離を量子化することで、表面下散乱モデル中の散乱項を線形的に推定する。その散乱項にダイポール近似モデルを当てはめることで、対象物体の表面下散乱を解析する。実際に撮影したいいくつかの半透明物体に対して本手法を用いることで、各表面に入射した照度と観測された放射輝度、対象の形状から、表面下散乱パラメータを推定した。

Fitting of Subsurface Scattering Model to Translucent Object

Kazuuya SUZUKI Yasuhiro MUKAIGAWA Yasushi YAGI

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan

{k-suzuki,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract

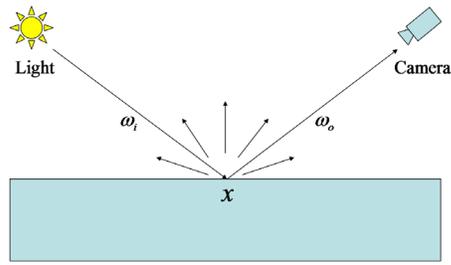
In translucent objects, the subsurface scattering, which is a scattering effect of incident lights under the surface, occurs. In this paper, we introduce a method to analyze subsurface scattering of a translucent object from one image taken under general illumination. In our method, diffuse subsurface reflectance in subsurface scattering model can be linearly solved by sampling the surface as patches, and quantizing the distances between each pair of patches. To analyze subsurface scattering of the object, the dipole approximation model is fit to the diffuse subsurface reflectance. By applying our method to real images, we compute subsurface scattering parameters from incident irradiance, outgoing radiance, and geometry.

1 はじめに

これまで、シーンを撮影した画像を入力として、光源環境や物体の反射特性を推定するための様々なインバースレンダリング法が提案されてきた[1]。しかし、それらの手法のほとんどは、対象物体が不透明であると仮定しているため、半透明物体には適用できない。大理石、皮膚などが典型的な半透明物体として知られているが、果実や野菜など

の我々の身の回りに存在する物体の多くも半透明である[2]。このような不透明物体に対しては、従来のほとんどのコンピュータビジョン技法がそのまま適用できない。

近年、コンピュータグラフィックス分野では、半透明物体の高速レンダリング法に関する研究が盛んに行われている。Jensenらは、カメラから空間上の光線を確率的に追跡するフォトンマッピング法[3]や、半透明物体内部での光の散乱をダイポー

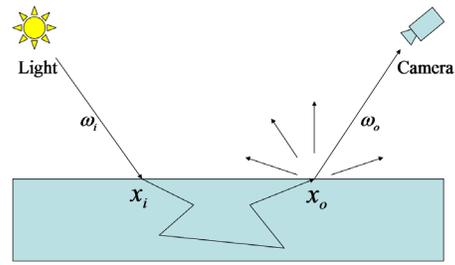


(a)



(b)

図 1: 不透明物体と BRDF



(a)



(b)

図 2: 半透明物体と BSSRDF

ル近似によって高速にレンダリングする手法 [4] を提案している。

一方、コンピュータビジョン分野では、半透明物体はほとんど取り扱われていない。不透明物体上の局所的な光学現象である拡散反射、鏡面反射、影の解析が主であり、物体表面上に入射した光が他の点を照らす現象としては相互反射が考慮されている程度である。近年、レーザやプロジェクタを用いた特殊な光源によって、半透明物体内部での光の散乱を計測する研究が発表されている。レーザによって物体表面上の一点を照射する方法 [4][5][6]、プロジェクタでスリットパターンを投影する方法 [7]、接触型の専用計測センサを用いる方法 [8] などが提案されている。しかし、いずれも、限定された環境において専用の機器を用いた計測手法であり、汎用的な解析手法ではない。

そこで、本研究では、任意の照明環境下で通常のカメラで撮影された 1 枚のみの画像を入力として、半透明物体内部での光の散乱を解析する手法を提案する。光源として、レーザやプロジェクタといった特殊な照明ではなく、任意の照明環境が利用できる。また、ダイポール近似によって半透明物体内部で生じる光の散乱を解析する。

2 半透明物体で生じる表面下散乱

2.1 表面下散乱の表現

ほとんどのコンピュータビジョン技法では対象物体は不透明であると仮定している。不透明物体では物体表面のある点に入射した光は、その点でのみ反射する。つまり、図 1(a) のように光の入射点と出射点は一致する。そのため、相互反射や環境光の影響を除けば、図 1(b) のように光源からの入射光のない影領域では出射光は観測されない。このような不透明物体上で生じる反射は双方向反射率分布関数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function: 以下、BRDF と略す) で表現される。BRDF は観測点 x に ω_i の方向から入射した光が ω_o の方向に出射する率 $F(x, \omega_i, \omega_o)$ を表す。

一方、半透明物体では、物体表面上のある点に入射した光は物体の内部で散乱し、物体表面上の別の点からも出射する。この物体内部の散乱を表面下散乱と呼ぶ。表面下散乱により、半透明物体では図 2(a) のように光の入射点と出射点が一致しない。そのため、図 2(b) のように、光源からの入射光のない影領域であっても、他の点への入射光が物体内部で散乱し、出射光として観測される。このような半透明物体で生じる表面下散乱は双方向

散乱面反射率分布関数 (Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function: 以下, BSSRDF と略す) で表現される. BSSRDF は入射点 x_i に ω_i の方向から入射した光が観測点 x_o において ω_o の方向に出射する率 $S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o)$ を表す.

シーン中の物体表面上の点 x_o における方向 ω_o への放射輝度 $L_o(x_o, \omega_o)$ は, 次式によって与えられる.

$$L_o(x_o, \omega_o) = \int_A \int_{\Omega} S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o) L_i(x_i, \omega_i) (N \cdot \omega_i) d\omega_i dx_i \quad (1)$$

ここで, $L_i(x_i, \omega_i)$ は, 点 x_i に ω_i 方向から入射する光の強度, A は物体表面, Ω は点 x_i における半球状に分布した方向, n は点 x_i における法線方向である.

2.2 ダイポール近似

コンピュータグラフィックス分野では, 表面下散乱を表現するためにフォトンマッピングなどの手法がとられてきた. しかし, フォトンマッピングでは高い再現性を持った画像をレンダリングするためには膨大な計算時間を必要とする. 近年, Jensen ら [4] によってダイポール近似を用いて表面下散乱をレンダリングする手法が提案された. この手法では, 高品質な画像を高速でレンダリングできるという利点がある. そのため, 本研究でもダイポール近似モデルを使用し, 半透明物体の解析を行う.

ダイポール近似モデルでは, 物体内部の散乱が入射光と観測光の方向に依存しないという仮定をおくことで, BSSRDF $S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o)$ を次式のように分解する.

$$S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o) = \frac{1}{\pi} F_{t,o}(\eta, \omega_o) R(x_i, x_o) F_{t,i}(\eta, \omega_i) \quad (2)$$

ここで, $F_t(\eta, \omega)$ は相対屈折率 η の境界面に対し, 角度 ω 方向に光が透過する際のフレネル関数である.

また, $R(x_i, x_o)$ は, x_i に入射した光が x_o に到達する際の減衰を表す散乱項であり, 2点間の距離 $d = \|x_o - x_i\|$ の関数として, 次式で近似される.

$$R(d) = \frac{\alpha}{4\pi} \left\{ z_r \left(\sigma_{tr} + \frac{1}{d_r} \right) \frac{e^{-\sigma_{tr} d_r}}{d_r^2} + z_v \left(\sigma_{tr} + \frac{1}{d_v} \right) \frac{e^{-\sigma_{tr} d_v}}{d_v^2} \right\} \quad (3)$$

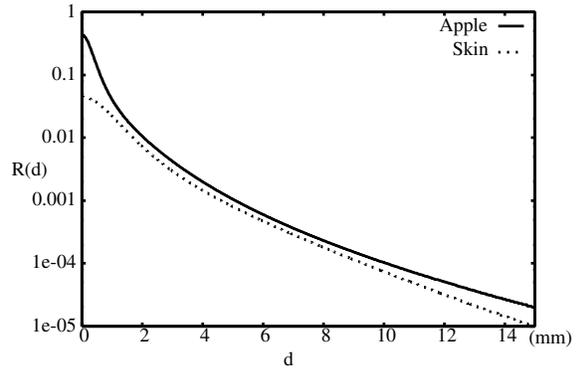


図 3: ダイポール近似モデルによって得られた d と $R(d)$ の関係 (Apple: $\sigma_s = 2.29$, $\sigma_a = 0.003$, $\eta = 1.3$. Skin: $\sigma_s = 0.74$, $\sigma_a = 0.032$, $\eta = 1.3$)

このとき, 各変数は以下の式で与えられる.

$$d_r = \sqrt{d^2 + z_r^2} \quad (4)$$

$$d_v = \sqrt{d^2 + z_v^2} \quad (5)$$

$$z_r = \frac{1}{\sigma'_t} \quad (6)$$

$$z_v = z_r \left(1 + \frac{4}{3} A \right) \quad (7)$$

$$A = \frac{1 + F_{dr}}{1 - F_{dr}} \quad (8)$$

$$F_{dr} = -\frac{1.440}{\eta^2} + \frac{0.710}{\eta} + 0.668 + 0.0636\eta \quad (9)$$

$$\sigma_{tr} = \sqrt{3\sigma_a\sigma'_t} \quad (10)$$

$$\sigma'_t = \sigma'_s + \sigma_a \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{\sigma'_s}{\sigma'_t} \quad (12)$$

$$\sigma'_s = \sigma_s(1 - g) \quad (13)$$

ここで σ_s, σ_a は物体固有のパラメータであり, それぞれ σ_s は散乱係数, σ_a は吸収係数と呼ばれる. g は位相関数による散乱方向と光の伝播方向の内積であるが, 等方散乱の場合は $g = 0$ となる.

このことから, ダイポール近似モデルでは等方散乱物体の表面下散乱を σ_s, σ_a, η の 3つのパラメータで近似表現できることがわかる.

ダイポール近似モデルによって σ_s, σ_a, η の 3つのパラメータから得られた $R(d)$ の例を図 3 に示す.

3 表面下散乱モデルの当てはめ

3.1 問題設定

本手法では、半透明物体を撮影した画像 1 枚のみを入力とし、次の条件下で表面下散乱のパラメータを推定する。

- 幾何情報：カメラ位置，対象物体の 3 次元形状は既知とする。
- 光源環境：対象物体の各表面上における光源の輝度分布 $L_i(x_i, \omega_i)$ は既知とする。
- 対象の材質：均一とし，等方散乱を生じる。
- 放射輝度：撮影した画像と幾何情報より，カメラから見える点について放射輝度 $L_o(x_o, \omega_o)$ は既知である。

3.2 パッチ分割による定式化

物体表面を十分に小さい等しい面積（パッチ）ごとに分割し，それぞれの中心をサンプル点とする。物体の形状が既知であることから，配されたサンプル点の 3 次元座標 x_i とその法線方向 N は求められる。

表面を m 個のパッチに分割したとき，各パッチの明るさは，次式のように表される

$$L_o(P_j) = \frac{1}{\pi} F_{t,o}(\eta, \omega_o) \sum_{j=1}^m \left\{ R(d_{jk}) \int_{\Omega} L_i(P_k, \omega_i) F_{t,i}(\eta, \omega_i) \max(0, N \cdot \omega_i) d\omega_i \right\} \quad (14)$$

このとき， $L_o(P_j)$ はパッチ P_j のサンプル点の放射輝度， d_{jk} はパッチ P_j からパッチ P_k までの直線距離， $L_i(P_k, \omega_i)$ はパッチ P_k のサンプル点に ω_i 方向から入射する光の強度である。

また Jensen ら [4] や Goesele ら [5] の研究から，大理石などの一部を除く物質で相対屈折率 $\eta = 1.3$ となることが経験的に知られている。本稿でもこれにならい，計測が困難な相対屈折率を $\eta = 1.3$ とおく。この置き換えをすることで， $F_{t,o}(\eta, \omega_o)$, $F_{t,i}(\eta, \omega_i)$ は対象の位置形状と照明環境，カメラ位置から計算することができる。

ここで，

$$l_j = \frac{\pi L_o(P_j)}{F_{t,o}(\eta, \omega_o)} \quad (15)$$

$$c_k = \frac{\int_{\Omega} L_i(P_k, \omega_i) F_{t,i}(\eta, \omega_i) \max(0, n \cdot \omega_i) d\omega_i}{F_{t,i}(\eta, \omega_i) \max(0, n \cdot \omega_i)} \quad (16)$$

とおけば，式 (14) から，

$$l_j = \sum_{k=1}^m (R(d_{jk}) c_k) \quad (17)$$

となるので，物体表面の全てのパッチでは，

$$\mathbf{l} = [l_1, l_2, \dots, l_m]^T \quad (18)$$

$$\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_m]^T \quad (19)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R(d_{11}) & \dots & R(d_{1k}) & \dots & R(d_{1m}) \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ R(d_{j1}) & \dots & R(d_{jk}) & \dots & R(d_{jm}) \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ R(d_{m1}) & \dots & R(d_{mk}) & \dots & R(d_{mm}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

とおくことで，次式のように行列演算で表せる。

$$\mathbf{l} = \mathbf{R} \mathbf{c} \quad (21)$$

ここで \mathbf{l} と \mathbf{c} は既知であり，求めるべきパラメータの σ_a, σ_s が含まれているのは \mathbf{R} である。しかし， \mathbf{R} には m^2 個の未知数が含まれるのに対し，拘束式は m しかないため，そのままでは解くことができない。

3.3 パッチ間距離の量子化による線形解法

本研究では， \mathbf{l} と \mathbf{c} から $R(d_{jk})$ の値を算出するために，パッチ間距離を量子化することで未知数を減らし，誤差を最小とする $R(d_{jk})$ を線形に解く方法を提案する。

距離 d_{11}, \dots, d_{mm} を n 個の離散値 d'_1, d'_2, \dots, d'_n で近似する。また，各離散化された距離における散乱項をそれぞれ R'_1, R'_2, \dots, R'_n とする。このとき d'_i は次の条件を満たす。

$$d'_1 = 0 \quad (22)$$

$$d'_n > \max(d_{jk}) \quad (23)$$

$$d'_1 < d'_2 < \dots < d'_n \quad (24)$$

d_{jk} に対し

$$d'_i \leq d_{jk} < d'_{i+1} \quad (25)$$

となる i を見つけると,

$$d_{jk} = \beta_{jk} d'_i + (1 - \beta_{jk}) d'_{i+1} \quad (26)$$

となる．このとき,

$$\beta_{jk} = \frac{d'_{i+1} - d_{jk}}{d'_{i+1} - d'_i} \quad (27)$$

である．

この関係から $R(d_{jk})$ を次式で線形近似する．

$$R(d_{jk}) \simeq \beta_{jk} R'_i + (1 - \beta_{jk}) R'_{i+1} \quad (28)$$

このとき, R'_i は d'_i に対応する測定値 R である．ここで i 番目の要素が β_{jk} , $i+1$ 番目の要素が $1 - \beta_{jk}$ それ以外の要素が全て 0 となる n 次元ベクトル

$$\mathbf{w}_{jk} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad \beta_{jk} \quad (1 - \beta_{jk}) \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (29)$$

をおき,

$$\mathbf{r} = [R'_1 \quad R'_2 \quad \dots \quad R'_n]^T \quad (30)$$

とすれば, 式 (28) は

$$R(d_{jk}) \simeq \mathbf{w}_{jk} \mathbf{r} \quad (31)$$

と表せる．

この近似を, 式 (17) に代入すると,

$$l_j \simeq \sum_{k=1}^m (c_k \mathbf{w}_{jk} \mathbf{r}) \quad (32)$$

となるので,

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m (c_k \mathbf{w}_{1k}) \\ \sum_{k=1}^m (c_k \mathbf{w}_{2k}) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^m (c_k \mathbf{w}_{mk}) \end{bmatrix} \quad (33)$$

とおくと, 式 (21) は,

$$\mathbf{l} \simeq \mathbf{W} \mathbf{r} \quad (34)$$

となる．この近似により n の未知数に対し, m の拘束式が得られるので, $n \leq m$ となる n をとれば, 擬似逆行列 \mathbf{W}^+ によって,

$$\mathbf{r} = \mathbf{W}^+ \mathbf{l} \quad (35)$$

となり, \mathbf{r} を求めることができる．

ただし, 実際には 1 枚の入力画像にはすべてのパッチが撮影されているわけではないため, \mathbf{l} と \mathbf{W} から可視パッチに対応する行のみを抜き出して, 式 (35) と同様に解く．

3.4 ダイポール近似モデルへの当てはめ

量子化による線形解法によりパッチ間の距離 d'_1, d'_2, \dots, d'_n とそれに対応する R'_1, R'_2, \dots, R'_n が得られる．この値にダイポール近似モデルを当てはめる．

ダイポール近似モデルにおける距離 d に対する散乱項 $R(d)$ は σ_s, σ_a の 2 つのパラメータによって決定される．ただし, 散乱項は d が大きくなると急激に値が小さくなるため, 実画像から得られた d'_i に対する測定値 R'_i に対し, 両者の対数をとって

$$\arg \min_{\sigma_s, \sigma_a} \sum_{i=1}^n (\log(R'_i) - \log(R(d'_i)))^2 \quad (36)$$

とすることで, σ_s, σ_a を求め, その物体固有の表面下散乱モデルを得る．

4 実験結果

4.1 シミュレーションによる評価

まず, 距離の量子化の細かさが, 最終的なパラメータ推定にどのように影響を与えるかを調べるため, コンピュータグラフィックスによって作成したノイズのない理想的な画像を用いて, シミュレーション実験を行った．

単一光源下にある四角錐を, 表 1 に示すパラメータを用いたダイポール近似モデルによって, レンダリングした．その結果を図 4 に示す．なお, パラメータ推定時には, レンダリング時に用いた幾何情報, 光源環境の情報を, そのまま既知情報として与える．

この画像を入力画像とし, 距離を量子化する幅を 8 mm から 0.03125 mm まで変化させてパラメー

表 1: 対象物体の各パラメータ (シミュレーション実験用)

σ_s	σ_a	η
2.19	0.0021	1.3

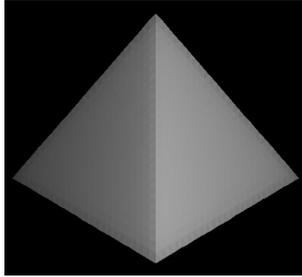


図 4: 対象物体画像 (シミュレーション実験用)

表 2: ダイポール近似モデルを当てはめる際のパラメータの範囲

	σ_s	σ_a
最小値	0.01	0.0001
最大値	3.00	0.0030
刻み幅	0.01	0.0001

タを推定した。また、ダイポール近似モデルを当てはめる際の σ_s, σ_a の最小値, 最大値, 刻み幅を表 2 に示すように同一とした。パラメータ推定の結果を表 3 に示す。

0.25 mm 幅のときに正解のパラメータが得られた。測定値にダイポールモデルを当てはめた結果を図 5 に示す。

量子化の幅が広い時には、明らかに量子化の精度が低下するため、誤差が大きいが、逆に細かすぎても誤差が大きくなる。これは、幅が細かすぎると、各距離に割り当てられるパッチの組が少なくなるためと考えられる。最適な量子化の幅を自動的に決定することは今後の課題である。

4.2 実画像を用いた実験

次に、実際に様々な材質の物体を撮影し、パラメータ推定を行った。材質は、ポリプロピレン (PP), ポリエチレン (PE), ポリオキシメチレン (POM) の 3 種とし、形状は立方体を用いた。

表 3: 量子化幅に対して得られたパラメータ

	σ_s	σ_a
真値	2.19	0.0021
8 mm 幅	0.28	0.0001
4 mm 幅	0.55	0.0001
2 mm 幅	1.49	0.0028
1 mm 幅	0.49	0.0030
0.5 mm 幅	2.63	0.0001
0.25 mm 幅	2.19	0.0021
0.125 mm 幅	2.09	0.0025
0.0625 mm 幅	2.05	0.0030
0.03125 mm 幅	0.36	0.0001

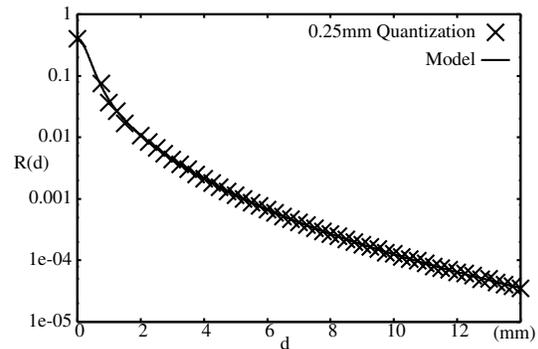


図 5: 0.25mm 幅での量子化で得られた測定値と当てはめによって得られたダイポール近似モデル



図 6: 実画像実験環境

表 4: 材質と得られたパラメータ

	σ_s	σ_a
PP	0.14	0.0030
PE	0.34	0.0001
POM	0.46	0.0001

図 6 に示すように、環境光の影響の少ない部屋で、反射率の低い光吸収暗幕シート上に対象物体を置いて、画像を撮影した。光源環境をできるだけ正確に与えるため、光源は単一の発光ダイオードとした。また、カメラは Nikon D80 であり、raw モード (12bit) で撮影した。なお、カメラや光源の 3 次元位置は測量器で計測し、パラメータ推定の際に既知情報として与えた。

撮影した画像を図 7 に示す。左から順に PP, PE, POM の立方体である。これらの 3 物体を撮影したときの、カメラと物体の位置関係、光源環境、およびカメラのシャッタースピードと絞りはすべて同一である。目視による観測では、PP, PE, POM の順に透明度が低い。実際、図 7 から、PP がもっとも光を遠くまで通すため、エネルギーが分散してしまい、1 点あたりの輝度が低く全体として暗くなっていることがわかる。

それぞれの画像に本手法を適用して推定されたパラメータを表 4 に示す。また、これらのパラメータによって決定された散乱項を図 8 に示す。PE/POM では距離が長くなると急激に散乱項の値が小さくなるため、あまり遠くまで光を通さないことが分かる。一方、PP では距離が短い時の散乱項の値がそれほど小さくなく、距離が長くなって値の低下は PE/POM ほどではないため、遠くまで光をよく通すことが分かる。この結果は、先ほどの目視による観測と一致する。

さらに、推定されたパラメータを用いて、別の形状の物体をダイポール近似モデルでレンダリングした結果を図 9 に示す。実物体である図 7 と比べて、表面下散乱の度合いが、比較的良好に再現されていることがわかる。

5 まとめ

本稿では、半透明物体の表面下散乱を推定する手法を提案した。表面下散乱に影響を与えるパッチ

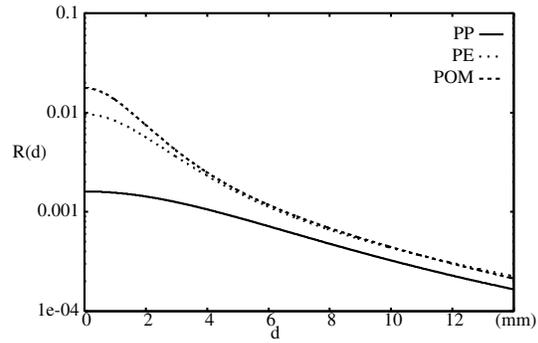


図 8: ダイポール近似モデルに当てはめた、それぞれの材質の d と $R(d)$ の関係

間の距離を量子化することにより、散乱項を線形的に解き、散乱項にダイポール近似モデルを当てはめることで、対象物体固有のパラメータを推定する手法を提案した。

提案手法により、半透明物体で生じる表面下散乱のパラメータを、レーザー光などの特別な光源・装置を用いることなく、一般照明下で推定することが原理上可能であることを明らかにした。しかし、パラメータ推定の正確さと安定性については、さらなる改善が必要である。まず、正確さについては、シミュレーション実験では、量子化の幅さえ適切に設定できれば、真値を見つけられることを確認した。しかし、実画像を用いた実験では、真値が不明であることから誤差評価をしていないが、再現性についても課題が残っている。すなわち、撮影条件を変えると、必ずしも同じパラメータが推定されるわけではない。

これは、本研究で仮定した BSSRDF モデルそのものが、撮影画像にうまく当てはまらないことも原因の一つである。実際、ダイポール近似モデルでは、対象物体の厚みや形状については考慮されていない。より実シーンをうまく表現できる BSSRDF モデルと組み合わせることも今後の課題である。

本研究は、科研費若手研究 (A) (17680018) の助成による。

参考文献

- [1] 佐藤洋一, 向川康博, “インバースレンダリング”, 情処研報 CVIM 2004-145-9, pp.65-76, 2004.

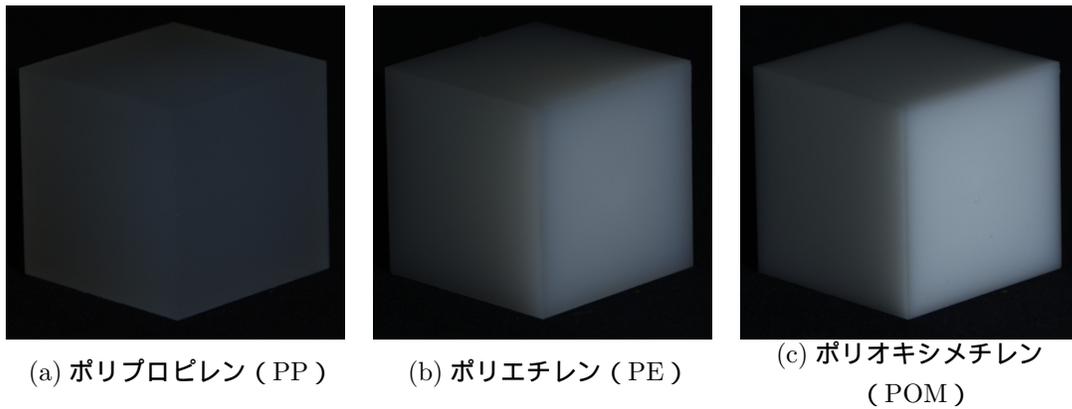


図 7: 実画像実験用画像 .

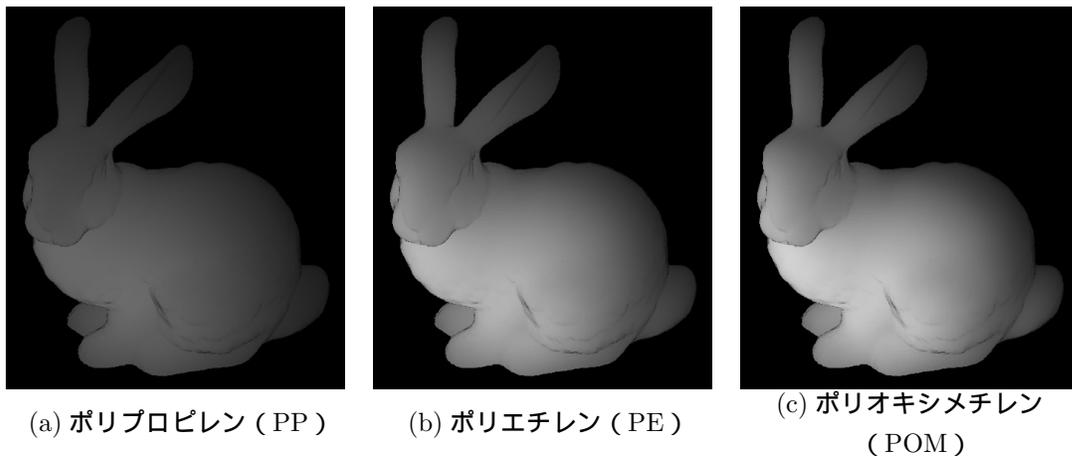


図 9: 推定した表面下散乱パラメータを用いてダイポール近似モデルでレンダリングした結果 .

- [2] S. K. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg, and R. Raskar, “Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination”, Proc. SIGGRAPH2006 pp.935-944, 2006.
- [3] H. W. Jensen, “Realistic Image Synthesis using Photon Mapping”, ISBN: 1-56881-140-7, AK Peters, 2001.
- [4] H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, and P. Hanrahan, “A Practical Model for Subsurface Light Transport”, Proc. SIGGRAPH2001, pp.511-518, 2001.
- [5] M. Goesele, H. P. A. Lensch, J. Lang, C. Fuchs, and H. P. Seidel, “Disco - Acquisition of Translucent Objects”, Proc. SIGGRAPH2004, pp.835-844, 2004.
- [6] C. Fuchs, M. Goesele, T. Chen, H. P. Seidel, “An Empirical Model for Heterogeneous Translucent Objects”, Research Report MPI-I-2005-4-006, 2005.
- [7] S. Tariq, A. Gardner, I. Llamas, A. Jones, P. Debevec, and G. Turk, “Efficient Estimation of Spatially Varying Subsurface Scattering Parameters”, Vision, Modeling, and Visualization (VMV2006), 2006.
- [8] T. Weyrich, W. Matusik, H. Pfister, B. Bickel, C. Donner, C. Tu, J. McAndless, J. Lee, A. Ngan, H. W. Jensen, and M. Gross, “Analysis of Human Faces using a Measurement-Based Skin Reflectance Model”, Proc. SIGGRAPH2006, pp.1013-1024, 2006.