一般照明下での表面下散乱の計測

向川康博*，鈴木和哉，八木康史（大阪大学）

Measurement of Subsurface Scattering under Generic Illumination

Yasuhiro Mukaigawa*, Kazuya Suzuki, Yasushi Yagi (Osaka University)

Abstract

The scattering effect of incident light, called subsurface scattering, occurs under the surface of translucent objects. In this paper, we present a method for measuring the subsurface scattering using a single image taken under generic illumination. In our method, diffuse subsurface reflectance in the subsurface scattering model can be linearly solved by quantizing the distances between each pair of surface points. Then, the dipole approximation model is fit to the diffuse subsurface reflectance. By applying our method to real images of translucent objects, we confirm that the parameters of subsurface scattering can be computed for different materials.

キーワード：表面下散乱，ダイポール近似モデル，半透明物体，インバースレンダリング
(subsurface scattering, dipole approximation model, translucent object, inverse rendering)

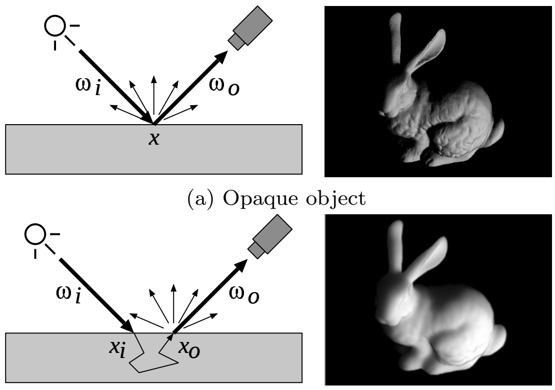
1. はじめに

物体表面に入射した光の振る舞いは，物体表面の微細形状や材質を知る上で貴重な情報である．そのため，シーンを撮影した画像を入力として，物体表面の反射光を計測・解析するための様々な手法が提案されてきた．しかし，従来の計測手法のほとんどは，主に不透明物体で生じる反射光を解析の対象としており，半透明物体を取り扱うことが難しかった．これは半透明物体では，物体表面に入射した光が内部で散乱する**表面下散乱**と呼ばれる複雑な現象が生じるためである．大理石・皮膚・ミルクが半透明物体の典型例として挙げられるが，最近の研究では，野菜や果実，布など，我々の身の回りに存在する物体の多くも実際には半透明であることがわかってきた [1]．

近年，コンピュータグラフィックス分野では，半透明物体を高速にレンダリングする手法が注目を集めている．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 [2] や，表面下散乱をダイポール近似モデルによって高速にレンダリングする手法 [3] を提案している．

一方，コンピュータビジョン分野では，これまで半透明物体はほとんど取り扱われてこなかった．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間接光としては相互反射が考慮されている程度である．近年，レーザなどを用いて物体表面上の一点を照射する方法 [3] [4] [5]，プロジェクタによってスリットパターンを投影する方法 [6] [7]，接触型の専用センサを用いる方法 [8] など，特殊な光源によって半透明物体内部での表面下散乱を計測する研究が発表され始めてきた．しかし，いずれも，限定された照明環境において専用の機器を用いた特殊な計測手法であり，一般照明下では利用できない．

そこで，本研究では一般照明下で通常のカメラによって撮影された１枚の画像を入力として，半透明物体内部での表面下散乱を計測する手法を提案する．本研究が想定する任意の照明で照らされたシーンは，従来法で取り扱うことができなかった難しい問題設定であり，物体内部での光の散乱に対してダイポール近似モデルを当てはめることで，一般シーン中に存在する半透明物体の表面下散乱を計測しようとする新しい試みである．



(a) Opaque object

(b) Translucent object

図１　BRDF と BSSRDF の違い
Fig. 1.　The difference between BRDF and BSSRDF.

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　多く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．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 1(b) のように光の入射点と出射点が一致しない．そのため，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．また，入射点の周辺には強い散乱光が到達するため，表面の細かい凹凸が見えにくくなり，全体的に滑らかな形状に見える．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．

半透明物体では，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．

$$L_o(x_o,\omega_o) = \int_A \int_\Omega S\left(x_i,\omega_i,x_o,\omega_o\right) L_i\left(x_i,\omega_i\right)\left(N\cdot\omega_i\right) d\omega_i\, dx_i \cdots (1)$$

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 における法線方向を示す．

〈2•2〉 ダイポール近似モデル　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，モンテカルロレイトレーシングやフォトンマッピングなどの手法が利用されてきた．しかし，これらのレイトレースに基づく手法では，写実性の高い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 [3] によってダイポール近似モデル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によるレンダリングの逆問題を解くことを目的とする．

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 を次式のように分解する．

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

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．

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

このとき，各変数は次式で与えられる．

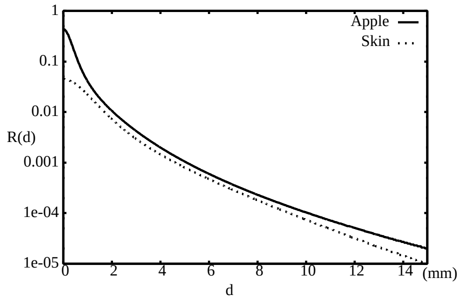


図 2　散乱項 $R(d)$ の例

Fig. 2.　Examples of $R(d)$ （Apple: $\sigma_s = 2.29$, $\sigma_a = 0.003$, $\eta = 1.3$. Skin: $\sigma_s = 0.74$, $\sigma_a = 0.032$, $\eta = 1.3$）

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

$$z_r = \frac{1}{\sigma_t'},\quad z_v = z_r(1+\frac{4}{3}A) \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

$$A = \frac{1+F_{dr}}{1-F_{dr}} \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

$$F_{dr} = -\frac{1.440}{\eta^2}+\frac{0.710}{\eta}+0.668+0.0636\eta \cdots\cdots (7)$$

$$\sigma_{tr} = \sqrt{3\sigma_a\sigma_t'},\quad \sigma_t' = \sigma_s'+\sigma_a,\quad \sigma_s' = \sigma_s(1-g)\ (8)$$

$$\alpha = \sigma_s'/\sigma_t' \cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

ここで σ_s, σ_a は材質に固有のパラメータであり，それぞれ散乱係数，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り，等方散乱の場合は $g = 0$ となる．

このように，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．これらのパラメータを変化させた場合に，散乱項 $R(d)$ がどのように変化するかを図 2 に例示する．この例では，リンゴと皮膚に対応するパラメータ [3] を与えた場合に，入射点と出射点の距離が離れるに従って，散乱光がそれぞれどのように減衰するかを示している．

3. 量子化による表面下散乱推定

〈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，以下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
材質： 対象物体の材質は均一で等方散乱を生じる
光源環境： 光源の輝度分布 $L_i(x_i, \omega_i)$ は既知
放射輝度： 撮影した画像より，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

〈3•2〉 パッチ分割による定式化　物体表面を十分に小さい m 個の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，サンプル点の 3 次元座標 x_i とその法線方向 N は容易に求めら

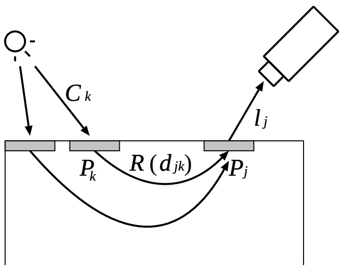


図 3　パッチ分割による放射輝度の定式化
Fig. 3.　Formulation of radiance by patch division.

れ，各パッチの明るさは次式のように表される．

$$L_o(P_j) = \frac{1}{\pi} F_{t,o}(\eta, \omega_o) \sum_{k=1}^{m} \left\{ R(d_{jk}) \int_{\Omega} L_i(P_k, \omega_i) F_{t,i}(\eta, \omega_i) \max(0, N \cdot \omega_i) d\omega_i \right\} \quad (10)$$

ここで，$L_o(P_j)$ はパッチ P_j のサンプル点の放射輝度，d_{jk} は P_j から P_k までの直線距離，$L_i(P_k, \omega_i)$ は 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．

なお，Jensen ら [3] や Goesele ら [4] の研究から，大理石などの一部の材質を除けば相対屈折率 η は 1.3 であることが経験的に知られている．本研究でもこれにならい，計測が困難な相対屈折率を 1.3 とする．これにより，フレネル関数 $F_{t,o}(\eta, \omega_o)$，$F_{t,i}(\eta, \omega_i)$ は対象の位置形状と照明環境，カメラ位置から計算できる．

ここで，

$$l_j = \pi L_o(P_j) / F_{t,o}(\eta, \omega_o) \quad (11)$$

$$c_k = \int_{\Omega} L_i(P_k, \omega_i) F_{t,i}(\eta, \omega_i) \max(0, N \cdot \omega_i) d\omega_i \quad (12)$$

とおけば，式 (10) から，

$$l_j = \sum_{k=1}^{m} (R(d_{jk}) c_k) \quad (13)$$

となる．これは，図 3 のように，パッチ P_j の放射輝度 l_j は，別のパッチ P_k への照度 c_k と，パッチ間の距離を d_{jk} とした散乱項 $R(d_{jk})$ の積を，すべてのパッチで総和をとった値から算出できることを意味している．これを，物体表面の全てのパッチで計算すると，

$$\mathbf{l} = [l_1, l_2, \ldots, l_m]^{\mathrm{T}}, \quad \mathbf{c} = [c_1, c_2, \ldots, c_m]^{\mathrm{T}} \quad (14)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R(d_{11}) \ldots R(d_{1k}) \ldots R(d_{1m}) \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \quad\quad \vdots \\ R(d_{j1}) \ldots R(d_{jk}) \ldots R(d_{jm}) \\ \vdots \quad\quad \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ R(d_{m1}) \ldots R(d_{mk}) \ldots R(d_{mm}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

とおくことで，次式のように行列演算で表せる．

$$\mathbf{l} = \mathbf{R}\mathbf{c} \quad (16)$$

ここで，$\mathbf{l}$ と $\mathbf{c}$ は既知であり，求めるべきパラメータ 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 $d_{11}, \ldots, d_{mm}$ を n 個の離散値 $d'_1, d'_2, \ldots, d'_n$ 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 $R'_1, R'_2, \ldots, R'_n$ とする．このとき d'_i は以下の条件を満たす．

$$d'_1 = 0, \quad d'_n > \max(d_{jk}) \quad (17)$$

$$d'_1 < d'_2 < \cdots < d'_n \quad (18)$$

d_{jk} に対し

$$d'_i \le d_{jk} < d'_{i+1} \quad (19)$$

となる i を見つけると，

$$d_{jk} = \beta_{jk} d'_i + (1 - \beta_{jk}) d'_{i+1} \quad (20)$$

となる．重み係数 β_{jk} は次式で求められる．

$$\beta_{jk} = \frac{d'_{i+1} - d_{jk}}{d'_{i+1} - d'_i} \quad (21)$$

この関係から $R(d_{jk})$ を次式で線形近似する．

$$R(d_{jk}) \simeq \beta_{jk} R'_i + (1 - \beta_{jk}) R'_{i+1} \quad (22)$$

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

$$\mathbf{w_{jk}} = [\cdots \quad 0 \quad \beta_{jk} \quad (1 - \beta_{jk}) \quad 0 \quad \cdots] \quad (23)$$

を考え，

$$\mathbf{r} = [\, R'_1 \quad R'_2 \quad \ldots \quad R'_n \,]^{\mathrm{T}} \quad (24)$$

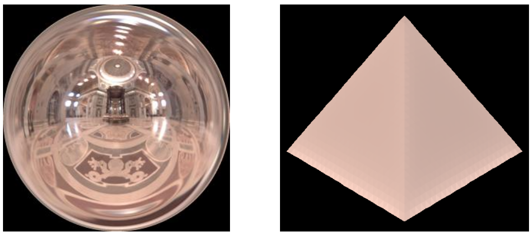
とすれば，式 (22) は

$$R(d_{jk}) \simeq \mathbf{w_{jk}} \mathbf{r} \quad (25)$$

と表せる．この近似を，式 (13) に代入すると，

$$l_j \simeq \sum_{k=1}^{m} (c_k \mathbf{w_{jk}} \mathbf{r}) \quad (26)$$

となるので，式 (16) は，次式のように近似できる．



(a) illumination environment　(b) synthesized image

図 4　シミュレーション実験のための照明環境と合成画像

Fig. 4.　Simulated scene.

表 1　パラメータの範囲

Table 1.　Range of parameters.

	σ_s	σ_a
minimum	0.01	0.000
maximum	3.00	0.010
step	0.01	0.001

$$\mathbf{l} \simeq \mathbf{W}\mathbf{r}, \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{m}(c_k \mathbf{w_{1k}}) \\ \sum_{k=1}^{m}(c_k \mathbf{w_{2k}}) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{m}(c_k \mathbf{w_{mk}}) \end{bmatrix} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (27)$$

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，$n \leq m$ であれば擬似逆行列 $\mathbf{W}^+$ によって，次式のように $\mathbf{r}$ を求めることができる．

$$\mathbf{r} = \mathbf{W}^+\mathbf{l} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (28)$$

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 (28) と同様に解く．

〈3•4〉 ダイポール近似モデルの当てはめ　量子化による線形解法によりパッチ間の距離 $d'_1, d'_2, \ldots, d'_n$ とそれに対応する $R'_1, R'_2, \ldots, R'_n$ が得られる．次に，この値にダイポール近似モデルを当てはめる．屈折率 η を既知としているため，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．実画像から得られた d'_i に対する測定値 R'_i に対し，

$$\arg\min_{\sigma_s, \sigma_a} \sum_{i=1}^{n}(R'_i - R(d'_i))^2 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (29)$$

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

〈4•1〉 距離の量子化に対する誤差評価　まず，距離の量子化が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に，シミュレーション実験を行った．一般照明環境として，図 4(a) に示す球面反射球を用いて撮影した環境データ[†]を利用し，環境データ各点の光源が対象物体を中心とする半径が無限遠の球面上にあるものとした．ダイポール近似モデルのパラメータを，$\sigma_s = 2.19$, $\sigma_a = 0.002$, $\eta = 1.3$ として，図 4(b) に示す四角錐をレンダリングし，これを入力画像とした．

パラメータ σ_s, σ_a を探索するための最小値，最大値，刻み幅は，それぞれ表 1 のように設定した．パッチ間距離の量子化幅を 0.05mm から 0.50mm まで 0.05mm 刻みで変化させた場合に，誤差が最小となったパラメータの組み合わせを表 2 に示す．散乱係数 σ_s は概ね真値に近い値が推定できているが，吸収係数 σ_a は全体的に真値よりもやや大きめとなり，推定は不安定であった．

推定したパラメータの正確さを定量的に評価するために，推定したパラメータによって画像を再レンダリングし，入力画像との差を PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) で評価した．各量子化幅に対する PSNR を表 2 と図 5 に示す．一般に，画質評価においては PSNR が 40dB 以上であれば，二つの画像の見分けはつかないと言われている．量子化幅 0.10mm と 0.35mm で PSNR が 40dB を上回っており，そ

表 2　推定されたパラメータと PSNR

Table 2.　Estimated parameters and PSNR.

Sampling [mm]	σ_s	σ_a	PSNR [dB]
0.05	2.14	0.000	26.47
0.10	2.20	0.007	42.12
0.15	2.19	0.004	30.58
0.20	2.19	0.009	33.47
0.25	2.19	0.005	28.69
0.30	2.32	0.009	29.78
0.35	2.34	0.009	47.93
0.40	2.22	0.009	25.76
0.45	2.18	0.009	20.35
0.50	2.40	0.009	23.43
Ground truth	2.19	0.002	–

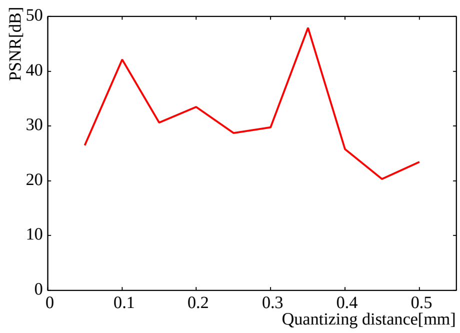


図 5　量子化幅と PSNR の関係

Fig. 5.　Relationship between quantizing distance and PSNR.

[†] http://www.debevec.org/Probes/

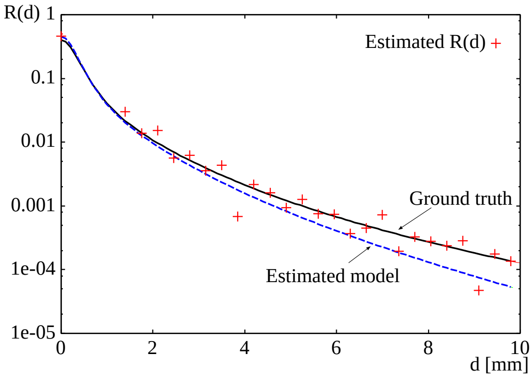


図 6　ダイポール近似モデルの当てはめ
Fig. 6.　Fitting of dipole approximation model.

図 7　実物体の撮影環境
Fig. 7.　Environment for capturing real objects.

の間の区間においても 30dB 程度の精度が得られている．量子化幅 0.35mm の場合の推定した散乱項とダイポール近似モデルの関係を図 6 に示す．外れ値の影響で真値よりやや小さめの値となっているが，概ね正しいフィッティング結果となってることが分かる．

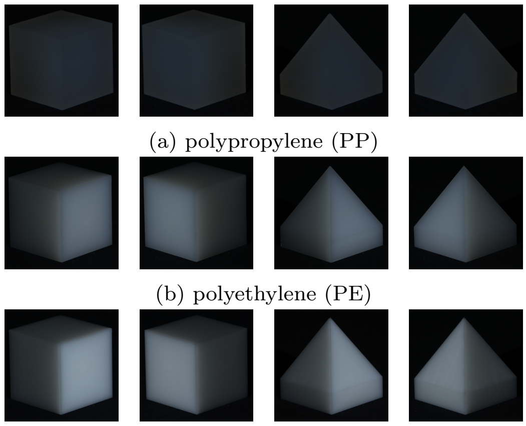
最適な量子化の幅は対象物体のパッチの区切り方などに依存するために一概にはいえないが，量子化の幅が広いと量子化の精度が低下するため誤差が大きくなりやすい．逆に，量子化幅 0.05mm で精度が低下しているのは，量子化幅が細かすぎると散乱項推定の際の未知数が増え，逆行列の推定が不安定になるためと考えられる．最適な量子化幅の決定は，今後の検討課題である．

〈4·2〉 実画像に対するパラメータ推定実験　次に，実際に様々な材質の半透明物体を撮影し，パラメータ推定を行った．図 7 のような環境光の影響の少ない部屋で，光吸収暗幕シート上に対象物体を置いて撮影した．本手法では任意の照明環境を利用できるが，照明環境を正確に計測するために単一の発光ダイオードを光源とした．カメラと光源の 3 次元位置は測量器を用いて正確に計測した．カメラは Nikon D80 であり，raw モード (12bit) で撮影した．

対象物体の材質は，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，それぞれ形状は立方体と台付の四角錘の 2 種とした．また，光源位置を変えることで 2 種類の照明環境（照明 1，照明 2）を用意し，図 8 に示す 3 素材× 2 形状× 2 照明＝合計 12 枚の画像を撮影した．これらの画像を撮影したときの，カメラと物体の位置関係，光源強度，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．

目視によれば，PP の散乱がもっとも強く，PE と POM は散乱がさほど強くなく質感は似ている．実際，図 8 からも，PP がもっとも光の散乱が強いため，全体として暗くなっていることがわかる．また，PE と POM は光の広がり方が違うものの，似た輝度分布となっている．

これらの画像に対し，ダイポール近似モデルを当てはめ，パラメータを推定した．パラメータ σ_s, σ_a の変動範囲は



(a) polypropylene (PP)

(b) polyethylene (PE)

(c) polyoxymethylene (POM)

図 8　半透明物体
Fig. 8.　Translucent objects.

前節の実験と同じであるが，本実験では距離の量子化幅も 0.05mm から 0.50mm まで 0.05mm 刻みで変化させ，もっとも誤差が小さくなるパラメータと量子化距離を求めた．パラメータは材質に対して一意に決まるので，同一材質であれば形状と照明が異なる場合でも，同じパラメータを推定できるのが理想である．

推定されたパラメータを表 3 に示す．また，各画像ごとの推定パラメータを，横軸を σ_s，縦軸を σ_a としてプロットしたものを図 9 に示す．前節の実験と同様に σ_a の推定はやや不安定となったが，σ_s については照明 1 の立方体を除けば，3 種の材質ごとに似たパラメータが推定された．照明 1 の立方体は材質に関わらず特異な結果となっていることから，この形状と照明の組合わせによる表面下散乱は，そもそもダイポール近似モデルで表現できず，散乱項の推定が不安定になってしまったことなどが原因として考えられる．

図 10 に，材質ごとに得られたパラメータの平均値による散乱項の変化を示す．PE と POM は，比較的似た減衰を示しており，PP ほど変化が大きくない．さらに，これらのパラメータ組を用いて，別の形状の物体をレンダリングした CG の例を図 11 に示す．材質ごとに異なる表面下散乱となっていることがわかる．

表 3　推定されたパラメータ

Table 3.　Estimated parameters.

material	shape	illumination	σ_s	σ_a
PP	cube	1	2.62	0.010
		2	1.69	0.000
	pyramid	1	2.07	0.010
		2	2.12	0.010
PE	cube	1	0.01	0.001
		2	0.08	0.001
	pyramid	1	0.28	0.000
		2	0.15	0.010
POM	cube	1	0.03	0.000
		2	0.37	0.010
	pyramid	1	0.56	0.010
		2	0.37	0.010

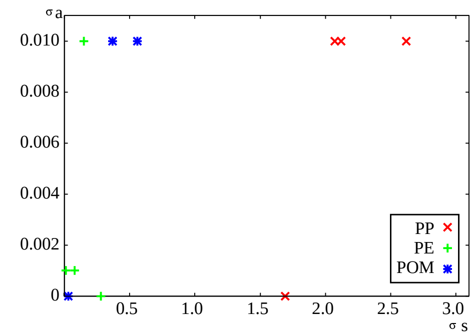


図 9　推定されたパラメータの分布

Fig. 9.　Distribution of the estimated parameters.

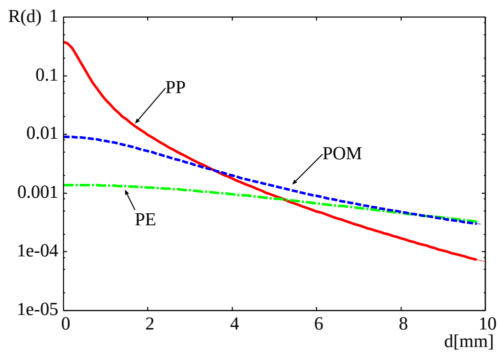


図 10　材質ごとのダイポール近似モデル

Fig. 10.　Dipole approximation model for each material.

5. おわりに

本研究では，一般照明下において半透明物体を撮影した１枚の画像から，表面下散乱を計測する手法を提案した．物体表面のパッチ間距離を量子化することで，散乱項を線形的に算出する方法を明らかにした．提案手法により，レーザや構造化光などの特殊な光源を用いることなく，一般照明下で生じる表面下散乱の解析を可能とした．

シミュレーション実験では，量子化の幅を適切に設定すれば，十分な精度でパラメータを推定できることを示した．

(a) PP　(b) PE　(c) POM

図 11　推定したパラメータを用いてレンダリングした結果

Fig. 11.　Rendering results using estimated parameters.

ただし，実画像実験では，同一素材に対して異なるパラメータを推定してしまうなどの正確性の問題が残っている．これは，ノイズの影響だけではなく，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っていないことも原因と考えられる．実際，ダイポール近似モデルは，対象物体の３次元形状を考慮していない．今後は，より適切なパラメータを求めるために，複数の画像を用いることでノイズの影響を低減したり，対象物体の形状を考慮した BSSRDF モデルを利用して精度を高めることなどが課題である．

なお，本研究の一部は，文部科学省科学技術振興調整費「新映像技術ダイブイントゥザムービーの研究」により進められている．

参考文献

（1） 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.

（2） H. W. Jensen, "Realistic Image Synthesis using Photon Mapping", ISBN: 1-56881-140-7, AK Peters, 2001.

（3） H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, and P. Hanrahan, "A Practical Model for Subsurface Light Transport", Proc. SIGGRAPH2001, pp.511-518, 2001.

（4） 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.

（5） C. Fuchs, M. Goesele, T. Chen, H. P. Seidel, "An Empirical Model for Heterogeneous Translucent Objects", Research Report MPI-I-2005-4-006, 2005.

（6） S. Tariq, A. Gardner, I. Llamas, A. Jones, P. Debevec, and G. Turk, "Efficient Estimation of Spatially Varying Subsurface Scattering Parameters", Vision, Modeling, and Visualzation (VMV2006), 2006.

（7） P.Peers, K.v.Berge, W.Matusik, R.Ramamoorthi, J.Lawrence, S.Rusinkiewicz,P.Dutré, "A Compact Factored Representation of Heterogeneous Subsurface Scattering", Proc. SIGGRAPH2006, pp.746-753, 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.