

反射・散乱の計測とモデル化

向川 康博^{†1}

物体が照明されると、一部の光は物体の表面で反射し、一部の光は物体の内部にまで到達して散乱する。人間の目やカメラで観測される物体の見えは、その材質や表面の微細形状に依存する。照明方向や観測方向を変えることによって、観測される明るさがどのように変化するかを解析するために、これまでに様々な表現方法やモデルが考案されてきた。本稿では、反射と散乱の2つの物理現象を取り上げ、それらの計測手段と表現方法について概説する。

Measurement and Modeling of Reflection and Scattering

YASUHIRO MUKAIGAWA^{†1}

When an object is illuminated, part of the light reflects on the surface and some scatter underneath the surface. The appearance of the object observed by a camera or human eyes depends on a material and micro-structure of the surface. To analyze a change of the surface intensity due to lighting and viewing directions, a variety of models and measuring methods have been proposed in the past. This paper focuses on optical phenomena of the reflection and scattering and outlines their methods of the measurement and models.

1. はじめに

3次元シーン中のある点が、2次元画像上のどの位置に射影されるかという幾何学的な関係については、古典的なピンホールカメラモデルだけでなく、レンズ収差も含めて十分に説明されているといつてよい。それに対して、シーン中のある点が2次元画像上でどのような明るさで記録されるかという測光学的な関係については、未だに正確なモデル化が難しく、

うまく表現できない光学現象も残っており、発展途上といえる。

シーンが照明されると、一部の光は物体の表面で反射し、一部の光は物体の内部にまで到達して散乱する。これらの反射や散乱の特性は、物体表面の滑らかさといった目に見えない微視的な構造や材質の違いによっても大きく変化する。照明方向や観測方向を変えることによって、観測される明るさがどのように変化するかを表現するために、コンピュータグラフィックス(CG)の分野では、様々な表現方法やレンダリング手法が考案されている。特に近年では、半透明物体のレンダリング技術が急速に進化し、違和感なくCGで表現された人間の肌を映画などで見かけることも多くなってきた。

基本的には、できるだけ物理現象を詳細に表現したモデルを用いた方がCGの写実性は向上する。同様に、シーン解析を目的とするコンピュータビジョン(CV)でも、モデルは物理現象に忠実である方がよい。一般に、CG分野の方が、いかに実世界に忠実であるべきかという点では要求レベルが高いため、モデル開発では先行している。そのため、CV研究者は、CG分野での成果を解析のために取り入れていくことになる。

しかし、CG分野でレンダリングのために開発されたモデルを、CV分野で解析のために利用する場合には、いくつかの注意が必要である。まず、CGでは必ずしも物理現象に忠実である必要はなく、より短いレンダリング時間で「それらしく」見えれば十分な場合があり、そのようなモデルは解析には向かない。また、CGでは見え方を直感的に制御できるパラメータが好まれ、必ずしも物理現象に一対一に対応していない場合がある。さらに操作しやすいようにパラメータを増やしている場合には、解析が不安定になってしまう。従って、CV分野で解析のために用いるモデルは、目的や物理現象の複雑さに応じて、適切に選択する必要がある。

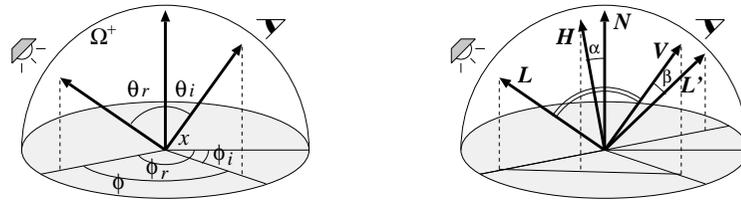
本稿では、物体表面での反射と、物体内部での散乱の2つの物理現象を取り上げ、表現形式が歴史的にどのように扱われてきたかを概説する。さらに、実際の計測方法についても、最新の研究事例も含めて紹介する。

2. 反射特性のモデル

2.1 双方向反射率分布関数

物体表面の反射特性は、双方向反射率分布関数(BRDF: Bi-directional Reflectance Distribution Function)によって表現される。物体表面上のある点 x におけるBRDFは、図1(a)に示すように入射と反射の双方向に依存し、照明方向 (θ_i, ϕ_i) からの入射光の強さ(イラディアン)に対する、観測方向 (θ_r, ϕ_r) への反射光の強さ(ラディアン)の比として

^{†1} 大阪大学
Osaka University



(a) 照明・観測方向を表す角度パラメータ (b) 反射モデルに用いられるベクトル

図 1 反射を表現する際に用いられる角度パラメータとベクトル

定義される。厳密には BRDF は波長にも依存するが、画像の生成や解析のためには各波長ごとの反射率は冗長であることが多いため、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の 3 チャンネルごとに BRDF を定義し、次式のように 4 つの角度をパラメータとするのが一般的である。

$$f_{BRDF}(x, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r). \quad (1)$$

なお、図 1(b) に示す照明方向 L と観測方向 V を固定し、対象物体を観測面の法線 N を軸に回転させたとき、明るさが変化するものを異方性反射、変化しないものを等方性反射と呼ぶ。異方性反射は織物やヘアライン加工された金属などで見られる比較的特殊な反射である。一方、等方性反射は、その性質から方位角については相対角 $\phi = \phi_r - \phi_i$ で決まるため、次式のように 3 つの角度パラメータでの記述が可能である。

$$f_{BRDF}^{isotropic}(x, \theta_i, \theta_r, \phi). \quad (2)$$

BRDF は、反射という物理現象を表現するため、次に挙げる二つの条件を満たす。

条件-1: 相反性 (レシプロシティ)

入射方向と反射方向を入れ替えても値が変化しない。すなわち、

$$f_{BRDF}(x, L, V) = f_{BRDF}(x, V, L). \quad (3)$$

条件-2: エネルギー保存の法則

反射光の総和が、入射光の総和を越えてはならない。すなわち、

$$\int_{\Omega^+} f_{BRDF}(x, L, V)(N \cdot L)dL \leq 1. \quad (4)$$

ここで、 Ω^+ は、観測点から見える半球面である。

これらの性質をもつ BRDF を具現化したものが反射モデルである。なお、BRDF はイラディアンズに対するラディアンズの比として定義され、照明方向と法線方向の角度関係は含めず、純粋に表面の材質のみを反映する関数である。したがって、反射光の強度を算出する

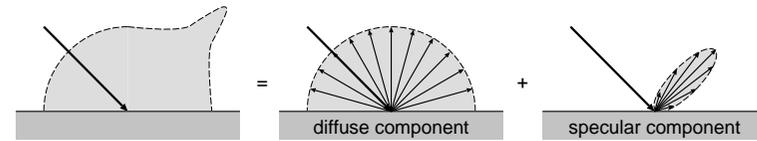


図 2 拡散反射成分と鏡面反射成分

場合は、式 (4) のように $\cos \theta_r (= N \cdot L)$ を乗ずる必要がある。一方、反射モデルは直感的な取扱いを容易にするために、法線の向きを表す余弦の項も含めるのが一般的である。

できるだけ単純なパラメトリック関数で現実の反射特性を正確に表現することを目指して、現在までに様々な反射モデルが提案されてきた。多くの反射モデルは、図 2 のように、反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分の和として近似する^{*1}。以下、拡散反射成分と鏡面反射成分の具体的な反射モデルを、それぞれ順に述べる。

2.2 拡散反射モデル

拡散反射は、入射光が表面層内部で乱反射することで生じる成分であり、観測方向に依存せず、あらゆる方向に均一の強度で観測される。そのため、拡散反射の BRDF は角度パラメータに依存せず定数となる。ざらざらした石膏などで観測される反射光は、ほぼ拡散反射成分だけを含む。拡散反射モデルとして、次式のように、拡散反射の強さは照明方向と法線方向のなす角の余弦に比例すると仮定する Lambert モデルが広く用いられている。

$$i = \rho_d \max(0, N \cdot L). \quad (5)$$

ここで、 ρ_d は拡散反射率 (ディフューズアルベドとも呼ばれる) であり、物体色を表す。

なお、コンピュータビジョン分野では、線形演算が可能であることから、Lambert モデルが陰影解析のために広く用いられている。一方、コンピュータグラフィクス分野では、微小面によって生じる自己遮蔽や自己陰影などの影響を考慮した Oren-Nayar モデル¹⁾ も、より現実に近い反射モデルとして利用されている。

2.3 鏡面反射モデル

鏡面反射は、入射光が大気と表面層との境界において反射することで生じる成分であり、正反射方向付近で強く観測される。なめらかな表面で強く観測され、ハイライトとも呼ばれる。鏡面反射は正確なモデル化が難しいことから、多くの反射モデルが提案されている。

*1 初期の反射モデルでは環境光成分も定数として含めていたが、大域照明による間接光の表現が一般的になってからは利用されなくなった。

ここでは、各モデルに含まれている鏡面反射成分の項を比較する。

Phong モデル²⁾ は、経験に基づく古典的なモデルであり、次式のように照明方向の正反射方向 L' と観測方向 V のなす角 β の余弦のべき乗として近似するモデルである。

$$i = \rho_s \cos^n \beta. \quad (6)$$

ここで、 ρ_s は鏡面反射率であり、鏡面反射の強さを表す。係数 n は、表面の粗さを表すパラメータである。このモデルは、あくまで経験に基づくものであり、エネルギー保存の法則を満たす保証がないなどの性質は気をつける必要はあるが、簡単に計算できるため、計算機能力が低かった初期の CG ではよく用いられた。

Torrance-Sparrow³⁾ モデルは、もっとも初期に開発され、物理的な解析に基づいた反射モデルである。鏡面反射の強度は、実際には正反射方向から少しずれた角度でピークをもつ性質があり、これをオフスペキュラーと呼ぶ。Torrance-Sparrow モデルは、物体表面は微小面の集合で構成されると仮定し、微小面による遮蔽やフレネル反射を解析することでオフスペキュラーを表現できる物理的に正しいモデルである。

光学の分野で開発された Torrance-Sparrow モデルは、後に Blinn⁴⁾ によって簡潔に再定義され、コンピュータグラフィックスに応用された。Blinn の定式化によれば、鏡面反射の強度は次式で表現される。

$$i = \rho_s \frac{DGF}{N \cdot V}. \quad (7)$$

ここで、 D は法線分布項であり、物体表面の法線のばらつきを表現する。 G は幾何減衰項であり、微小面の凹凸によって生じる自己遮蔽・自己陰影を表現する。 F はフレネル項であり、物理的な特性が異なる領域の境界では反射が生じ、屈折率や光の入射角度により反射率が変化するフレネル反射を表現する。以下、それぞれの具体的な定式化を順に説明する。

まず、法線分布項 D を定義するために、物体表面は完全な鏡面反射を生じる微小面の集合で構成されると仮定する。法線分布項 D は、照明方向と観測方向の 2 等分方向（ハーフベクトル） H と、法線方向 N のなす角 α の確率密度関数を表す。すなわち、ハーフベクトルに対して、微小面の法線がどれだけばらついているかを表す。具体的な法線分布項を表すパラメトリック関数として、以下に挙げるように様々な定式化が試みられている。

D_1 は、微小面の法線のばらつきを、 α の余弦のべき乗で近似したモデルである。Phong モデルと基本的な考え方は似ているが、Phong モデルが照明方向の正反射方向と観測方向のなす角によって定義されていたのに対して、これを照明方向と観測方向の 2 等分方向で定義しなおすことで、反射の相反性を満たすように改良したものである。

$$D_1 = \cos^{n_1} \alpha. \quad (8)$$

D_2 は、微小面の法線のばらつきをガウス関数で近似したモデルであり、Torrance-Sparrow モデルで用いられている。

$$D_2 = e^{-(\alpha n_2)^2}. \quad (9)$$

D_3 は、Trowbridge-Reitz によって提案された分布モデルである。

$$D_3 = \left(\frac{(n_3)^2}{\cos^2 \alpha ((n_3)^2 - 1) + 1} \right)^2. \quad (10)$$

次に、微小面の凹凸によって生じる自己遮蔽・自己陰影を表現する幾何減衰項 G は、入射光が遮られるシャドウイングと、反射光が遮られるマスキングを考慮したモデルである。いずれも、照明方向もしくは観測方向が物体の接平面に近づくほど減衰が大きくなり、次式のように定式化される。

$$G = \min \left(1, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{(V \cdot H)}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{(V \cdot H)} \right). \quad (11)$$

最後に、フレネル反射を表現するフレネル項 F は、照明方向もしくは観測方向が物体の接平面に近づくほど強くなり、次式のような近似式によって定式化される^{*1}。

$$F = \frac{1}{2} \frac{(g - c)^2}{(g + c)^2} \cdot \left(1 + \frac{(c(g + c) - 1)^2}{(c(g - c) + 1)^2} \right), \quad (12)$$

$$c = V \cdot H, \quad g = \sqrt{\eta^2 + c^2 - 1}. \quad (13)$$

ここで、 η は相対屈折率である。

Cook-Torrance モデル⁵⁾ は、Torrance-Sparrow モデル中の法線分布項 D を、次式のように絶対強度を直接算出できるベックマン分布で表現したものである。

$$D_4 = \frac{1}{(n_4)^2 \cos^4 \alpha} e^{-\left(\frac{\tan^2 \alpha}{(n_4)^2} \right)}. \quad (14)$$

また、Cook-Torrance モデルでは、分光反射率を用いることで、反射光の波長ごとのエネルギー分布を算出する。これにより、光源色とは異なる色として観測される金属面での鏡面

*1 厳密なフレネル反射の計算は複雑であるため、通常はこのような近似式が用いられることが多い。この他にもいくつかの近似的な計算法が知られている。

反射を、より正確に表現できるようになる。

Ward モデル⁶⁾ は、彼が開発した BRDF 計測システムで得られた計測値を記述するために考案された、異方性反射を表現できる反射モデルである。多くの異方性反射は、織物であれば繊維方向、ヘアライン加工された金属であればブラシ方向といったように、反射が線対称となる軸を持つ。そこで、Torrance-Sparrow モデルのうち、法線分布項 D のみを取り出し、表面の粗さ係数を対称軸に平行な方向と垂直な方向に別々に定義できるように拡張した。これにより、法線を軸に観測面を回転させたときの見え方の変化を表現できる。

このように、オフスペキュラーや異方性反射などの特徴を表現するために、個別に反射モデルが開発されてきた。一方、これらの特徴をすべて表現することを目指した Lafortune モデル⁷⁾ は、コサインローブを一般化した汎用的な反射モデルである。

なお、本節で述べた BRDF、及びそれを具現化した反射モデルは、物体表面上のある 1 点の反射特性を独立に表現するものである。物体表面上の隣接する点同士の関係、すなわち空間的な分布を表現したい場合には、BRDF をテクスチャに拡張した BTF (Bi-directional Texture Function) が利用される。

3. 反射特性の計測

実物体の反射特性を正確に知ることができれば、より写実性の高い CG を合成できるだけでなく、塗装面の検査や表面微細形状に基づく真贋判定など、様々な応用が期待される。2.1 節でも述べたとおり、BRDF は入射と反射の双方向に依存するため、物体表面上の計測点に対して、照明方向と観測方向を様々に変化させた場合の反射光強度をサンプリングする必要がある。本節では、BRDF のサンプリング方法について述べた後、サンプリング値と反射モデルの関係について説明する。

3.1 BRDF のサンプリング方法

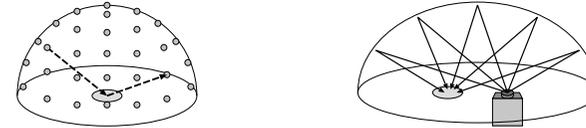
物体表面上の計測点に対して、照明方向と観測方向を様々に変化させた場合の BRDF をサンプリングする方法は、用いる装置や前提条件の違いによって、主に 4 つの手法に大別できる。以下では、それぞれのサンプリング方法とともに、その利点と問題点を整理する。

3.1.1 光源とセンサを機械的に回転

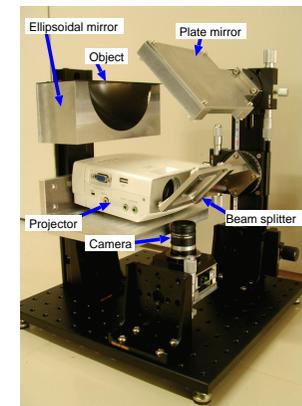
図 3(a) のように、ロボットアームや回転ステージに光源とセンサ（あるいは対象物体）を取り付け、機械的に回転させることで、計測面の法線方向に対して照明方向と観測方向を様々に変化させた場合の BRDF をサンプリングすることができる。計測点を中心とした半球面上で光源とセンサを均一かつ密に回転させるためには、専用の計測装置であるゴニオリ



(a) 光源とセンサを機械的に回転 (b) 反射特性が一般的な物体を利用



(c) 光源とセンサを半球状に配置 (d) 反射屈折光学系を工夫



(e) 楕円鏡とプロジェクタを用いた BRDF 計測システム (RCG-2)¹⁸⁾

図 3 BRDF のサンプリング

フレクトメータが利用される⁸⁾。回転角度を小さくすることで密な BRDF をサンプリングできるが、機械的な回転のために計測時間が長くなるのが問題である。

3.1.2 反射特性が一般的な物体を利用

簡便な方法として、物体表面の BRDF が一般であれば、少数の画像から BRDF をサンプリングすることができる。例えば、球はすべての法線方向を含むため、図 3(b) のように光源とカメラを固定して球を撮影するだけでも、球面上の各点における法線に対して相対的に照明方向と観測方向が異なる BRDF のサンプリングが可能である⁹⁾。さらに光源位置を変

化させれば、より多くの BRDF をサンプリングできる。布などのように球にすることが難しい素材の場合は円筒に巻きつけるなどの工夫も可能である¹⁰⁾。さらに、3次元スキャナと併用することで、人間の顔などの任意形状を撮影した画像から BRDF をサンプリングすることも可能である¹¹⁾。形状が既知であれば比較的手軽に計測できるが、不均一な BRDF を持つ物体には適用できないという制限がある。

3.1.3 光源とセンサを半球状に配置

光源やセンサを物理的に回転させる代わりに、図 3(c) のように、計測対象を中心に光源とセンサを半球状に配置することで、入射角と反射角の様々な組み合わせによる BRDF をサンプリングできる。151 台のフラッシュ付きカメラを半球上に配置したシステム¹²⁾ や、半球上に配置した LED を光源とセンサの両方の機能のために利用するシステム¹³⁾ などが開発されている。光源とセンサの機械系な回転が不要であることから高速な計測が可能であるが、物理的な制約から密な BRDF のサンプリングは難しい。

3.1.4 反射屈折光学系を工夫

鏡、魚眼レンズ、ビームスプリッタなどの反射屈折光学系を工夫することで、機械的な回転機構を用いることなく照明・観測方向を高速かつ密に変化させて BRDF をサンプリングできる。光源やセンサの角度を仮想的に変化させるために、楕円鏡¹⁴⁾ や放物面鏡¹⁵⁾ の他、円筒状の鏡¹⁶⁾ や万華鏡のように平面鏡を組み合わせたもの¹⁷⁾ など、鏡の形状を工夫した様々な計測システムが開発されている。さらに、光源としてプロジェクタを用いることで、照明方向を高速に変えることができる。例えば図 3(d) は、楕円鏡の 2 つの焦点位置にプロジェクタと対象物体をそれぞれ配置した設計であり、計測対象を中心として、光源とカメラ位置を仮想的に半球状に密に配置できる。我々は、この設計に基づいて、図 3(e) に示すような 1 度刻みの BRDF を高速に計測できるシステムを開発している¹⁸⁾。なお、反射屈折光学系とプロジェクタを組み合わせることで、BRDF を高速かつ密にサンプリングできるが、光学的なアライメントが難しいなどの問題がある。

3.2 BRDF のサンプリングと反射モデル

サンプリングされた BRDF は、反射特性を表す離散的な情報に過ぎない。サンプリング値を、表面の微細形状の解析や CG に利用するためには、サンプリング値と反射モデルの関係を明らかにする必要がある。

一般には、対象物体に適した反射モデルを仮定し、サンプリング値に反射モデルを当てはめてパラメータを推定する。この場合は、仮定したモデルが実際の反射と適合していることが前提となり、いかに安定してパラメータを推定できるかが課題となる。5-1 節でも述べた

通り、ほとんどの反射モデルでは、反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分の和として表現している。そのため、パラメータ推定の前処理として、反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分に分離し、それぞれ別々のモデルに当てはめられる。両成分の分離のためには、拡散反射と鏡面反射の偏光や色の違いなどが利用される。例えば、照明が偏光であった場合、鏡面反射は偏光を保つものに対して、拡散反射は偏光の性質を乱す。この性質を利用すれば、照明を偏光とし、カメラの前に配置した偏光板を回転しながら撮影することで、拡散反射と鏡面反射を比較的安定に分離することが可能である。また、2色性反射モデルによれば、鏡面反射は光源色となるのに対して、拡散反射は光源色と物体色の積となることから、RGB 空間での分布の違いを利用して両成分を分離できる。

一方、反射特性が複雑で既存のパラメトリック関数で近似することが困難な場合や、映画などのように極めて高い再現性が求められる場合には、サンプリング値をそのまま BRDF の参照テーブルとして利用することも可能である。以前は、このような方法は記憶容量の問題から非現実的と考えられてきたが、最近ではテラバイト単位の膨大な記憶容量が安価に利用できることから、現実的になりつつある。ただし、十分な精度を保つためには、BRDF のサンプリング間隔を密にする必要があるため、いかにして計測時間を短縮するかが課題となる。

4. 散乱特性のモデル

我々の身の回りにあるほとんどの物体は、完全な不透明ではない。金属以外の物体は、程度の差こそあれ、基本的には半透明の性質を持っていると考えてよい。半透明物体では、物体表面に入射した光は内部へ到達し、散乱を繰り返す。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、プラスチックや木材、野菜や果実、紙や布など、我々の身の回りに存在する物体のほとんどは半透明である。

本節では、まず散乱の物理現象を正しく理解するために、パーティシペイティングメディアと呼ばれる光の吸収や散乱を生じる媒体中で、微粒子がどのように光に影響を与えるかを明らかにする。それをふまえて、半透明物体で生じる散乱特性の表現方法と、その計測手法について述べる。

4.1 パーティシペイティングメディア

真空中では光は減衰せずに直進し続ける。しかし、実際には、大気中ではこのような仮定は成立しない。特に、霧や煙がかすんでいる場合や、海中などのように不純物が混ざった液体の場合には、光は媒体中の微粒子に衝突し、一部は吸収され、また一部は散乱する。その

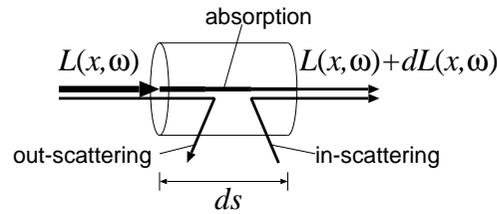


図4 光の吸収と散乱

結果，媒体の先にある物体の見え方は暗く不鮮明になる．このように，光の吸収や散乱が強く生じる媒体は，パーティシペイティングメディアと呼ばれる．

パーティシペイティングメディアでの光の振る舞いは，ライトトランスポート方程式の理論¹⁹⁾によれば，図4のように光の吸収と散乱としてモデル化できる．ここで，媒体中のある点 x を ω 方向に進む光の強さを $L(x, \omega)$ とする．この光が点 x を微小距離 ds だけ通過することによる光の強さの変化量を $dL(x, \omega)$ とする．すなわち，点 x を通過後の光の強さは $L(x, \omega) + dL(x, \omega)$ となる．媒体自体が光を放射することを考えなければ，光の強さは吸収と散乱によって変化する．

光が媒体中の微粒子に衝突してエネルギーの一部が吸収されると，光は減衰する．その変化量は，吸収係数 $\sigma_a(x)$ によって次式のように表される．

$$dL(x, \omega) = -\sigma_a(x)L(x, \omega)ds. \quad (15)$$

吸収係数の単位は $[m^{-1}]$ である（ミリで表現される場合もある）．正の値を持ち，値が大きいほど吸収されやすいことを示す．

一方，光が散乱する場合には，光の進行方向の外部に散乱してしまうことで強度が減少するアウトスキヤタリングと，他の方向からの入射光が進行方向に散乱することで強度が増加するインスキヤタリングの両方のケースがある．アウトスキヤタリングによる変化量は，散乱係数 $\sigma_s(x)$ によって次式のように表される．

$$dL(x, \omega) = -\sigma_s(x)L(x, \omega)ds. \quad (16)$$

散乱係数の単位も同様に $[m^{-1}]$ であり，正の値を持ち，値が大きいほど散乱しやすいことを示す．この散乱による光の減衰は，吸収の場合と同じ形をしていることから，消滅係数 $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$ を導入することで，吸収と散乱による光の減衰をまとめて

$$dL(x, \omega) = -\sigma_t(x)L(x, \omega)ds, \quad (17)$$

と表すことができる．

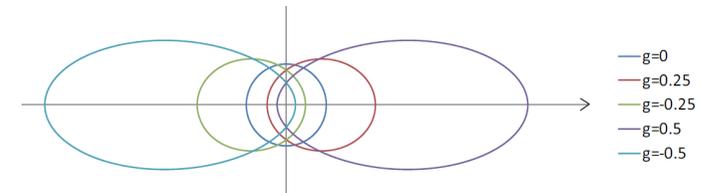


図5 フェーズ関数の例

媒体中の各点から到達する光の影響で強度が増加するインスキヤタリングについては，考え方が少し異なる．点 x を取り囲む球面の各方向 ω' から到達する光の強度を $L(x, \omega')$ とする．また， ω' 方向から来た光が点 x で微粒子に衝突して ω 方向に散乱する確率をフェーズ関数 $p(x, \omega', \omega)$ とすると，インスキヤタリングによる強度の増加は，次式で表される．

$$dL(x, \omega) = \sigma_s(x) \left(\int_{\Omega} p(x, \omega', \omega) L(x, \omega') d\omega' \right) ds. \quad (18)$$

ここで， Ω は点 x を中心とする球面を表す．フェーズ関数 p は散乱の偏りを表し， ω と ω' のなす角を θ とすると，均一な媒体では次式で近似表現される．

$$p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{\frac{3}{2}}}. \quad (19)$$

ここで，パラメータ g は，入射方向と散乱方向のなす角の余弦とフェーズ関数の積を全球面上で積分した値であり，散乱の等方性を決めるパラメータである．図5に例示するように， g の値は，前方散乱では正に，後方散乱では負に，等方散乱の場合ゼロとなる．

以上をまとめると，媒体中のある点 x を ω 方向に進む光の強さ $L(x, \omega)$ は，吸収と散乱によって次式に示す変化量 $dL(x, \omega)$ だけ増加する．

$$dL(x, \omega) = -\sigma_t(x)L(x, \omega)ds + \sigma_s(x) \left(\int_{\Omega} p(x, \omega', \omega) L(x, \omega') d\omega' \right) ds. \quad (20)$$

4.2 双方向散乱面反射率分布関数

前節では，媒体内部での光の散乱をモデル化した．本節では，光の散乱によって物体表面上での明るさがどのようにモデル化できるかを考える．不透明物体では，図6(a)のように，ある点 x における入射光と反射光の関係だけを考えればよかった．一方，半透明物体では，図6(b)のように物体表面上のある点 x_i 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 x_o からも出射する．この物体内部での散乱を表面下散乱（サブサーフェーススキヤタリング）と呼ぶ．

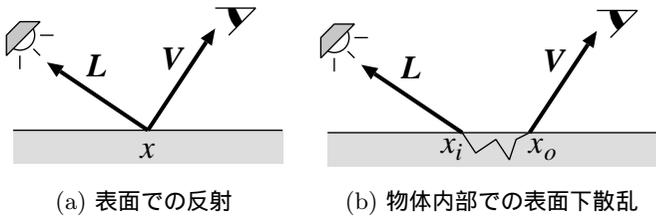


図 6 不透明物体と半透明物体の違い

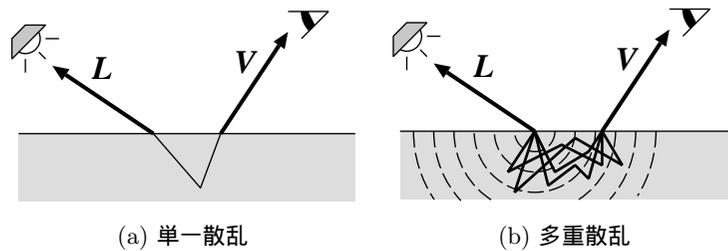


図 7 表面下散乱の分解

表面下散乱により、光源から照らされ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するため明るく見える。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。

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 (BSSRDF: Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function) で表現される。BSSRDF は入射点 x_i に L の方向から入射した光が観測点 x_o において V の方向に射出する率として、次式のように定義される。

$$f_{BSSRDF}(x_i, L, x_o, V). \quad (21)$$

表面下散乱は、図 7 に示すように、単一散乱 (シングルスカッタリング) f_{BSSRDF}^{single} と多重散乱 (マルチスカッタリング) $f_{BSSRDF}^{multiple}$ の和として近似されることが多い^{*1}。

$$f_{BSSRDF}(x_i, L, x_o, V) = f_{BSSRDF}^{single}(x_i, L, x_o, V) + f_{BSSRDF}^{multiple}(x_i, L, x_o, V). \quad (22)$$

*1 実際には、2 回反射や 3 回反射などの、単一散乱と多重散乱の中間の性質をもつ低次の散乱も存在する。

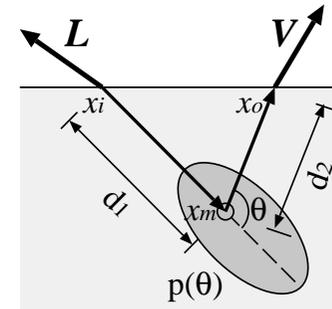


図 8 単一散乱のモデル

4.3 単一散乱のモデル

単一散乱は、物体内部で入射光が一度だけ微粒子に衝突することによって生じる散乱であり、霧や不純物を含む水など、光学的な密度が低い媒体で強く観測される。ここで、図 8 に示すように、均一な材質の表面上の点 x_i に入射した光が、物体内部の x_m で微粒子に衝突し、再び表面上の点 x_o で観測されることを考える。この場合、入射方向 L 、観測方向 V 、屈折率の関係より、光源から発せられた光が視点に届くまでの光路が一意に定まる。 x_i から x_m までの距離を d_1 とすれば、入射光の強度の減衰は、光路に沿って減衰率を積分することによって $e^{-\sigma_t d_1}$ と表される。この光は、点 x_m におけるインスキャタリングとなるため、光の進行方向に対する散乱角度を θ とすると、インスキャタリングの強度は $\sigma_s p(\theta)$ と表される。さらに、 x_m から x_o までの距離を d_2 とすれば、散乱光の減衰は $e^{-\sigma_t d_2}$ と表される。以上をまとめると、単一散乱は次式のようにモデル化できる。

$$f_{BSSRDF}^{single}(x_i, L, x_o, V) = \sigma_s p(\theta) e^{-\sigma_t(d_1+d_2)}. \quad (23)$$

4.4 多重散乱のモデル

一方、多重散乱は、入射光が物体内部で何度も反射を繰り返すことによって生じる散乱であり、皮膚や大理石など、散乱物質の密度が高い媒体で強く観測される。反射を繰り返すため、あらゆる方向に同じ強度で散乱する等方散乱の性質を持つ。これをディフュージョンと呼ぶ¹⁹⁾。マルチスカッタリングを厳密に計算するためには、複雑な光路を追跡する必要があり、モンテカルロレイトレーシング法²⁰⁾ やフォトンマッピング法²¹⁾ などの計算コストの高い手法が用いられてきた。

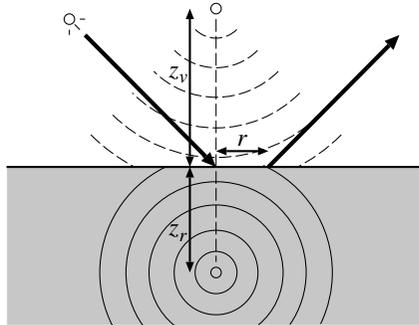


図9 ダイポールモデル

Jensen はマルチスキヤタリングを簡単なパラメトリック関数で近似するダイポールモデル²²⁾を提案した。ダイポールモデルでは、入射光と出射光の方向に依存しない散乱項を導入することで、BSSRDF を次式のように分解する。

$$f_{BSSRDF}^{multiple}(x_i, \mathbf{L}, x_o, \mathbf{V}) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \mathbf{V}) R_d(x_i, x_o) F_t(\eta, \mathbf{L}) \quad (24)$$

ここで、 η は相対屈折率であり、 F_t は物体表面を光が透過する際のフレネル係数を表す項である。また、 $R_d(x_i, x_o)$ 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 $r = \|x_o - x_i\|$ の関数として、次式で近似される。

$$R_d(r) = \frac{\alpha}{4\pi} \left\{ z_r \left(\sigma_{tr} + \frac{1}{d_r} \right) \frac{e^{-\sigma_{tr} d_r}}{d_r^2} + z_v \left(\sigma_{tr} + \frac{1}{d_v} \right) \frac{e^{-\sigma_{tr} d_v}}{d_v^2} \right\} \quad (25)$$

このとき、各変数は以下のように与えられる。

$$d_r = \sqrt{r^2 + z_r^2}, \quad d_v = \sqrt{r^2 + z_v^2}, \quad z_r = \frac{1}{\sigma'_t}, \quad z_v = z_r \left(1 + \frac{4}{3} A \right) \quad (26)$$

$$A = \frac{1 + F_{dr}}{1 - F_{dr}}, \quad F_{dr} = -\frac{1.440}{\eta^2} + \frac{0.710}{\eta} + 0.668 + 0.0636\eta \quad (27)$$

$$\sigma_{tr} = \sqrt{3\sigma_a \sigma'_t}, \quad \sigma'_t = \sigma'_s + \sigma_a, \quad \sigma'_s = \sigma_s(1 - g), \quad \alpha = \frac{\sigma'_s}{\sigma'_t} \quad (28)$$

このように、ダイポールモデルではマルチスキヤタリングを、材質に固有の $\sigma_s, \sigma_a, \eta, g$ の4つのパラメータを持つシンプルなパラメトリック関数で近似表現できることがわかる。ダイポールモデルの直感的な意味は、図9のように、物体内部に点光源を配置し、さら

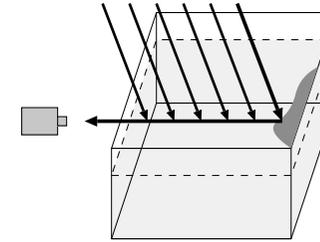


図10 単一散乱の計測

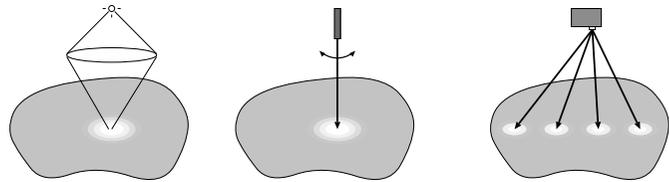
に境界条件を満たすように入射点の上に光を吸収する負の光源を配置することで、マルチスキヤタリングを近似したものである。

その後、ダイポールモデルは、紙などの薄い物体にも適用できるように、マルチポールモデル²³⁾に拡張されている。また、散乱項を複数のガウス分布で近似することでGPUを用いたハードウェアレンダリングを実現²⁴⁾する方法なども提案されている。近年では、入射方向に依存した低次の散乱成分をより正確に表現できる経験に基づいたモデル²⁵⁾なども提案されるなど、コンピュータグラフィクス分野では、より写実的な表面下散乱の高速レンダリング技術について活発に研究が進められている。

5. 散乱特性の計測

5.1 単一散乱のパラメータ推定

媒体中で単一散乱しか生じないと仮定できるのは、主に光学的な密度の低い液体や気体に限られるため、媒体は均一であると仮定することが多い。CV分野では、霧や濁った水中での見えを鮮明化するために、散乱光を除去するデスキヤタリングの研究が行われている。主目的は画像の鮮明化であるが、散乱の影響を解析するために単一散乱のみを仮定して吸収・散乱係数を推定することから、副産物として媒体の散乱特性が計測されている。たとえば、Narasimhanら²⁶⁾は、図10に示すように、水中で物体表面での反射と媒体での散乱が重なって観測されると仮定し、4.3節で述べたモデルに基づいて散乱のパラメータを推定している。同じくNarasimhan²⁷⁾らは、多重散乱が無視できないような光学的な密度の高い液体の場合に、水で薄めることでパラメータを推定し、元の濃い液体のパラメータを推定している。



(a) レンズの利用 (b) レーザ光の利用 (c) プロジェクタの利用

図 11 多重散乱の計測

5.2 多重散乱のパラメータ推定

多重散乱を仮定する場合には、物体表面上のある 1 点を照明した場合に、散乱光が表面上でどのように分布するかを調べるとするのが一般的である。1 点のみを照明するために、図 11(a) のようにレンズを用いて照明を集光させたり²²⁾、(b) のようにレーザー光を照射したり²⁸⁾、(c) のようにプロジェクタからドットパターン²⁹⁾ やストライプパターン³⁰⁾ を照射する方法がとられている。また、冷却したケースに入れたカメラと光ファイバで接続された接触型の専用計測センサ³¹⁾ などのデバイスも開発されている。このようにして計測された散乱光の広がり、ディフュージョンを仮定できる場合には、ダイポールモデルにあてはめてパラメータを推定することが多い。

5.3 BSSRDF のサンプリング

3.2 節でも述べたとおり、BRDF については密にサンプリングしたデータをそのまま参照テーブルとして利用することも不可能ではない。しかし、不均一な材質の BSSRDF は次元数が 8 となり、密なサンプリングは事実上不可能であるといつてよい。

しかし、対象物体によっては、その BSSRDF は冗長性があるため、容量を削減することも可能である。Peers ら³²⁾ は、大理石の表面をプロジェクタで照射することでサンプリングした BSSRDF の 2 次元のスライスを因子分解することで、複数の材質が混ざり合った物体の BSSRDF をコンパクトに表現する方法を提案している。

6. 関連するツール・教科書

最後に、本稿で述べた CG/CV 分野における反射や散乱などの現象について、研究を始めた人向けに詳しく勉強したい人に向けて、関連するツールや教科書を紹介したい。

6.1 POV-Ray

反射解析などの研究をしていると、同一形状で反射特性のみが異なる複数の物体を撮影す

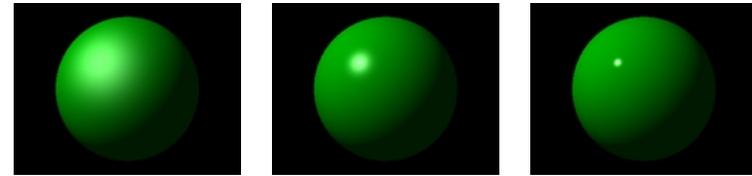


図 12 POV-Ray による反射特性のシミュレーション



(a) 反射特性を計測した硬貨 (b) CG による反射特性の再現

図 13 POV-Ray を用いた実験結果の可視化

る必要が生じるが、実際にはそのような物体を用意するのは難しい。ところが、シミュレーションで画像を作ろうにも、キャストシャドウや写り込みなどを正確にレンダリングするのは意外に難しい。

POV-Ray (Persistence of Vision Ray-Tracer) は、3 次元 CG を簡単に作成できるツールである。レイトレーシング法によってレンダリングするため、フォトリアリスティックな画像を容易に作成できる。POV-Ray はオープンソースのフリーウェアであるため、気軽に CG を試してみることができる。また、マルチプラットフォームで開発されており、Windows, Mac OS X, Linux などの代表的な環境はもちろんのこと、SunOS などの UNIX 系や MS-DOS など、ほとんどの環境で動作する。POV-Ray は、CG のためのレイトレーシングソフトウェアであるが、画像処理や CV の研究にも利用できる便利なツールである。

例えば、図 12 は、カメラや照明の位置は変えずに、反射特性のパラメータだけを変化させてレンダリングした結果である。パラメータが具体的にどのように利用されているかにつ

いては、ソースコードを見て確認することができる。

また、3.1.4 節でも紹介したように、我々は反射屈折光学系を工夫することで BRDF を計測するシステムを開発している。図 13(a) は計測の対象となる硬貨であり、この BRDF を 1 度刻みでサンプリングした。しかし、パラメトリック反射モデルを利用せず、反射率を密に記録した数値データを直接用いて画像をレンダリングできるソフトは見当たらない*1。そこで、計測した BRDF に基づいて画像をレンダリングできるように、POV-Ray を改造した。図 13(b) は、(a) の反射特性を持った竜の形状をレンダリングした結果である。改造するという、大変な作業に聞こえるかも知れないが、丁寧にコメントが書かれたきれいなソースであるため、部分的な修正程度であればさほど苦労はない。実際には、Phong モデルで反射光強度を計算する関数 void do_phong() の中身を、計測した BRDF に基づいて画像をレンダリングするように書き換えた。

6.2 PBRT

最近、SIGGRAPH などでは「pbrt」というレンダラーの名前を見かけることが多い。これは、Matt Pharr and Greg Humphreys, “PHYSICALLY BASED RENDERING – FROM THEORY TO IMPLEMENTATION –”, Elsevier (ISBN 978-0-12-553180-1) という書籍で説明されているレンダラーである。この書籍は、実際にプリンストン大学やスタンフォード大学で CG を講義している現役の CG 研究者らが執筆したものである。レイトレーシングの理論はわかっていても、実際にどのように実装するのは難しい場合が多いが、この書籍は理論と同時に実装の解説も兼ねており、レンダラー「pbrt」の解説書になっている。簡単なプラグインを書くだけで容易に機能拡張できるため、新しい BRDF を考案したら、BRDF だけをプラグインとして実装するだけで、pbrt を用いて複雑なシーンをレンダリングすることができる。前述の POV-Ray と同様に、実際にどのように反射を計算しているのかを、ソースを見て確認できるため、CV でも安心して使うことができる。

なお、SIGGRAPH2010 にあわせて出版予定である第 2 版では、pbrt もバージョン 2 となり、ダイポールモデルによる表面下散乱のレンダリングや、サンプリングした BRDF 計測データに基づいたレンダリングが可能となる予定である。すでにアルファ版は公開されており、試してみる価値は大いにある。

6.3 CG Magic

最後に、2007 年に初版が出版された、倉地紀子著、“CG Magic: レンダリング”, オーム

社を紹介したい。この書籍は、主に CG のレンダリング技術に関して、古典的な技術から、写実性を大きく向上させた最近の技術まで、重要な技術を丁寧に解説し、明瞭な理論体系としてまとめている。最近の SIGGRAPH などでは発表された CG/CV の注目論文についても、わかりやすく日本語で解説されているため、この分野に新たに入ってきた学生さんだけではなく、CV の最前線にいる研究者にとっても、大いに参考となる書籍である。CV 研究者が知っておくべき CG 技術に加えて、最近のフォトメトリ関連の CV 技術についてもまとめられているため、ぜひ研究室に 1 冊常備されることをお勧めする。

7. ま と め

本稿では、物体表面での反射と物体内部での散乱について、表現形式を概説し、さらに実際の計測方法について紹介した。しかし、冒頭でも述べたとおり、反射や散乱による見えの変化については、未だに正確なモデル化が難しく、うまく表現できない光学現象も残っており発展途上である。そのため、今後、より複雑な光学現象を詳細かつ簡潔に表現できるモデルが考案された場合には、本稿で説明したモデルがすべて「古典的」とまとめられるかもしれないが、それはそれで非常に喜ばしいことである。

我々 CV 分野の研究者に与えられた課題は、実世界で何が起きているのかを正確に理解し、画像を手がかりにして実世界で起こったことを詳細に解析していくことである。そのためには、物理現象の正確なモデル化と、その計測手法の開発が重要であるといえる。

参 考 文 献

- 1) M. Oren and S. K. Nayar, “Generalization of Lambert’s Reflectance Model”, Proc. SIGGRAPH’94, pp.239-246, 1994.
- 2) B. T. Phong, “Illumination for computer generated pictures”, Proc. SIGGRAPH’75. pp.311-317, 1975.
- 3) K. E. Torrance and E. M. Sparrow, “Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces”, JOSA, Vol. 57, Issue 9, pp.1105-1112, 1967.
- 4) J. F. Blinn, “Models of light reflection for computer synthesized pictures”, Proc. SIGGRAPH’77, pp.192-198, 1977.
- 5) R. L. Cook and K. E. Torrance, “A reflectance model for computer graphics”, Proc. SIGGRAPH’81, pp.307-316, 1981.
- 6) G.J.Ward, “Measuring and Modeling anisotropic reflection”, Proc. SIGGRAPH’92, pp.255-272, 1992.
- 7) E. P. F. LaFortune, S. C. Foo, K. E. Torrance, and D. P. Greenberg, “Non-Linear

*1 後述する pbrt のバージョン 2 では新機能として実装される予定である。

- Approximation of Reflectance Functions”, Proc. SIGGRAPH’97, pp.117-126, 1997.
- 8) H. Li, S. C. Foo, K. E. Torrance, and S. H. Westin, “Automated three-axis goniorelectrometer for computer graphics applications”, Proc. SPIE, Vol.5878, pp.221-231, 2005.
 - 9) S. R. Marschner, S. H. Westin, E. P. F. Lafortune, K. E. Torrance, “Image-Based Bidirectional Reflectance Distribution Function Measurement”, Applied Optics, Vol.39, No.16, pp.2592-2600, 2000.
 - 10) R. Lu, J. J. Koenderink, and A. M. L. Kappers, “Optical Properties (Bidirectional Reflection Distribution Functions) of Velvet”, Applied Optics, Vol.37, No.25, pp.5974-5984, 1998.
 - 11) S. R. Marschner, S. H. Westin, E. P. F. Lafortune, K. E. Torrance, and D. P. Greenberg, “Image-Based BRDF Measurement Including Human Skin”, Proc. 10th Eurographics Workshop on Rendering, pp.139-152, 1999.
 - 12) G. Müller, G. H. Bendels, and R. Klein, “Rapid Synchronous Acquisition of Geometry and Appearance of Cultural Heritage Artefacts”, VAST2005, pp13-20, 2005
 - 13) M. Ben-Ezra, J. Wang, B. Wilburn, X. Li, and L. Ma, “An LED-only BRDF Measurement Device”, Proc. CVPR2008, pp.1-8, 2008.
 - 14) P. R. Mattison, M. S. Dombrowski, J. M. Lorenz, K. J. Davis, H. C. Mann, P. Johnson, and B. Foos, “Handheld directional reflectometer: an angular imaging device to measure BRDF and HDR in real time”, Proc. SPIE Vol.3426, pp.240-251, 1998.
 - 15) K. J. Dana and J. Wang, “Device for convenient measurement of spatially varying bidirectional reflectance”, J. Opt. Soc. Am. A, Vol.21, Issue 1, pp.1-12, 2004.
 - 16) S. Kuthirummal and S. K. Nayar, “Multiview Radial Catadioptric Imaging for Scene Capture”, Proc. SIGGRAPH2006, pp.916-923, 2006.
 - 17) J. Y. Han and K. Perlin, “Measuring Bidirectional Texture Reflectance with a Kaleidoscope”, ACM Transactions on Graphics, Vol.22, No.3, pp.741-748, 2003.
 - 18) Y. Mukaigawa, K. Sumino, Y. Yagi, “Rapid BRDF Measurement using an Ellipsoidal Mirror and a Projector”, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol.1, pp.21-32, 2009.
 - 19) J. Stam, “Multiple scattering as a diffusion process”, Proc. Eurographics Rendering Workshop, 1995.
 - 20) M. Pharr and P. Hanrahan, “Monte Carlo evaluation of non-linear scattering equations for subsurface reflection”, Proc. SIGGRAPH2000, pp.75-84, 2000.
 - 21) H. W. Jensen and P.H. Christensen, “Efficient Simulation of Light Transport in Scenes with Participating Media using Photon Maps”, Proc. SIGGRAPH’98, pp.311-320, 1998.
 - 22) H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, and P. Hanrahan, “A Practical Model for Subsurface Light Transport”, Proc. SIGGRAPH2001, pp.511-518, 2001.
 - 23) C. Donner H. W. Jensen, “Light Diffusion in Multi-Layered Translucent Materials”, Proc. SIGGRAPH2005, pp.1032-1039, 2005.
 - 24) E.d’Eon, D. Luebke, and E. Enderton, “Efficient Rendering of Human Skin”, Eurographics Symposium on Rendering, 2007.
 - 25) C. Donner, J. Lawrence, R. Ramamoorthi, T. Hachisuka, H. W. Jensen, and S. K. Nayar, “An empirical BSSRDF model”, Proc. SIGGRAPH2009, pp.1-10, 2009.
 - 26) S. G. Narasimhan, S. K. Nayar, B. Sun, and S. J. Koppal, “Structured Light in Scattering Media”, Proc. ICCV’05, Vol.1, pp.420-427, 2005.
 - 27) S. G. Narasimhan, M. Gupta, C. Donner, R. Ramamoorthi, S. K. Nayar, and H. W. Jensen, “Acquiring Scattering Properties of Participating Media by Dilution”, Proc. SIGGRAPH2006, pp.1003-1012, 2006.
 - 28) 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.
 - 29) A. Ghosh, T. Hawkins, P. Peers, S. Frederiksen, and P. Debevec, “Practical Modeling and Acquisition of Layered Facial Reflectance”, Proc. SIGGRAPH Asia 2008.
 - 30) 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.
 - 31) 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.
 - 32) P. Peers, K. vom Berge, W. Matusik, R. Ramamoorthi, J. Lawrence, S. Rusinkiewicz, and P. Dutre, “A Compact Factored Representation of Heterogeneous Subsurface Scattering” Proc. SIGGRAPH2006, pp.746-753, 2006.