

散乱媒体内における物体の反射特性モデルの提案

馬場 葉子[†] 向川 康博[†] 八木 康史[†]

A Proposal for Modeling Reflectance Properties in Scattering Media

Yoko BABA[†], Yasuhiro MUKAIGAWA[†], and Yasushi YAGI[†]

あらまし 物体が散乱媒体中に置かれると、その見かけの反射特性は変化する。これは、光源からの照明光が物体に到達する前に散乱してしまうこと、及び、物体表面での反射光がカメラに到達する前に散乱してしまうことが原因である。本研究では、この照明と反射の散乱を考慮し、散乱媒体の透過特性と物体表面の反射特性の相互作用を表現する反射モデルを新たに提案する。このモデルによって、散乱媒体による見た目の変化が表現できることをレンダリング実験によって示す。また、この反射モデルに基づいて、反射特性が既知な参照物体を利用することで、散乱媒体の透過特性と物体表面の反射特性を2段階に分けて推定する手法について述べる。レンダリング実験と実画像を用いた実験により、モデルの妥当性と、散乱を考慮した反射特性推定の精度を検証する。

キーワード 反射特性, 透過特性, 散乱媒体

1. ま え が き

物体の反射特性は表面の微細形状に依存し、物体の見え方に影響を与える。反射特性を正確に計測できれば、CGでの再現や塗装面の検査などに応用できる。これまで、反射特性を計測するために、ゴニオリフレクトメータ [1] や凹面鏡を用いた計測機器 [2] などが用いられてきた。しかし、これらの計測では、カメラ・光源と物体の間に存在する媒体の影響は考慮していない。例えば、濁った液体で物体を観察したり、物体表面に塗装などのコーティングを施すと、反射特性が変化したように見える。これは、散乱媒体の影響で物体への入射光や反射光が散乱してしまい、本来の反射特性を直接計測することができないからである。

薄いコーティングを施した際の見え方の変化については、例えば肌と化粧品の分光反射特性を解析することで化粧品塗布肌の分光反射率を推定したり [3]、塗料などの層状表面における反射光のモデル [4] などが研究されている。これらは主に色の変化が解析の対象となっている。また、散乱成分の除去法 [5] などでも提案されているが、もとの反射特性を推定することはできない。逆に散乱を利用して物体の反射特性を推定し

ようという試みもなされている [6]。一方、散乱媒体の特性そのものを推定する方法 [7], [8] も提案されているが、これらは散乱媒体だけを単独で計測できるという条件が必要である。実際には塗装膜のように単体で計測することが難しい媒体が多数存在する。

そこで、本研究では、照明と反射の散乱を考慮し、散乱媒体の透過特性と物体表面の反射特性の相互作用を表現する反射モデルを新たに提案する。このモデルにより、例えば水中で撮影した映像から散乱成分を除去して鮮明化したり、水中で本来の反射特性を推定するなどの応用が期待される。本論文では、この反射モデルに基づいて、散乱媒体中では見かけの反射特性がどのように変化するかを示した後、反射特性が既知な参照物体を利用することで、散乱媒体の透過特性と物体表面の反射特性を2段階に分けて推定する手法について述べる。

2. 散乱媒体内における物体の見え方

同じ物体であっても、光源やカメラと物体の間に存在する媒体の影響によって、見かけの反射特性は異なる。例えば、図1は同じ硬貨を水と散乱媒体（水で薄めた乳酸飲料）に入れたときの見え方の違いを示している。(b)の方が(a)よりも鏡面反射が弱くなっており、一見すると(b)の方がざらついているように見える。実際、図1(a), (b)のある高さの輝度変化を示し

[†] 大阪大学産業科学研究所, 茨本市
Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki-shi, 567-0047 Japan

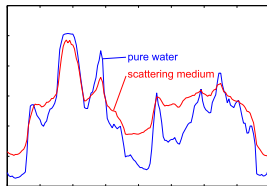
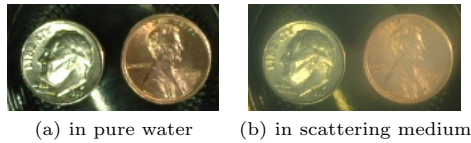


図 1 散乱媒体による物体の見え方の変化
Fig. 1 Appearance change by scattering media.

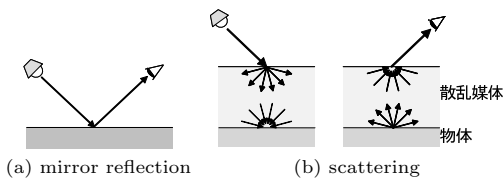


図 2 散乱による反射の変化
Fig. 2 Change of reflectance feature by scattering.

た(c)を見ても、鏡面反射の急激な変化が弱まっていることから、表面の滑らかさが低下したように感じられる。

図 2(a)のように、散乱媒体がない状態では光源から出た光は、直接物体表面を反射して視点に届く。しかし散乱媒体が存在する場合には、図 2(b)のように、光源から出た光は散乱媒体中で広がり、様々な方向から観測点を照らす。更に物体表面で反射した光も観測点に到達するまでに散乱媒体の影響により広がり、更にピークの強度も下がる。このように散乱媒体が原因で物体の鏡面反射は広がり、弱くなる。拡散反射成分に関しては、もともと全ての方向に拡散するため、著しい変化はないと考えられる。この散乱媒体による鏡面反射の広がりや弱まりの効果によって、たとえば磨かれた金属のように、鏡面反射が強く観測される物体であっても、ざらついた質感に見えてしまう。

3. 散乱媒体内における反射特性モデル

3.1 入射・反射光の散乱

対象物体と光源・カメラの間に散乱媒体が存在する場合の光の挙動を考える。図 3 に示すように、入射光は散乱媒体中の粒子との衝突を繰り返した後、対象物体の表面で反射する。つまり、光源から発せられた光

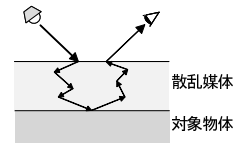


図 3 散乱媒体内における光線の振舞い
Fig. 3 Light path in scattering media.

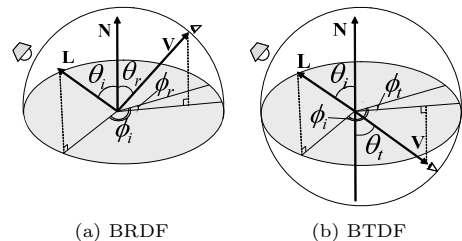


図 4 入射角、反射角、透過角の関係
Fig. 4 Relation among incident, reflected, and transmitted angles.

は直接対象物体には届かず、散乱媒体が対象物体に対する照明光となる。この散乱の影響で、たとえ照明が点光源であったとしても、対象物体への入射光は一方方向からだけではなく、対象物体を中心とする半球面上の全ての方向から光が入射することになる。

散乱の影響で対象物体の反射光は直接観測されず、入射光と同様に反射光も散乱する。よって観測方向に反射した光のみが観測されるわけではなく、対象物体の表面で様々な方向に反射した光が散乱によって観測点に到達する。そのため観測光は、対象物体を中心とする半球面上の全ての方向へ反射した後、散乱によって観測方向に向かう光の総和として表現される。

このように散乱媒体が存在する場合は、対象物体への入射光・反射光が散乱するため異なる反射特性として観測される。我々はこれを、対象物体の本来の反射特性に対して、**見かけの反射特性**と呼ぶ。

3.2 見かけの反射特性モデル

反射特性は双方向反射率分布関数 (BRDF: Bi-directional Reflectance Distribution Function) を用いて表せる。BRDF は、図 4(a) に示すように、物体表面上のある点における、光源方向ベクトル $\mathbf{L}$ によって定まる入射角 (θ_i, ϕ_i) と観測方向ベクトル $\mathbf{V}$ によって定まる反射角 (θ_r, ϕ_r) の 4 パラメータで記述される入射光強度に対する反射光輝度の比率を表す。一方、透過特性は双方向透過率分布関数 (BTDF: Bi-directional Transmittance Distribution Function) を用いて表せ

る。BTDF は、図 4(b) に示すように、物体のある点における、光源方向ベクトル $\mathbf{L}$ によって定まる入射角 (θ_i, ϕ_i) と観測方向ベクトル $\mathbf{V}$ によって定まる透過角 (θ_t, ϕ_t) の 4 パラメータで記述される入射光強度に対する透過光強度の比率を表す。ここで、物体の反射特性と散乱媒体の透過特性をそれぞれ $f_r(\mathbf{L}, \mathbf{V})$, $f_t(\mathbf{L}, \mathbf{V})$ と表現する。

光源から発せられた光は散乱媒体の影響で散乱し、観測点を中心とする半球面上の全ての方向から物体へ入射する。また物体表面上で反射した光は、再び観測点を中心とする半球面上全ての方向へ散乱する。よって求める散乱媒体内での見かけの反射特性は、物体への入射方向ベクトル $(\mathbf{L}')$ と反射方向ベクトル $(\mathbf{V}')$ で半球面上で積分した形になる。つまり散乱媒体内における物体の見かけの反射特性 $f(\mathbf{L}, \mathbf{V})$ は次式で表現される。

$$f(\mathbf{L}, \mathbf{V}) = \int_{\Omega^+} \int_{\Omega^+} f_t(\mathbf{L}, \mathbf{L}') f_r(\mathbf{L}', \mathbf{V}') f_t(\mathbf{V}', \mathbf{V}) d\mathbf{L}' d\mathbf{V}' \quad (1)$$

ただし、 Ω^+ は観測点を中心とする半球面を示す。

3.3 反射と透過のモデル化

物体の反射・透過特性を表現するために、コンピュータグラフィクス (CG) 分野では、様々なモデルが提案されている。しかし、CG のために開発されたモデルを、コンピュータビジョン (CV) のために利用する場合には、モデルの特徴を注意深く吟味する必要がある。

映画作成などの用途に用いられる CG モデルは、写実性を向上させるために、できるだけ物理現象に忠実であることが求められる。そのため、必要以上に複雑であったり、直感的に制御しやすいようなパラメータが追加されている場合がある。一方で、ゲームなどでは、必ずしも物理現象に忠実である必要はなく、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る。それに対して、CV で用いるモデルは、物理現象に忠実である方が良いが、複雑になると解析が不安定となってしまうため、バランスが重要である。以上を踏まえた上で、本研究で用いた反射・透過モデルを以下に述べる。

3.3.1 反射モデル

反射特性を表すモデルとして、本研究では物体表面が様々な向きの微小面で構成されると仮定した物理的な解析に基づいた Torrance-Sparrow モデル [11] を用いる。このモデルは反射光を拡散反射と鏡面反射の和

として考える。パラメータは拡散反射係数 ρ_d 、鏡面反射係数 ρ_s 、表面の粗さ係数 n 、相対屈折率 η である。詳しくは付録を参照されたい。

なお本論文では照度や輝度の物理量は考慮せず、画素値そのものを輝度値として用いる。よって実際に反射モデルで利用するパラメータは ρ_d , ρ_s ではなく、照度との積の P_d , P_s である。これらは相対的な比率にのみ意味がある。

3.3.2 透過モデル

透過時の光の拡散を表現するために、CG 分野では古くは粒子との衝突としてモデル化したもの [12] から、最近では油脂などで汚れたガラス面での拡散をモデル化したもの [13] まで、様々な透過モデルが提案されている。本論文では安定したパラメータ推定を行うために、パラメータ数が少なく簡潔な透過モデルを提案する。

本モデルでは、図 5 に示すように透過光を多重散乱と単一散乱の和として考える。多重散乱は入射光が散乱媒体内で何度も散乱を繰り返すことによって生じる。多重散乱は、視線方向に依存せずあらゆる方向に同じ強さで観測される等方散乱の性質をもつ。そのため多重散乱はその強度を表す係数だけで表現される。

一方、単一散乱は散乱媒体内で一度だけ反射することによって生じる。単一散乱の広がりには散乱媒体内の粒子の衝突によって生じるため、フェーズ関数で表現する。フェーズ関数は、図 6 に示すように光の入射方向と散乱方向が成す角度 γ に依存し、散乱の等方性を表す g をパラメータとし、次式のように表される [14]。

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

また、散乱媒体に入射するときと透過するとき、

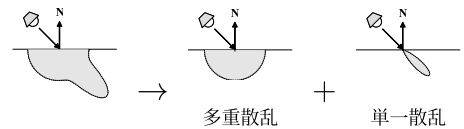


図 5 多重散乱と単一散乱の和で表現される透過モデル
Fig.5 Transmittance model expressed by the sum of multiple and single scattering.

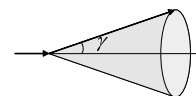


図 6 フェーズ関数
Fig.6 Phase function.

散乱媒体の表面と裏面のそれぞれでフレネル反射が生じる．フレネル透過項を2回乗じる必要がある．

以上の考察より，本研究では透過モデルを以下のよう

$$f_t(\mathbf{L}, \mathbf{V}) = \tau_d + \tau_t p(g, \gamma) F_{t_1} F_{t_2}, \quad (3)$$

$$F_{t_1} = 1 - F_{r_1}, \quad F_{t_2} = 1 - F_{r_2}. \quad (4)$$

式(3)の右辺は，第1項が多重散乱，第2項が単一散乱を表す． τ_d と τ_t はそれぞれ多重散乱係数と単一散乱係数を表す． F_{t_1} は物体に入射する際の表面でのフレネル透過を， F_{t_2} は物体を透過する際の裏面でのフレネル透過を表し，それぞれ1からフレネル反射率を引くことで算出される．フレネル反射率の計算法は，付録を参照されたい．

なお本論文では照度や輝度の物理量は考慮せず，画素値そのものを輝度値として用いる．よって実際に透過モデルで利用するパラメータは τ_d ， τ_t ではなく照度との積の T_d ， T_t である．これらは相対的な比率にのみ意味がある．

3.4 散乱媒体の厚み

提案モデルでは，散乱媒体の影響を図4(b)に示すように入射角と透過角の関係で表現するBTDFとして定式化しており，「厚み」という概念は入っていない．もしも散乱媒体の厚みを考慮すれば，図7のように，角度によって散乱媒体中の光路長が変化してしまい，減衰量が一定とならない．更に，入射点と透過点が一致しなくなり，ちょうどBRDFとBSSRDFの関係[14]のように入射点と透過点の距離をも考慮する必要が生じる．

提案モデルは，このような物理現象を忠実に反映するものではなく，散乱の分布をフェーズ関数で近似したものである．そのため，条件によっては，現実

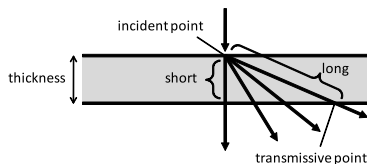


図7 散乱媒体の厚み
Fig. 7 Thickness of scattering medium.

4. 散乱媒体による見え方の変化

4.1 提案モデルに基づくシミュレーション

提案モデルは，物体の見かけが散乱媒体によってどのように変化するかということを知るためのシミュレーションとして利用できる．具体例としては，物体が散乱媒体中に置かれている状態をCGで表現したい場合に，よりリアルなCGを描画できる．また塗装面にコーティングをした場合や肌に化粧品を塗った場合において，見かけの変化をシミュレーションすることで実際に物体にコーティングを行わなくても見かけの変化を知ることができる．このシミュレーションは散乱媒体の透過特性と物体の反射特性が既知であるという条件において行うことができる．

4.2 仮想物体と散乱媒体

反射特性と透過特性の組み合わせによって，見かけの反射特性がどのように変化するかを調べた．2種類の物体と3種類の散乱媒体を想定して，提案モデルに基づいて見かけの反射特性を再現した．

反射特性の異なる2種類の物体を，以降ではGloss，Matteと呼ぶ．Glossは表面が滑らかで鏡面反射が強く，鏡面反射が周囲へ広がらない性質をもつ物体とした．一方，Matteは拡散反射が強く，表面がざらついた物体である．これらの物体の反射パラメータを表1に示す．なおGloss，Matteに対して入射角 45° で光が入射したときの反射光の広がりを図8に示す．

透過特性の異なる3種類の散乱媒体を，以降ではWeak，Medium，Strongと呼ぶ．Weakは濃度が薄い散乱媒体を想定しており，光が広がりにくい．Strongは濃い散乱媒体であり，光が広がる．Mediumは，両者の中間の性質をもつ．これらの透過モデルのパラメータを表2に示す．それぞれの媒体に対して入射

表1 仮想物体の反射パラメータ
Table 1 Reflection parameters of virtual objects.

	P_d	P_s	n	η
Gloss	2.00×10^2	5.00×10^5	0.80	1.55
Matte	1.60×10^4	3.00×10^5	0.30	1.55

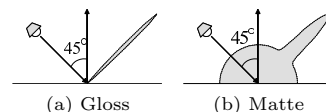


図8 仮想物体の反射光の広がり
Fig. 8 Distribution of reflected light on virtual objects.

表 2 仮想散乱媒体の透過パラメータ
Table 2 Transmittance parameters of virtual scattering media.

	T_d	T_t	g	η
Weak	1.00×10^{-3}	0.01	0.98	1.3
Medium	1.00×10^{-3}	0.13	0.93	1.3
Strong	1.00×10^{-3}	0.38	0.88	1.3

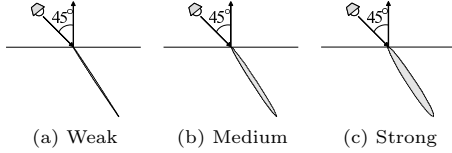


図 9 仮想散乱媒体による透過光の広がり
Fig. 9 Distribution of transmitted light in virtual scattering media.

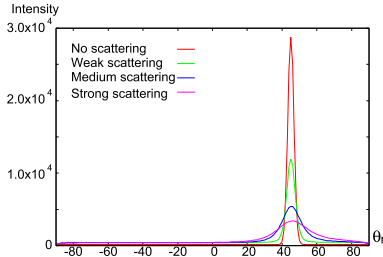


図 10 Gloss の本来の反射特性と見かけの反射特性
Fig. 10 Original and observed reflectance features of Gloss.

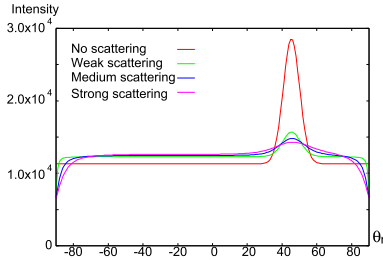


図 11 Matte の本来の反射特性と見かけの反射特性
Fig. 11 Original and observed reflectance features of Matte.

角 45° において光が入射したときの透過光の広がりを図 9 に示す。パラメータ g の値が減少するにつれて透過光の広がりが大きくなることが分かる。

4.3 見かけの反射特性の変化

物体 Gloss, Matte の表面に各散乱媒体が存在する状態を仮定する。各物体において入射角が 45° における反射角と観測値の関係を図 10, 図 11 に示す。各グラフの赤線が、物体の周囲に散乱媒体が存在しない状態、つまり本来の反射特性を表す。この結果から散乱

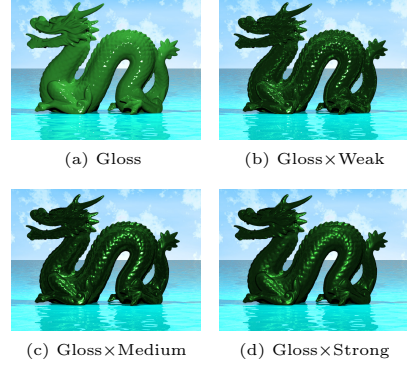


図 12 Gloss の本来の反射特性と見かけの反射特性に基づくレンダリング
Fig. 12 CG based on original and observed reflectance features of Gloss.

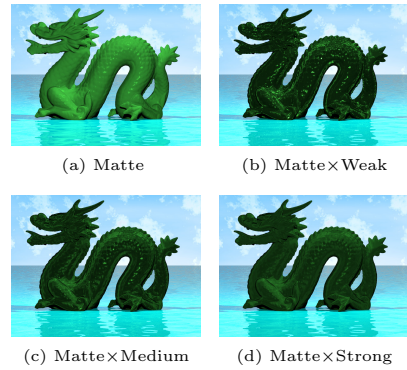


図 13 Matte の本来の反射特性と見かけの反射特性に基づくレンダリング
Fig. 13 CG based on original and observed reflectance features of Matte.

媒体のパラメータ g の値が減少するにつれて、つまり散乱の度合いが大きくなるほど見かけの鏡面反射は弱くなり、周囲へ広がることが分かる。更に散乱媒体の影響で鏡面反射と拡散反射にあたる成分の比率が本来の反射特性と比べて変化していることが分かる。このことから提案モデルは散乱媒体による反射特性の見かけの変化を表現できていることが分かる。

4.4 見かけの反射特性の CG レンダリング

Gloss, Matte の本来の反射特性のモデルと提案モデルに基づいてレンダリングした CG を図 12, 図 13 に示す。各図の (a) が本来の反射特性を表し、(b)～(d) が各散乱媒体内における見かけの反射特性を表す。この結果からも散乱媒体によって見かけの反射特性が変化していることが分かる。また散乱媒体ごとに鏡面反射の明るさや広がりが異なることが分かる。特に散

乱の大きい Strong では鏡面反射の広がりとピーク値の減少が顕著に確認できる。

なお、レンダリングのためには、各画素ごとに式 (1) の二重積分を計算する必要がある。本研究では、モンテカルロ積分法によって、入射方向と反射方向のそれぞれを半球面上で積分している。すなわち、半球面上で入射方向と反射方向をランダムにサンプリングし、計算した反射光を累積することを繰り返して、見かけの反射特性の値を計算している。

本研究では、この二重積分を画素ごとに計算するのではなく、あらかじめ入射方向と反射方向を緯度・経度ともに 1 度刻みで式 (1) の値を計算しておき、これをテーブル参照することで画像をレンダリングしている。そのため、レンダリングそのものは 1 秒以内に完了するが、テーブルを作成するためには、現状では Xeon 48 コアのサーバを用いて 6 時間もの計算時間を要している。高速化のためには、重点サンプリング [14] などの工夫が必要と考えられる。

5. 反射・散乱特性の解析

5.1 提案モデルに基づく解析

提案モデルを利用することで、見かけの反射特性を、散乱媒体の透過特性と物体の反射特性に分解することができる。これは、例えば濁った水中で撮影した画像から、大気中での物体の反射特性を予想することに相当する。散乱媒体または物体のどちらか一方の特性が既知であるか、またはどちらの特性も未知であるかという条件によって推定の安定性が変わる。この推定の安定性については次節で述べる。

5.2 パラメータ推定の安定性

散乱媒体中の物体の見かけの反射特性を式 (1) に表す提案モデルに当てはめることで、散乱媒体の透過モデルパラメータと物体の本来の反射モデルパラメータを同時に求めることが理論的には可能である。しかし透過特性と反射特性の両方が未知であるとき、パラメータ推定は極めて不安定になりやすい。例えば見かけの反射特性がランバート面に近い特徴をもっている場合は、濃い散乱媒体の影響で滑らかな表面の鏡面反射が弱く観測されたのか、あるいは逆に薄い散乱媒体中にランバート面があるのかを区別することは難しい。そこで本研究では散乱媒体と対象物体のいずれか一方が既知という条件のもとで見かけの反射特性を提案モデルに当てはめ、未知パラメータの推定を行う。

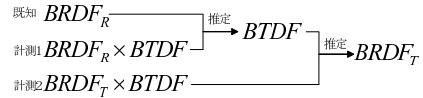


図 14 推定の流れ
Fig. 14 Flow of analysis.

5.3 推定の流れ

散乱媒体内の物体（以降では対象物体と呼ぶ）の本来の反射特性を推定する。前節で述べたように反射特性と透過特性の両方が未知である状態では推定は難しいため、反射特性が既知な物体（以降では参照物体と呼ぶ）を利用して、散乱媒体の透過特性と対象物体の反射特性を二段階に分けて推定する。

まず散乱媒体の透過特性を求める。そのために参照物体を散乱媒体内に設置し、参照物体の散乱媒体内での見かけの反射特性を計測する。その計測結果と参照物体の反射モデルを式 (1) に当てはめることで、散乱媒体の透過モデルパラメータを推定する。当てはめには Levenberg-Marquardt 法を使い、計測データとモデルによる計算値の誤差が最小になるようにパラメータを算出する。

次に対象物体の反射特性を求める。そのために対象物体を散乱媒体内に設置し、散乱媒体内での対象物体の見かけの反射特性を計測する。その計測結果と散乱媒体の透過モデルを式 (1) に当てはめることで、対象物体の反射モデルパラメータを推定する。

この推定の流れを図 14 に示す。 $BRDF_R$ 、 $BRDF_T$ をそれぞれ参照物体と対象物体の反射特性、 $BTDF$ を散乱媒体の透過特性、 $BRDF_R \times BTDF$ を散乱媒体内における参照物体の見かけの反射特性、 $BRDF_T \times BTDF$ を散乱媒体内における対象物体の見かけの反射特性とする。このように二段階に分けて対象物体の反射特性を推定することで、各段階において推定するパラメータ数を減らすことができるため、モデルの不安定性を軽減できる。

6. 対象物体の反射特性推定

6.1 実験環境

5.3 で述べた手法を用いて、実際に散乱媒体内の物体の本来の反射特性を推定する実験を行った。参照物体として図 15 (a) に示す黒色アクリル板を用いた。この黒色アクリル板の反射モデルパラメータは $P_d = 8.00$ 、 $P_s = 3.01 \times 10^6$ 、 $n = 2.74$ 、 $\eta = 1.49$ である。また対象物体として図 15 (b) に示す赤色塩化ビ

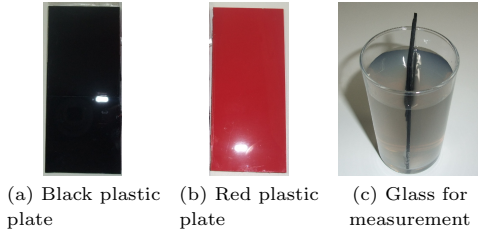


図 15 計測対象
Fig. 15 Measured objects.

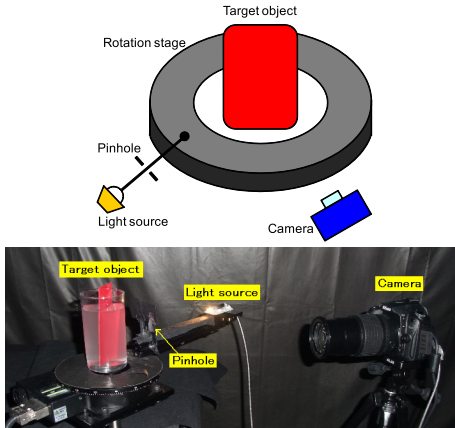


図 16 計測システム
Fig. 16 Measuring system.

ニル板を用いた。光源と物体、及びカメラと物体の間に存在する散乱媒体の厚みが入射・反射方向に依存せず常に一定となるように、図 15 (c) に示す円筒の中心に物体を立てて設置し、円筒内部を散乱媒体（水で薄めた乳酸飲料）で満たした。このような配置にすることで、大気と散乱媒体の境界での光の通過が常に垂直となり、屈折の影響を無視できる。また散乱媒体への入射点表面での反射光も無視できる。

図 16 のように、光源（MORITEX 製のハロゲンライト MHF-M1001）とカメラ（Nikon D90）と観測点が同一平面上に乗るように配置した。点光源を作るため光源の前にピンホールを設置した。入射角を変化させながら反射光の強度を計測するために、カメラと物体を固定した状態で、回転ステージを使って光源を回し、反射光を計測した。物体とカメラ間の距離は 34 cm、物体と光源までの距離は 26 cm、物体とピンホールまでの距離は 8 cm である。計測時間を減らすために、鏡面反射が強く観測される正反射領域付近は密に、それ以外の領域は粗く計測した。カメラの設定は ISO 感度は 100、F 値は 7.1、シャッター速度は

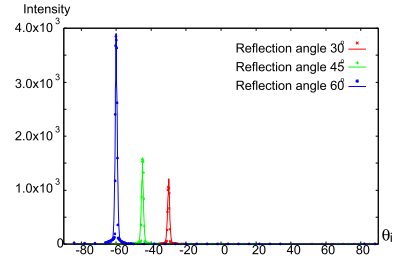


図 17 黒色アクリル板の計測と見かけの反射モデルの当てはめ結果
Fig. 17 Fitting results of the relectance model to measured data of black plastic plate.

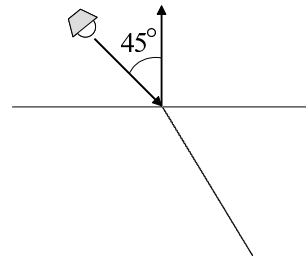


図 18 推定された散乱媒体の空間的な広がり
Fig. 18 Distribution of estimated transmitted light of scattering media.

1/250 秒である。この計測を反射角を 30°, 45°, 60° と変えて行った。

6.2 推定実験

6.2.1 散乱媒体の透過特性の推定

まず、散乱媒体の透過特性を推定した。そのために参照物体である黒色アクリル板を散乱媒体内に置き、その見かけの反射特性を計測した。この計測結果と黒色アクリル板の反射モデルパラメータを式 (1) のモデルに当てはめ、散乱媒体の透過パラメータを算出した。

図 17 のグラフ中の点は、各入射角 θ_i における計測値を、反射角ごとに示したものである。この計測結果を式 (1) に当てはめた結果を実線に示す。この結果よりおおむね良好な推定ができているといえる。

推定された散乱媒体の透過パラメータは $T_d = 9.28 \times 10^{-7}$, $T_t = 9.00 \times 10^{-5}$, $g = 0.99$, $\eta = 1.37$ であった。

得られたパラメータを使って、透過光の空間的な広がりを透過モデルから算出した結果を図 18 に示す。利用した散乱媒体は散乱の度が比較的弱く、直進性が高いことが分かる。

6.2.2 対象物体の反射特性の推定

前項で推定した散乱媒体の透過特性と、その散乱媒

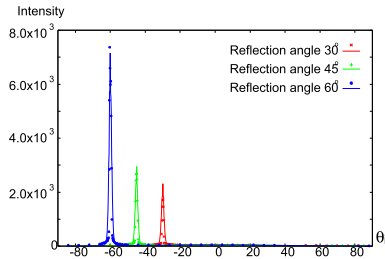


図 19 赤色塩化ビニル板の計測と見かけの反射モデルの当てはめ結果

Fig. 19 Fitting results of the reflectance model to measured data of red plastic plate.

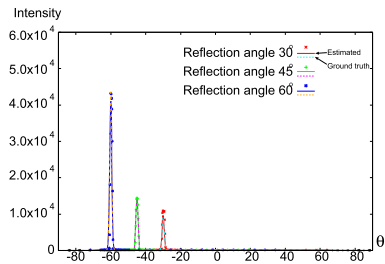


図 20 赤色塩化ビニル板の反射モデルの真値と提案モデルによる推定結果

Fig. 20 Ground truth and fitting results estimated by proposed model.

体内にある対象物体の見かけの反射特性の計測データから、対象物体の本来の反射特性を推定する実験を行った。前項と同様に散乱媒体内に置いた滑らかな塩化ビニルの見えを計測した。計測結果と散乱媒体の透過パラメータを式 (1) のモデルに当てはめた結果、 $P_d = 1.40 \times 10^2$, $P_s = 4.69 \times 10^6$, $n = 2.21$, $\eta = 1.50$ の滑らかな反射特性であるパラメータが推定された。計測値とモデルに当てはめた結果を、それぞれ図 19 の点と実線で示す。

推定したパラメータが適切であるかどうか検証するために、赤色塩化ビニルの本来の反射特性を直接計測して反射モデルに当てはめた。その結果、 $P_d = 2.60 \times 10^2$, $P_s = 3.27 \times 10^6$, $n = 2.26$, $\eta = 1.54$ の滑らかな反射特性としてパラメータが得られた。このパラメータを真値とする。図 20 のグラフ中の点は、各入射角 θ_i における赤色塩化ビニル単体の計測値を、反射角ごとに示したものである。真値を実線で示す。また提案モデルを使って推定した結果を点線で示す。図 21 に入射角が 45° の観測光の空間的な広がりを、図 22 に反射特性を反映した CG を、それぞれ真値と推定値において表す。ただし、鏡面反射の広がりを分り

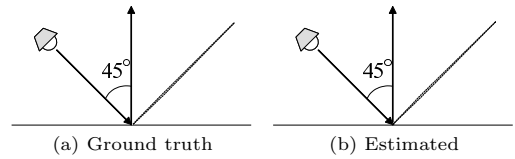


図 21 赤色塩化ビニル板の入射角 45° における観測光の広がり

Fig. 21 Distribution of reflected light by red plastic plate when incident angle is 45°

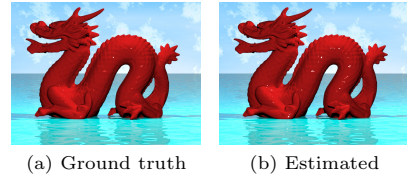


図 22 赤色塩化ビニル板の反射特性を反映した CG

表 3 対象物体の反射パラメータ

Table 3 Reflection parameters of the target object.

	P_d	P_s	n	η
真値	2.60×10^2	3.27×10^6	2.26	1.54
推定値	1.40×10^2	4.69×10^6	2.21	1.50

やすくするために、拡散反射成分の値が一致するように、真値と推定パラメータをスケール変換してレンダリングしている。

表 3 に真値と提案モデルを使って推定した値を示す。この値のみの結果で比較すると推定値は真値とは大幅にずれていることが分かる。しかし図 20 のグラフや図 21 や図 22 から、推定した値を反射モデルに当てはめて計算した結果は真値の結果とほとんど変わらないということが分かる。このことより対象物体の反射特性はおおむね良好な推定が行えたことが分かる。

6.3 散乱媒体の透過特性

前節では、特定の容器に入れた特定の濃さの散乱媒体を用いて実験を行った。本節では、提案モデルの適用範囲を調べるため、散乱媒体の深さや濃さを変えたときに、透過特性がどのように変化するかを確かめた。

提案モデルの特徴は、反射の BRDF と透過の BTDF の相互作用にある。反射の BRDF は古典的な Torrance-Sparrow モデルであり、既に適用性が検証されている。一方、透過の BTDF は本研究で新たに提案したものであることに加え、散乱媒体の厚みや濃度を変えると透過の BTDF モデルのみが影響を受けることから、透過特性の検証を行った。

図 23 のように透明な容器に散乱媒体を入れ、上部

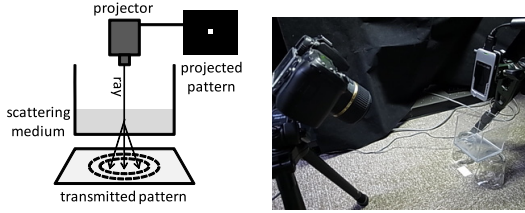


図 23 散乱媒体の透過特性の計測

Fig. 23 Measurement of transmitted light by scattering medium.

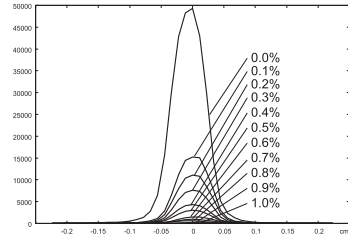
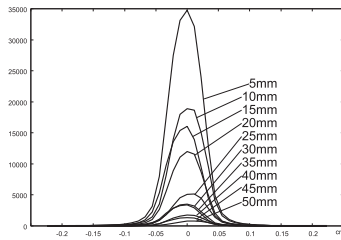
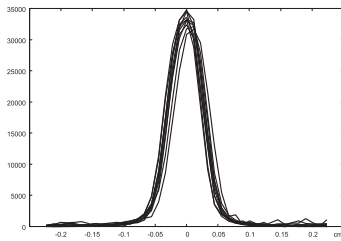


図 25 濃度を変えたときの透過光の変化

Fig. 25 Change of transmitted light for each density.



(a) 計測値



(b) 平均値で正規化

図 24 深さを変えたときの透過光の変化

Fig. 24 Change of transmitted light for each depth.

からプロジェクタで1画素のみを白にしたパターンを投影することで細い光線を入射した。この光線が散乱媒体を透過した後の分布をカメラで撮影することで、透過特性を直接計測した。なお、散乱媒体は水で薄めた牛乳であり、その量や濃度を正確に変更できる。

まず、牛乳の濃度を0.1%とし、深さを5mmから50mmまで5mm刻みで変化させた場合の透過光の広がりを図24(a)に示す。深くなるにつれて値が急激に減少している。分布の様子を比較しやすいように、平均値で正規化した結果を(b)に示す。多少の誤差はあるが、分布はほぼ一致していることが分かる。これより、散乱媒体の深さの違いは、透過特性の推定に大きな影響を与えないことが分かる。一方で、深くなると透過率が低くなり、散乱媒体の先の物体表面に到達する光の強度は極めて小さくなる。このことから、濃度が0.1%程度でも、その深さが40mmを超えたあた

りから、提案モデルの適用が難しいことが分かる。

次に、深さを10mmとし、牛乳の濃度を0.1%から1.0%まで0.1刻みで変化させた場合の透過光の広がりを図25に示す。この分布は図24(a)に似ていることから、濃度が増しても透過特性の推定に大きな影響を与えないことが分かる。しかし、先ほどの深さの検証と同様に、濃度が増加すると透過率が低くなり、深さが10mm程度の場合でも0.5%以下の濃度の薄い媒体にしか適用できないことが分かる。

散乱媒体が変われば透過特性も変化するが、同じ媒体では濃度や深さを変えても、主に全体としてのスケールが変わり、パラメータ推定には大きな影響を与えないことが分かった。しかし、散乱媒体の光学的な濃さや深さが増加すると、散乱媒体の先の物体に入射光が届かず、そもそも式(1)のような散乱光と反射光の相互作用が生じない。本論文で提案したモデルは、対象物体を0.1%程度に薄めた牛乳を1cm程度の厚さで覆うような散乱光の影響が少ないシーンにのみ有効であるといえる。

7. む す び

本論文では、散乱媒体の透過特性と物体の反射特性を組み合わせることで、散乱媒体中の物体の見かけの反射特性をモデル化した。レンダリング実験により、散乱媒体が物体の見かけの反射特性に与える影響を調べた。また、反射特性が既知な参照物体を利用することで、散乱媒体の特性と物体の反射特性を二段階に分けて推定する方法について述べた。

実画像を用いた実験では、グラフでのあてはめ結果は良好であるが、パラメータの推定値は真値とはずれていた。この問題を解決するためには条件を変えて計測した複数のデータを加えるなどの工夫が必要である。また、提案モデルの計算は、モンテカルロ積分で実装したが、サンプル数の少なさもレンダリング結果に影響

響を与えている．今後は実装の工夫などにより，安定した推定結果を求める必要がある．

文 献

- [1] G.J. Ward, "Measuring and modeling anisotropic reflection," Proc. SIGGRAPH'92, pp.255-273, 1992.
- [2] Y. Mukaigawa, K. Sumino, and Y. Yagi, "Rapid BRDF measurement using an ellipsoidal mirror and a projector," Trans. IPSJ, Comput. Vis. Appl., vol.1, pp.21-32, 2009.
- [3] 土居元紀, 大槻理恵, 富永昌治, 池田直子, 引間理恵, 丹野修, "ケベルカム理論に基づいたファンデーション塗布肌の分光反射率の推定," 信学論 (D), vol.J92-D, no.9, pp.1602-1612, Sept. 2009.
- [4] 森本哲郎, Robby T. Tan, 川上 玲, 池内克史, "層状表面におけるスパイダーモデルを用いた複雑反射表面の要素分解," 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2009), 2009.
- [5] 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.
- [6] 小山 亮, 船富卓哉, 飯山将晃, 椋木正之, 美濃導彦, "物体表面反射特性推定のためのチンダル現象を用いたレーザ光反射シミュレーション," 情処学研報, CVIM 174-11, 2010.
- [7] S.G. Narasimhan and S.K. Nayar, "Shedding light on the weather," Proc. IEEE CVPR2003, vol.151, pp.665-672, 2003.
- [8] 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.
- [9] B.T. Phong, "Illumination for computer generated pictures," Commun. ACM, vol.18, no.6, pp.311-317, 1975.
- [10] R.L. Cook and K.E. Torrance, "A reflectance model for computer graphics," Comput. Graph., vol.15, no.3, pp.307-316, 1981.
- [11] K.E. Torrance and E.M. Sparrow, "Theory for off-specular reflection from roughened surfaces," JOSA, vol.57, no.9, pp.1105-1112, 1967.
- [12] J.F. Blinn, "Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces," Comput. Graph., vol.16, no.3, pp.21-29, 1982.
- [13] J. Gu, R. Ramamoorthi, P.N. Belhumeur, and S.K. Nayar, "Dirty glass: Rendering contamination on transparent surfaces," Proc. Eurographics Symposium on Rendering, 2007.
- [14] 倉地紀子, CG Magic, レンダリング, オーム社, 2007.

付 録

本研究で用いた Torrance-Sparrow モデルは以下のとおりである [11], [14].

$$f_r(\mathbf{L}, \mathbf{V}) = \rho_d \mathbf{N} \cdot \mathbf{L} + \rho_s \frac{DGF_r(\theta_i, \theta_{i2})}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}} \mathbf{N} \cdot \mathbf{L},$$

$$D = e^{-(\alpha n)^2},$$

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

$$F_r(\theta_i, \theta'_i) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(\theta_i - \theta'_i)}{\sin^2(\theta_i + \theta'_i)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta'_i)}{\tan^2(\theta_i + \theta'_i)} \right\},$$

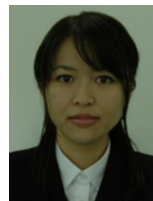
$$\sin \theta_i = \eta \sin \theta'_i$$

なお, [11] では以下のフレネル反射項が用いられている．

$$F_r = \frac{1}{2} \frac{(g - c)^2}{(g + c)^2} \left(1 + \frac{(c(g + c) - 1)^2}{(c(g - c) + 1)^2} \right),$$

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

(平成 23 年 3 月 25 日受付, 8 月 8 日再受付)



馬場 葉子

2009 阪大・基礎工・情報科学卒. 2011 同大大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程了.



向川 康博 (正員)

1997 筑波大学大学院工学研究科博士課程了. 同年～2002 岡山大学助手. 2003～2004 年 10 月筑波大学講師. 大阪大学助教授を経て 2007 年 4 月より同大学准教授. コンピュータビジョンの研究に従事. 博士 (工学). 情報処理学会, 日本バーチャリティ学会, IEEE 各会員.



八木 康史 (正員)

1983 阪大・基礎工・制御卒. 1985 同大大学院修士課程了. 同年三菱電機 (株) 入社. 同社産業システム研究所にてロボットビジョンの研究に従事. 1990 大阪大学基礎工学部情報工学科助手. 同学部システム工学科講師, 同大学院助教授を経て, 2003 より同大学産業科学研究所教授. 1995～1996 英オックスフォード大学客員研究員, 2002 仏ピカルディエール大学招聘助教授, コンピュータビジョンに関する研究に従事. 情報処理学会フェロー, IEEE, 情報処理学会, 日本ロボット学会各会員. 博士 (工学).