

照明光と反射光の散乱を考慮した反射特性の推定

馬場 葉子^{†1} 向川 康博^{†1} 八木 康史^{†1}

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、および、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。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段階に分けて別々に推定する手法について述べる。シミュレーション画像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した。

BRDF Estimation Considering Scatterings of Illumination and Reflection

YOKO BABA,^{†1} YASUHIRO MUKAIGAWA^{†1}
and YASUSHI YAGI^{†1}

The observed reflectance features change, if they are put in scattering media. This phenomenon is caused by scattering of illuminated and reflected lights. The incident light from the light source scatters before it reaches at the surface of the object. Similarly, the reflected light scatters before it reaches at the camera. In this paper, we propose a new reflectance model which can express the interaction between the transmittance feature of the media and the reflectance feature of the object by taking the scattering of illuminated and reflected lights into account. Based on the reflectance model, the transmittance feature in the scattering media and the reflectance feature of the object are sequentially estimated by two steps using a reference object whose reflectance feature is known. We examined the validity of the proposed model by the simulation experiment. We also examined the accuracy of the estimation of the reflectance feature which takes into account the scattering in the media.

1. はじめに

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、濁った液体や霧の中で物体を観察したり、物体表面に塗装や化粧品といった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。実際には化粧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。これにより、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表現することが可能となる。さらに、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段階に分けて別々に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(a)、(b)は同じ硬貨を水と散乱媒体(水で薄めた乳酸飲料)に入れた時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

^{†1} 大阪大学 産業科学研究所
Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

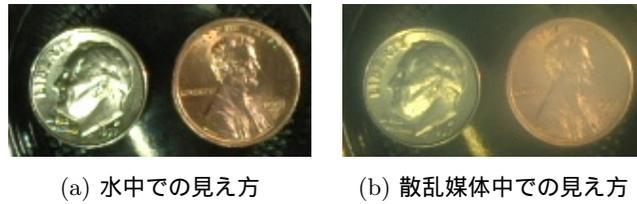


図 1 散乱媒体による物体の見え方の変化

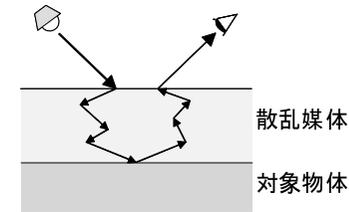


図 3 散乱媒体内における光線の振る舞い

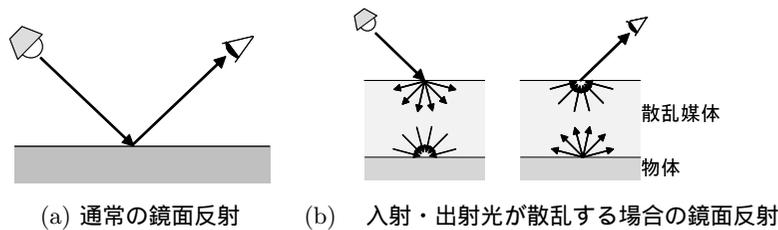


図 2 散乱媒体による反射の変化

おり、一見すると (b) の方がざらついているように感じる。

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観測点に届く。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。さら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、さら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、散乱媒体の有無に関わらず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たとしても、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 散乱による入射・反射光の変化

対象物体と光源・カメラの間に散乱媒体が存在する場合における光の挙動を考える。図 3 に示すように、入射光は散乱媒体中の粒子との衝突による散乱を繰り返した後、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からだけではなく、対象物体を中心とする半球面上のすべての方向から光が入射することになる。

散乱媒体の影響で対象物体の反射光は直接観測されない。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すべ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、対象物体の真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 $I = (\theta_i, \phi_i)$ と観測方向 $R = (\theta_r, \phi_r)$ 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 $I = (\theta_i, \phi_i)$ と観測方向 $T = (\theta_t, \phi_t)$ 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輝度の比率を表す。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 $f_r(I, R)$ 、 $f_t(I, T)$ と表現する。ただし I は入射角を表し、 R 、 T はそれぞれ反射角、透過角を表す。

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すべ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

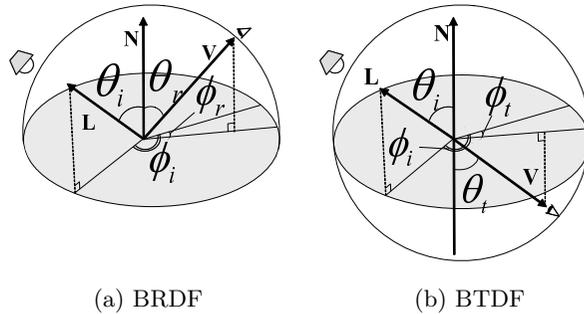


図 4 入射角, 反射角, 透過角の関係

面上すべ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 (I') と反射方向ベクトル (R') 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 $f(I, R)$ は次式で表現される．

$$f(I, R) = \int_{\Omega^+} \int_{\Omega^+} f_t(I, I') f_r(I', R') f_t(R', R) dI' dR' \quad (1)$$

ただし， Ω^+ は観測点を中心とする半球面を示す．

3.3 光学モデル

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ほうが良いが，複雑になると解析が不安定になってしまうため，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

反射特性を表す様々なモデルには鏡面反射が正反射方向と視線方向が成す角度の余弦のべき乗に比例して弱くなる Phong モデルや，鏡面反射の広がりを Beckmann 関数で表す

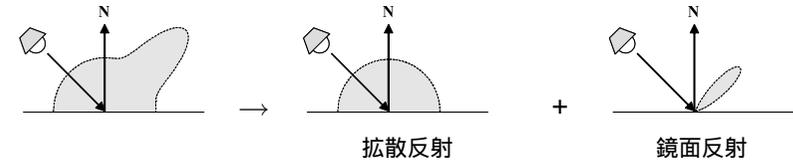


図 5 拡散反射と鏡面反射の和で表現される反射モデル

Cook-Torrance モデル等，様々なモデルが提案されている．本研究では物体表面が様々な向きの微正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⁹⁾を用いる．図 5 に示すように，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 ，表面の荒さ係数 n ，相対屈折率 η である．

なお本稿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¹⁰⁾ 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¹¹⁾ まで様々な透過モデルが提案されている．本稿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．図 6 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散乱である．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持つ．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．

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散乱である．単一散乱の広がり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．フェーズ関数とは図 7 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，散乱の向きの優位性を表す g をパラメータとする．また散乱媒体に入射する時と透過する時に散乱媒体の表面と裏面でフレネル反射が生じる．よって 1 からフレネル反射率を引いた，フレネル透過項を 2 度乗じる必要がある．

以上の考えより本研究では下記の式を透過モデルとして使う．

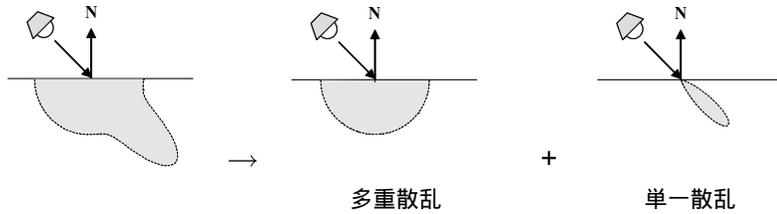


図 6 多重散乱と単一散乱の和で表現される透過モデル

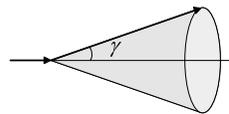


図 7 フェーズ関数

表 1 パラメータ

反射モデル	拡散反射係数 P_d	鏡面反射係数 P_s	表面の荒さ係数 n	屈折率 η_b
透過モデル	拡散反射係数 T_d	鏡面反射係数 T_t	フェーズ関数パラメータ g	屈折率 η_u

$$f_t(\mathbf{I}, \mathbf{T}) = \tau_d + \tau_t p(g, \gamma) F_t(\theta_i, \theta_{i2}) F_t(\theta_{i2}, \theta_{i3}), \quad (2)$$

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

$$F_t(\theta_i, \theta_{i2}) = 1 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_{i2})}{\sin^2(\theta_i + \theta_{i2})} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_{i2})}{\tan^2(\theta_i + \theta_{i2})} \right\}. \quad (4)$$

式 (2) における, 右辺第 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. $F_t(\theta_i, \theta_{i2})$ は物体に入射する際の表面でのフレネル透過を表し, $F_t(\theta_{i2}, \theta_{i3})$ は物体を透過する際の裏面でのフレネル透過を表す. θ_{i2}, θ_{i3} はそれぞれ散乱媒体の表面から入射する時の屈折角, 裏面から透過する時の屈折角を表す.

なお本稿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.

反射特性・透過特性を求めるために必要なパラメータを表 1 に示す.

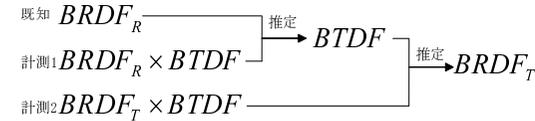


図 8 推定の流れ

4. 反射・散乱特性の解析

4.1 パラメータ推定の不安定性

提案モデルに基づいて散乱媒体の透過特性と, 物体の反射特性を推定する. 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持っている場合は, 濃い散乱媒体の影響でなめ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.

4.2 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. よって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 2 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, 対象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

表 2 シミュレーション物体の反射パラメータ

	P_d	P_s	n	η
BRDF1	2.00×10^2	5.00×10^5	0.80	1.55
BRDF2	1.00×10^3	5.00×10^5	0.50	1.55

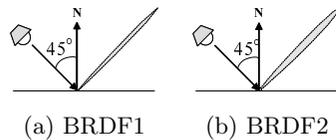


図 9 物体の反射光の広がり

を図 8 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．

5. 実 験

5.1 散乱媒体による見えの変化

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するシミュレーション実験を行った．

反射特性の異なる2種類の物体を，以降ではBRDF1，BRDF2と呼ぶ．BRDF1は表面がなめらかで鏡面反射成分が強く，鏡面反射が周囲へ広がらない性質を持つ物体とした．一方，BRDF2は拡散反射成分が大きく，鏡面反射成分が広がる物体とした．これらの反射パラメータを表2に示す．なおBRDF1，BRDF2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9に示す．

透過特性の異なる3種類の散乱媒体を，以降ではBTDF1，BTDF2，BTDF3と呼ぶ．BTDF1はモデルの濃度が薄い散乱媒体を想定しており，光が広がりにくい．BTDF3は濃い散乱媒体であり，光が広がる．BTDF2は，BTDF1とBTDF3の間の性質を持つ．これらの透過モデルのパラメータを表3に示す．それぞれの媒体に対して入射角45°において

表 3 シミュレーション散乱媒体の透過パラメータ

	T_d	T_t	g	η
BTDF1	1.00×10^{-3}	0.01	0.98	1.3
BTDF2	1.00×10^{-3}	0.13	0.93	1.3
BTDF3	1.00×10^{-3}	0.38	0.88	1.3

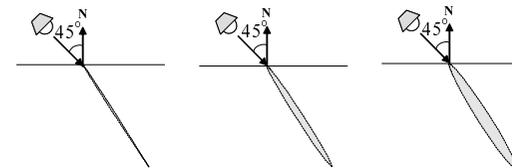


図 10 散乱媒体による透過光の広がり

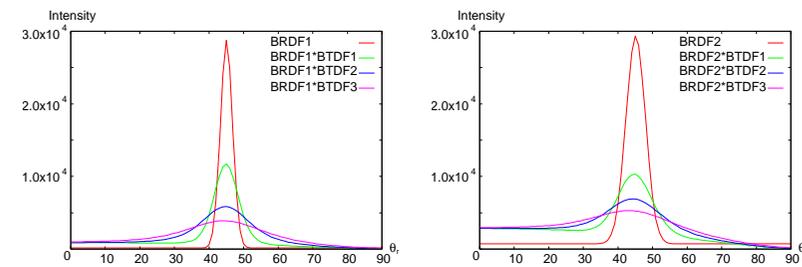


図 11 散乱媒体による観測値の違い

光が入射したときの透過光の広がりを図10に示す．パラメータ g の値が減少するにつれて透過光の周囲への広がりが大きくなるのが分かる．

BRDF1，BRDF2の表面に各散乱媒体が存在する状態を仮定する．入射角が45°における反射角と観測値の関係を図11に示す．ただし図11の赤線が，物体の周囲に散乱媒体が存在しない状態における観測値である．この結果から散乱媒体のパラメータ g の値が減少するにつれて見かけの鏡面反射は弱くなり，さらに鏡面反射が周囲へ広がることがわかる．BRDF1，BRDF2の真の反射特性に基づいてレンダリングしたCGを図12(a),(e)に，

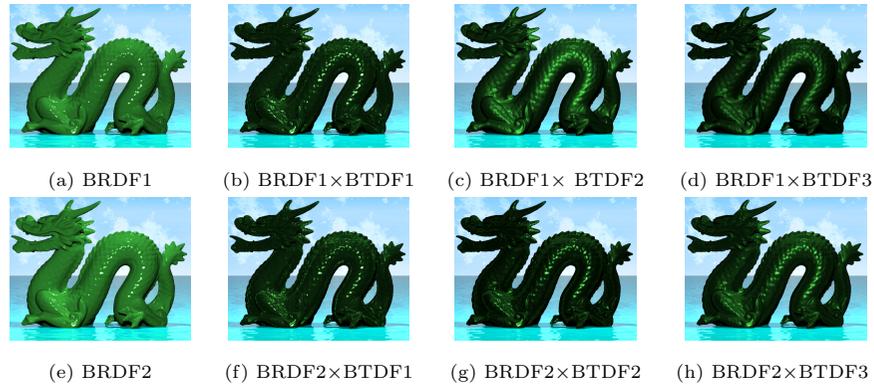


図 12 散乱媒体の影響を受けた見かけの反射特性に基づくレンダリング

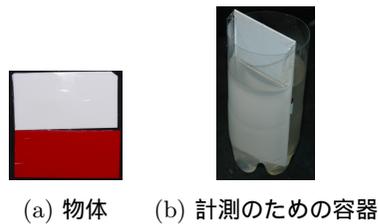


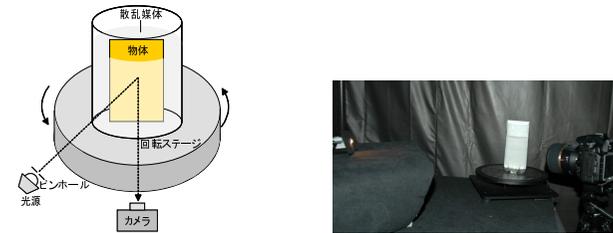
図 13 計測対象

BRDF1, BRDF2 の周囲に各媒体が存在する場合の見かけの反射特性に基づいてレンダリングした CG を図 12(b)~(d), (f)~(h) に示す．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わかる．また散乱媒体ごとに鏡面反射の明るさや広がり異なることがわかる．特に散乱の大きい BTDF3 では鏡面反射の広がりやピーク値の減少が顕著に確認できる．

5.2 対象物体の反射特性推定

5.2.1 実験環境

4.2 節で述べた手法を用いて、実際に散乱媒体内の物体の真の反射特性を推定する実験を行った．参照物体として図 13(a) の上に示す白色アクリル板を、対象物体として図 13(a) の下に示す赤い塩化ビニル板を用いた．また散乱媒体として水で薄めた乳酸飲料を用いた．光源と物体、およ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



(a) 光源、カメラ、物体の位置関係 (b) 計測システム

図 14 計測環境

常に一定となるように、図 13(b) に示す円筒の中心にアクリル板を設置し、円筒内部を散乱媒体で満たした．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．

図 14 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．入射角と反射角を変化させながら反射光の強度を計測するために、光源とカメラを固定した状態で、回転ステージを使って円筒を回し、反射光を計測した．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．この計測を光源とカメラの相対角度を 30° , 60° , 90° と変えて行った．

5.2.2 参照物体の反射特性の計測とモデル化

参照物体である白色アクリル板の反射特性を求め、モデル化する．参照物体単体の反射特性を求めるため、散乱媒体の代わりに水を円筒の内部に満たして計測した．

図 15(a) のグラフ中の点は、各反射角 θ_r における計測値を、光源とカメラの相対角ごとに示したものである．この計測結果を反射モデルに当てはめた結果を図 15(a) の実線に示す．推定されたパラメータは $P_d = 2.91 \times 10^3$, $P_s = 1.34 \times 10^6$, $n = 0.80$, $\eta_b = 1.16$ となった．図 15(a) の結果より概ね良好な推定ができていると言える．この反射特性を用いてレンダリングした CG の例を図 15(b) に、入射角が 45° の場合の反射光の空間的な広がりを図 15(c) に示す．

5.2.3 散乱媒体の透過特性の推定

次に、散乱媒体の透過特性を推定する．そのために前節で反射特性を計測した白色アクリル板を散乱媒体に入れ、その見かけの反射特性を計測した．この計測結果と前節で求めた反

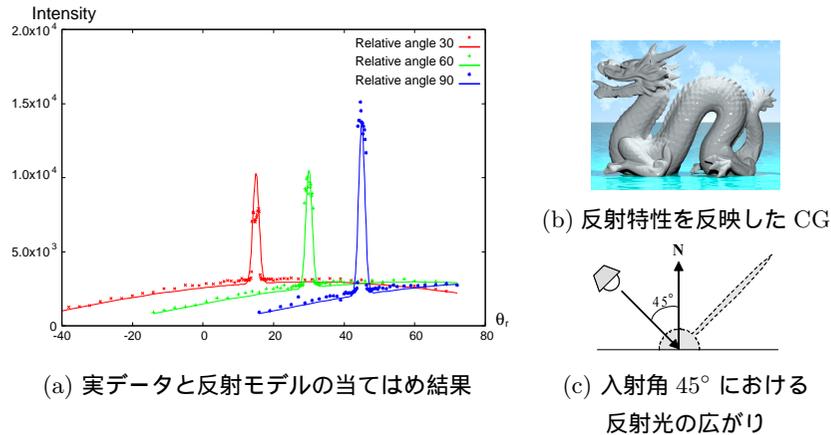


図 15 白色アクリル板の計測と反射モデルの当てはめ結果

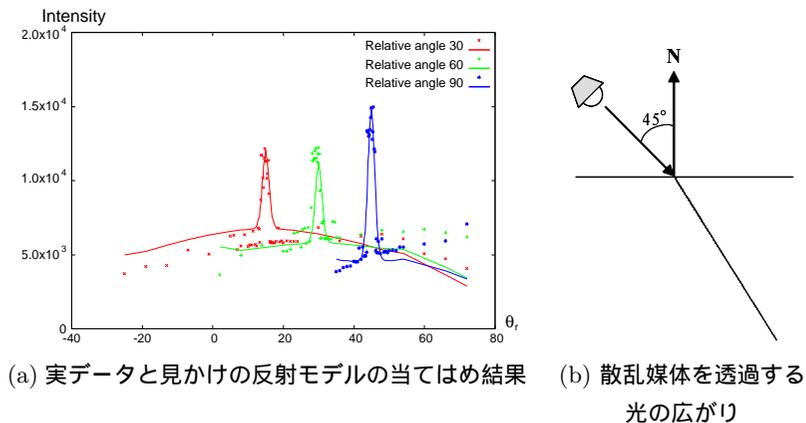
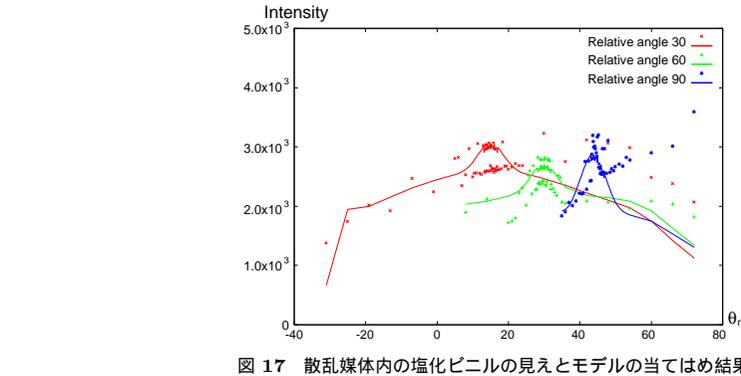


図 16 散乱媒体内の白色アクリル板の見えとモデルの当てはめ結果

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。ただし計測結果には散乱媒体内で散乱した後、物体で反射することなく観測される成分が含まれてしまう。この問題を解決するために、反射を生じない黒い布を参照物体と同時に計測する。黒い布上での観測値は散乱媒体内だけの散乱光と考えられるので、計測値との差



を取ることで物体を反射する光の成分を求めることができる。

図 16(a) のグラフ中の点は、各反射角 θ_r における計測値を、光源とカメラの相対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。反射角 θ_r が 60° 以上の場合にモデルと計測値との誤差がやや大きくなっているが、鏡面反射に相当するピーク部分については概ね一致している。

推定された散乱媒体の透過パラメータは $T_d = 1.67 \times 10^{-3}$, $T_t = 2.78 \times 10^{-4}$, $g = 0.99$, $\eta_u = 1.31$ であった。得られたパラメータを使って入射角が 45° の場合の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 16(c) に示す。媒体の濃度が薄いため、散乱の広がりは、さほど大きくないと推定された。

5.2.4 対象物体の反射特性の推定

前節で推定した散乱媒体の透過特性と、その散乱媒体内にある対象物体の見かけの計測データから、対象物体の本来の反射特性を推定する実験を行った。前節と同様に散乱媒体内に置いたなめらかな塩化ビニルの見えを計測した後、塩化ビニルの表面で反射しない成分を除去した。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、 $P_d = 1.17 \times 10^3$, $P_s = 6.82 \times 10^4$, $n = 0.20$, $\eta_b = 1.13$ の比較的ざらついた反射特性として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 17 の点と実線で示す。全体的に計測値とのずれがあり、特に反射角 θ_r が 60° 以上で誤差が大きい。

その原因を調べるため、塩化ビニルはどのような反射特性として推定されたのかを調べた。比較のために、5.2.2 節で参照物体を計測したときと同じ方法で、塩化ビニルの反射特性を直接計測した。その結果、 $P_d = 4.57 \times 10^2$, $P_s = 1.58 \times 10^6$, $n = 0.83$, $\eta = 1.14$ の

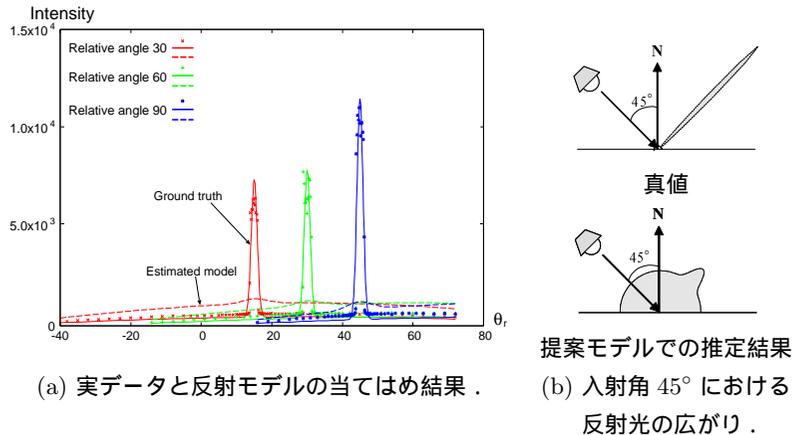


図 18 塩化ビニルの反射モデルの真値と提案モデルによる推定結果.

なめらかな反射特性としてパラメータが得られた。これは、推定したパラメータと大きく異なる。実際、図 18(a) に示すように、直接計測した場合の実線と、推定した場合の点線は異なる分布となり、入射角が 45° の場合の反射光の空間的な広がりを表した (b) の結果からも、正確な推定が行えていないことがわかる。

この結果より、前段階の透過特性の推定の誤差が、次の段階の反射特性の推定に大きく影響していることがわかる。実際、散乱の広がりが大きい媒体に表面がなめらかな物体を置いたが、推定結果ではほとんど散乱しない媒体にざらざらした物体を置いたと解釈されている。4 章でも述べたとおり、両者の見かけの反射特性は似たものになるため、これらを区別することが難しい。

本研究では、参照物体を用いることで不良設定問題を回避することを試みたが、依然として不良設定問題に近い状態になっている。カメラ・光源と物体の距離を数段階にして、反射特性は同一で散乱特性のみが異なる計測値を利用するなどの工夫によって、不良設定問題に近づける工夫などが考えられる。

6. ま と め

本稿では、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。シミュレーション実験により、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、散乱媒体の透過特性と物体の反射特性を 2 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、モデルの当てはめが不良設定問題に陥りやすく、参照物体を用いて 2 段階に分けて推定する際に、誤差が伝播しやすいという問題点が明らかとなった。前述の通り、条件を変えて計測した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影響を与えている。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予定である。

参 考 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", IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 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, "クベルカ-ムンク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", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J92-D, No.9, pp.1602-1612, 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ー光反射シミュレーション", 情処研報 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) K. E. Torrance and E. M. Sparrow, "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces", JOSA, Vol. 57, Issue 9, pp.1105-1112, 1967.
- 10) J. F. Blinn, "Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces", Computer Graphics, Vol.16, Issue 3, pp.21-29, 1982.
- 11) J. Gu, R. Ramamoorthi, P.N. Belhumeur, and S.K. Nayar, "Dirty Glass: Rendering Contamination on Transparent Surfaces", Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering, 2007.