Vol.2017-CG-168 No.26
Vol.2017-DCC-17 No.26
Vol.2017-CVIM-209 No.26
2017/11/8

散乱を利用した物体反射特性推定における散乱異方性を考慮した観測のモデル化

櫛田 貴弘[1,a)]　舩冨 卓哉[1,b)]　久保 尋之[1,c)]　向川 康博[1,d)]

概要：反射特性を計測するためには，物体表面で反射した光をあらゆる方向から観察する必要があるため，非常に手間がかかる．本研究では，光をその進行方向以外から観測できるようになる散乱現象を利用し反射光を観測することで，あらゆる方向への反射光を同時に観測する．散乱には観測方向によって強度が変化する散乱異方性があるため，これを考慮して観測をモデル化する．このモデルと観測値との差を最小化する最適化問題を解くことにより，各方向への反射光の強度を推定する．合成データと実測データを用いた実験を行い，提案手法の有効性を検証した．

1. はじめに

物体の反射特性は，物体に当たった光がどの方向にどの程度反射するかを示す特性である．反射特性は物の見た目に大きく関わっており，リアルな CG の生成や文化財のアーカイブ化などにおいて重要な技術である．

物体の反射特性を計測するには物体で反射した光を各反射方向からそれぞれ観測する必要があるため，大量の観測が必要になる．反射特性を効率よく計測するために，これまで様々な方法が提案されてきた．

本研究では，散乱現象を利用して物体の反射特性を推定する手法を提案する．散乱の有無による反射光の見え方の違いを図 1 に示す．散乱が起こらない媒体中では反射光が見えないのに対し，散乱が起こる媒体中では反射光を見ることができる．また，反射特性の異なる物体では，反射光の広がりの違いを見ることができる．つまり，散乱媒体を利用することで，反射光を各反射方向以外から観測することができ，さらに観測される散乱光には，反射特性の違いが反映されていることが分かる．我々は，この散乱媒体の性質を反射特性推定に利用する．

散乱媒体を通して反射光を観測する時，観測される光は複数の反射方向の光の散乱光の強度を積算したものになる．各方向の反射光強度を得るには，散乱光の積算画像から各方向の反射光強度を推定する必要がある．これは単一の観測画像では困難であるため，複数の視点から観測した画像を用いる．このとき，散乱には異方性があるため，同じ方向の反射光でも観測方向により散乱光の強度が変化してしまう．そこで我々は，散乱異方性を考慮して観測をモデル化し，モデルと観測との差を最小化する最適化問題を解くことにより，反射光の強度分布を推定した．

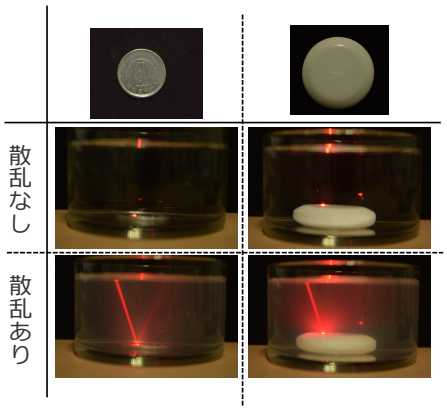


図 1　散乱の有無による反射光の見え方の違い

2. 関連研究

反射特性を計測するには，入射方向と反射方向の組み合わせについてそれぞれ計測する必要があるが，特に複雑な反射特性を持つ物体を計測するには，すべての方向の反射光を計測する必要があり，非常に手間がかかる．

反射特性の計測方法として最も単純なものは，ゴニオリフレクトメータを用いる方法である．ゴニオリフレクトメータには可動部のアームに光源とセンサが取り付けられており，それぞれを機械的に動かして光の入射方向と反射

[1] 奈良先端科学技術大学院大学
〒 630–0192 奈良県生駒市高山町 8916 番地 5
[a)] kushida.takahiro.kh3@is.naist.jp
[b)] funatomi@is.naist.jp
[c)] hkubo@is.naist.jp
[d)] mukaigawa@is.naist.jp

© 2017 Information Processing Society of Japan

Vol.2017-CG-168 No.26
Vol.2017-DCC-17 No.26
Vol.2017-CVIM-209 No.26
2017/11/8

方向の組み合わせを変えながら反射光の強度を計測する．この方法は単純であるが入射方向と反射方向の組み合わせを同時に 1 つしか計測できないため，すべての方向を計測するには膨大な計測回数が必要となる問題がある．そのため，計測を効率的に行う方法がこれまでに提案されている [3]．

多数の反射方向を同時に計測する方法として，大量の光源やセンサを用いる方法がある．Ben-Ezra ら [1] や Rump ら [10] は，半球状に 1 つの光源 LED と大量のセンサを取り付けた装置を制作し，受光器を機械的に動かすことなくあらゆる方向の反射光を同時に取得する方法を提案した．Tunwattanapong ら [11] は，大量の光源を取り付けた半円状のアームを回転させ，複数の方向からカメラで撮影することで計測を効率化した．

鏡の反射を利用して，複数の方向の反射特性を同時に計測しようとする研究も行われている．Mukaigawa ら [7] は楕円鏡を利用し，Ghosh ら [2] は独自に設計した凹面鏡を利用して，機械的な駆動系を排除することで計測の効率化を行った．これらの装置では光源にプロジェクタを利用しており，投影パターンを変えることによって光の入射方向を高速に切り替えながら計測を行うことができる．

カメラを用いて広範囲を同時に計測するイメージベースの方法も提案されている．Marschner ら [5] は，反射特性が一様な球や円筒を計測対象として，少数の画像から様々な入射方向と反射方向の組み合わせを計測する方法を提案した．さらに Matusik ら [6] は，Marschner と同様に反射特性が一様な球を計測対象として，100 種類の異なる素材の反射特性を計測したデータベース（MERL BRDF Database）を構築した．

我々はこれらの方法とは異なった，散乱現象を利用して反射特性を推定する方法を提案する．

3. 問題設定と観測方法

3.1 問題設定

反射特性の表現には，一般的に BRDF（双方向反射率分布関数）が用いられる．BRDF はある角度から入射した光が各方向へどの程度反射するかを表すものであり，入射方向 (θ_i, ϕ_i) と反射方向 (θ_o, ϕ_o) の組み合わせの 4 次元で表現される．本研究では，入射方向を固定した時の 2 次元の反射光強度分布を求める．

図 2 のように散乱媒体を通して反射光を観測すると，各方向の反射光が散乱した光が同時に観測される．各方向への反射光強度を推定するには，複数の方向の反射光の散乱光の積算値から，各方向の反射光強度を推定しなければならない．これを単一の観測から推定するのは困難である．そのため，複数の視点からの観測を用いて各方向の反射光強度を推定する．

本研究ではすべて単一散乱を仮定する．単一散乱は，散乱媒体に入射した光が媒体中で一度だけ微粒子と衝突して出射する散乱現象である．単一散乱を仮定することで，光路の解析が容易になる．

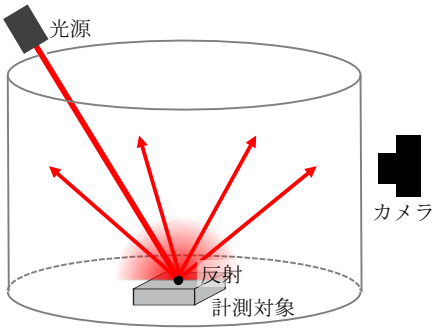


図 2 散乱媒体を通して反射光を観測

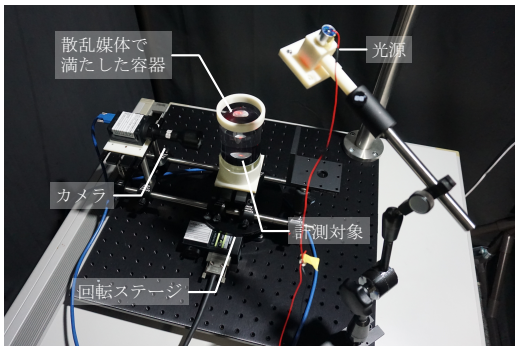


図 3 観測システム

3.2 観測方法（観測システム）

物体で反射し散乱媒体で散乱した光を複数の視点から観測するために，我々は図 3 の観測システムを構築した．観測システムの中央には散乱媒体で満たされた容器があり，容器の中に計測対象となる物体を設置する．容器の上部から計測対象となる物体に光を照射し，物体で反射して散乱した光をカメラで観測する．カメラは回転軸の中心を向くように回転ステージに取り付けられており，計測対象を中心に回転する．これにより様々な視点から散乱光を観測することができる．観測の光学系には平行系を仮定するために，カメラにテレセントリックレンズを取り付ける．

散乱媒体は単一散乱とみなせる程度まで薄めた牛乳を用いる．

4. 反射光強度分布の推定

4.1 散乱の異方性が観測に与える影響

本研究では，図 1 の下段のように観測される散乱光を複数の方向から観測し，各方向の反射光強度を得る．このとき，散乱された光が全方向に均等に放射される等方散乱であれば，観測は散乱光強度分布の Radon 変換として表されるため，X 線 CT のような逆投影による再構成法により反射光の強度分布を得ることができる．しかし，身の回り

© 2017 Information Processing Society of Japan

Vol.2017-CG-168 No.26
Vol.2017-DCC-17 No.26
Vol.2017-CVIM-209 No.26
2017/11/8

にある散乱媒体はほとんどが強い異方性を持つため，等方散乱とみなすことができない．

そこで本研究では，光が入射して物体表面で反射し，散乱して観測されるまでの過程をモデル化し，モデルと観測との差を最小化する最適化問題を解くことにより各方向の反射光強度を推定する．

4.2 散乱異方性を考慮した観測のモデル化

散乱媒体に入射した光が物体で反射し，散乱して観測されるまでの過程をモデル化する．

散乱のモデルとして，単一散乱モデル [8] を用いる． 単一散乱モデルは単一散乱媒体における散乱光強度を記述したモデルであり，単一散乱の解析に広く用いられている．光が散乱媒体に $\boldsymbol{x}_i$ から入射して散乱点 $\boldsymbol{x}_s$ で一度だけ微粒子と衝突し，$\boldsymbol{x}_o$ から出射する時，観測される散乱光の強度 $L(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_o)$ は次のように定式化される．

$$L(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_o) = L_0 \sigma_s p(g, \theta) e^{-\sigma_t (d_1 + d_2)} \qquad (1)$$

ここで，L_0 は入射光の強度，σ_s，σ_t はそれぞれ散乱媒体の散乱係数，消失係数，$p(g, \theta)$ は散乱の異方性を表す位相関数，d_1 は光が散乱媒体へ入射した位置から微粒子に衝突するまでの距離，d_2 は微粒子に衝突してから散乱媒体の外へ出射するまでの距離である．位相関数 $p(g, \theta)$ には一般的に Henyey-Greenstein 関数 [4] が用いられる．

$$p(g, \theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{[1 + g^2 - 2g\cos\theta]^{\frac{3}{2}}} \qquad (2)$$

$g \in [-1, 1]$ は散乱の異方性を制御するパラメータであり，0 に近いほど光が全方向へ均等に散乱される等方散乱となり，1 に近いほど前方へと散乱される前方散乱，-1 に近いほど後方散乱となる．

図 4 に示すように，散乱媒体に入射した光は，反射特性の推定対象の物体表面で反射する．そして物体表面で反射した光は単一散乱により散乱点 $\boldsymbol{x}_s$ において 1 度だけ散乱し，容器の表面 $\boldsymbol{x}_o$ に到達し出射する．この時，反射特性の推定対象の表面で反射し，散乱点 $\boldsymbol{x}_s$ において散乱した光が容器の表面 $\boldsymbol{x}_o$ に到達した時の光の強度 $L(\boldsymbol{x}_s, \boldsymbol{x}_o)$ を単一散乱モデルを用いて次のように定式化する．

$$L(\boldsymbol{x}_s, \boldsymbol{x}_o) = L_0 f_r(\boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) \frac{1}{d_1^2} \mathrm{e}^{-\sigma_t d_1} \sigma_s p(g, \theta) \mathrm{e}^{-\sigma_t d_2} \qquad (3)$$

ここで，L_0 は物体表面に当たる直前の光の強度，$f_r(\boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o)$ は光が方向 $\boldsymbol{\omega}_i$ から入射し，方向 $\boldsymbol{\omega}_o$ へ反射する時の物体表面の BRDF，d_1 は反射点から散乱点 $\boldsymbol{x}_s$ までの距離，d_2 は散乱点 $\boldsymbol{x}_s$ から容器の表面 $\boldsymbol{x}_o$ までの距離，σ_t は散乱媒体の消失係数，$p(g, \theta)$ は反射方向と観測方向のなす角 θ における散乱媒体の位相関数を表す．前述の単一散乱モデルと異なるのは，入射した光が物体で反射し，散乱点に到達するまでの過程が追加されている点である．物体表面に方向 $\boldsymbol{\omega}_i$ から入射した光が方向 $\boldsymbol{\omega}_o$ に反射する時，反射光の強度は入射光強度 L_0 に，物体表面の反射特性 f_r を掛けた値となる．そして反射した光は散乱点 $\boldsymbol{x}_s$ へ達するまでに逆 2 乗の法則に従って減衰し，また，単一散乱モデルに従って光路長 d_1 に対して指数関数的に減衰する．散乱点に到達した光は一部が散乱して出射点 $\boldsymbol{x}_o$ から容器の外へと出射する．この時，出射する光の強度は，単一散乱モデルと同様に，散乱点に達した光の強度に散乱係数 σ_s と位相関数 p を掛け，容器表面までの指数関数減衰を掛けたものとなる．

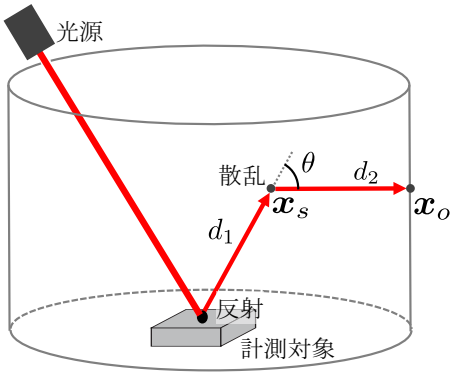


図 4 単一散乱による反射光の散乱光の観測モデル

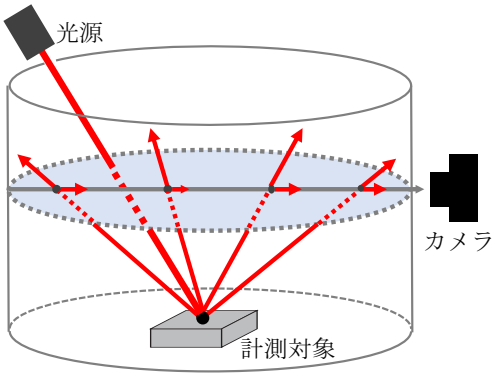


図 5 観測値は観測方向に向かう散乱光強度の積算値

観測される光は，図 5 のように様々な方向への反射光の散乱光をすべて積算したものである．カメラの視線方向に含まれる散乱光を積分することで，観測光の強度を計算する．

$$I(\boldsymbol{x}_c, \boldsymbol{v}) = \int_{\boldsymbol{x}_s \in \Omega(\boldsymbol{x}_c, \boldsymbol{v})} L_0 f_r(\boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) \frac{1}{d_1^2} \mathrm{e}^{-\sigma_t d_1} \sigma_s p(g, \theta) \mathrm{e}^{-\sigma_t d_2} d\boldsymbol{x}_s \qquad (4)$$

$\boldsymbol{x}_c$ はカメラの位置，$\boldsymbol{v}$ はカメラの視線方向のベクトル，$\Omega(\boldsymbol{x}_c, \boldsymbol{v})$ はカメラの視線方向に含まれる散乱媒体の領域である．視線方向に含まれる各散乱点での散乱光を積分することで観測光の強度を計算する．

次に，物体の反射特性 f_r を推定するために，式 4 を離散系へと変形し，最適化問題として定式化する．観測を含む平面を考え，正方形の格子に区切る．各格子内に入射する反射光の方向は同じとし，計測対象物体の反射位置から各格子の中心点へ向かう方向をその格子が受ける光の入射方

© 2017 Information Processing Society of Japan

Vol.2017-CG-168 No.26
Vol.2017-DCC-17 No.26
Vol.2017-CVIM-209 No.26
2017/11/8

向とする．この時点で格子数が反射方向の数になる．観測光の強度は，視線領域に含まれる各格子が受けた光が観測方向へ散乱したものをすべて積算したものとする．観測光の強度を次のように定式化する．

$$I = \sum_k w_k I_{cell_k} p(g, \theta_k) \mathrm{e}^{-\sigma_t d_{2_k}} \tag{5}$$

$$I_{cell_k} = L_0 f_r(\boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_{o_k}) \frac{1}{d_{1_k}^2} \mathrm{e}^{-\sigma_t d_{1_k}} \sigma_s \Delta A \tag{6}$$

I_{cell_k} は格子が受ける反射光の強度，w_k は各格子が受ける光が観測方向へ寄与する割合，ΔA は格子の面積である．

今求めたいのは物体の反射特性 f_r である．光の入射方向，反射点，カメラの位置，散乱媒体の散乱係数，消失係数，位相関数がすべて既知のとき，f_r 以外の係数はすべて計算できる．そこで，物体の反射特性 f_r を未知数 x とし，それ以外の光の伝播過程の既知の係数をまとめたベクトルを $\boldsymbol{c}$ とすると，観測光はベクトルの内積を用いて次のように表現できる．

$$I = \boldsymbol{c}^\top \boldsymbol{x} \tag{7}$$

さらに複数の位置からの観測をまとめ，次のように表す．

$$\boldsymbol{I} = C\boldsymbol{x} \tag{8}$$

これを最小二乗法を用いて解くことにより反射特性を推定する．光の強度は負値になることはないので，非負制約を加える．

4.3 入射光の除去による推定結果の向上

計測装置で得られる観測画像には，物体の反射光の散乱光の他に，物体に照射した入射光の散乱光も同時に含まれてしまう．この入射光の散乱光は反射光の散乱光に比べ非常に大きな強度を持つため，反射光強度をうまく推定できない．そこで我々は，入射光を含む部分を観測データと反射光強度の推定方向から除去することで，入射光の散乱光が推定結果に影響を与えないようにした．

5. 実験

提案手法を用いて反射特性が推定できるかを確かめるために，合成データと実測データを用いた実験を行った．

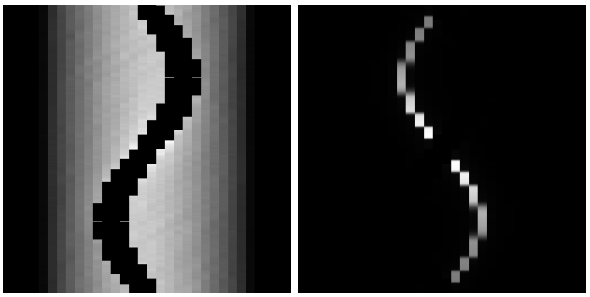
5.1 合成データを用いた実験

5.1.1 合成データの生成

物理ベースレンダラ pbrt-v3[9] を用いて計測環境を模したシーンを構成し，観測画像を生成した．

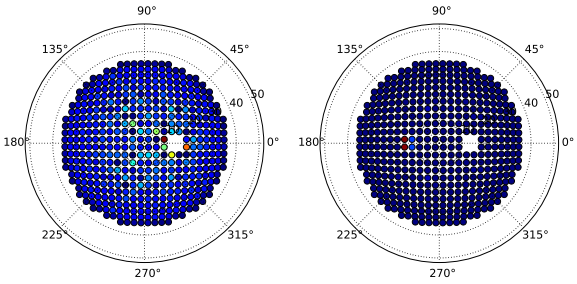
反射特性の推定対象の上に円柱の散乱媒体を配置し，円柱の斜め上から細い光を照射する．物体で反射し，散乱媒体で散乱した光を CT のように円柱の側面から中心軸に向かって観測する．円柱の軸を中心にカメラを回転させ，周囲から観測する．円柱の周囲を 1 度刻みで３６０方向の観測画像を生成する．得られた画像から特定の高さのピクセルを取り出し角度ごとに並べたサイノグラムを作成する．散乱媒体は単一散乱とみなせる程度に散乱係数を調整し，吸収はなしとする．また，散乱媒体と外部の境界で屈折はないとする．散乱位相関数のパラメータは $g = 0.9$（前方散乱）とする．

推定対象の反射特性は，理想的な鏡面反射と拡散反射の２種類を用いた．



拡散反射　　鏡面反射

図 6　サイノグラム



拡散反射　　鏡面反射

図 7　合成データを用いた時の反射光強度分布の推定結果．各反射方向を極座標上にプロットし，強度をヒートマップで表示している．赤くなるほど強度が強く，青くなるほど強度が弱いことを表す．

5.1.2 結果・考察

入力に用いたサイノグラムを図 6 に，反射特性の推定結果を図 7 に示す．サイノグラムの黒く抜けている部分は入射光の散乱光を除去した部分である．また，推定結果の抜けている部分は入射光の方向である．図 7 に示す鏡面反射の推定結果では，鏡面反射方向に強いピークが現れていることが分かる．また，拡散反射の推定結果では，わずかにノイズが目立つが，均一な強度が推定されていることが分かる．

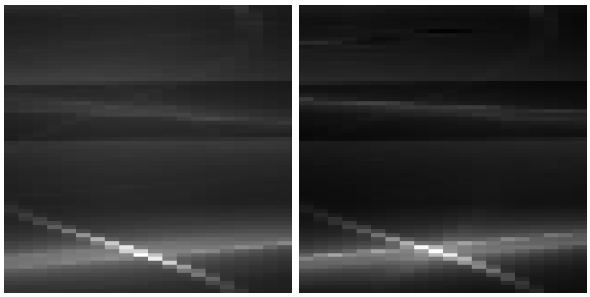
5.2 実測データを用いた実験

5.2.1 実測データの取得

図 3 に示す観測システムを用いて実測データを取得した．光源にはプロジェクタを使用し，黒背景の中央に白い点を描画した画像を物体に投影した．回転ステージを 5 度刻みで動かし，合計７２方向から撮影した．露光時間は，

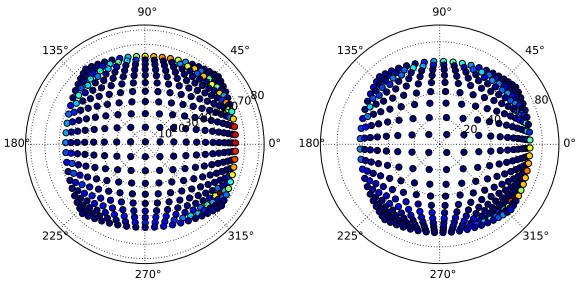
© 2017 Information Processing Society of Japan

Vol.2017-CG-168 No.26
Vol.2017-DCC-17 No.26
Vol.2017-CVIM-209 No.26
2017/11/8



プラスチック片　　硬貨

図 8　サイノグラム



プラスチック片　　硬貨

図 9　実測データを用いた時の反射光強度分布の推定結果

画素が飽和せず単一散乱のみが得られるよう調整した．サイノグラムは，合成データを用いた実験と同様に，得られた画像から特定の高さのピクセルを取り出し角度ごとに並べることにより生成した．

反射特性の推定対象物体として，プラスチック片と硬貨の 2 種類を用いた．

5.2.2　結果・考察

得られたサイノグラムを図 8 に，反射特性の推定結果を図 9 に示す．硬貨は鏡面反射成分が強く，プラスチック片は拡散反射成分が強いと考えられるので，両物体の反射特性の推定結果は大きく違うことが期待される．しかし，図 9 の結果を比較すると，両者にあまり違いが見られないことが分かる．

以上の結果から，実測データでは反射特性をうまく推定できなかったと判断した．原因として，次のことが挙げられる．第一に，モデルに含まれていない，ノイズとなる光が観測画像中に多数含まれていたことである．これらは，散乱光が容器の内側で反射した光や，容器の傷による散乱のほか，散乱媒体中に浮遊するホコリなどが影響を与えたと考えている．第二に，散乱媒体の特性が観測に影響を与えた可能性がある．散乱媒体の特性により，媒体中の微粒子は絶えず動いているため，観測される散乱光は時間的に安定していなかった．そのため，位置を変えながら撮影している間に散乱光強度が変化してしまった可能性がある．第三に，観測システムのアラインメント，キャリブレーションのズレである．本手法は光の反射位置，カメラの位置・方向が全て既知とし，観測光の光路を計算している．そのため，位置の僅かなズレが結果に影響を与えてしまう．

6.　おわりに

本研究では，光の散乱を利用して物体の反射特性を推定する手法を提案した．本手法は，散乱により光をその進行方向以外から観測できるようになることを利用し，複数方向の反射光を同時に観測することで，効率的に反射特性を計測する手法である．観測で得られる散乱光の積算画像から各方向の反射光の強度を推定するために，散乱異方性を考慮して観測をモデル化し，複数の観測を用いた最適化問題として定式化した．実験では，合成データと実測データを用いて提案手法を評価し，合成データを用いた実験においてのみ提案手法を用いて反射特性が推定できることを確認した．今後は，実環境において推定できるよう観測方法を改良するほか，ノイズへの頑強性や推定結果の向上に向けて最適化問題の解法を改良する予定である．

謝辞　本研究は JSPS 科研費 JP26700013 の助成を受けた．

参考文献

[1] Ben-Ezra, M., Wang, J., Wilburn, B., Xiaoyang Li and Le Ma: An LED-only BRDF measurement device, *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1109/CVPR.2008.4587766 (2008).

[2] Ghosh, A., Achutha, S., Heidrich, W. and O'Toole, M.: BRDF Acquisition with Basis Illumination, *2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision*, IEEE, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1109/ICCV.2007.4408935 (2007).

[3] Guarnera, D., Guarnera, G., Ghosh, A., Denk, C. and Glencross, M.: BRDF Representation and Acquisition, *Computer Graphics Forum*, Vol. 35, No. 2, pp. 625–650 (online), DOI: 10.1111/cgf.12867 (2016).

[4] Henyey, L. C. and Greenstein, J. L.: Diffuse radiation in the Galaxy, *The Astrophysical Journal*, Vol. 93, p. 70 (online), DOI: 10.1086/144246 (1941).

[5] Marschner, S. R., Westin, S. H., Lafortune, E. P. F. and Torrance, K. E.: Image-based bidirectional reflectance distribution function measurement, *Applied Optics*, Vol. 39, No. 16, p. 2592 (online), DOI: 10.1364/AO.39.002592 (2000).

[6] Matusik, W., Pfister, H., Brand, M. and McMillan, L.: A data-driven reflectance model, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 22, No. 3, p. 759 (online), DOI: 10.1145/882262.882343 (2003).

[7] Mukaigawa, Y., Sumino, K. and Yagi, Y.: Rapid BRDF Measurement Using an Ellipsoidal Mirror and a Projector, *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 1, pp. 21–32 (online), DOI: 10.2197/ipsjtcva.1.21 (2009).

[8] Narasimhan, S. G., Gupta, M., Donner, C., Ramamoorthi, R., Nayar, S. K. and Jensen, H. W.: Acquiring scattering properties of participating media by dilution, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 25, No. 3, p. 1003 (online), DOI: 10.1145/1141911.1141986 (2006).

[9] Pharr, M., Jakob, W. and Humphreys, G.: *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA,

© 2017 Information Processing Society of Japan

Vol.2017-CG-168 No.26
Vol.2017-DCC-17 No.26
Vol.2017-CVIM-209 No.26
2017/11/8

USA, 3rd edition (2016).

[10] Rump, M., Müller, G., Sarlette, R., Koch, D. and Klein, R.: Photo-realistic Rendering of Metallic Car Paint from Image-Based Measurements, pp. 527–536 (online), DOI: 10.1111/j.1467-8659.2008.01150.x.

[11] Tunwattanapong, B., Fyffe, G., Graham, P., Busch, J., Yu, X., Ghosh, A. and Debevec, P.: Acquiring reflectance and shape from continuous spherical harmonic illumination, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 32, No. 4, p. 1 (online), DOI: 10.1145/2461912.2461944 (2013).

© 2017 Information Processing Society of Japan