

能動サンプリングに基づく効率的BRDF計測

枝廣 修平^{1,a)} 長原 一² 谷口 倫一郎²

概要：物体の材質認識や質感のあるCG生成のため、サンプルからBRDFを計測して用いられてきた。BRDFを計測する際、対象物体を照明方向と視点方向を様々に変化させて反射光を密に観測する必要があるため、長い計測時間や膨大なデータサイズが問題となってきた。実測されたデータを関数モデルにフィッティングし、パラメータ群として表現する方法としてNishinoらのDSBRDFモデルがある。DSBRDFモデルにより、実測されたBRDFの複雑な反射特性が、データサイズを落としながらも質を保った表現ができることが確認された。そこで本研究では、BRDFを扱う際にDSBRDFモデルとして扱うことを前提とすることで、より少ない計測によってBRDFを得る手法を提案する。全材質データの分散からサンプリング角度を決めることで、計測対象のBRDFを効率的に取得する。

キーワード：BRDF, DSBRDF, 質感

1. はじめに

画像から対象の物体の材質を推定するには、対象の幾何形状だけでなく光沢があるか、マットであるかといった対象の表面上の光の反射特性が重要な要素となる。また、質感の高いCG生成のためにも、物体の反射率分布は重要な要素である。Computer VisionやCGにおいて物体表面の反射特性は双方向反射分布確率(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)を用いて表されてきた。

BRDFは、モデルを用いて生成する方法や、実際に物体の反射率をゴニオメータなどの機器を用いて計測する方法がある。BRDFモデルの代表的なものとしては、Lambertianモデル[2]やPhongモデル[4]、Torrance-Sparrowモデル[5]Blinnモデル[6]などが上げられる。しかしながら、これらのモデルは鏡面反射に偏ったり、拡散反射に偏ったりといった特定の反射特性しか表現できないという問題がある。

一方で、BRDFを実際のサンプルから計測することにより直接的に求めることで、複雑な反射特性を持つBRDFを表現する方法もある。BRDFの計測には、ゴニオメータと呼ばれる、カメラと照明をそれぞれ2軸回転により、半球状で移動できる機械を用い、対象物体をあらゆる方向から照明したときのあらゆる視点方向への反射光を密に計測

することで得られる。このゴニオメータによるBRDF計測では、長い計測時間がかかることや、計測データは、カメラと照明それぞれ2自由度、合計4次元の膨大なデータサイズであることが問題であった。また、物体認識などに用いる際には、BRDFのどの特徴が認識に寄与するかを解析する際に、この膨大なデータ量が問題となる。

これらのモデル化や計測によるBRDF表現に対して、両方の利点を融合したアプローチも提案されている。Nishinoら[7-9]は、BRDFをHemi-EPDという分布の混合分布関数としてモデル化し、計測されたノンパラメトリックBRDFをこのモデルにフィッティングすることで、幅広い実際のBRDFをモデル近似する(Directional Statistics Bidirectional Distribution Function(DSBRDF))を提案した。これらの論文により、モデル近似されたBRDFを用いてCGレンダリングをした結果が、生の計測BRDFを用いた際と遜色がないことや、このモデルのパラメータを用いることで、物体の材質識別が行えることを示した。このDSBRDFのフィッティングには、1度毎の計測BRDFが用いられていたが、そもそもモデルフィッティングを前提にするのであれば、これほど密な計測BRDFが必要であるのだろうかという疑問が持ち上がる。これに対して、フィッティングの入力となる計測BRDFデータを線形に25%まで落としても、DSBRDFモデルの再現性にあまり変化はない。

本研究では、更なる簡略化と再現性の向上を目指し、単純な線形ではなく全材質のデータの分散からサンプリング角度を決めることで計測対象のBRDFを効率的に取得す

¹ 九州大学 大学院 システム情報科学府 情報知能工学専攻 実世界ロボティクス講座

² 九州大学 大学院 システム情報科学研究科 情報知能工学専攻 実世界ロボティクス講座

a) edahiro@limu.ait.kyushu-u.ac.jp

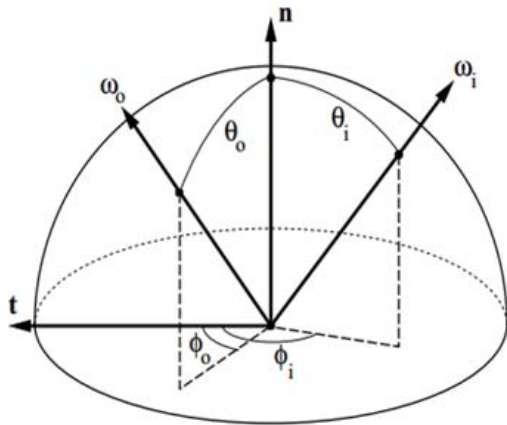


図 1 照明, 観測方向を表す角度パラメータ

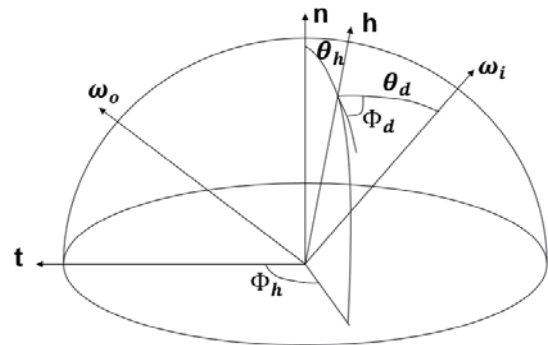


図 2 反射モデルに用いられるベクトル

る手法を提案する .

2. 関連研究

2.1 Bidirectional Reflectance Distribution Function

2.1.1 BRDF とは

双方向反射率分布関数 Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) とは, Nicodemus [1] らによって物体表面における光の反射を記述する手段として提案されたものである . これは, 任意の入射方向の放射照度 (irradiance) に対する任意の視線方向への放射輝度 (radiance) の比率として以下のように表される .

$$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o) = \frac{dL_o(\vec{\omega}_o)}{dL_i(\vec{\omega}_i)(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}} \quad (1)$$

ここで, $dL_o(\vec{\omega}_o)$ はある地点から $\vec{\omega}_o$ 方向へ反射する放射輝度, $dL_i(\vec{\omega}_i)$ はある地点に $\vec{\omega}_i$ 方向から入射する放射輝度である . \vec{n} はある地点における法線である . 光の向きは入射角 $\omega_i = (\theta_i, \phi_i)$ と反射角 $\omega_o = (\theta_o, \phi_o)$ で表され, 物体表面上の材質が均一である場合, BRDF は図 1 のような 4 次元の関数となる .

これを計測するためには, 上記のように 4 次元であるためそれぞれの角度を仮に 1 度ごとにサンプリングしたと仮定すると光源 (360 × 90) × カメラ (360 × 90) の計測が必要となり約 10 億回の計測が必要となる . データにするとそのまま 10 億個のベクトルということになる . 1 回の計測に 1 秒と仮定しても 33 年という莫大な時間がかかってしまうという問題がある .

2.1.2 Isotropic BRDF

前章では, BRDF を 4 次元で表現した . しかし, 多くの実世界の物体は本質的にはそれ以下の次元しか持たない . そこで, 低次元でもっと本質的な特徴を用いた表現を用いる . 図 2 の左図に示す照射方向 ω_i と観測方向 ω_o を固定す

る . そして, 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しない等方性反射を仮定した isotropic BRDF に注目する . 式 3 のような, 光源とカメラを水平方向に同じだけ回転させても反射特性は変わらない性質と, 式 3 のような, 光源に対して水平方向に対称な位置から見た反射特性は変わらないという性質から, BRDF は 3 次元で $f_r(\theta_i, \theta_o, |\phi_i - \phi_o|)$ と表すことができる .

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o) = f_r(\theta_i, \phi_i + \varphi, \theta_o, \phi_o + \varphi) \quad (2)$$

$$f_r(\theta_i, 0, \theta_o, \phi_o) = f_r(\theta_i, 0, \theta_o, -\phi_o) \quad (3)$$

次に, これを式 4 に示すような入射方向と反射方向の間方向角 ω_h と相違角 ω_d で表す .

$$\omega_h = \frac{\omega_i + \omega_o}{\|\omega_i + \omega_o\|}, \omega_d = \mathbf{R}_Y(-\theta_h) \mathbf{R}_Z(-\phi_h) \omega_i \quad (4)$$

ここで, \mathbf{R}_Y と \mathbf{R}_Z はそれぞれ従法線, 法線の回転とし, 視覚的に表すと図 2 のように表される . 以上をまとめ, BRDF は 3 次元の関数で $(f_r(\theta_h, \phi_d, \theta_d))$ と表すことができる .

2.1.3 BRDF の計測

前章でも述べたとおり, BRDF とは入射と反射の双方向に依存するため, 対象の表面上の計測点に対して光源方向と計測方向を様々に変化させた場合の反射強度を観測することが必要である . このサンプリングを行う方法は, 用いる装置や前提条件の違いによって, 主に 3 つの手法に大別される . まず第一に, ロボットアームや回転ステージに光源とセンサ (または測定対象) 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光源方向と計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手法がある . この計測は, 球面上で光源とセンサを回転角度を小さく, 密に回転させるため密な BRDF がサンプリングできるが, 機械的な方法のために計測時間が非常に長くなるのが問題である .

次に, 計測時間を短縮するため, Ward [3] は半球面のハーフミラーと魚眼レンズを用いることで, カメラを回転さ

せずにすべての視線方向からの反射光を一度に観測できる装置を提案した。しかし、光源はハーフミラーの裏側で回転させなければならず、計測に時間がかかる上に、対象とカメラの両方を半径の中心に配置できないために、中心付近に並べて配置することしかできず、この誤差を吸収するために大きな半径が必要であるという問題があった。同様に1枚の画像計測で多くの情報を得るための手法として、対象を筒状の台に取り付けて計測を行う方法なども開発されている [11]。

更に、鏡、魚眼レンズ、ビームスプリッタ等の反射屈折光学系を用いることで、仮想的に光源やセンサの角度を変化させることができ、機械的な回転構造を持つことなく照明・計測方向を高速で、尚且つ密に BRDF を計測する手法も開発されている [12] [13]。これらの光学系とプロジェクタを組み合わせることで、BRDF を高速且つ密に計測できるが、光学的な構造の調節が難しいという問題がある。

2.1.4 パラメトリック BRDF

BRDF を観測することなく、経験等に基づいて定式化して表現する手法、また、計測された BRDF を簡潔にモデル化する表現として、パラメトリックモデルが広く利用されている。パラメトリックな BRDF の表現方法として様々な手法が提案されている。まず、Phong モデル [4] は、経験に基づく古典的なモデルであり、照明方向の正反射方向と観測方向なす角の余弦のべき乗として近似するモデルである。このモデルはあくまで経験に基づくものであり、エネルギー保存則を満たす保証がないなど気をつけるべき性質はあるが、計算が容易であるため計算能力が低かった初期の CG モデルではよく使用された。単に経験的な観測に基づいたものでなく、物理的な解析に基づいた反射モデルとして最も初期に開発されたものとして Torrance-Sparrow モデル [5] がある。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、鏡面反射の強度は実際には正反射方向から少しずれた位置で最大になるという性質を表現できるモデルである。Lambertian, Blinn らは微細な表面の幾何形状に基づいた物理的なモデルを、Ward らは球面調和関数を用いた周波数領域での反射解析や、ゼルニケ多項式を用いたデータ解析に基づいた現象論的なモデルを考案している。しかし、それらの BRDF モデルはそれぞれ特定のタイプの反射に限られ、単一のモデルで BRDF 全てのスペクトラムを表現できないため独立した複数のモデルを結合する必要がある。

3. DSBPDF

方向統計双方向反射分布関数 Directional Statistics Bidirectional Reflectance Distribution Function (DSBRDF) [7] は、Nishino らによって物体表面における光の反射をパラメトリックに、データサイズを落として表現する手法と

して提案されたものであり、以下のように Hemispherical Exponential Power Distribution (Hemi EPD) の式 5 のような組み合わせで表される。

$$p(\theta_h | \theta_d, \Theta) = C(\Theta) (\exp[\kappa \cos^\gamma \theta_h] - 1) \quad (5)$$

ここで、 $\Theta = \{\kappa, \gamma\}$ はこの分布のパラメータであり、 κ とは分布の高さに関するパラメータ、 γ は尖度に関するパラメータである。 C は正規化項で、 $C(\Theta) = \frac{\gamma(-\kappa)^{\frac{1}{\gamma}}}{2\pi(\Gamma(\frac{1}{\gamma}) - \Gamma(\frac{1}{\gamma}, -\kappa) - \gamma(-\kappa)^{\frac{1}{\gamma}})}$ と表され、 Γ とはガンマ関数である。 γ が 0 に近いほどランバート反射に似た反射を表し、大きいほど鏡面反射に近い反射を表す。特殊なケースとして、 $\gamma = 0$ のとき完全ランバート反射に、 $\gamma = \infty$ のとき完全鏡面反射となる。

対象を以上のモデルでモデリングする際、1つの解析モデルでは鏡面反射、拡散反射を同時にうまく表現できず複数のパラメトリック BRDF モデルを線形結合して表現することが多い。例えば、Lambert モデルと Torrance-Sparrow モデルは同時に扱われることがほとんどである。Lambert モデルは入射した光はすべての方向に等しく反射するという反射側に基づき、拡散反射を表現している。それに対し、Torrance-Sparrow モデルは Phong のモデルに反射係数や幾何学的要因による、光の減衰といったパラメータも含めた、鏡面反射を表現するモデルである。そのためこれら2つを同時に用いることで、それぞれの得意な鏡面反射、拡散反射を表現する手法が多く用いられる。

isotropic BRDF を混合 hemi-EPD でモデル化する場合、上記のような他のモデルと組み合わせることなくそれ単一のモデルで表現することができる。hemi-EPD は θ_d を固定した2次元スライスの線形結合 (式 6) で表される。

$$p(\theta_h | \theta_d, \Theta) = \sum_{k=1}^K \alpha^{(k)} p(\theta_h | \theta_d, \Theta^{(k)}) \quad (6)$$

ここで、 $\Theta = \Theta^{(1)} \dots \Theta^{(K)}$ 、 K は BRDF を構成する hemi-EPD の数である。

実際に計測された BRDF は正規化されていない場合もある。そのようなデータをモデル化する場合は、式 6 の曲線近似は正規化項を除く、式 7 のように表す。

$$p(\theta_h | \theta_d, \Theta) = \sum_{k=1}^K \left(\exp[\kappa^{(k)} \cos^{\gamma^{(k)}} \theta_h] - 1 \right) \quad (7)$$

k は近似する hemi-EPD の数 (ローブ数) を表す。この関数を、 θ_d を固定し、横軸を θ_h にとった1次元の曲線として近似を行う。上記の曲線近似は、 θ_d を角度を固定し、複数のスライスに分割する。今回の実験では、5度ずつで18のスライスとする。

このフィッティングは標準的な Expectation Maximization アルゴリズム (EM アルゴリズム) を用いる。まず、

E-step の条件付期待値として、式 8 により、モデルを構成するそれぞれの hemi-EPD のそれぞれの θ_n に対して全体のモデルとの割合を求める。

$$q(k | \theta_h^{(n)}, \Theta_{old}) = \frac{\frac{1}{C(\Theta_{old}^{(k)})} f(\theta_h^{(n)} | \Theta_{old}^{(k)})}{\sum_{k=1}^K \frac{1}{C(\Theta_{old}^{(k)})} f(\theta_h^{(n)} | \Theta_{old}^{(k)})} \quad (8)$$

次に、E-step で計算した値を用いて式 9 のように設計する。

$$\sum_{n=1}^N \|q(k | \theta_h^{(n)}, \Theta_{old}) L_i(\theta_h^{(n)}, \phi_d^{(n)}, \theta_d) - \frac{1}{C(\Theta^{(k)})} p(\theta_h^{(n)} | \theta_d, \Theta^{(k)})\|^2 \quad (9)$$

この誤差関数を最小化するパラメータ κ, γ を求める。最小化のステップでは、Levenberg-Marquardt Algorithm (LM 法) を用いて誤差関数を最小化するパラメータを求める。

LM 法とは、関数の最適化手法の 1 つである。まず勾配法により粗く解の探索を行い、解にある程度近づくと、ガウス・ニュートン法に切り替える。そうすることで、どちらか一方を用いる場合に比べ精度や効率のよい探索ができる。

Algorithm 1 EM アルゴリズムによるモデルフィッティング

```

Initialize all  $\kappa^{(k)}, \gamma^{(k)}$   $k = 1, \dots, K$ 
repeat
  E-step
  for  $n = 0$  to  $N$  do
    for  $k = 1$  to  $K$  do
       $q(k | \theta_h^{(n)}, \Theta_{old}) = \frac{\frac{1}{C(\Theta_{old}^{(k)})} f(\theta_h^{(n)} | \Theta_{old}^{(k)})}{\sum_{k=1}^K \frac{1}{C(\Theta_{old}^{(k)})} f(\theta_h^{(n)} | \Theta_{old}^{(k)})}$ 
    end for
  end for
  M-step
  Initialize  $\Theta^{(k)}$  for  $k = 1, \dots, K$ 
  for  $k = 1$  to  $K$  do
     $\operatorname{argmin}_{\Theta^{(k)}} \sum_{n=1}^N \|q(k | \theta_h^{(n)}, \Theta_{old}) L_i(\theta_h^{(n)}, \phi_d^{(n)}, \theta_d) - \frac{1}{C(\Theta^{(k)})} p(\theta_h^{(n)} | \theta_d, \Theta^{(k)})\|^2$ 
  end for
until convergence

```

これにより、 $3(\text{color}) \times 90(\theta_h) \times 90(\theta_d) \times 180(\phi_d)$ の数値で表現されていた BRDF データが K 個のローブでフィッティングする場合 $3(\text{color}) \times K(\text{robe 数}) \times 2(\kappa \text{ or } \gamma) \times M(\text{スライス数})$ のパラメータで表現できる。今回の実験では $K = 3$ でフィッティングしているため 1,458,000 のデータが約 2500 倍に圧縮した 576 のパラメータで表せる。

4. BRDF サンプリングと DSBRDF 再現性の評価

本手法では、能動サンプリングによる DSBRDF モデル

の再現性を評価することを目的とし、より少ない計測により BRDF を表現することを目指す。

具体的には、Ground Truth として 100 種類の等方 BRDF ($3(\text{color}) \times 90(\theta_h) \times 90(\theta_d) \times (\phi_d)$) が収録されている Mitsubishi Electric Research Laboratories (MERL) で公開されている (<http://www.merl.com/brdf/>) BRDF データベース [14] を使い、様々な材質間の分散から、3 章および文献 [7-9] で説明された DSBRDF フィッティングアルゴリズムに用いるサンプリング点を定める。

θ_d に対しては、 $0 \sim 90$ 度の範囲で 15 度毎のスライスに切り、それぞれモデルを生成し、係数 κ, γ を求める。 κ, γ は θ_d に対してなめらかに変動すると考えられるので、スプライン補間でスライスの間の係数を補間する。この様にして、求められた DSBRDF のパラメータ $3(\text{color}) \times 3(\text{robe 数}) \times 2(\kappa \text{ or } \gamma) \times 6(\text{スライス数})$ から、MERL データベースと同じ $3(\text{color}) \times 90(\theta_h) \times 90(\theta_d) \times 180(\phi_d)$ の BRDF データを DSBRDF モデルより再現した。

5. 実験

5.1 計測 BRDF のデータ分散

MERL のデータベースにある 100 の材質からモデル化の軸である θ_d の各 θ_h に関して分散を計算する。図 3 に $\theta_d = 0$ のときの分散を示す。このように、 θ_h によって分散に大きな開きがある。ここで、分散の小さい部分はその材質でも似たような値を持つため、特定の材質を表現するのにあまり重要ではないことが分かる。また、分散の大きい部分は材質によって値に大きな開きがあるため、材質を表現、区別するのに非常に重要である。つまり、こういった分散の低い部分は密にサンプリングする必要はなく、分散の大きい部分を密にサンプリングすることが好ましいと考えられる。

そこで、分散の逆数である精度をサンプリング間隔に利用することを考える。精度を式 10 のように累積値として求め正規化し、新たなサンプリング角度を式 11 で定める。この新たなサンプリング角度をモデル化に用いる。

$$A_i = \sum_{k=0}^i \frac{1}{\sigma_k^2} \quad (10)$$

$$\theta_d' = 90 \times \frac{A_i}{A_{89}} \quad (11)$$

5.2 予備実験

データベースの $\theta_h = 0$ 付近のデータは信頼性が低いとされているため、それらの点を除外したモデル化をする必要がある。そのため、0 付近の点をどの程度取り除くべきなのか実験を行い調査した。

図 4 は取り除く点の違いによるモデル化の差を示してい

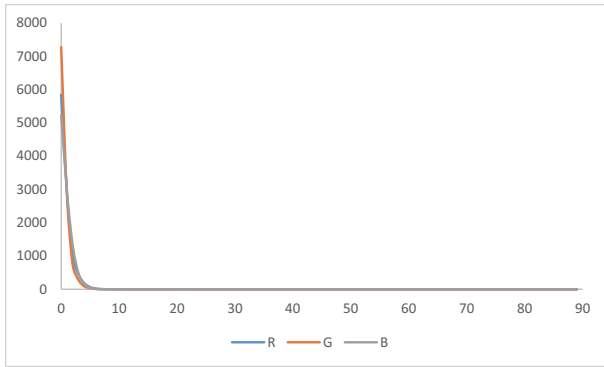


図 3 $\theta_d = 0$ の分散

る．材質は white-acrylic, $\theta_d = 0$, 色は赤のモデルである．水色が MERL の実測値, 青が DSBRDF としてモデル化した値, そしてオレンジ, 灰色, 黄色がそれを構成する各 robe で, 緑の点がモデル化に用いたサンプリング点である．このように $\theta_h = 0$ 付近では BRDF の値は滑らかになっていない部分が存在し, そこをモデル化に使用するか否かで結果が大きく変わってしまう．そのため除外する点を様々な変化させてモデル化し, その精度を比較することで最適なモデル化を実験的に求めた．図 5 にサンプリングを開始する θ_h を様々な変化させたモデルのレンダリング画像を示す． $\theta_h = 0 \sim 4$ までの区間では, θ_d , 色の様々な組み合わせで滑らかでない部分がまばらに存在しているため, モデル化した際に色のバランスが崩れてしまい, 見え方が変わってしまうという結果が得られた．しかし, $\theta_h = 0 \sim 4$ の 5 点を除くとおおよそ信頼性の低い滑らかでない部分を外したモデル化が行えることが確認された．そのため今回の実験では, $\theta_h = 5$ 以降の点からモデル化を行うこととする．

5.3 数値的評価

提案手法とこれまでの線形にサンプリング点を減らす手法 [10] の各モデルの MERL の計測 BRDF に対する誤差を図 6,7 に示す．線形に減らす手法が 1/5, 提案手法が 1/8 の圧縮率となっている．これまでの線形に減らしたモデルと比較し, マットな材質ではサンプリングの密度を減らしながらも若干精度を改善できていることが分かる．更に, 多少スペキュラー成分の強い white-acrylic や steel などにはより精度の向上が大きいことが確認できる．これは, 分散が大きい, つまり BRDF の形状が大きく変化する付近を重点的にサンプリングしているためであると考えられる．しかし, これまで同様スペキュラー成分が大きくなるに連れて誤差も大きくなるという欠点は改善されていないという問題もある．

5.4 視覚的比較

CG レンダリングなどの応用を想定して, DSBRDF の

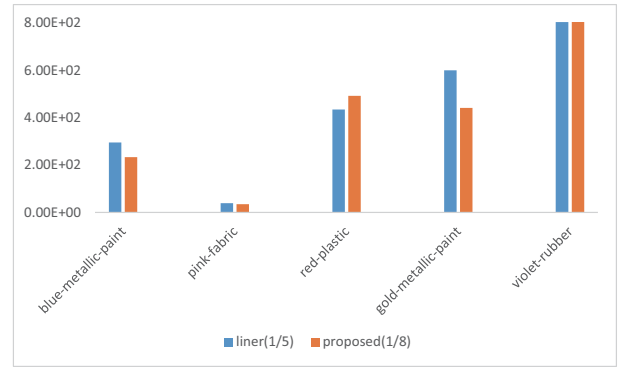


図 6 誤差の数値比較

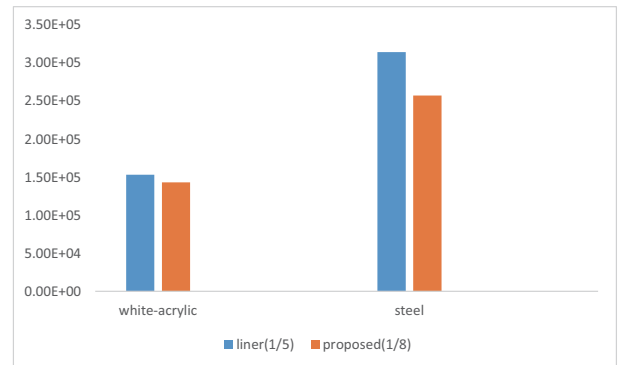
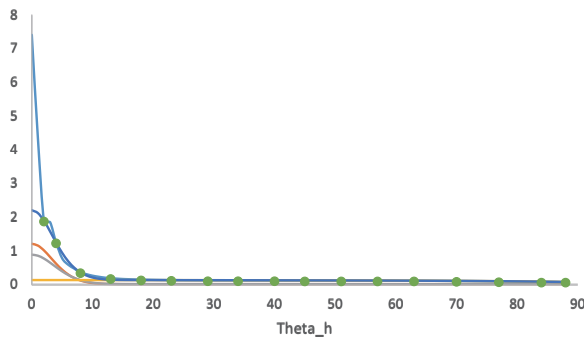


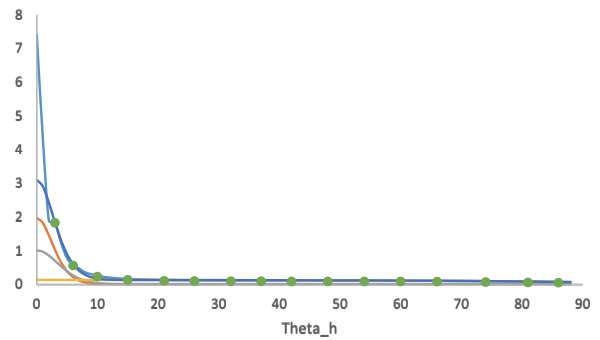
図 7 誤差の数値比較

再現性を視覚的に評価した．レンダリングには PBRT (<http://www.pbrt.org/index.php>) を用いて物体形状を球にまた光源を点光源に設定して画像を生成した．MERL の生の計測データから直接レンダリングした結果を図 8 に示す．一方で, 線形に入力データを間引いた DSBRDF モデルによるレンダリング結果を図 9 に, 提案手法により入力データを間引いた DSBRDF モデルによるレンダリング結果を図 10 に示す．plastic, paint, rubber, というそれぞれ異なる材質をモデル化してレンダリングを行った．rubber は色合い等視覚的にうまくモデル化されていることが分かる．plastic はサブサーフェイスキャタリングの部分がそもそも DSBRDF モデルでモデル化できないために表現できていないが, スペキュラーハイライトの部分が, これまでのモデルに比べて若干表現できていることが分かる．metallic-paint は, 元のスペキュラーハイライト部分が対称でなく若干いびつな形をしており, その形状まで正確にモデル化することはできなかった．しかし, これは DSBRDF モデルで等方性を仮定しているため, これを厳密にモデル化する場合新たなモデルを考える必要がある．

RGB がより複雑にバランスを取り合って作られる白い材質も同様にモデル化を行った．その結果を図 11 に示す．いずれの結果も元と遜色ないモデルが生成できているように見える．しかし, 前章の数値比較で出た誤差はスペキュラー成分の強い acrylic が非常に高い値を示している．こ



(A) $\theta_h = 2$ 度からモデル化



(B) $\theta_h = 3$ 度からモデル化

図 4 $\theta_h = 0$ 付近のサンプリング点



(A) $\theta_h = 1$ 度からモデル化 (B) $\theta_h = 2$ 度からモデル化 (C) $\theta_h = 3$ 度からモデル化 (D) $\theta_h = 4$ 度からモデル化 (E) $\theta_h = 5$ 度からモデル化

図 5 $\theta_h = 0$ 付近のサンプリング点



(A) MERL の計測データからのレンダリング



(B) 提案手法によるモデル

図 12 光源を段階的に変化させたレンダリング画像

ここで、照明方向を段階的に変化させた画像を図 11 に示す。この図より、先ほどまでは目立たなかったが若干変色したような部分が存在していることが確認できる。

以上の結果より、圧縮率を上げながらもマットな材質のモデル化精度を保ち、かつスペキュラー成分の強い材質にも多少対応できることが確認された。しかしながら、数値比較の結果と同様に鏡面反射成分が強くなっていくごとに精度が落ちる問題はこれまでと同様に変わっておらず、今後対応が必要である。

6. まとめ

本研究では、関数フィッティングにより BRDF の表現を行うことを前提にすることで、そもそもの BRDF の計測データの削減が可能ではないかという仮定に基づき、計測 BRDF のサンプリング点数を減らしながらも表現精度を保つことのできる手法を提案した。BRDF の材質による

分散の大きい部分を密にとることで材質を表現する上で重要な点と不要な点を切り分け、計測点を減らしつつ精度を保つモデル化することに成功した。しかし、これまでの疎なサンプリングによる DSRDF モデルでは難があったスペキュラー成分の強い金属などのモデルに対しては以前と同様に誤差が大きくなってしまふことは改善できなかった。

今後は前述のような鏡面反射や、複雑な反射特性にも頑健な手法の確立と実実験による計測での検証、また、DSRDF モデルを用いた反射係数推定のアプリケーションにも対応できるかの検証が必要である。更に、Nishino らの DSRDF モデルでは前述したようなサブサーフェイススキャタリングのモデル化が不可能であったため、それらにも対応できるモデルの検討も課題となる。

7. 謝辞

本研究は、文部科学省科研費新学術領域研究“質感脳情報学”(No. 25135725)の助成を受けたものです。

参考文献

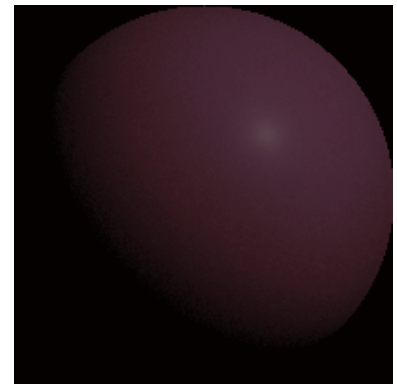
- [1] F.E.Nicodemus, J.C.Richmond, J.J.Hisa, I.W.Ginsberg, T.Limperies: "Geometrical considerations and nomenclature for reflectance", Vol. 160. Washington, D. C: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1977.
- [2] J. Lambert: "Photometria sive de mensura de gratibus luminis colorum et umbrae", Eberhard Klett, Augsburg, Germany, 1760.
- [3] G.J.Ward: "Measuring and modeling anisotropic reflection", ACM SIGGRAPH Computer Graphics 26.2, 265-272, 1992.



(A)red-plastic

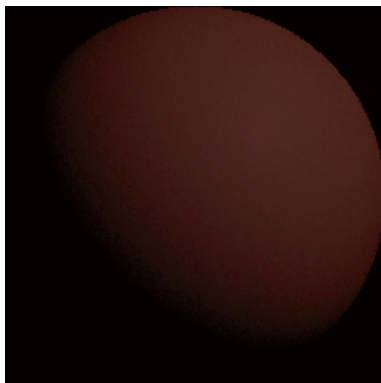


(B)blue-metallic-paint



(C)violet-rubber

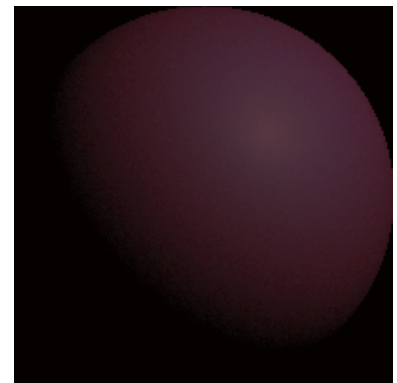
図 8 MERL レンダリング画像



(A)red-plastic



(B)blue-metallic-paint



(C)violet-rubber

図 9 線形に減らしてモデル化した DSRDF のレンダリング画像

- [4] B.T.Phong: "Illumination for computer generated pictures", Communications of the ACM 18.6, 311-317, 1975.
- [5] K.E.Torrance, E.M.Sparrow: "Theory for off-specular reflection from roughened surfaces", JOSA 57.9, 1105-1112, 1967.
- [6] J.F.Blinn: "Models of light reflection for computer synthesized pictures", ACM SIGGRAPH Computer Graphics. Vol. 11. No. 2. ACM, 1977.
- [7] K.Nishino: "Directional statistics BRDF model", Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on. IEEE, 2009.
- [8] K.Nishino, S.Lombardi: "Directional statistics-based reflectance model for isotropic bidirectional reflectance distribution functions", JOSA A 28.1, 8-18, 2011.
- [9] S.Lombardi, K.Nishino: "Reflectance and natural illumination from a single image", Computer Vision-ECCV 2012. Springer Berlin Heidelberg, 582-595, 2012.
- [10] 枝廣修平, 長原一, and 谷口倫一郎: "DSBRDF を用いた BRDF の冗長性の検討", 情報処理学会研究報告. CVIM, 2014.
- [11] A.Ngan, F.Durand, W.Matusik: "Experimental analysis of BRDF models", Proceedings of the Sixteenth Eurographics conference on Rendering Techniques. Eurographics Association, 2005.
- [12] S.Kuthirummal, S.Nayar: "Multiview radial catadioptric imaging for scene capture", ACM Transactions on Graphics (TOG). Vol. 25. No. 3. ACM, 2006.
- [13] J.Y.Han, K.Perlin: "Measuring bidirectional texture reflectance with a kaleidoscope", ACM Transactions on Graphics (TOG). Vol. 22. No. 3. ACM, 2003.
- [14] W.Matusik: "A data-driven reflectance model", Diss.

Massachusetts Institute of Technology, 2003.



(A)red-plastic

(B)blue-metallic-paint

(C)violet-rubber

図 10 提案手法によりモデル化した DSBDRDF レンダリング画像



(A)MERL の実測データ

(B) 線形に減らしたモデル

(C) 提案手法によるモデル

図 11 white-acrylic のレンダリング画像