

# DSBRDF を用いた BRDF の冗長性の検討

枝廣 修平<sup>1,a)</sup> 長原 一<sup>2</sup> 谷口 倫一郎<sup>2</sup>

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 計測では，対象物体に対して，照明やカメラの方向を変化させながら物体上の反射光を密に観測しなければならない．そのため，その膨大な計測データの扱いや長い計測時間が問題となってきた．本研究では，計測された BRDF を複数の分布関数の足し合わせで表現する DSBRDF モデルを用いることで，データ量を削減し，BRDF の扱いを容易にすることを考える．また，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れば，そもそもの BRDF 計測データを従来のように密に計測する必要があるのかという疑問が生まれる．

そこで本研究では，入力データの密度とそれによりもった DSBRDF モデルの近似制度を比較することで BRDF の冗長性を検証し BRDF 測定における無駄を調査する．この比較により，材質によっては BRDF のサンプリング密度を 30% 程度まで減らしても，DSBRDF による BRDF の再現性能が大きく変わらないことが示された．

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 を表現する方法が用いられる．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．

そこで本研究では，DSBRDF による BRDF のモデル化

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 九州大学 大学院 システム情報科学研究院 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

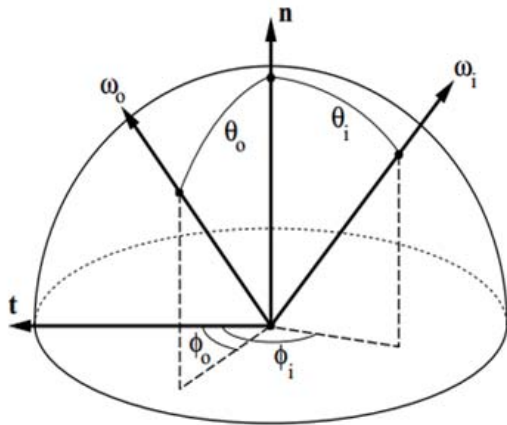


図 1 照明, 観測方向を表す角度パラメータ

を前提として, フィッティングに用いる入力 BRDF の冗長性や, どのサンプリングが重要であるかを検討することを目的とする. 具体的には, フィッティングの入力となる計測 BRDF データを段階的に疎に落としたときの DSRDF の再現性を比較する. 平均二乗誤差を用いた数値的比較と, レンダリングを行った視覚的比較を行い, その再現性を評価した.

## 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 4 次元の関数となる. (図 1)

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 10 度ごとにサンプリングしたと仮定すると  $36^4$  で約 170 万回の計測が必要となり, これはデータにするとそのまま 170 万個のベクトルということになる. 1 つの計測に 1 秒と仮定しても約 10 日という莫大な時間がかかってしまうという問題がある.

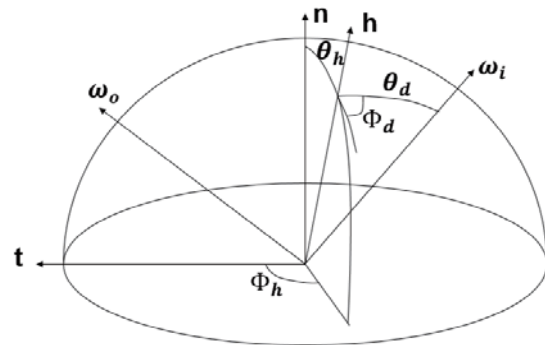


図 2 反射モデルに用いられるベクトル

#### 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  $\omega_i$  と観測方向  $\omega_o$  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. 以下の 2 つの式 (2,3) で表される性質を用くと,

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

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

BRDF は 3 次元でこのように表すことができる. ( $f_r(\theta_i, \theta_o, |\phi_i - \phi_o|)$  次に, これを入射方向と反射方向の中間方向角  $\omega_h$  と相違角  $\omega_d$  で表す. (式 4)

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

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

なることが問題である。

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 [10]。

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 [11] [12]。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、ゼルニク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. DSBRDF

[7] 方向統計双方向反射分布関数 Directional Statis-

tics 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、 $\kappa$  とは分布の高さに関するパラメータ、 $\gamma$  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、 $\Gamma$  とはガンマ関数である。 $\gamma$  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 $\theta_d$ 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、 $\theta_d$ を固定し、横軸を $\theta_h$ 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、 $\theta_d$ 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、モデルを構成するそれぞれの hemi-EPD のそれぞれの  $\theta_n$  に対して全体のモデルとの割合を求める。(式 8)

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

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  $\kappa, \gamma$  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
     $argmin_{\Theta^{(k)}} \sum_{n=1}^N \|q(k | \theta_h^{(n)}, \Theta_{old}) L_i(\theta_h^{(n)}, \phi_d^{(n)}, \theta_d) - \frac{1}{C(\Theta^{(k)})} p(\theta_h^{(n)} | \theta_d, \Theta^{(k)})\|^2$ 
  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 750 倍に圧縮した 1962 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、計測 BRDF のデータ密度に対する DSBRDF の再現性を評価することを目的とし、BRDF サンプリングの冗長性や重要なサンプル点の特定を目指す。具体的には、様々な密度の入力 BRDF を仮定し、3 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を用いて、DSBRDF を求める。入力とする計測 BRDF には 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 [13] を用いた。この MERL データベースには、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。図 3, 4 に、white-acrylic と light-brown-fabric のフィッティング結果を例として示した。今回の実験では、混合分布数を 3 とした。図 3 左図は、入力 BRDF の分布で、右図が 3 つの Hemi-EPD でフィッティングした結果である。青、グレー、赤の 3 本の曲線がそれぞれの Hemi-EPD 関数を、オレンジの曲線がそれらの混合関数を表している。同様に図 4 左図が light-brown-fabric の入力 BRDF モデルを、右図がそれに対し同様に 3 つの Hemi-EPD でフィッティングしたものを示している。light-brown-fabric に似た性質を持つ材質として pink-fabric がある。このフィッティング結果が図 5 である。オーダーが異なるため、図 4 では確認できなかったサブサーフェイススキヤタリングを除外したフィッティングができていることが確認できる。

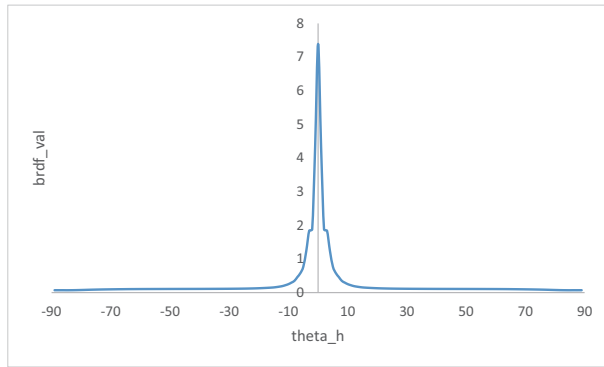
本研究では、この MERL データベースのデータを間引いて入力 BRDF として用いることで、疎なサンプリングの BRDF 入力と見なす。具体的には元データの  $\theta_h$  のサンプリングが 1 度毎の 90 点であるのに対して、それを 2 度毎、3 度毎のように間引いて用いた。

$\theta_d$  に対しては、 $0 \sim 90$  度の範囲で 5 度毎のスライスに切り、それぞれモデルを生成し、係数  $\kappa, \gamma$  を求める。 $\kappa, \gamma$  は  $\theta_d$  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  $3(\text{color}) \times 3(\text{robe 数}) \times 2(\kappa \text{ or } \gamma) \times 19(\text{スライス数})$  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。

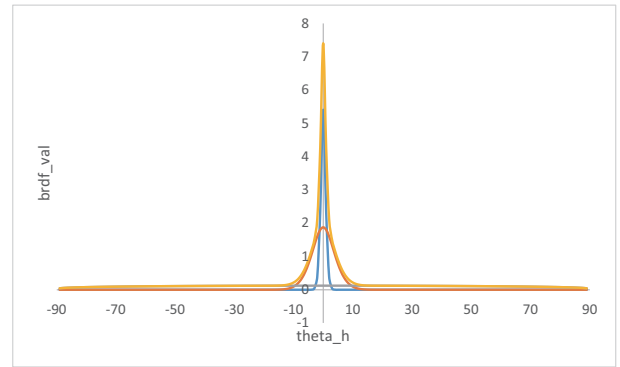
## 5. 実験

### 5.1 数値的評価

MERL データベースの計測 BRDF と DSBRDF モデルから生成された BRDF を数値的に比較することで、DSBRDF の再現性を評価した。具体的には、生の計測 BRDF と DSBRDF モデルにより生成された  $3(\text{color}) \times 90(\theta_h) \times 90(\theta_d) \times 180(\phi_d)$  個の BRDF 輝度の平均二乗誤差を計

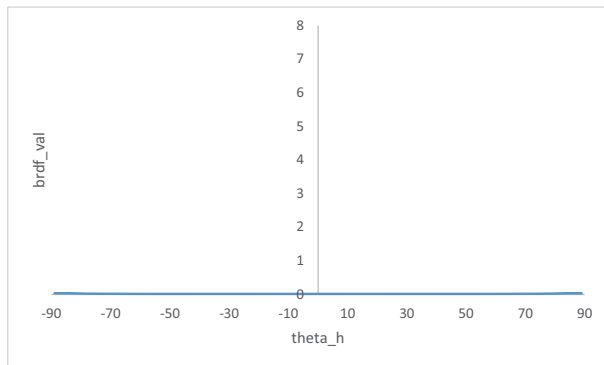


[1]white-acrylic の BRDF データ ( $\theta_d = 0$ )

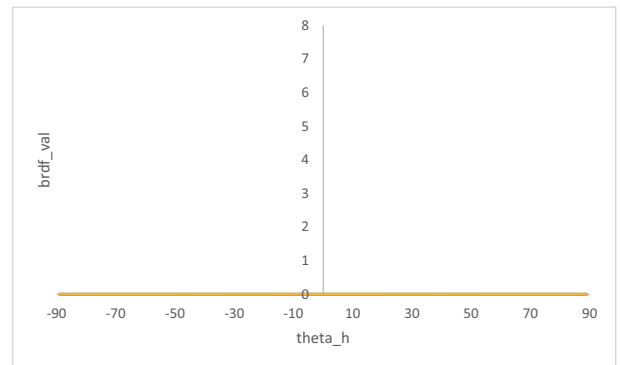


[2] フィッティングしたグラフ ( $\theta_d = 0$ )

図 3 white-acrylic の関数フィッティング



[1]light-brown-fabric の BRDF データ ( $\theta_d = 0$ )



[2] フィッティングしたグラフ ( $\theta_d = 0$ )

図 4 light-brown-fabric の関数フィッティング

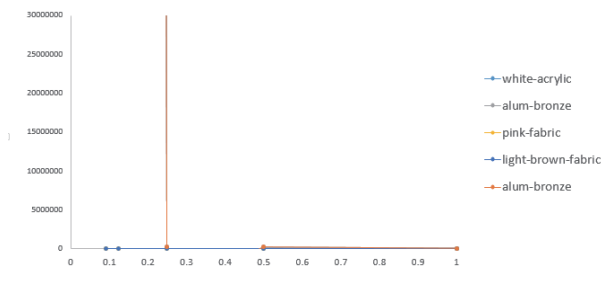


図 6 密度-誤差グラフ

算することにより、再現誤差とした。図 6 に 5 物体における誤差を示した。図 6 において横軸は、生の計測 BRDF のサンプル数を 1 とした時に対する、DSBRDF モデルフィッティングに用いる入力 BRDF 密度の比を表している。この図 6 より、すべての物体において、入力 BRDF のサンプル数が減少しているのに対してエラーが上昇しているのが分かる。しかしながら、その上昇は 30% あたりまでは、緩やかで元のサンプル数を用いる際と比べて大きな遜色はないことが表されている。更にマットでない white-acrylic と alum-bronze に関しては、急激に誤差が大きくなるという結果が得られた。

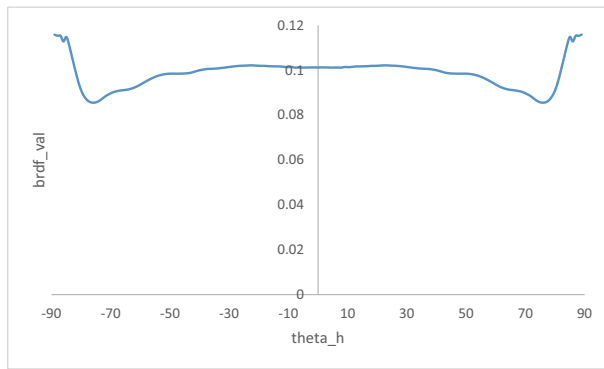
## 5.2 視覚的比較

CG レンダリングなどの応用を想定して、DSBRDF の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 7 に示す。一方で、提案手法により入力データを間引いて DSBRDF でモデル化し、そのモデルによりレンダリングした結果を図 9-11 に示した。

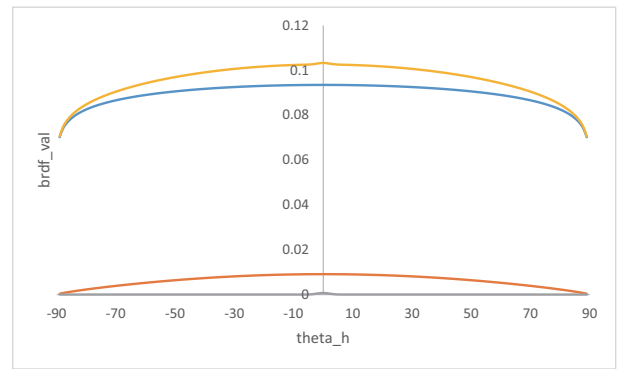
画像を比較した際に、white-acrylic は多少明るさが変化したように見えるが、それ以外のマットな材質に関してはほとんど劣化は見られなかった。単純な点光源だけでなく、PBRT の環境光として入っている main 環境でのレンダリングも行った。結果画像が図 12 となる。この結果からも精度が保たれていることが確認できる。

## 6. まとめ

本研究では、計測 BRDF を複数の分布関数の足し合わせで表現する DSBRDF モデルを用いることで、データ量を削減し、BRDF の扱いを容易にすることを提案した。また、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

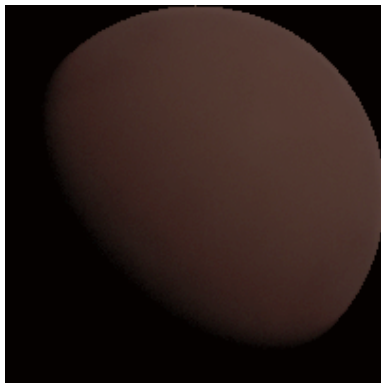


[1] pink-fabric の BRDF データ ( $\theta_d = 0$ )



[2] フィッティングしたグラフ ( $\theta_d = 0$ )

図 5 pink-fabric の関数フィッティング



[1] light-brown-fabric-fabric-MERL



[2] white-acrylic-MERL



[3] pink-fabric-MERL

図 7 MERL レンダリング画像

サンプリング点数と DSBPDF の再現性の関係性を評価した。この比較により、BRDF のサンプリング密度を 30% 程度まで減らしても、DSBPDF による BRDF の再現性能が大きく変わらないことが示された。

今後は、まだ未検証な材質に対しても確認することや、鏡面反射部分の更に正確なモデル化手法の提案、新たなパラメータを与えるなどの非線形なデータの減らし方の検討、またその際の誤差や視覚的な影響の検証をすること。更に、より精度の高い、重要と思われる観測点を調査しモデル化、または定義することで、実際の BRDF の計測時間を短縮しつつ精度を保つ具体的な手法の提案をすることが課題である。

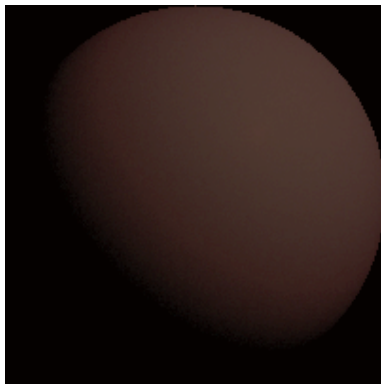
## 7. 謝辞

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] United States. National Bureau of Standards and Nicodemus, Fred Edwin: Geometrical considerations and nomenclature for reflectance (1977).
- [2] J. Lambert: Photometria sive de mensura de gratibus luminis colorum et umbrae (1760).
- [3] Ward, Gregory J: Measuring and modeling anisotropic reflection (1992).

- [4] Phong, Bui Tuong: Illumination for computer generated pictures (1975).
- [5] Torrance, Kenneth E and Sparrow, Ephraim M: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces (1967).
- [6] Blinn, James F: Models of light reflection for computer synthesized pictures (1977).
- [7] Nishino, Ko: Directional statistics BRDF model(2009).
- [8] Nishino, Ko and Lombardi, Stephen: Directional statistics-based reflectance model for isotropic bidirectional reflectance distribution functions (2011).
- [9] Lombardi, Stephen and Nishino, Ko: Reflectance and natural illumination from a single image(2012).
- [10] Ngan, Addy and Durand, Frédo and Matusik, Wojciech: Experimental analysis of BRDF models(2005).
- [11] Kuthirummal, Sujit and Nayar, Shree K: Multiview radial catadioptric imaging for scene capture(2006).
- [12] Han, Jefferson Y and Perlin, Ken: Measuring bidirectional texture reflectance with a kaleidoscope(2003).
- [13] Matusik, Wojciech: A data-driven reflectance model(2003).



[1]light-brown-fabric-DSBRDF

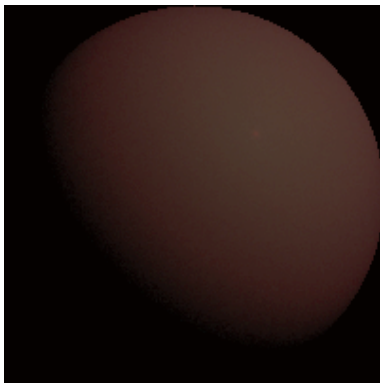


[2]white-acrylic-DSBRDF

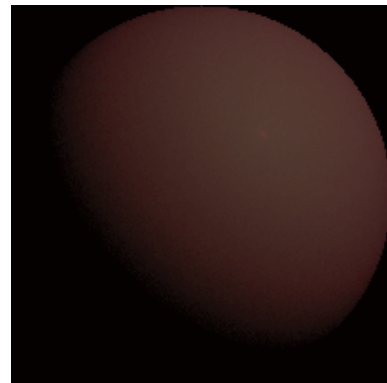


[1]pink-fabric-DSBRDF

図 8 DSBRDF レンダリング画像



[1]light-brown-fabric-DSBRDF(データ点 1/8)



[2]light-brown-fabric-DSBRDF(データ点 1/11)

図 9 元データを祖に落とした DSBRDF(light-brown-fabric)



[1]white-acrylic-DSBRDF(データ点 1/8)



[2]white-acrylic-DSBRDF(データ点 1/11)

図 10 元データを祖に落とした DSBRDF(white-acrylic)



[1]white-acrylic-DSBRDF(データ点 1/8)



[2]pink-fabric-DSBRDF(データ点 1/11)

図 11 元データを祖に落とした DSBRDF(pink-fabric)



[1]white-acrylic-MERL



[2]white-acrylic-DSRDF(1/4)

図 12 複雑な環境光でのレンダリング (white-acrylic)