

BRDFによる物体表面の微細構造の推定とBRDFの再現

早川水城 剣持雪子 小谷一孔

北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

E-mail: {mizuki,kenmochi,ikko}@jaist.ac.jp

概要 フォトリアルなCGを生成するには、物体表面の反射特性(以下、BRDF)を忠実に再現する必要がある。BRDFを再現するためには微細構造を用いる方法が有効であり、微細構造の変化によってBRDFに変化を与えることもできる。この方法には微細構造のモデリングが必要であり、本研究ではBRDFを用いた高精度の微細構造のモデリングを試みる。

Estimation of a micro-scale structure by BRDF and expression BRDF

Mizuki HAYAKAWA Yukiko KENMOCHI Kazunori KOTANI

Graduate School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

E-mail: {mizuki,kenmochi,ikko}@jaist.ac.jp

Abstract This paper describes estimation of a micro-scale structure by a Bidirectional Reflectance Distribution Function. Computer generated image needs BRDFs which is expressed accurate. A method of using micro-scale structures for expressed BRDFs is effective, and varies BRDFs by a transformed micro-scale structure. This method needs a modeling of micro-scale structure. We propose estimated accuracy micro-scale structure by BRDF.

1 はじめに

フォトリアルなコンピュータグラフィックスを生成するには、個々の物体によって異なる物体表面の反射特性(以下、BRDF)を忠実に再現する必要がある。BRDFは物体表面の微細構造により決まり、物体表面の微細構造からBRDFをモデル化する方法[3]等が提案されている。この方法は、微細構造を変化させることにより、BRDFに物体の個体差や成長変化などを与えることができる。

微細構造のモデリングは、(1)観察によるモデリングと、(2)測定によるモデリングがある。観察によるモデリングは、一回のモデリングで正確なBRDFが表現できる保証はなく、場合によっては繰り返しによって精度を高める必要がある。測定によるモデリングでは、モデリングに適した条件を選ぶことができれば、一回の測定により測定誤差の範囲内で正確なBRDFの再現が期待できる。

本研究では、測定したBRDF[4]から微細構造を推定する方法を検討する。

2 BRDFの定義と算出

2.1 BRDFの定義

入射方向 ω_i の輝度を $L_i(\omega_i)$ 、反射方向 ω_r の輝度を $L_r(\omega_r)$ 、入射方向と法線ベクトル N のなす角を θ_i とした時(図1)、BRDFは式(1)で定義される[1, 2].

$$f_r(\omega_i, \omega_r) \equiv \frac{L_r(\omega_r)}{L_i(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (1)$$

2.2 微細構造からBRDFの算出法

この章で用いる記号を表1に示す。

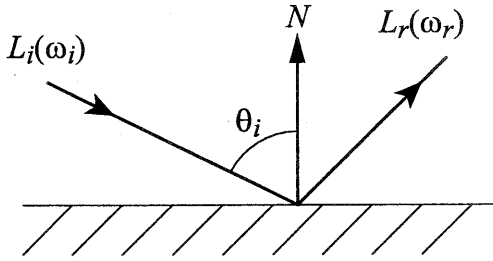


図 1: 物体表面での反射

表 1: 本研究で用いる記号

$n(p)$	点 p における法線ベクトルの方向
A	微細構造の総面積
$\delta()$	ディラックのデルタ関数
$h(\omega_i, \omega_r)$	方向 ω_i と方向 ω_r に対する二等分線の方向
$m(\omega, p)$	方向 ω_i から入射したとき, 点 p が遮蔽されていないならば 1, 遮蔽されていれば 0 を返す関数.
$\overline{m(\omega, p)}$	$1 - m(\omega, p)$

物体表面が正反射のみ起こすなら, BRDF は式 (2) 及び式 (3) で表せる.

$$\begin{aligned}
 f_r(\omega_i, \omega_r) &= \int_A \delta(n(p)m(\omega_i, p)m(\omega_r, p) - h(\omega_i, \omega_r)) dp \\
 &= \int_A \delta(n(p) - h(\omega_i, \omega_r)) dp \\
 &\quad - \int_A \delta(n(p)\overline{m(\omega_i, p)} - h(\omega_i, \omega_r)) dp \\
 &\quad - \int_A \delta(n(p)\overline{m(\omega_r, p)} - h(\omega_i, \omega_r)) dp \\
 &\quad + \int_A \delta(n(p)\overline{m(\omega_i, p)}\overline{m(\omega_r, p)} - h(\omega_i, \omega_r)) dp
 \end{aligned} \quad (2)$$

各法線ベクトル分布を次のように定義する.

$$\begin{aligned}
 d(h(\omega_i, \omega_r)) &\triangleq \int_A \delta(n(p) - h(\omega_i, \omega_r)) dp \quad (4) \\
 d_m(\omega_i, \omega_r) &\triangleq \int_A \delta(n(p)\overline{m(\omega_i, p)} - h(\omega_i, \omega_r)) dp
 \end{aligned}$$

表 2: 角度・方向の定義

方向 $\omega[st]$	二つの平面角 θ, ϕ で表される立体角
平面角 $\theta[rad]$	xy 平面上に射影した線とのなす角. 定義域は $0 \sim \pi$
平面角 $\phi[rad]$	xy 平面上に射影したとき, 正方向の x 軸とのなす角. 定義域は $0 \sim \pi$

$$-h(\omega_i, \omega_r)) dp \quad (5)$$

$$d_m(\omega_r, \omega_i) \triangleq \int_A \delta(n(p)\overline{m(\omega_r, p)} - h(\omega_r, \omega_i)) dp \quad (6)$$

$$d_c(\omega_i, \omega_r) \triangleq \int_A \delta(n(p)\overline{m(\omega_i, p)}\overline{m(\omega_r, p)} - h(\omega_i, \omega_r)) dp \quad (7)$$

これらを, 式 (3) に代入すると BRDF は次式によって表すことができる.

$$f_r(\omega_i, \omega_r) = d(h(\omega_i, \omega_r)) - d_m(\omega_i, \omega_r) - d_m(\omega_r, \omega_i) + d_c(\omega_i, \omega_r) \quad (8)$$

3 測定した BRDF から微細構造の推定法

角度・方向の定義を表 2, 図 2 に示す. 立体角を表す二つの平面角の定義域は, θ が $0 \sim 2\pi$, ϕ が $-\pi/2 \sim \pi/2$ となっているが, 本研究では半球面しか扱わないことと, BRDF の扱いやすさから, 表 2 に示す定義域を用いる. また, 平面角 θ_i, ϕ_i は入射方向 ω_i を表し, 平面角 θ_r, ϕ_r は反射方向 ω_r を表す.

3.1 推定する微細構造の定義

推定する微細構造を次のように定義する (図 3).

1. 微細構造をある平面で切ったときの断面を微細構造の断面と呼び, 微細構造は微細構造の断面の集合で構成する

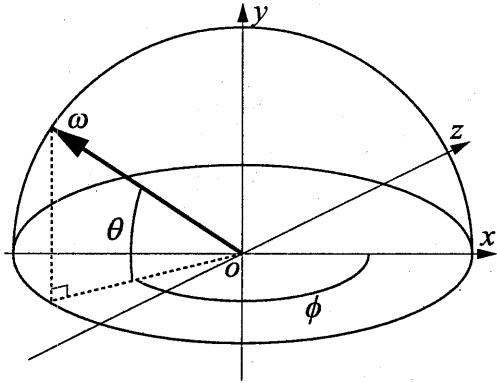


図 2: xyz 座標と用いる角度・方向の定義

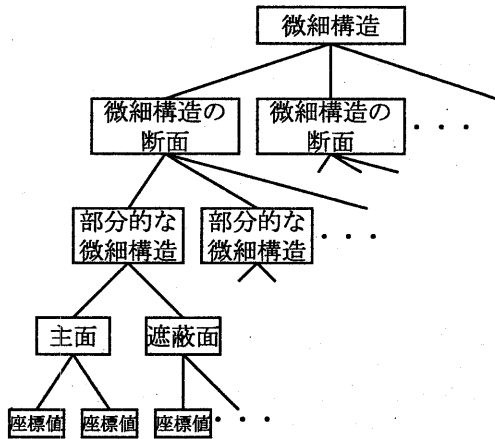


図 3: 微細構造の定義

2. 微細構造の断面は、部分的な微細構造と呼ぶ構造の集合で構成する
3. 部分的な微細構造は、二つの座標値から構成される主面と呼ぶ面と、その主面に影を落とす頂点の集合から構成する。そして、影を作る頂点の集合を遮蔽面と呼ぶ

3.2 推定の概要

式 (8) 内の $d(h(\omega_i, \omega_r))$ から、方向 $h(\omega_i, \omega_r)$ の法線ベクトルを持つ面の存在する比率が分かる。しかし、どのように面同士が繋がっているかまでは分からず、正確な遮蔽を起こす微細構造を推定することはできない。

そこで、面同士の繋がりの情報を用いて正確な遮蔽を起こす微細構造を推定することを考える。この情報を用いることで、BRDF から微細構造が一意に決定できる保証はないが、推定した複数の微細構造から得られる BRDF は測定値と一致することは保証される。今回は面同士の繋がりの情報として、遮蔽の影響がある法線ベクトル分布 $d_m(\omega_i, \omega_r)$ を用いる。この法線ベクトル分布を用いることで、遮蔽される面に対し、遮蔽する面を決定することができる。

また、推定する微細構造は、面積の比率が求められれば良いため、実際の大きさの情報(尺度)を必要としない。

次に推定の手順を示す。

1. BRDF から、遮蔽の影響がある法線ベクトル分布 $d_m(\omega_i, \omega_r)$ を計算する
2. $d_m(\omega_i, \omega_r)$ を用いて、主面に対する遮蔽面を推定し、部分的な微細構造を推定する
3. 同一平面上にある部分的な微細構造を組み合わせて、微細構造の断面を推定する
4. 微細構造の断面を組み合わせて、微細構造を推定する

3.3 $d_m(\omega_i, \omega_r)$ の算出

測定値は BRDF $f_r(\omega_i, \omega_r)$ であり、この関数から $d_m(\omega_i, \omega_r)$ のみを取り出す必要がある。

まず、式 (8) を変形し

$$d_m(\omega_i, \omega_r) + d_m(\omega_r, \omega_i) - d_c(\omega_i, \omega_r) = d_m(\omega_i, \omega_r) - f_r(\omega_i, \omega_r) \quad (9)$$

式 (9) は遮蔽による減衰量を表しているから

$$d_m(\omega_i, \omega_r) + d_m(\omega_r, \omega_i) - d_c(\omega_i, \omega_r) \geq 0 \quad (10)$$

となる。したがって、

$$d(h(\omega_i, \omega_r)) = \max\{f_r(\omega_i, \omega_r)\}_{h(\omega_i, \omega_r)=const} \quad (11)$$

として、式 (9) に代入すると、減衰量を求めることが出来る。次に、減衰量から $d_m(\omega_i, \omega_r)$ の

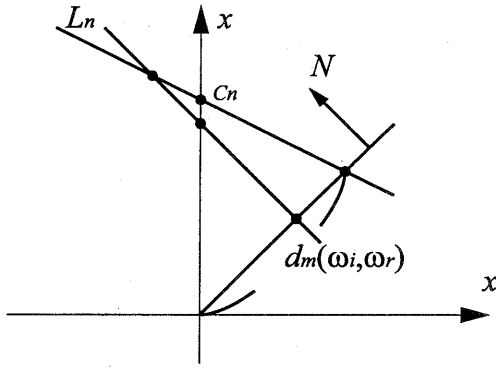


図 4: 直線 L_n と主面の関係

分離を考える。これは、三つの関数の和であるため、代数的に $d_m(\omega_i, \omega_r)$ を求めることは不可能である。そこで、 $d_m(\omega_r, \omega_i) = 0$ となる場合、 $d_c(\omega_i, \omega_r) = 0$ となるため、下式のように $d_m(\omega_i, \omega_r)$ を求める。

$$d_m(\omega_i, \omega_r) = (\max\{f_r(\omega_i, \omega_r)\} |_{h(\omega_i, \omega_r)=const} - f_r(\omega_i, \omega_r)) |_{d_m(\omega_r, \omega_i)=0} \quad (12)$$

3.4 部分的な微細構造の推定

$h(\omega_i, \omega_r)$ を一定にして、一つの部分的な微細構造を求め、 $h(\omega_i, \omega_r)$ が取り得る値すべてに対して以下の推定法を適用する。

3.4.1 主面に入射する線の方程式 L_n の算出

主面に入射する線の方程式 L_n は以下のように求めることが出来る (図 4)。

$$C_n = \cos(\pi/2 - h(\omega_{in}, \omega_{rm})) d_m(\omega_{in}, \omega_{rm}) - \tan(\omega_{im}) \sin(\pi/2 - h(\omega_{in}, \omega_{rm})) \times d_m(\omega_{in}, \omega_{rm}) \quad (13)$$

$$L_n = \tan(\omega_{in})x + C_n \quad (14)$$

なお、 ω_{in} を n 番目の ω_i 、 ω_{rm} を m 番目の ω_r とする。

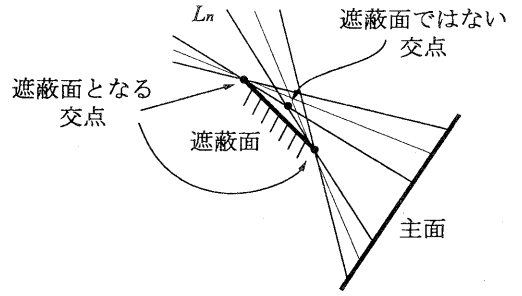


図 5: 交点から遮蔽面の生成

3.4.2 方程式 L_n 同士の交点算出

$h(\omega_{in}, \omega_{rm}) = N$ となる ω_{in} と ω_{rm} の組合せがある場合に方程式 L_n が存在する。その方程式が複数存在するなら、 L_n と L_{n+1} の交点 $P(X, Y)$ を式 (15,16) によって求める。

$$X = \frac{C_{n+1} - C_n}{\tan(\omega_{in}) - \tan(\omega_{in+1})} \quad (15)$$

$$Y = \tan(\omega_{in})X + C_n \quad (16)$$

3.4.3 交点から遮蔽面の算出

交点 $P(X, Y)$ が遮蔽を起こす遮蔽面となるが、計算誤差や遮蔽面ではない交点が含まれている (図 5)。遮蔽面となる交点は、複数の点が集まり、遮蔽面ではない交点は孤立している。このことから、遮蔽面となる点の数は二個以上の集合とする制限をつけて収束している点を選び、その点を遮蔽面とする。

3.5 微細構造の断面の推定

部分的な微細構造の主面を接続して、微細構造の断面を推定するが、この時用いる遮蔽面は $\theta_i = \theta_r$ となる BRDF から推定したものを使う。 $\theta_i = \theta_r$ とすることで、微細構造の断面が同一平面上にあることになる。そして、 θ_i の変化分だけ、微細構造の断面が推定できる。もし、 θ_i が変化しても BRDF が変化しない場合、すべての微細構造の断面は一致するため、一つの微細構造の断面を推定するだけで、微細構造を推定したことになる。

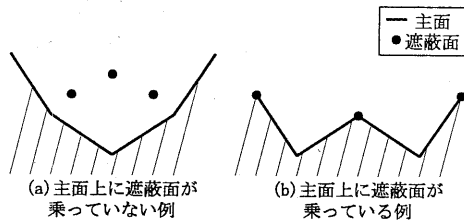


図 6: 主面と遮蔽面の関係

主面の接続の組み合わせはいくつか考えられるが、主面を組み合わせたとき、遮蔽面が主面と重ならない場合(図 6(a)), この微細構造から得られる BRDF は、推定に用いた BRDF とは異なる。部分的な微細構造の主面を接続する組み合わせのうちで、すべての遮蔽面が主面と重なる組み合わせ(図 6(b))を探索し、この微細構造の断面を推定結果とする。

3.6 微細構造の断面から微細構造の推定

上記の微細構造の断面を接続し、微細構造を推定するが、 $\theta_i = \theta_n$ となる BRDF から推定した微細構造の断面が存在する平面の角度は θ_n であり、 $\theta_i = \theta_m$ となる BRDF から推定した微細構造の断面が存在する平面の角度は θ_m となる。両者の関係は θ_n と θ_m の BRDF から推定した遮蔽面で表せられる(図 7(a))。そして、微細構造の断面と遮蔽面が一致するように微細構造の断面を組み合わせ(図 7(b))、微細構造を推定する。

4 推定実験

まず、微細構造の断面をランダムに生成し BRDF を計算し、この BRDF から微細構造の断面が正しく推定されるか調べる。6000 個の微細構造の断面を推定した結果、80.1% の微細構造の断面は正しく推定することが出来た。この時の正しく推定できなかった微細構造の断面の一例を図 8 に示す。

推定できていないところは、入射光が届かない、または届いても反射光が視点に入らない場所であるとするなら、BRDF の計算には必要の

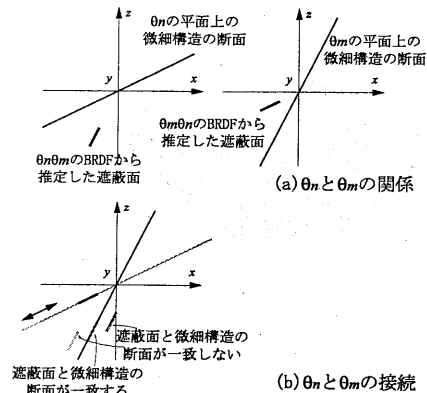


図 7: 微細構造の断面と遮蔽面の接続(俯瞰図)

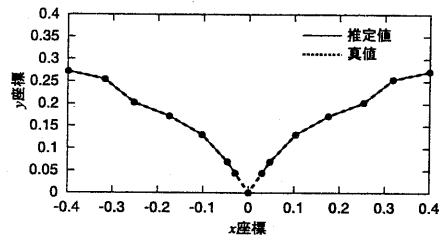


図 8: 正しい推定が行えなかった微細構造

ない微細構造と言える。そして、推定した微細構造が真値と一致しなくても、求めた BRDF は一致する可能性がある。そこで、推定した微細構造から求めた BRDF と推定に用いた BRDF を比較したところ両者は一致した。このことから、この推定法は、BRDF を十分に再現可能な微細構造を推定する手法と言える。

次に、微細構造の断面から微細構造を組み合わせるときに必要な微細構造の断面に対する遮蔽面の推定を行う。用いた微細構造(図 9)は微細構造の断面(図 10)を y 軸中心に θ の定義域内で回転させたものである。

図 9 の断面に対する遮蔽面を求めた結果(図 11)、遮蔽面の座標値は他の微細構造の断面の座標値と一致した。この結果より、微細構造の断面(θ_i)と微細構造の断面(θ_{i+1})の関係が決まり、微細構造の断面(θ_{i+1})によって、遮蔽が起きる場合、推定に用いた BRDF と同様の遮蔽を起こすため、推定した微細構造はから得られる BRDF は、推定に用いた BRDF に一

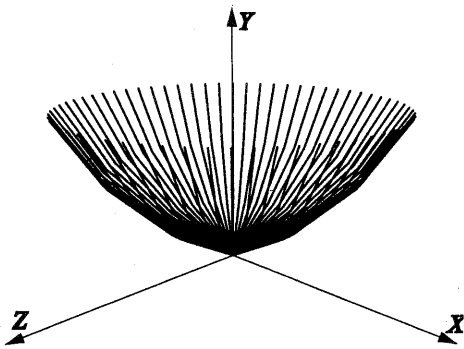


図 9: 用いた微細構造

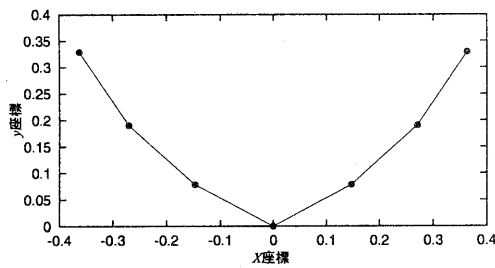


図 10: 微細構造の断面

致すると言える。

5 まとめ

本報告では、フォトリアルなコンピュータグラフィックス生成のためにBRDFから微細構造を推定する手法について検討した。

微細構造の断面を推定した場合、80.1%の微細構造の断面は真値と一致し、残りの微細構造から得られたBRDFは、推定に用いたBRDFと一致した。また、微細構造の断面における遮蔽を求めたところ真値と一致した。この結果、提案手法を用いることでBRDFを再現できる微細構造を推定することが可能な提案手法と言える。

参考文献

[1] Ian Ashdown. *RADIOSITY A Programmer's Perspective*. JOHN WILEY &

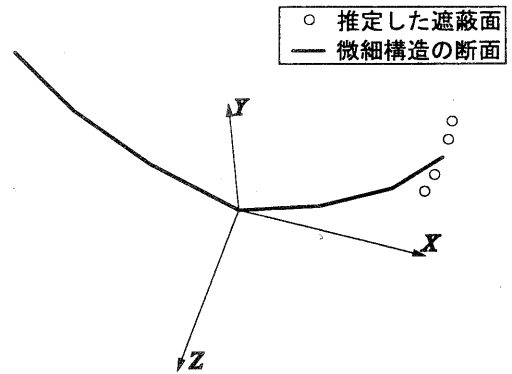


図 11: 推定結果

SONS ,INC, 1994.

- [2] Michael F.Cohen and Jphn R.Wallace. *Radiosity and Realistic Image Synthesis*. Academic Press Professional, 1993.
- [3] Stephen H.Westin, James R.Arvo, and Kenneth E.Torrance. Predicting reflectance functions from complex surfaces. *In Proceedings of SIGGRAPH'92*, pp. 255-264, July 1992.
- [4] Gregory J.Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. *In Proceedings of SIGGRAPH'92*, pp. 265-272, July 1992.