

## 計測データを用いた漆器の質感表現

井上岳<sup>†</sup> 池戸恒雄<sup>†</sup>

本論文では漆器の反射の様子を表現するものである。写実的な結果を得るために実際に漆器を計測し、クックトランスモデルに適応させた。漆器の環境光の影響はマルチテクスチャを用いた環境キューブマッピングで表現した。さらにこの論文では異なる漆の含有量のものも表現できるようなシェーディングモデルを提案する。

### Expression for a Lacquer Ware Using Measured Data

Gaku Inoue<sup>†</sup>, Tsuneo Ikedo<sup>†</sup>

The paper addresses the expression focusing on the shading effects for Lacquer Ware. To obtain a realistic imaging, it uses the measured data and applies these to the similar model of Cook-Torrance. Furthermore, the shading model comprises environment mapping techniques with filtered multi-texture to show the blur effect concerned with grazing angle. This paper also proposes the mathematical reflectance model corresponding to the various blending ratios of lacquer and colorant.

### 1. はじめに

写実的な物体の表現のためには、物体自身のモデリング、物体に対するシェーディング、シャドウイングなどが必要となる。物体の反射特性を表現する主な手法として双方向反射率分布関数(BRDF)などが存在する。BRDF[1]は双方向散乱面反射率分布関数(BSSRDF)[2]を特殊化した関数であり、入射光強度と反射光強度の比率を表すものである。この関数には高速化を図った Blinn-Phong モデル[3]、金属のような質感に適した Cook-Torrance モデル[4]など様々なモデルが挙げられる。本研究では漆器の反射特性に注目し表現した。関連研究としてアルファブレンディングと BRDF を利用して蒔絵を表現した研究[5]や蒔絵の皴や破れを表現した研究[6]がある。本研究では大域照明の代わりとして複数レイヤーの環境マッピングを用い、局所的な反射については従来の BRDF モデルのひとつである Cook-Torrance モデルを改良し、パラメータを調節するだけで異なる漆器の表現を可能とするシェーディングモデルを提案する。その式は漆器を変角色彩計で計測し、特徴を抽出したものである。計測に使う漆器の板は、表面が粗い物、滑らかな物、漆の含有率が異なる物など様々な種類を用意した。

### 2. 提案モデル

厳密に物理的に漆器を表現するならば、複数層で BSSRDF モデルを解くことが理想であるが、今回の計測データから各層についてのデータを分離することは困難である。また、目に見えるほどの薄膜干渉も起きていないことから、あえて複数層のモデルを扱う必要はないと考え本研究では単一層での BRDF モデルを提案する。代表的な BRDF モデルの一つである Torrance-Sparrow モデルや Blinn-Phong モデルで提唱されているマイクロファセット分布関数では粗い面での反射光の表現が十分できないという観点から Cook-Torrance モデルをベースとして漆器の表現をする。反射光は拡散反射成分と鏡面反射成分から成るとし、以下に挙げるモデルを仮定した。

$$\rho(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L}) = \rho_d(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L}) + \rho_s(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L}) \quad (1)$$

$$\rho_d(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L}) = f(\mathbf{N}, \mathbf{V})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})g(r) \quad (2)$$

---

<sup>†</sup> 法政大学  
Hosei University

$$\rho_s(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L}) = \frac{F_\lambda D(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L}) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})} \quad (3)$$

ここで  $\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L}$  はそれぞれ物体の法線ベクトル, 視線ベクトル, 光源ベクトルである。 $\rho$  は物体から反射される総エネルギーを表し, ディフューズ項  $\rho_d$  とスペキュラー項  $\rho_s$  から成る。関数  $f$  は計測データを従来のディフューズ項に落とすための値である。 $r$  は漆器に含まれる漆の比率に関するパラメータであり,  $g$  は異なる漆器間での表現を, 変数  $r$  を用いて表す関数である。フレネル係数  $F$  は計測データからテーブルを作り参照する。 $D, G$  は一般的な Cook-Torrance モデルの式[7]であり以下の様に表される。

$$D = \frac{1}{4\pi m^2 (\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^4} e^{m^2 (\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^2} \quad (4)$$

( $0 \leq m \leq 1$ )

$$G = \text{Min}\left\{1, \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})}{\mathbf{V} \cdot \mathbf{H}}, \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})}{\mathbf{V} \cdot \mathbf{H}}\right\} \quad (5)$$

### 3. パラメータフィッティング

図1に見られる計測機によって得られるデータは鏡面反射成分と拡散反射成分が混合したものである。しかし正確な反射を再現するためには2つの成分を分離することが必要となる。そのため, 基本的に拡散反射光は等方的であるという性質や, 物体への入射角度をずらして測定することによって反射成分を分離した。図2, 3はそれぞれ分離された拡散反射成分と鏡面反射成分である。

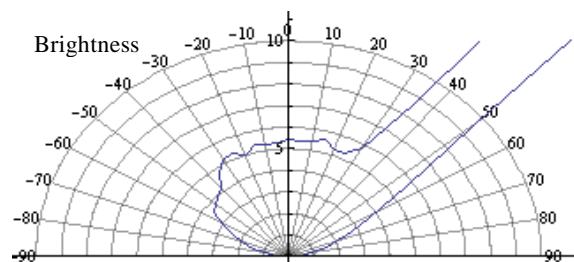


図1 明度分布(極座標表示)

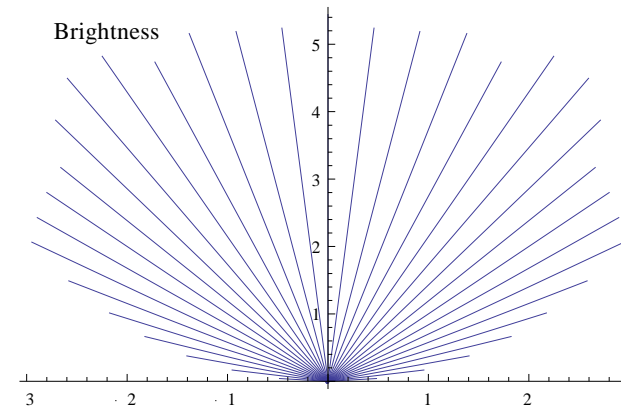


図2 拡散反射成分強度(極座標表示)

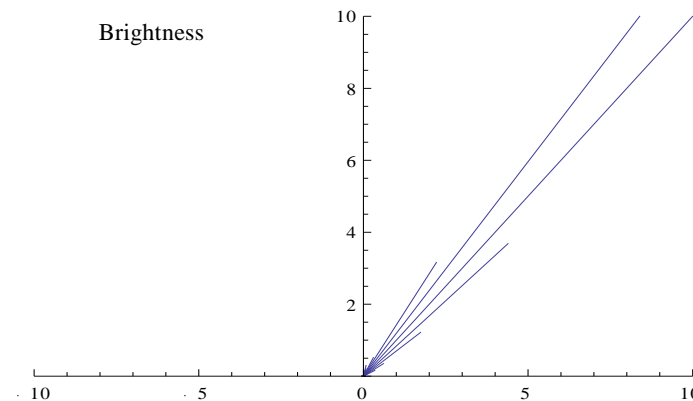


図3 鏡面反射成分強度(極座標表示)

#### 3.1 スペキュラー項へのパラメータフィッティング

Cook-Torrance で用いられている(4)式のベックマン分布関数は表面の微視的構造をV字型であると仮定して立てられたもので, 表面の荒さを定数  $m$  で表現している。 $m$  が大きければ粗い面を表しスペキュラーは拡散しやすく,  $m$  が小さければ鏡のような滑らかな面を表しスペキュラーは鋭く強くなる。この定数を求めるためにいくつかの

異なる  $m$  をベックマン分布に代入し、計測データと最も近似した  $m$  を求めた。その結果表面が滑らかな漆器には  $m=0.05$ 、粗い漆器には  $m=0.2$  が適切であるとわかった。図4に求めた値を式(4)に適応した値と実際に計測されたデータを示す。

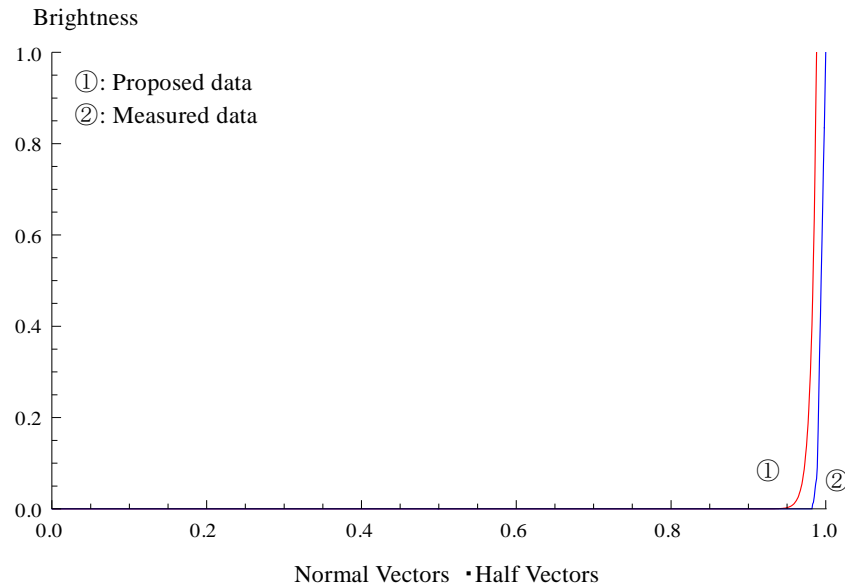


図4  $m=0.05$  における分布

式(5)の幾何減衰係数は表面の微視的構造により反射光の減衰を表す関数である。すなわち、ある注目点において入射光がその構造により遮られ、結果として反射光が減衰するか、その点においての反射光が視点に届く前に、その構造に遮られてしまうがために反射光が減衰するかのいずれかである。

本研究でもその条件のもとそのまま係数  $G$  を使う。フレネル係数  $F$  には計測によって得られる分光反射率からのデータで近似して使う。図5からわかるようにある角度で青の成分が強くなるという特徴がある。

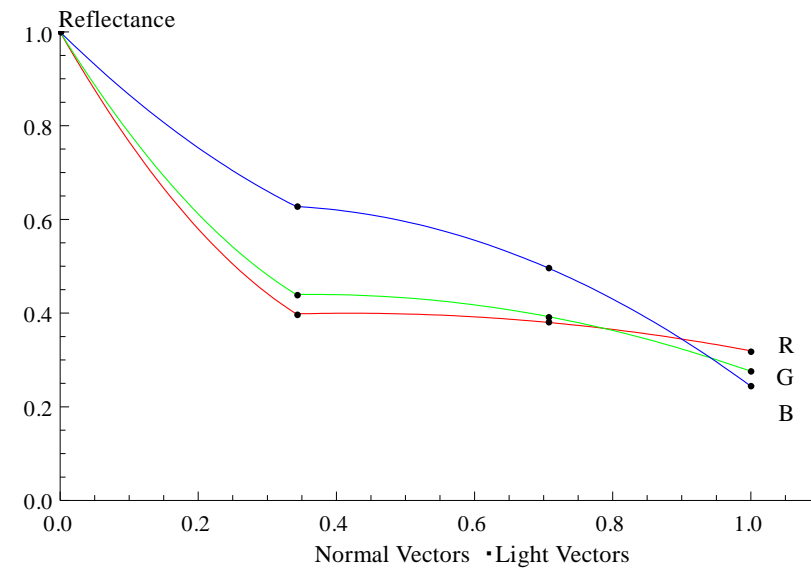


図5 RGBの反射強度

### 3.2 ディフューズ項へのパラメータフィッティング

コンピュータグラフィックスにおいて、拡散反射成分はランバート反射で代用されることが多く、その反射強度は反射方向によらず、物体の法線に対する光の入射角によって決まるとされている。しかし計測されたデータは反射する方向によってデータが一樣ではなく入射角が鋭くなるにつれてその値は減少していく。そのため本来の  $\mathbf{N}, \mathbf{L}$  から成る関数だけでなく反射方向によって値を変える関数  $f$  を求めた。また一般的な BRDF のディフューズ項にかかる係数の定義になる。この関数は内積値  $(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})$  が大きくなるとほぼ線形的に増えていく特徴がある。

下記に滑らかな面の式(6)と粗い面の式(7)を掲げ、図6に求めた式(6)の値と計測データとの比較のグラフを掲げる。

$$f(\mathbf{N}, \mathbf{V}) = -0.03 + 1.05 (\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}) \quad (6)$$

$$f(\mathbf{N}, \mathbf{V}) = 0.01 + 0.96 (\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}) \quad (7)$$

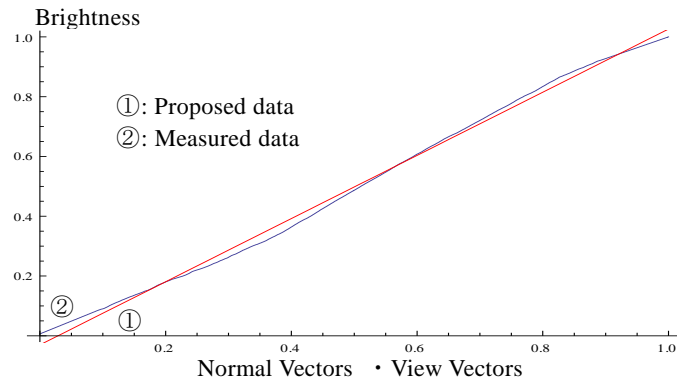


図6 拡散反射成分の反射方向による変化

また、漆の含有率の違いが拡散反射成分には顕著に見られる。しかし複数の含有率の違いを表すには従来の計算では不可能である。そのため新たな式を立てる必要がある。それが関数  $g$  である。異なる漆の量の試料の中、最も含有率の少ない試料を基準値として、それに対する漆の比率を  $r$  とし式(8)を立てた。特徴として漆の含有量が大きくなると明度が下がるという点が挙げられ、図7に見られるように分光反射率からも減衰しているのが読み取れる。 $r$ の値が3倍より大きくなると減衰が緩やかになり、以下ようになった。図8に求めた式(8)の値と計測データとの比較のグラフを掲げる。

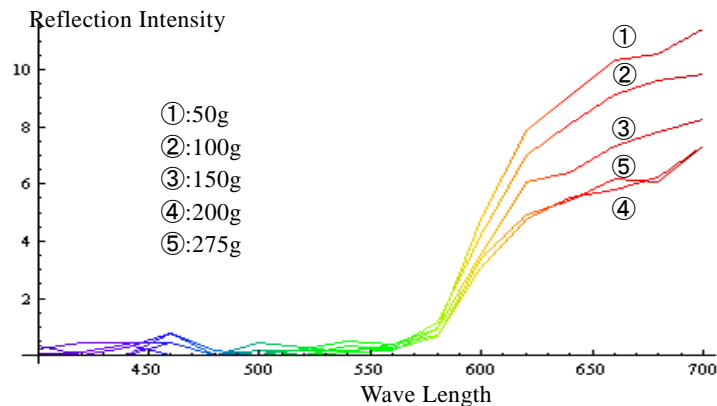


図7 漆の含有量による反射率の違い

$$g(r) = 1.22 - 0.224r + 0.0199r^2 \quad (8)$$

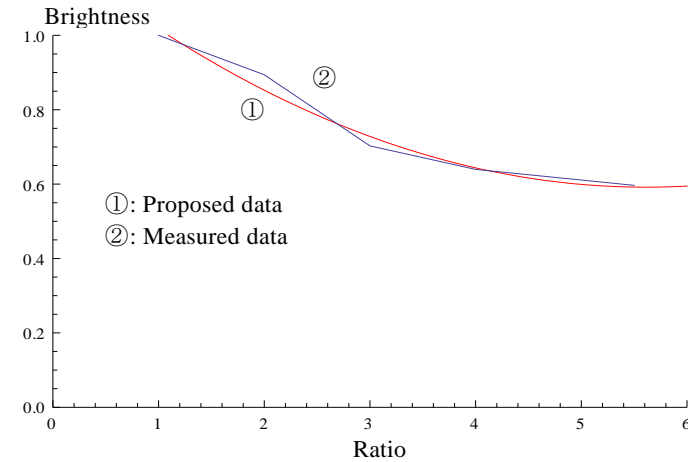


図8 各漆の割合による変化

#### 4. 環境光の考慮

より写実的な映像を作り出すためには物体を大域的にみて環境光を扱う必要がある。本研究では擬似的に環境光を取り扱うために環境マッピングを用いた。滑らかな面と粗い面の漆器の両方において、法線に対しての光の入射角が大きければ鏡面反射強度が増すという特徴が見られた。一方で、粗い面の漆器では視線が法線に対して垂直に近づくほど背景がシャープに映り、逆に法線に対して平行になるほど背景がぼやけ、ほぼ見えなくなるという現象が顕著に見られた。この現象は漆器が複数の層でできているためと考えられる。垂直入射に近い場合に比較的滑らかな層を光が透過し、下層の凹凸が激しい面で反射して拡散するためであると考えられる。

前者の方は一般的なフレネル反射の処理で済む、後者は環境キューブの1面にたいして複数のぼかしたテクスチャを用意することによって表現した。ぼかしはあらかじめ事前に処理しておき、内積値( $\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}$ )によって適切なテクスチャを選び補間して反射色を求める。図9に環境キューブの一面に使うぼかし処理を加えた環境テクスチャの例を掲げる。

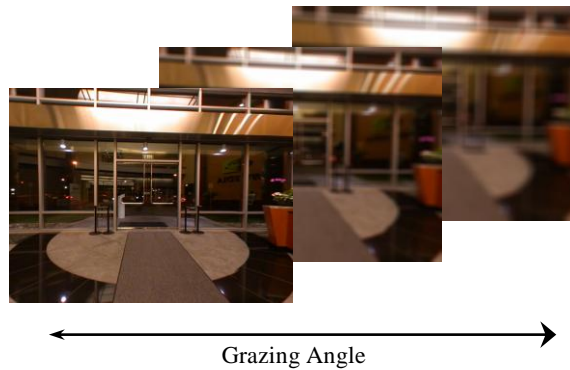


図9 事前にぼかし処理を加えた環境テクスチャ

## 5. 実装結果

図10に実装結果を掲げる。測定された反射のデータからもわかるように、スペキュラーの際に青みが確認できることがわかる。

## 6. むすび

本研究では漆の割合が違う複数の漆器板を計測して Cook-Torrance モデルにパラメータフィッティングすることにより漆器の局所的反射特性を表現した。また、ぼかした複数のテクスチャからなる環境キューブマッピングを用いることにより大域的照明効果も表現した。

今後の課題としてダイナミックレンジの違いをどう吸収するか、ということが挙げられる。滑らかな面を持つ漆器を計測すると鏡面反射光が拡散反射光に対して数百倍の明るさで観測される。そのためコンピュータ上で扱おうと図10の滑らかな面をもつ漆器で見られるように鏡面反射光が白とびしてしまう。実際の人間の目ではこの部分にも強弱が付き違いがわかるように見える。また、光の全波長を考慮した計算、漆器のサンプル数を多くして密なデータを取るなどの点も今後の課題として挙げられる。また、より写実的な表現のためには BSSRDF などを用いて内部散乱も考慮しなくてはならない。そうなった場合は、計測する法も変え、漆の層ごとに計測する必要があると考えられる。

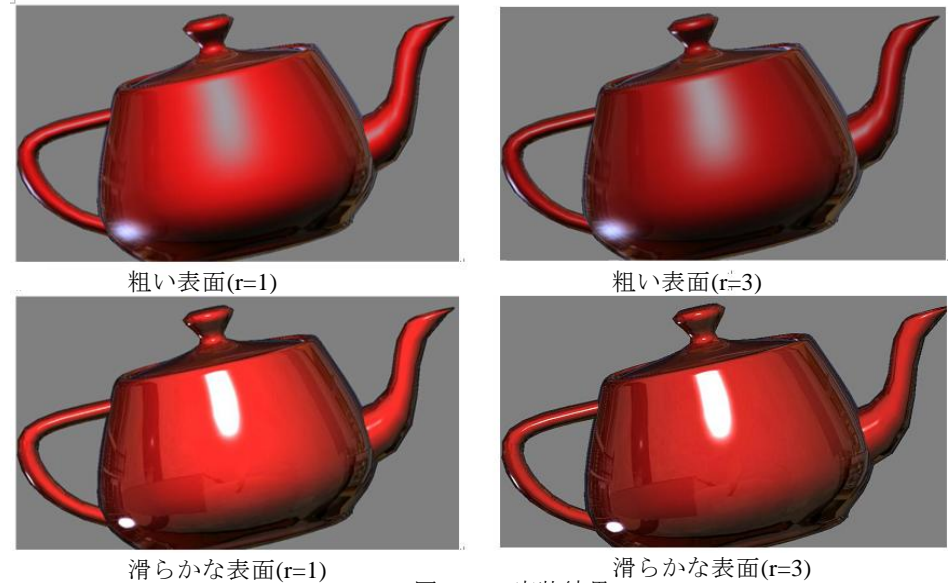


図10 実装結果

## 参考文献

- 1) Andrew S. Glassner. *Principles of Digital Image Synthesis*. Morgan-Kaufman, San Francisco, 1995.
- 2) Henrik Wann Jensen, Stephen R. Marschner, Marc Levoy, Pat Hanrahan, "A Practical Model for Subsurface Light Transport," SIGGRAPH 2002, 511-518.  
1982. <http://support.microsoft.com/default.aspx?scid=kb;ja:881019>
- 3) James F. Blinn, "Models of light reflection for computer synthesized pictures," Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.192-198, July 1977.
- 4) R. L. Cook, K. E. Torrance, "A Reflectance Model for Computer Graphics," ACM Transactions on Graphics, v.1 n.1, pp.7-24, Jan 1982.x
- 5) R. Durikovic, K. Kolchin, S. Ershov, "Rendering of Japanese Artcraft," Proceedings of the EUROGRAPHICS short presentations, pp.131-138, 2002..
- 6) 宮田 一乗, 櫻井 快勢, 友井 俊弘, 田下 博, 今尾 公二, 坂口 嘉之, "漆工芸の質感表現," 画像電子学会研究会講演予稿, vol.237, pp.165-170, March 2008.
- 7) Eric Lengyel, "MATHEMATICS for 3D GAME PROGRAMMING & COMPUTER GRAPHICS", Mark DeLoura,.