

## 3次元物体の全周形状の高精度な計測および双方向反射特性の 効率的獲得手法

猪瀬 健二<sup>†</sup> 福田 悠人<sup>†</sup> 川崎 洋<sup>†</sup> 古川 亮<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 埼玉大学工学部 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

<sup>††</sup> 広島市立大学 情報科学部 〒731-3194 広島県広島市安佐南区大塚東 3-4-1

E-mail: <sup>†</sup>{inose,fukuda,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, <sup>††</sup>ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 本論文では、立体物の形状および表面反射特性を表す双方向反射率分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) を獲得する手法を提案する。本手法によって物体の形状と反射モデルのパラメータのそれぞれが高精度に獲得される。一般に、物体表面の反射特性を獲得する手法として、実シーンを計測し、計測データを用いて反射モデルのパラメータを推定することがよく行われる。物体表面の反射特性が複雑な場合、視線方向、光線方向を変えて密に計測する必要がある。同一点を追跡する際に生じる対応点誤差を避けるため、計測する物体は、均一材質の平面もしくはカメラと対象物体を固定して、光線方向のみを変えて計測することが一般に行われる。本論文では、対象物体として、通常、BRDF 解析の対象とされる平面ではなく、立体物とすることにより広範な対象のパラメータ推定を可能とする手法を提案する。これにより、これまで計測が難しかった 3次元形状物体の 4次元 BRDF を全てサンプリングすることが出来るようになる。しかし、立体物を対象とすることで形状誤差や位置ずれの影響を受けやすくなるという問題が生じる。本論文では、立体形状をもつ対象物体に対して、高精度に全周の 3次元形状を復元し、視点、光線方向を変えながら計測可能なキャリブレーション手法を提案する。また、実験により計測した BRDF から Lambert と Lafortune を組み合わせた反射モデルのパラメータ推定を行い、提案手法の有用性を示す。キーワード 双方向反射特性, BRDF, 3次元計測, ランバートモデル, ラフォーチュンモデル

### Entire shape acquisition and efficient BRDF measurement of 3D object

Kenji INOSE<sup>†</sup>, Hisato FUKUDA<sup>†</sup>, Hiroshi KAWASAKI<sup>†</sup>, and Ryo FURUKAWA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Engineering, Saitama University SimoOkubo 255, Sakura district, Saitama City, 338-8570  
Japan

<sup>††</sup> Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University Ozuka-higasi, Asaminami-ku, Hiroshima,  
Japan

E-mail: <sup>†</sup>{inose,fukuda,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, <sup>††</sup>ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

**Abstract** In this paper, we proposed an efficient method of entire shape acquisition and BRDF measurement. Generally, as the technique of acquiring BRDF parameters, to avoid the correspondence problem of physical sampling position, a flat shape with uniform material or a fixed camera and object with moving light source are assumed. In this paper, we propose the technique to capture BRDF parameter from 3D objects. With our method, general 3D shaped objects, which are difficult to capture with previous methods, can be measured. To achieve this, a correspondence problem is solved by our precise calibration method. Moreover, we also propose a method to efficiently estimate the parameter of BRDF based on combination of Lambert and Lafortune model.

**Key words** Physics based vision, BRDF, 3D shape acquisition, Lambert mode, Lafortune model

### 1. はじめに

近年、CGによる映像表現において、視覚的に現実感の高いシーンの描画が求められるようになってきている。写実的に仮想物体を表現するためには、その物体の幾何形状のみならず、反射現象を正確に表現する必要

があり、これまで、物体表面での反射特性を表す双方向反射関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) を用いた写実的な CG 表現手法が提案されてきた。複雑な反射特性を持つ物体の BRDF を完全に計測するためには、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線方向からの反射光を密に観測しな

ければならない．そのため，計測時間や計測データの膨大なデータサイズが問題となっており，これまで，計測時間の短縮やデータサイズの圧縮などに関する様々な手法，計測装置が提案，開発されてきた．計測時間を短縮するため，一度の計測で，多くのサンプルを獲得するシステムが提案されている．Ward [1] は半球状の鏡を用いて1枚の画像計測で多くの光源方向からの反射率を獲得可能なシステムを開発した．1枚の画像計測で多くの光源方向から反射率を獲得するための同様な手法として，計測対象を筒上の試料台に取り付ける手法も開発されている [2], [3]．また，向川ら [4] は楕円鏡とプロジェクタを用いた計測装置を開発し，駆動装置を排除することによって高速計測を実現した．また，Marschner ら [5], [6] は幾何形状をレンジスキャナーにより復元する手法を開発した．これらの手法は，計測時間を大幅に短縮することが可能であるが，計測対象が均一な材質であることを前提としている．一方，均一でない材質を計測可能な手法として，McAllister は不均一な平面状の材質に対して Lafortune モデルへのフィッティングを行う手法を提案している．また，データサイズ圧縮の方法としては，計測した BRDF の反射モデルへのパラメータ当てはめや特異値分解や因数分解 [7] などが行われている．これらの計算は一般に不安定であり，処理も重いので，物体表面上において一様な BRDF を仮定した単純なモデルを利用したり，計測視点を固定して得られる反射率のみを使用するなどして問題を簡単化することが多い．また，これらの手法は，対象物として立体形状を想定しておらず，一般の3次元形状物体に適用することは困難である．立体物に対しても計測可能な手法として，佐藤らはレンジファインダを用いて3次元計測を行い，その獲得された三角メッシュと撮影したカラー画像を用いて，Torrance Sparrow モデルへのフィッティングを不均一な材質に対して行う手法を提案している．一方，Hendrick ら [8] は3次元スキャナーにより対象物体の3次元形状を獲得し，比較的少ない画像より，物体表面上で変化する Lafortune モデルのパラメータを推定する手法を提案している．本論文では3次元形状物体を対象とし，不均一な材質からなる物体の反射特性を推定する手法を提案する．提案手法では形状と BRDF の両方を獲得する．計測した BRDF から2色性反射モデルに基づき，拡散反射成分を Lambert と仮定し，拡散反射率を求め，鏡面反射成分としては，Lafortune モデルにフィッティングすることによって，パラメータを求める．

## 2. 反射モデル

双方向反射率分布関数 BRDF (bidirectional reflectance distribution function) は，Nicodemus ら [9] によって物体表面上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り CG においては仮想現実感を創り上げる上で，任意の照明環境に応じた物体の見えを表現するため

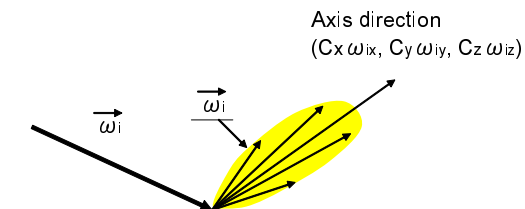


図1 Lafortune モデルのローブ形状．

などに利用されている．BRDF は，任意の入射方向の放射照度 (イラディアン) に対する任意の視線方向への放射輝度 (ラディアン) の比率として以下のように表される．

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

ここで， $L_o(x, \vec{\omega}_o)$  は点  $x$  から  $\vec{\omega}_o$  方向へ反射する放射輝度， $L_i(x, \vec{\omega}_i)$  は点  $x$  に  $\vec{\omega}_i$  方向から入射する放射輝度である． $\vec{n}$  は点  $x$  における法線である．光の向きは仰角と方位角で表され，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．CG の分野では，反射特性を簡潔に記述するためには，Phong モデル [10] や Torrance-Sparrow モデル [11] などのパラトリックモデルが広く利用されている．実物体の反射特性をこれらのパラトリックモデルで表現するためには，物体に合わせたパラメータの設定が必要であり，ユーザーが手で設定するには，反射モデルによっては面倒な作業であったり，一意に定まらないなどの問題がある．そこで，パラメータを自動推定するため，材質の BRDF を計測し，観測された反射率からパラトリック反射モデルへのフィッティングを行い，パラメータ推定を行う手法が開発されてきた [1], [12] ~ [15]．本手法では，Lafortune モデル [14] を利用してパラメータ推定を行う．このモデルは，軸の向きと長さの異なる複数のコサインローブを組み合わせるにより，異方性反射やオフスペキュラーにも対応可能なモデルである．図1は Lafortune モデルにおけるローブ形状を表したものである．

Lafortune の BRDF モデルはこのローブの任意数の和として表現される (式2)．

$$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o) = \sum_i [C_{x,i} \omega_{ix} \omega_{ox} + C_{y,i} \omega_{iy} \omega_{oy} + C_{z,i} \omega_{iz} \omega_{oz}]^{n_i} \quad (2)$$

## 3. 計測システム

実物体の BRDF 計測において，対象物が立体形状であり，複数の複雑な反射特性をもつ材質からなる場合，その物体の反射特性を出来るだけ正確に獲得するためには，物体表面のあらゆる法線方向および，視線，光線方向の全てを考慮したサンプリングが必要となる．本章では，そのような物体の反射特性を解析するための BRDF 計測システムを提案し，その計測手法を述べる．

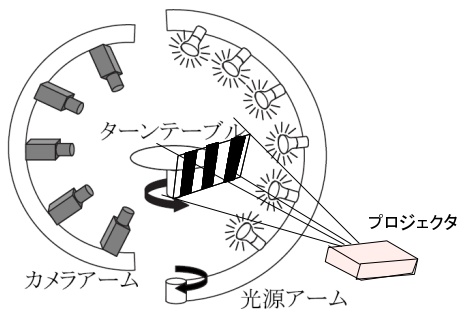


図 2 物体表面反射測定装置

### 3.1 計測装置

計測装置の構成は図 2 に示されるように、2 個の円弧状の部品がついており、それぞれ CCD カメラとハロゲンランプを複数個取り付けられている。以後、これらを取り付ける円弧をアームと呼ぶことにする。これらのカメラと光源は PC により制御される。計測装置の中心付近には、計測対象物体を載せるための回転テーブルが取り付けられている。回転テーブルと光源アームは、同一の垂直な軸を中心に回転する。これらの回転も、PC によって制御される。回転テーブルによる角度変化と撮影するカメラの選択によって、視点の方位角と仰角を、また、光源アームの角度変化と点灯する光源の選択によって、光源の方位角と仰角を変えることができる。これらのパラメータを変えながら画像を標準化することで、4 自由度パラメータについて BRDF のサンプリングが可能となっている。また、対象物体の BRDF のサンプリングと同時にプロジェクタとカメラを用いて形状計測を行い、計測した形状から統合三角メッシュを生成する。複数カメラ視点より得られる計測 BRDF は統合メッシュに射影マッピングすることによってリサンプリングする。

### 3.2 計測の流れ

計測は大きく分けて 3 次元計測と BRDF 画像計測に分けられる。3 次元計測は 1 台のプロジェクタとアームに取り付けられているカメラを用いて回転台上に載せた対象物体を回転させながら複数視点から計測を行う。BRDF 画像計測は光源アームと回転台を回転させて計測される。計測されたデータは図 3 の流れに沿って、最終的に対象物体の三角メッシュとテクスチャとして反射パラメータが獲得される。

### 3.3 3 次元形状計測

本手法では、3 次元形状計測のために、プロジェクタとカメラを用いる。本論文では、空間コード化法と位相シフト法組み合わせることで高精度に行われる。図 4 に 3 次元計測の様子を示す。3 次元計測は複数視点から行い、計測される複数の部分形状を位置あわせ、統合することにより対象物体の三角メッシュを獲得する。位置あわせに関しては、4.2 節で述べるカメラ位置の外部キャ

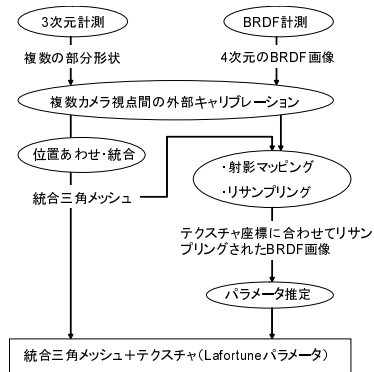
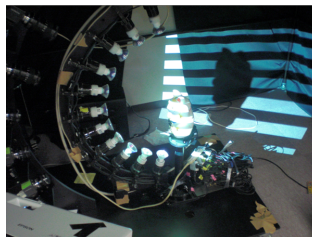


図 3 計測の流れ



空間コード化法による計測



位相シフト法による計測

図 4 3 次元計測の様子。

リブレーション方法によって高精度に実現される。

## 4. BRDF モデルの獲得手法

### 4.1 BRDF のサンプリング方法について

物体表面上の BRDF については物体形状を三角メッシュとして獲得し、その三角メッシュの各テクセル(テクスチャ用画像上の各ピクセル)ごとに BRDF を獲得する。これは計測画像を三角メッシュに射影マッピングし、そのマッピングされた輝度値をテクスチャ座標をもとにリサンプリングすることによって行う。図 5 に撮影された画像から射影マッピングを施し、形状のテクスチャ座標系に合わせてリサンプリングにより BRDF が獲得される様子を示す。

### 4.2 複数計測視点の外部キャリブレーション

3 次元計測した部分形状の位置あわせや、BRDF のサンプリング時に行う射影マッピングにおいて誤差の影響

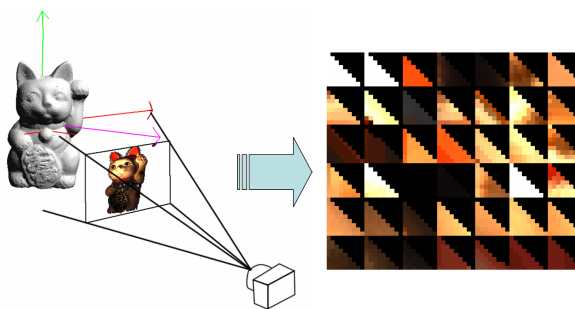


図 5 計測 BRDF 画像からテクスチャ座標に合わせてリサンプリングの様子



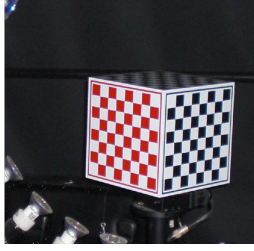


図6 校正器具

を少なくするためには、カメラと物体との位置関係を正確に求める必要がある。そのために、本手法では、図6に示す校正器具を使用して外部キャリブレーションを行う。校正器具は立方体となっており、各面に校正用のチェッカーパターンが印刷されている。カメラの内部パラメータは事前に求めておき、校正器具の真値データを内部パラメータをもとに2次元画像上へ投影し、テンプレートマッチングすることによって対応点を求める。外部パラメータは、方位角方向に0度、90度、180度、270度回転させて撮影し、それぞれのシーンにおいてカメラと校正器具とのポーズを求めた後、それらのポーズの平均をとることによって、回転テーブルの回転中心と回転軸を求める。回転中心と回転軸が求めれば、回転テーブルの回転角度は、回転テーブルを回転させるステップモーターにより正確に求まるので、これにより、各計測視点におけるカメラの外部パラメータが求まる。

### 4.3 反射パラメータ推定

提案手法では、2色性反射モデルを仮定し、拡散反射を Lambert モデル、鏡面反射を Lafortune モデルで表すモデルへの計測 BRDF のフィッティングによってパラメータを推定する。また、等方性反射モデルを仮定し、より Lafortune モデルのパラメータを簡略化する。仮定する反射モデルは次式である。

$$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o) = \rho_d + \sum_i [C_{xy,i}(\omega_{ix}\omega_{rx} + \omega_{iy}\omega_{ry}) + C_{z,i}\omega_{iz}\omega_{rz}]^{n_i} \quad (3)$$

ここで、 $i$  はローブの数であり、実験では、ローブの数を1つと固定した。この反射モデルに計測時の  $\vec{\omega}_i$  と  $\vec{\omega}_o$  を代入し求まる輝度値と計測 BRDF との誤差関数の最適化をレーベンバーグ・マーカート法 (以下 LM 法) [16] によって推定する。LM 法によって最適化する誤差関数は次式である。

$$E = \sum_j [I_{(j)} - f_r(\vec{\omega}_{i(j)}, \vec{\omega}_{o(j)}) (\vec{\omega}_{i(j)} \cdot \vec{n})] \quad (4)$$

また、拡散反射率  $\rho_d$  に関しては、パラメータ推定が不安定となるのを避けるため、以下の式により推定し、その値を初期値とする。

$$\rho_d = \frac{\sum_j^N (I_{(j)} / \vec{\omega}_{i(j)} \cdot \vec{n})}{N} \quad (5)$$

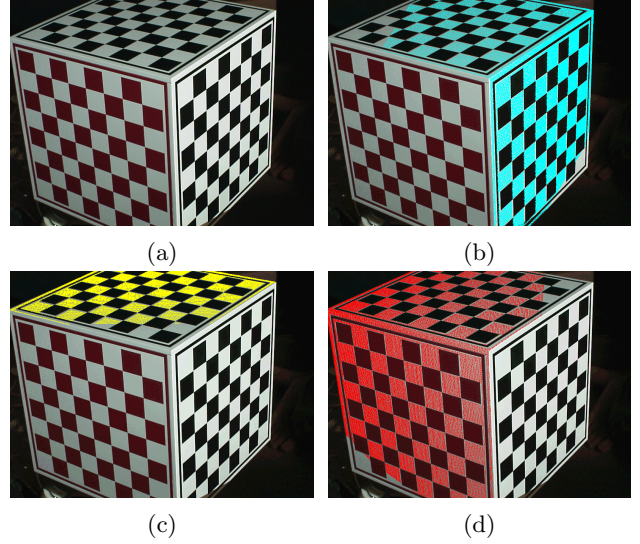


図7 方位角方向に90度ずつずらして復元した3次元点の射影結果

誤差関数に与えるサンプルの輝度値は3.3章で述べた方法によって取得される。 $w_i, w_o$  は計測 BRDF 画像の撮影時の視点、光源位置情報をもとに物体表面法線を  $Z$  軸とする局所座標系での値を使用する。接ベクトルは法線ベクトルとワールド座標系の  $Y$  軸ベクトルの外積として計算される。

## 5. 実験

本システムで行うカメラと回転テーブル間の外部キャリブレーションの精度を検証するために実験を行った。また、実際に本システムを用いて、BRDF の取得を行い、パラメータフィッティングを行った。

### 5.1 外部キャリブレーション

本システムの外部キャリブレーション方法を評価する方法として、実際に校正器具を方位角方向0度、90度、180度、270度の計測視点から3次元復元を行い、復元された3次元点データを撮影画像上に投影し、パターンのずれ具合を評価した。以下の図5.1は方位角0度の計測視点における校正器具の撮影画像である。図5.1(b), (c), (d)は方位角0度、90度、180度、270度の計測視点から3次元復元した3次元データを本システムの外部キャリブレーション方法によって求めた剛体変換パラメータから、方位角0度視点の座標系へ変換し、射影した画像をを図5.1(a)の撮影画像に重ねて表示した画像である。結果を見ると、射影先の画素値のずれは、最大3ピクセル程度であり、ある程度の精度で校正できていることが確認できた。しかし、より精度の高いリサンプリングのためには1ピクセル以下にする必要があるこれは今後の課題である。

### 5.2 物体の双方向反射率分布関数計測

対象物体は図8(a)に示す招き猫の置物とした。図8(b)



は3次元復元処理で行うパターン光の投影を行っている様子である．図8(c)はBRDF計測の風景である．図9に計測結果例を示す．次に，撮影した計測画像を統合メッシュに射影マッピングした結果を図10に示す．図

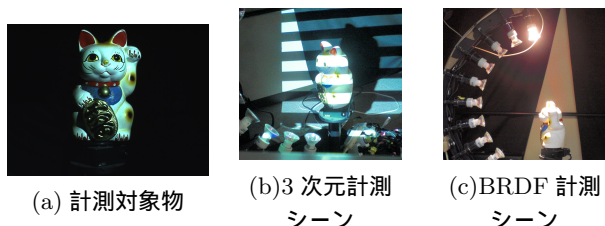


図8 対象物体（招き猫）の計測シーン

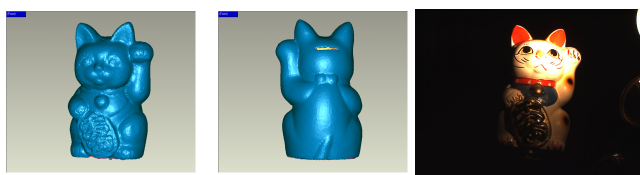


図9 対象物体（招き猫）の計測結果

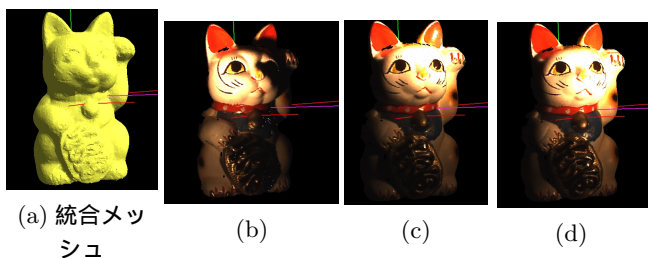


図10 統合形状 (a) および計測画像の射影マッピング結果 (b-d)

11に図10(d)の射影マッピング結果を統合メッシュのテクスチャ座標に合わせてリサンプリングしたテクスチャを図示する．このように異なる視点で撮影した画像を統合メッシュのテクスチャ座標に合わせてリサンプリングすることによって，テクスチャ画像の各画素が同じ物体表面上の点と対応がとれるようになる．図12は対象物の正面の計測視点において，光源位置を変えてサンプリングしたBRDFの例を示している．

### 5.3 Lafortune パラメータ推定

前節で，物体表面上の点で対応がとられたBRDFの標本点を手に入れることができた．ここでは得られた標本点に対して，LM法を用いた，ラフォーチュンモデルに対する非線形最小2乗近似を行うことにより，ラフォーチュンモデルのパラメータを推定する．今回の推定では，等方性の反射を仮定し， $C_x = C_y$ としている．図13と14に推定の結果を示す．図13では，ハイライトの位置が標本の位置とほぼ同じになっており，正しく推定され

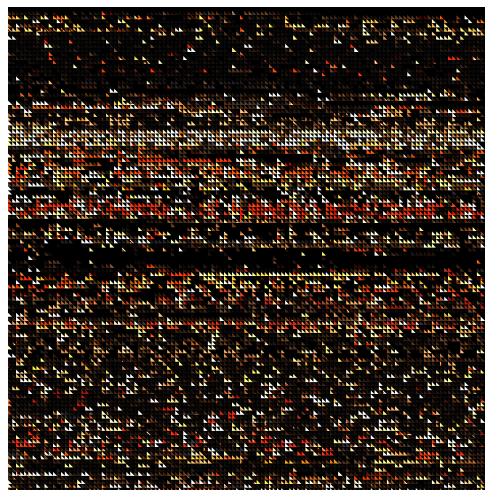


図11 射影マッピング結果を統合メッシュのテクスチャ座標に合わせてリサンプリングした結果

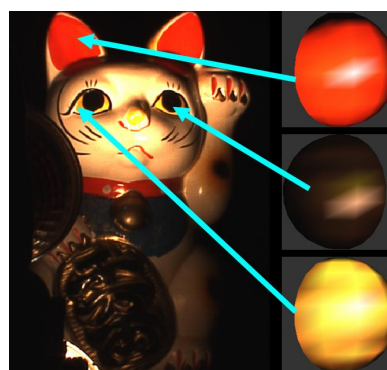


図12 計測 BRDF

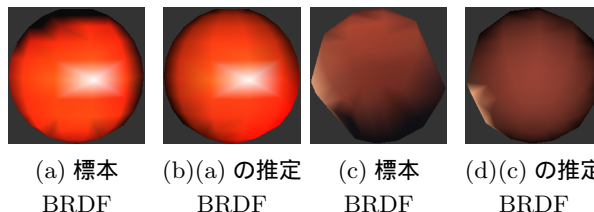


図13 パラメータ推定成功例



図14 パラメータ推定失敗例

ているが，図14では，ハイライトが中央にあり，正しく推定されていない．これは，初期値を固定値としているため，LM法による推定に失敗したためと考えられる．この対策としては，あらかじめローブの広がりから良い初期値を推定することが考えられる．

### 5.4 全周モデルにおける推定結果

別の対象物体について，計測により得られた，物体表面のBRDFデータを用いてLafortuneモデルに当ては

めてパラメータ推定を行った．結果を図 15 に示す．レンダリングの際に設定したカメラと光源位置と同じ設定で実際に撮影された画像を図 16 に示す．結果を見ると，うまく推定されている箇所と，そうでない箇所があることが分かる．これは 5.3 節で述べた推定の失敗が大きな理由と考えられる．またセルフオクルージョン付近では正しいリサンプリングが行われなかったため，このことによる誤った推定パラメータも一因と思われる．これら問題の解決については，アルゴリズムの改善や，精度の良い初期値推定などが挙げられる．

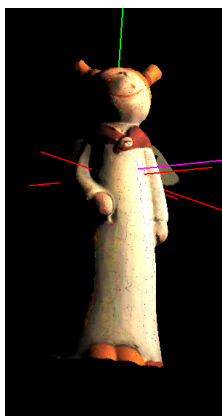


図 15 推定パラメータからテクスチャを生成した結果



図 16 実際の撮影画像

## 6. 結 論

本論文では，不均一な材質からなる複数の反射特性をもつ 3 次元形状物体に対して反射特性解析が可能な BRDF 計測手法を提案した．使用した計測装置は，視点，光源を仰角，方位角ともに任意に設定可能であり，さらに全周の 3 次元形状を獲得することができ，一般の 3 次元形状物体の 4 パラメータ BRDF データを効率よく計測可能である．実際に計測を行い，Lambert 反射モデルと Lafortune 反射モデルを組み合わせた反射モデルへパラメータフィッティングを行い，パラメータの推定に成功した．推定の高精度化が今後の課題として残されている．

また，実験では等方性反射を仮定し単純なモデル当てはめを行ったが，今後，異方性反射への対応や微少な位置ずれの修正などが考えられる．

## 文 献

- [1] G. J. Ward: “Measuring and modeling anisotropic reflection”, SIGGRAPH Comput. Graph., **26**, 2, pp. 265–272 (1992).
- [2] R. Lu, J. J. Koenderink and A. M. L. Kappers: “Optical properties (bidirectional reflection distribution functions) of velvet”, Appl. Opt., **37**, 25, pp. 5974–5984 (1998).
- [3] A. Ngan, F. Durand and W. Matusik: “Experimental

analysis of brdf models”, Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering, Eurographics Association, pp. 117–226 (2005).

- [4] 角野，向川，八木： “楕円鏡を用いた双方向反射率分布関数の高速計測”，電子情報通信学会論文誌，第 J90-D 巻，pp. 1921–1937 (2007).
- [5] S. R. Marschner: “Inverse rendering for computer graphics”, PhD thesis, Ithaca, NY, USA (1998). Adviser-Greenberg., Donald P.
- [6] S. R. Marschner, S. H. Westin, E. P. F. Lafortune, K. E. Torrance and D. P. Greenberg: “Image-based brdf measurement including human skin” (1999).
- [7] M. D. McCool, J. Ang and A. Ahmad: “Homomorphic factorization of brdfs for high-performance rendering”, SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, New York, NY, USA, ACM, pp. 171–178 (2001).
- [8] H. P. A. Lensch, M. Goesele, J. Kautz, W. Heidrich and H.-P. Seidel: “Image-based reconstruction of spatially varying materials”, Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques, London, UK, Springer-Verlag, pp. 103–114 (2001).
- [9] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg and T. Limperis: “Geometric considerations and nomenclature for reflectance”, National Bureau of Standards (1977).
- [10] B.-T. Phong: “Illumination for Computer Generated Pictures”, **18**, 6, pp. 311–317 (1975).
- [11] K. E. Torrance and E. M. Sparrow: “Theory for off-specular reflection from roughened surfaces”, pp. 32–41 (1992).
- [12] 佐藤，向川： “インバースレンダリング (サーベイ)”，情報処理学会研究報告. CVIM, **2004**, 91, pp. 65–76 (2004).
- [13] Y. Sato, M. D. Wheeler and K. Ikeuchi: “Object shape and reflectance modeling from observation”, pp. 379–387 (1997).
- [14] E. P. F. Lafortune, S.-C. Foo, K. E. Torrance and D. P. Greenberg: “Non-linear approximation of reflectance functions”, ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), pp. 117–126 (1997).
- [15] D. K. McCallister: “A generalized surface appearance representation for computer graphics”, PhD thesis (2002). Director-Lastra., Anselmo.
- [16] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery: “Numerical Recipes in C [日本語版] C 言語による数値計算のレシピ”，技術評論社 (1993). 丹慶 勝市、奥村 晴彦、佐藤 俊郎、小林 誠 共訳.