

実 3 次元物体の表面反射特性パラメータの効率的推定手法

福 田 悠 人^{†1} 川 崎 洋^{†2}
久 野 義 徳^{†1} 古 川 亮^{†3}

本研究では、3次元物体の物体表面の反射特性を表す双方向反射率分布関数 (BRDF) の高精度なパラメータ推定手法を提案する。パラメータ推定は実シーンを計測し、計測データを反射モデルのパラメータへフィッティングすることで実現できるが、一般に推定が不安定になりやすい。また、通常 BRDF パラメータ推定の対象は、パターンが一様な平面物体であるのに対して本研究では対象物としてテクスチャ模様のある 3次元物体を想定している。そのため、視線方向、光線方向を変えながら密に計測する際に、同一点を高精度に追跡する必要があるが、これは難しい課題である。そこで本研究では、ラフォーチュンモデルによるパラメータ推定手法と高精度なキャリブレーションによりこれらを解決し、精度の高い BRDF パラメータを自動推定する手法を提案する。

efficient reflectance property estimation of 3D object's surface

HISATO FUKUDA,^{†1} HIROSHI KAWASAKI,^{†2}
YOSHINORI KUNO^{†1} and RYO FURUKAWA^{†3}

In this paper, we propose an efficient method to estimate BRDF parameter of the surface of real 3D object. For the parameter estimation, we first measure the real object several times with a number of cameras, and then, fit them to the reflection model. Since the reflection model is usually complicated with many parameters, the fitting process is not easy and unstable. In addition, the shape of the target object is usually flat and uniform for such purpose, whereas our target is 3D object with non-uniform texture, therefore, parameter estimation becomes more difficult. For solution, we propose a bundle adjustment approach for better camera calibration and new optimization method based on Lafortune model.

1. はじめに

近年、映画やテレビなどの映像作成やビデオゲームの表現手法において、コンピュータグラフィックス (CG) 技術は欠くことのできないものとなっており、生成される CG 画像もより質の高い写実的なもの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、反射特性を正確に表現する必要があり、これまで、物体表面の双方向反射率分布関数関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) による写実的な CG 表現が試みられてきた。

従来、任意の光源状況や視点位置に対応し物体表面の反射特性を小さいデータで再現するために、関数による反射モデルによって BRDF を近似することが行われており、物体の反射特性に合わせて、様々な反射モデルが提案されてきた。実物体の反射特性をモデリングするためには、観測した反射率を BRDF を表す関数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取得するということが行われている。BRDF を完全に計測するためには、対象物体を構成する材質に対してあらゆる方向から照明したときの反射光をあらゆる視線方向から観測しなければならないが、一般の 3次元物体においてこれを実現することは困難である。過去の手法においては BRDF フィッティングの計算において、物体表面上において一様な BRDF であると仮定したり、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単純化することが多かった。しかし、複雑な反射特性をもつ物体や不均一な材質から構成される 3次元物体の BRDF を再現するためにはこの問題を解決する必要がある。

また、任意の 3次元形状を持った物体に対して、複数の視点位置から取得された画像から、物理的に同一位置にある点を抽出するには、高精度の形状計測とキャリブレーションが必要である。

本研究では、これを実現するために、立体形状を持つ物体に対して光源方向、視線方向を変化させながら計測することが可能な装置を用いて、4次元の密なサンプリングを行い、Lafortune モデルによる反射パラメータを推定を行う。また、立体物でも位置ずれなく精度

^{†1} 埼玉大学
Saitama University

^{†2} 鹿児島大学
Kagoshima University

^{†3} 広島市立大学
Hiroshima City University

良くサンプリングするためバンドル調整によるキャリブレーションの高精度化手法を提案する。

2. 反射モデル

双方向反射率分布関数 (BRDF:bidirectional reflectance distribution function) とは, Nicodemus ら¹⁾ によって CG の分野などで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に物体表面における光の反射を記述する手段として利用された. BRDF では, 物体表面上のある点に入射する光は, 同一点で反射されると仮定されている. BRDF f_r 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.

$$f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) = \frac{dL_r(x, \vec{\omega})}{L_i(x, \vec{\omega}')(\vec{\omega}' \cdot \vec{n})d\vec{\omega}} \quad (1)$$

ここで, $L_r(x, \vec{\omega})$ は点 x から $\vec{\omega}$ 方向へ反射する放射輝度, $L_i(x, \vec{\omega}')$ は点 x に $\vec{\omega}'$ 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. 物体表面上の点 x の明るさは考慮すべき光源全ての入射光に対する反射の総和として表すことができ, BRDF を用いて以下のように表される. また, 図 1 に入射光と反射光の関係を示す.

$$L_r(x, \vec{\omega}) = \int_{\Omega} f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega})((\vec{\omega}' \cdot \vec{n}))L_i(x, \vec{\omega}')d\vec{\omega}' \quad (2)$$

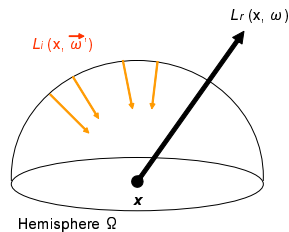


図 1 入射光と反射光の関係図. 点 x に入射する全ての光 L_i に対して, 点 x の BRDF により $\vec{\omega}$ 方向に反射する放射輝度が計算され, その総和が L_r となる.

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²⁾ や Torrance-Sparrow モデル³⁾ 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, 複雑な反射モデルをユーザーが手動で設定するのは面倒な作業であり, 思った通りの表現ができないなどの問題があった. そこで, パラメータを自動で推定するために, 材質の BRDF 画像を計測し, 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という手法が研究されてきた⁴⁾⁻⁸⁾. 多くの材質の反射に対応可能なモデルとして Lafortune モデル⁷⁾ が提案されている. 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ことで, 方向性を持つ拡散反射, 正反射方向以外の鏡面反射, 異方性反射もモデル化可能である. コサインローブはその軸方向とローブ形状を, 光線入射方向及び反射方向ベクトルと, 3×3 の行列によって表すことが可能である. ローブ形状 S は次式によって表される.

$$S(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = \left(\begin{bmatrix} \omega_{rx} \\ \omega_{ry} \\ \omega_{rz} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_x & & \\ & C_y & \\ & & C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{ix} \\ \omega_{iy} \\ \omega_{iz} \end{bmatrix} \right)^n \quad (3)$$

図 2 はローブ形状を表した図である. Lafortune の BRDF モデルはこのローブの任意数個の和で表現される.

$$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = \sum_i [C_{x,i}\omega_{ix}\omega_{rx} + C_{y,i}\omega_{iy}\omega_{ry} + C_{z,i}\omega_{iz}\omega_{rz}]^{n_i} \quad (4)$$

C_x, C_y, C_z, n_i の値を設定することによって前節までに述べた様々な反射特性を表現することが可能となっている. たとえば, $C_x = C_y = 0$ のローブは拡散反射を表す, さらに $n = 0$ ならば Lambert 反射であるといえる. このような汎用性の高さから近年このモデルが良く用いられるようになってきており, 本論文においても本モデルを用いてパラメータ推定を行う.

3. 計測手法

提案する手法では, 3 次元形状物体の幾何形状と, 視点位置, 光源位置を用いて, 撮影した画像群から, 3 次元形状物体の反射パラメータ推定を行う. 本章では, まずはじめに正確にデータを獲得するための視点位置の外部キャリブレーションについて述べ, 反射特性の計測方法について述べる. 図 3 に処理の流れの図を示す.

3.1 既存の反射特性の計測方法

実物体の反射特性をモデリングするためにこれまで様々な計測装置が提案, 開発されている. それらの装置の多くは, 計測対象を様々な方向から光を投射して計測を行うため, 計測時間が非常に大きかった. 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

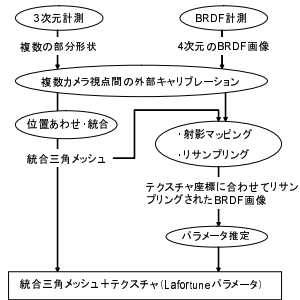


図3 計測の流れ

するシステムが提案されている。Ward⁵⁾ 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は計測対象を筒上の試料台に取り付ける手法が開発されている^{9),10)}。向川ら¹¹⁾ 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^{12),13)} 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、計測対象が均一の材質であるという制限がある。一方、佐藤らは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⁶⁾。McAllisterは不均一な平面状の材質に対してLafortuneフィッティングを行う手法を提案している⁸⁾。

3.2 計測システム

本手法で用いる計測装置は図4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が複数個取り付けられている。以後、これらが取り付けられてい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。円弧の中心付近には、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関するBRDFのサンプリングが可能となっている。

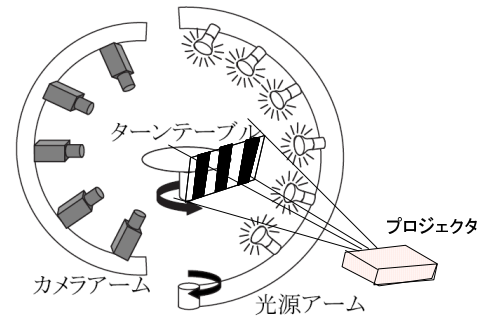


図4 物体表面反射測定装置

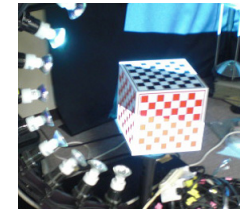


図5 校正器具

3.3 外部キャリブレーション

本手法では、BRDFを物体表面上の点ごとに正確に、獲得することが必要であり、そのために、カメラの高精度な外部キャリブレーションを行うことが重要である。

そこで、図5に示す校正器具を用いて外部キャリブレーションを行う。校正器具は精密作成された直方体であり、各面に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、まず校正器具を回転テーブルの上に乗せて、校正器具とカメラ間のポーズを求める。次に、回転テーブルを90度回転させて、再び校正器具とカメラ間のポーズを求める。方位角方向に0度、90度、180度、270度回転させた際のそれぞれのシーンにおいてカメラと校正器具との各ポーズを求めた後、回転テーブルの回転中心と回転軸を、その回転中心と回転軸が描く円軌道と、求めた各カメラのポーズの誤差が最小となるように求める。回転テーブルの回転はステップモーターにより行われるため、非常に正確であることが期待されるため、これにより高精度な外部パラメータが取得できる。最適化には本論文では、LM法を用いた。

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計算により求まる。

3.4 反射特性の計測

3.4.1 3次元形状の計測

3次元形状物体の反射特性解析には、密な3次元形状が必要であり、本論文では実装にあ

たり、物体の3次元情報を密に取得することが可能な、カメラとプロジェクタ各1台ずつで構成された3次元計測システムを用いる(図6)。これは、対象物体にプロジェクタとカメラを向けプロジェクタから光パターンを投影し、これをカメラで撮影し解析することで3次元形状復元する手法である。この3次元計測システムにより得られるデータの例を図7

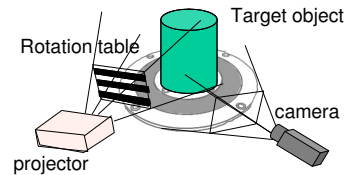


図6 3次元計測システムの構成

に示す。

3次元形状物体の全周形状を計測するためには、複数方向から計測を行い、3.3節で述べた方法で求めた各カメラの外部パラメータにより、剛体変換させ位置あわせを行う。こうして位置合わせされた形状データを統合することによって、3次元形状物体の全周のメッシュデータを獲得する。位置あわせ後の3次元データと全周のメッシュデータを図8に示す。

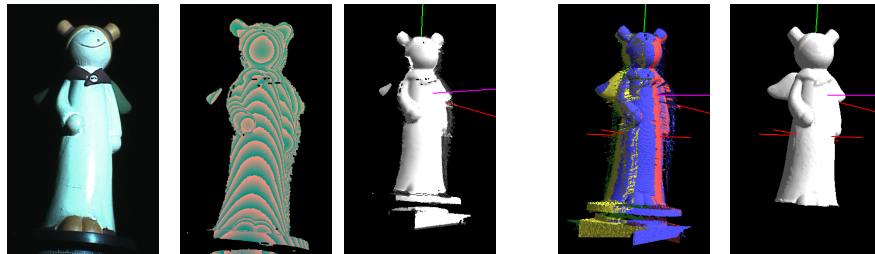


図7 1回の計測によって得られるカラー画像と距離画像の例。(左)カラー画像。(中)距離画像。(右)復元3次元点。図8 統合処理。(左)位置あわせ後計測3次元データ(右)統合メッシュデータ

3.4.2 画像の獲得

本手法では、光源位置、視点位置を変化させながら計測対象物を撮影することで、物体の反射特性を計測する。しかし撮影した写真では、光の強さや色味を必ずしも正確に表しているとはいえない。そこで、ホワイトバランスとレスポンス特性の補正が必要となる。本手法では、ホワイトバランスをマクベスカラーチャートによりキャリブレーションする。レスポ

ンス特性に関しては、ひとつのシーンで露光時間を変えて複数枚撮影した画像による推定する。こうして得られたレスポンス特性を用いて、HDR(High Dynamic Range)画像を作成し、明るさの範囲が広範に渡るような対象物であっても、正確な物体の反射特性を獲得することができる。撮影した画像例とHDRの画像例を図9に示す。



(a) 撮影画像

図9 撮影画像とHDR画像の例

3.4.3 リサンプリング

撮影した画像は3次元形状物体の三角メッシュにテクセル(その三角メッシュのテクスチャ用画像上の各ピクセル)としてリサンプリングされる。リサンプリングの様子を、図10に示す。具体的には、計測された画像を三角メッシュに対して、射影マッピングを行い、そのパッチ毎にマッピングされた輝度値を、三角メッシュのテクセルとしてリサンプリングするこれを撮影した全ての視点、光源下の画像に関して行う。視点、光源のパラメタライズは物体の接空間に対して行う。

また推定処理の際、パッチ毎に推定処理を行うが、パッチ毎に毎回大量のリサンプリング画像を読み込むのは処理時間の面で大きなボトルネックとなる。そこであらかじめ大量のリサンプリング画像を、パッチ毎の画像に分けることにより、パッチ毎の処理で1枚だけそのパッチのリサンプリング画像を読むことで、処理の高速化を行っている。

4. パラメータ推定手法

提案手法では、2色性の反射モデルを仮定し、拡散反射モデルにLambertモデルを、鏡

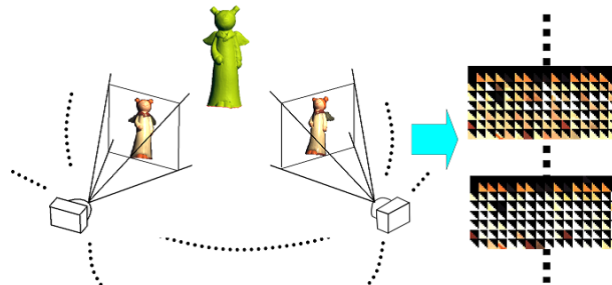


図 10 リサンプリングの様子

面反射モデルに Lafortune モデルを用いる．仮定する反射モデルは次式で表される．

$$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o) = \rho_d + \sum_i [C_{x,i}\omega_{ix}\omega_{ox} + C_{y,i}\omega_{iy}\omega_{oy} + C_{z,i}\omega_{iz}\omega_{oz}]^{n_i} \quad (5)$$

ここで， i は Lafortune モデルのローブ数を表し，ローブの数を 1 と仮定した場合の推定するパラメータは，RGB 成分ごとに ρ_d, C_x, C_y, C_z, n の 5 つとなる．推定には，計測時の $\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o$ を代入し求める値と計測した BRDF との誤差関数を，レーベンバーグ・マーカート法 (以下 LM 法) により最適化することで，各パラメータを推定する．以下では，推定を高精度に行うための，初期値推定と最適化アルゴリズムについて述べる．

4.1 反射パラメータの推定方法

実物体の反射特性のパラメータ推定方法として，拡散反射を Lambert モデル，鏡面反射を Phong や Blinn モデル，もしくは Torrance-Sparrow モデルによって観測 BRDF へのフィッティングをすることが可能である．2 色性反射モデルの理論では，反射成分は拡散反射成分と鏡面反射成分から成る．パラメータの推定するためには拡散反射成分と鏡面反射成分を観測輝度値から分離してから，それぞれのパラメータを別々に推定することができる．分離方法としては，物体表面の特徴点に対して光源を移動させて多数のカラー画像を計測画素ごとに光源位置による RGB 値の変化を分析する手法¹⁴⁾ や，鏡面反射が正反射方向のみ強く観測されるという特徴から，鏡面反射がほとんど観測されない領域から拡散反射を先に推定する手法，また偏光フィルタを利用した鏡面反射成分の分離手法¹⁵⁾ が挙げられる．多くの推定手法は点光源とデジタルカメラを使用し，標準白色板などをあらかじめ計測し，光学的キャリブレーションを行った後，カメラによって得られる観測輝度値を反射率とみなしている．パラメータ数が少なく，線形化が簡単なモデルである，Lambert モデル，

Phong モデル，Torrance-Sparrow モデルなどについては，線形最小 2 乗法の形式に式変形し，直線当てはめなどによる最適化によって，推定が可能である．一方，Ward モデルや Lafortune モデルは様々な反射特性を表現できるが，パラメータが多く，線形化が難しいため，前述のモデルに比べ推定が難しい．このように線形化が難しいモデルに対しては，LM 法などによる，非線形最適化手法が行われる．本研究でも最適化に LM 法を用いる．しかしながら，局所解が多くあることから，初期値の推定が必須となる．また，推定を安定させるために，Lensch ら¹⁶⁾ らは，入力データのクラスタリングを行い，クラスタ毎に BRDF を推定し，それらの線形和により反射特性を表現する手法を提案している．その他にも，反射特性解析では物体表面の微細な形状が反射パラメータ推定に影響を与えることから，そのような影響を，軽減し高精度に推定を行うために，物体の法線と反射特性を同時に推定する手法が Kreigman ら¹⁷⁾ により提案されている．

4.2 初期値推定

LM 法は解から離れたところでは勾配法で粗い探索をおこない，解にある程度近づいたら Gauss-Newton 法に切り替える組織的な推定をおこなう手法であり，収束までの時間は短いものの，初期解によっては局所解に陥る場合がある．そこで本手法では，あらかじめ解に近い値を初期値解として与えることで，局所解に陥ることなく精度良く推定を行う．

各パラメータの初期値解の与え方としては，拡散反射を表す Lambert モデルのパラメータの ρ_d には，サンプリングによって得られた BRDF 値を，入射光ベクトルとその物体表面上の点の法線方向ベクトルの内積で割ったものの中間値を使用する．これは Lambert モデルを仮定した拡散反射では，光は全方向に一樣な割合で反射され，どのサンプルにおいても一樣な BRDF 値が期待されるため，鏡面反射成分やノイズにより特異な反射が観測されても，中間値により正しい値を得られるためである．

鏡面反射を表す Lafortune モデルのパラメータ C_x, C_y, C_z は，図 2 に示すように，入射光を現すベクトル $\vec{\omega}_i$ が与えられたとき，Lafortune モデルの軸の方向が， $(C_x\vec{\omega}_{ix}, C_y\vec{\omega}_{iy}, C_z\vec{\omega}_{iz})$ となる．軸の方向では，観測される BRDF が最大となることから，光源位置，視点位置を変化させて得られた BRDF が，最大となっている時の，入射光を表すベクトル $\vec{\omega}_i$ ，視線方向への出射光を表すベクトル $\vec{\omega}_o$ の組み合わせから，

$$C_x = \frac{\omega_{ix}}{\omega_{ox}}, C_y = \frac{\omega_{iy}}{\omega_{oy}}, C_z = \frac{\omega_{iz}}{\omega_{oz}} \quad (6)$$

のように初期値解を与える．ここで Lafortune モデルのパラメータで，ローブの広がりを表す n は，推定が困難なため，固定値を初期値として与える．

4.3 最適化アルゴリズム

初期値推定により、得られたパラメータ C_x, C_y, C_z は、その3つの比によって、Lafortuneモデルの軸の向きを表すパラメータである。4.2節では、光源・視点位置から、その比の推定を行ったが、パラメータの大きさについては、パラメータの n が推定困難なことから、推定が行えず、そのために全パラメータを推定する最適化が不安定になることがあった。そこで、本手法では、まずパラメータ C_x, C_y, C_z についてのみ最適化を行い、その後、全てのパラメータに対して LM 法を用いて最適化を行うものとした。

5. 実験

本実験では、外部キャリブレーションについて高精度にキャリブレーションが行われているかの検証および、反射パラメータ推定の精度評価を行った。反射パラメータの推定の評価では、獲得した BRDF から、物体表面の反射パラメータを推定しレンダリングを行い、同じシーンを同じ光源下・カメラ姿勢で撮影した実際の画像と比べることを行った。

実験は、図 11 に示すような豚の置物を対象として行った。3次元形状の獲得処理で、パターン光を投影している様子を図 12 に示し、反射特性の計測の様子を図 13 に示す。図 14 に得られた3次元形状を統合した結果を示し、反射特性の計測結果を図 15 に示す。反射特性計測は示した図のように、露光を変えながら、光源、視点方向を変化させて撮影を行う。これらの得られた計測画像から、HDR 画像を作成したものが図 16 であり、作成した HDR 画像を3次元形状のテクスチャ座標にあわせて、リサンプリングしたものを、図 17 に示す。このようリサンプリングを行うことで、他視点から撮影した画像でも、テクスチャ座標によって物体表面上の点の対応をとることが可能である。



図 11 計測対象物

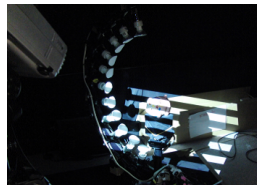


図 12 3次元計測シーン



図 13 反射特性計測シーン

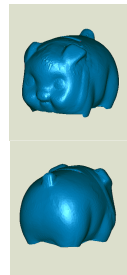


図 14 統合した全周の3次元形状

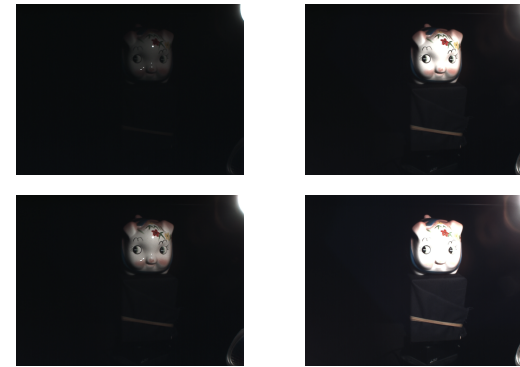


図 15 反射特性計測結果

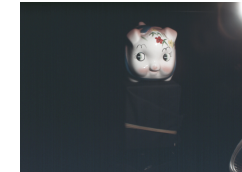


図 16 HDR 画像

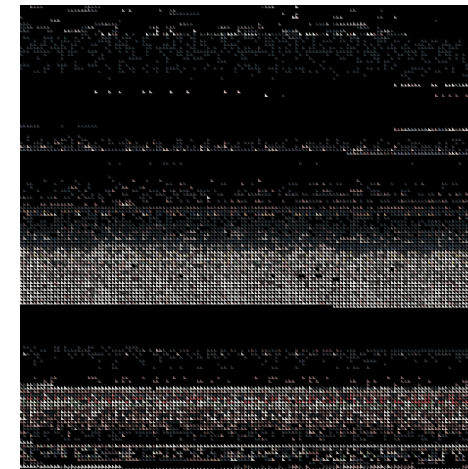


図 17 リサンプリング結果

5.1 バンドル調整による外部キャリブレーションの精度向上

図 18(a) は得られた3次元データを、外部キャリブレーションにより得られたパラメータを用いて投影した結果である。投影結果を見ると、大きなズレは無く、大きくても1,2ピクセル程度であることが確認できた。また、回転中心、回転軸を推定するのに最適化を使用せ

ず、各ポーズの平均をとった場合である図 18(b) より、精度が向上したことが確認できた。

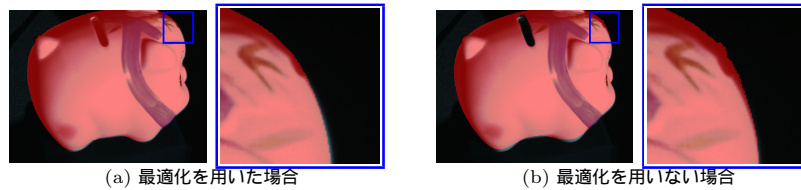


図 18 計測データの射影結果

5.2 ラフォーチュンモデルのパラメータ推定

計測により得られた物体表面の BRDF を用いて提案したモデルを用いてパラメータ推定を行った。この際の、Lafortune モデルのローブの数は 1 とした。提案手法による推定パラメータを用いてレンダリングした結果を図 19(a) に示す。また、初期値推定および提案した最適化アルゴリズムを使用せず、固定した初期値から直接最適化を行った場合の推定パラメータによるレンダリング結果を図 19(b) に示す。レンダリング時のカメラ位置、光源位置と同じ設定で実際に撮影された画像を図 19(c) に示す。結果を見ると、初期値推定、最適化アルゴリズムを用いることにより、精度良く推定されたことが分かるが、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も分かる。特に形状の起伏が大きい部分に、推定に失敗している箇所が多く見られ、これは、物体形状の不正確さ、法線のずれや、キャストシャドウなどのノイズの除去に失敗したために、誤った推定がされたと考えられる。また、光源により光が照射される領域とされない領域との境界においても、誤った推定がされており、これは法線方向と光の入射方向により光が照射される領域を求めていることから、光源の位置や、物体の法線のズレにより、正しくサンプリングされなかったためだと考えられる。また、サンプリングには閾値を用いてキャストシャドウなどのノイズ除去を行っているが、このことによる誤ったサンプリングも一因と思われる。

図 21 は、サンプルの視点数を増やして推定を行った結果であり、図 20 の視点数の少ないときの推定結果と比べると、精度と安定性それぞれにおいて向上した結果が得られていることが分かる。



図 19 推定結果

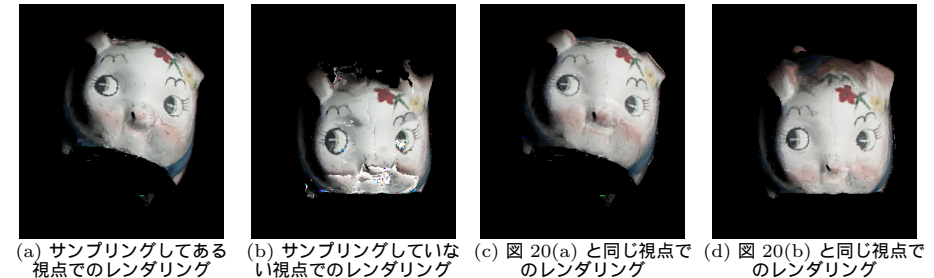


図 20 視点数が少ない場合

図 21 視点数を増やした場合

図 22 は別の 2 つの計測対象物に対して実験を行った結果である。これらの結果においても、大部分において正しいパラメータ推定ができているものの、形状の起伏が大きい部分や、光が照射される領域とされない領域との境界部分などで、推定に失敗していることが分かる。これらの解決は今後の課題である。

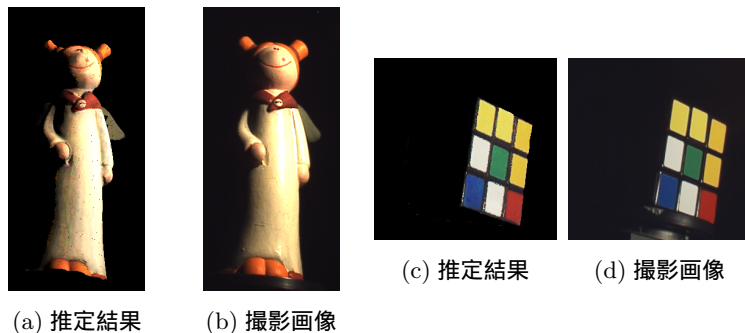


図 22 計測対象を変えた場合の推定結果

6. ま と め

本論文では、視点、光源位置を、仰角、方位角方向に変えながら、物体の反射特性を密に計測可能な BRDF 計測システムを用いて、3次元形状物体表面の反射特性を高精度に推定する手法を提案した。提案手法では、高精度な外部キャリブレーションにより、BRDF のリサンプリング時の位置ずれを抑え、最適化のための初期値推定と、最適化アルゴリズムの工夫により、物体表面の反射特性パラメータを、高精度に推定することができた。今後の課題としては、光源の位置ずれや物体の法線、形状のずれ、キャストシャドウなどによる、パラメータの誤推定の解消が挙げられる。また、安定した結果を得るために、反射特性パラメータのクラスタリングなども必要と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) Bui-Tuong Phong. Illumination for Computer Generated Pictures. Vol.18, No.6, pp. 311–317, 1975.
- 3) K.E. Torrance and E.M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. pp. 32–41, 1992.
- 4) 佐藤洋一, 向川康博. 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, Vol. 2004, No.91, pp. 65–76, 2004.
- 5) Gregory J. Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. *SIGGRAPH*

- Comput. Graph.*, Vol.26, No.2, pp. 265–272, 1992.
- 6) Yoichi Sato, Mark D. Wheeler, and Katsushi Ikeuchi. Object shape and reflectance modeling from observation. pp. 379–387, 1997.
- 7) Eric P.F. Lafortune, Sing-Choong Foo, Kenneth E. Torrance, and Donald P. Greenberg. Non-linear approximation of reflectance functions. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 117–126, August 1997.
- 8) David Kirk McAllister. *A generalized surface appearance representation for computer graphics*. PhD thesis, 2002. Director-Lastra, Anselmo.
- 9) Rong Lu, Jan J. Koenderink, and Astrid M.L. Kappers. Optical properties (bidirectional reflection distribution functions) of velvet. *Appl. Opt.*, Vol.37, No.25, pp. 5974–5984, 1998.
- 10) Addy Ngan, Frédo Durand, and Wojciech Matusik. Experimental analysis of brdf models. In *Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering*, pp. 117–226. Eurographics Association, 2005.
- 11) 角野皓平, 向川康博, 八木康史. 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, Aug 2007.
- 12) Stephen Robert Marschner. *Inverse rendering for computer graphics*. PhD thesis, Ithaca, NY, USA, 1998. Adviser-Greenberg, Donald P.
- 13) Stephen R. Marschner, Stephen H. Westin, Eric P.F. Lafortune, Kenneth E. Torrance, and Donald P. Greenberg. Image-based brdf measurement including human skin. June 1999.
- 14) Yoichi Sato and Katsushi Ikeuchi. Temporal-color space analysis of reflection. *Journal of Optical Society of America A*, Vol.11, pp. 2990–3002, 1994.
- 15) Shree K. Nayar, Xisheng Fang, and Terrance Boult. Separation of reflection components using color and polarization. *International Journal of Computer Vision*, Vol.21, pp. 163–186, 1997.
- 16) Hendrik P.A. Lensch, Jan Kautz, Michael Goesele, Wolfgang Heidrich, and Hans-Peter Seidel. Image-based reconstruction of spatial appearance and geometric detail. In *ACM Transactions on Graphics*, pp. 234–257, 2003.
- 17) Neil Alldrin, Todd Zickler, and David Kriegman. Photometric stereo with non-parametric and spatially-varying reflectance. In *Comp. Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2008.