

# 多視点画像から実物体のBRDFを復元する 実用的な手法の提案

大野 大志<sup>1,a)</sup> 久保 尋之<sup>1</sup> 船富 卓哉<sup>1</sup> 向川 康博<sup>1</sup>

**概要:** 多視点画像から実物体の3次元形状を復元するフォトグラメトリーと呼ばれる技術が実用化されつつあるが、その質感の復元にはまだ課題がある。本研究では、3次元形状復元のための多視点画像に加え、対象物体の反射率を得るための画像を数枚撮影することで、簡易に実物体の双方向反射率分布関数(BRDF)を復元することを目的とする。本手法では多視点画像により復元された3次元形状を元にBRDFを復元するが、復元した形状及び法線には領域に応じて大小さまざまな誤差が存在しており、BRDFの復元に悪影響を及ぼす。そのため、正確なBRDFを復元するためには、法線方向について誤差の小さい領域を抽出する必要がある。そのため、本研究では復元した形状から信頼性の高い領域を抽出するために3つの仮定を導入し、BRDFの復元に最適な光線の入射方向及び出射方向を満たしている領域を探し出す方法を明らかにした。実験結果により、本手法により尤もらしいBRDFが復元できていることが示された。

**キーワード:** BRDF, 多視点画像, フォトグラメトリー

## 1. はじめに

多視点画像から実物体の3次元形状を復元する手法は古くから存在しており[9]、この手法はStructure from Motion (SfM)として広く知られている。またChandrakerら[1]などの近年の研究により、特徴的な反射率分布をもつ物体においても精度の高い3次元形状を復元出来るようになってきている。そのため、多視点画像を用いて実物体の3次元形状を復元する手法が映画やテレビゲーム等の商業分野においても広く用いられるようになってきており、この手法はフォトグラメトリーと呼ばれている。しかしながら、物体の持つ双方向反射率分布関数(BRDF)は物体から直接復元されておらず、その質感の復元には課題が残っている。BRDFはフォトリアリスティックな見えを復元するための重要な要素である。そのため、BRDFを実物体から直接復元することで、よりリアルな見えを実現できるようになることが期待される。

本研究では、フォトグラメトリーに用いられる多視点画像に加え、対象物体の反射率を得るための画像を数枚撮影することで、簡易で実用的な実物体のBRDFの復元手法を提案する。本手法ではまず多視点画像からSfMを用いて対象物体の3次元形状を復元する。しかしながら、SfM

を用いて復元した3次元形状及び法線方向には領域に応じて大小様々な誤差が含まれており、精度の高いBRDFの復元のためにはこの誤差が小さい領域を抽出する必要がある。そのため、我々は復元した3次元形状から信頼度の高い領域を抽出するための仮定を導入した。その仮定によって抽出された領域の法線を用いて、既存の解析的手法を用いて尤もらしいBRDFを復元する。本稿ではシミュレーション実験、及び実環境での実験を行い、本手法の有効性を示した。

## 2. 関連研究

多視点画像から3次元形状とカメラ位置姿勢を推定することを目的として、古くから多くの研究がなされており[9]、これらはSfMとして知られている。従来、SfMは特徴的な反射率分布をもつような物体においては推定精度が低かったが、Chandrakerら[1]は未知の等方性BRDFを持つ物体において、対象物体の多視点画像から物体の3次元形状を復元した。この研究では、対象物体における4つの特定の動きによって物体表面の3次元位置及び勾配を十分に説明できることが示された。

また、実物体から3次元形状とBRDFを同時に復元する研究として、Müllerら[6]は複数のカメラ及び光源をドーム状に配置することによる計測デバイスを開発した。一方、Miyashitaら[5]は高周波プロジェクター及びハイス

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 〒630-0192 奈良県生駒市高山町8916-5

<sup>a)</sup> ono.taishi.op0@is.naist.jp

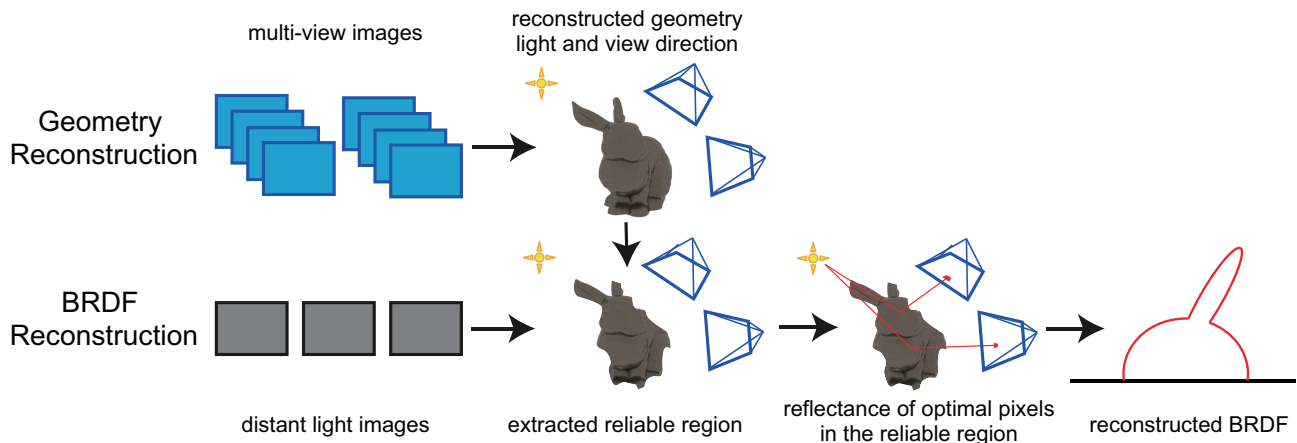


図 1 提案手法の概要。まず環境光のある状態で多視点画像を撮影し、加えて単一の平行光源下で数枚の平行光源画像を撮影する。次に Structure from Motion (SfM) を用いて多視点画像から 3 次元形状、光線方向及び各画像でのカメラ位置姿勢を推定する。そして復元した形状から信頼できる領域を抽出し、復元に最適な光線の入射方向及び出射方向を満たす箇所を解析的に探し出す。対応するピクセルにおける反射率分布を平行光源画像より取得し、その値から尤もらしい BRDF を復元する。

ピードカメラを用いることにより、高速に対象物体の形状と BRDF を復元した。しかしながら、これらの手法は高価な機材や複雑なキャリブレーションを必要としており、実用性に課題がある。

BRDF は光線の入射方向及び出射方向に依存しており、密に取得するためには数万回にも上る計測を行う必要がある。この問題を解決するために、Nielsen ら [7] は Matusik ら [4] により作成された BRDF のデータベースから任意の BRDF を表現する統計的手法を開発し、BRDF の復元に最適な光線の入射方向及び出射方向のペアを導き出した。この手法により、少ない計測から正確な BRDF を復元することができるようになったが、この手法は正確な計測を行うために物体の法線が既知であることが必要であり、また複雑なキャリブレーションも依然として要求される。

本論文では、フォトグラメトリーのための多視点画像に加えて数枚の画像を取得することで、特別な機材や複雑なキャリブレーションを用いない、簡易で実用的な実物体の BRDF 復元手法について提案する。

### 3. BRDF の復元

図 1 は本手法の概要を表している。BRDF を復元する前に、まず環境光源下で多視点画像を撮影し (図 2 (a)), SfM を用いて 3 次元形状を復元する。これは一般的なフォトグラメトリーのパイプラインである。また、物体の反射率分布を取得するために、単一の平行光源下で数枚の平行光源画像も撮影しておく (図 2 (b))。これらの平行光源画像はそれぞれ、多視点画像のうちのいずれかと同じカメラ位置姿勢にて取得する。これらの平行光源画像及び復元した 3 次元形状を用いて、BRDF の復元に最適な光線の入射方向と出射方向を満たす領域を探し出す。以降では、その

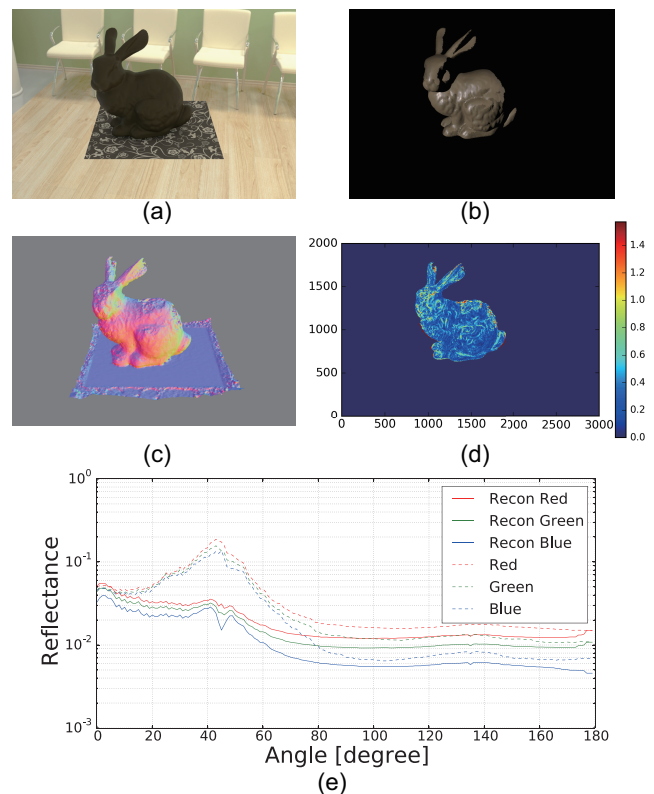


図 2 (a) フォトグラメトリーのために環境光のある状態でレンダリングした多視点画像の一つ。(b) 反射率分布を取得するために単一の平行光源下でレンダリングした平行光源画像の一つ。(c) 多視点画像を用いて復元した形状における法線マップ。(d) 復元した法線方向と、真値とのなす角 [rad] を誤差として示した誤差マップ。(e) 法線の誤差を考慮せずに復元した BRDF (実線) と真値 (点線) との比較。

領域を探し出すアプローチについて詳述する。

### 3.1 復元した形状から法線方向に関して信頼度の高い領域を抽出するための制約条件

BRDF を正確に復元するためには、対象物体の法線方向が正確であることが必要である。図 2 (c) は多視点画像から復元した法線方向のマップ、図 2 (d) は復元した法線方向と真値とのなす角を誤差として表示した誤差マップをそれぞれ示している。これにより、復元した法線方向には領域に応じて大小さまざまな誤差が存在していることがわかる。この法線方向に関する復元誤差を考慮せずに BRDF の復元を行った場合、BRDF の復元結果に大きな悪影響を及ぼす。図 2 (e) は、物体表面におけるある地点に光線が 135 度方向から入射した場合において、視線方向が同一平面内で 0 度から 180 度まで遷移した場合の反射率の変化を示したものである。このグラフに示されているように、特に鏡面反射方向である 45 度付近において復元した BRDF は真値と著しく乖離していることが分かる。

そのため、実物体から BRDF を復元するためには、法線の真値が未知である状態において、復元した 3 次元形状から法線方向に関して信頼性の高い領域を抽出する必要がある。そのために、我々は次の 3 つの仮定を導入した。まず、SfM を用いて復元した形状は法線がなまってしまう傾向にあるため、法線方向の誤差と復元した形状における曲率には強い相関があることを仮定した。つまり、曲率の大きい領域の法線方向は信頼性が低いということを意味している。次に、物体における反射率分布が法線方向とハーフベクトルとのなすコサインに関して単調であることを仮定した。この仮定は Higo ら [3] による、多様な BRDF において有効なフォトメトリックステレオに関する研究にて導入されたものである。最後に、最も明るい輝度値を持つ領域は鏡面反射におけるピークを表しているということを仮定した。我々は、このような思想に基づいて具体的に以下のような実装を行った。

- 曲率について

Vergne ら [10] により提案された手法に基づき、主方向ベクトル  $\mathbf{u}$  と  $\mathbf{v}$  に対応する主曲率  $\kappa_u$  と  $\kappa_v$  を取得する。ここでは平均曲率  $H = \frac{(\kappa_u + \kappa_v)}{2}$  を各領域における最終的な曲率とする。

平行光源画像における全ピクセルについて、復元した形状における曲率  $H$  を取得した後、設定した閾値よりも曲率の高い領域は信頼度が低いとして除外する。

- 単調性について

光線方向  $\mathbf{l}$ 、視線方向  $\mathbf{v}$ 、法線方向  $\mathbf{n}$  及びハーフベクトル  $\mathbf{h} = \frac{\mathbf{l} + \mathbf{v}}{\|\mathbf{l} + \mathbf{v}\|}$  と表すとき、ピクセル  $i$  と  $j$  における BRDF  $r_i, r_j$  において次の式が成り立つと仮定する。

$$\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{h}_i > \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{h}_j \Leftrightarrow r_i > r_j \quad (1)$$

BRDF の復元に最適な領域を [7] の手法に基づいて一つずつ追加していくとき、新たに追加された領域がこ



図 3 (a) 反射率を取得するために撮影した平行光源画像のうちの一つ。(b) 復元した BRDF を用いて復元した形状をレンダリングした復元画像。

れまでに追加された領域全てと式 (1) を満たしているかを確認する。満たしていない場合は、この新たに追加された領域は信頼性が低いとみなし、満たす領域を見つけるまで選び直すという操作を行う。

- 最大の輝度値を持つ領域について

反射率復元のために取得した平行光源画像における全領域中で最も輝度の高い領域  $k$  において、法線方向  $\mathbf{n}$  及びハーフベクトル  $\mathbf{h}$  について以下の式が成り立つと仮定する。

$$\mathbf{n}_k \cdot \mathbf{h}_k = 1 \quad (2)$$

全ての平行光源画像中から最も輝度値の高いピクセルを探し出し、そのピクセルにおける法線を、式 (2) を満たすように修正し、このピクセルは完全に信頼できるものとして必ず BRDF の復元に用いる。

### 3.2 抽出後の領域における復元に最適な領域の選択

これらの仮定を用いて復元した 3 次元形状から信頼性の高い領域を抽出した後、Nielsen ら [7] の手法に基づいて、BRDF 復元に最適な光線の入射方向と出射方向を満たす領域を探し出す。

Nielsen ら [7] は Matusik ら [4] が実物体から計測した BRDF のデータベースから特異値分解を用いて BRDF の主成分を抽出し、任意の BRDF をこの主成分の足し合わせで表現した。次にこの主成分によって構成された行列から任意の計測角に対応する部分行列を作成し、この部分行列の条件数を小さくするような計測角を求めた。こうして取得した計測角を満たす領域を、BRDF の復元に最適な領域であると定義した。

本研究では、抽出した信頼性の高い領域において先の部分行列の条件数を小さくするような領域を最終的に BRDF の復元に用いる。

### 3.3 尤もらしい復元結果の選択

仮定を用いて定義した信頼性の高い領域においても、依然として多少の法線方向の誤差が存在している。そこでランダムな試行でいくつかの BRDF を推定し、その中から最良のものを選択する。

まず、定義された信頼性の高い領域からさらにランダム

に領域を抽出し、その領域内において3.2節にて説明した方法で最適なピクセルを選ぶという操作を行う。これにより、実行するたびに選ばれるピクセルは異なるピクセルになるので、復元したBRDFも異なるものとなる。この操作を複数回実行することで、信頼性の高い領域から複数の異なるBRDFを取得することが出来る。次にそれらの中から尤もらしい復元結果を選び出す。

はじめに、復元したBRDF及び復元した形状を用いて復元画像を取得する(図3(b))。この画像は、フォトグラメトリーにより推定された平行光源画像(図3(a))のカメラ位置姿勢を用いて取得したものである。次に平行光源画像と復元画像における輝度値の分布をそれぞれ取得する。この二つの分布をベクトル  $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ ,  $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$  で表し、これらにおける類似度をコサイン類似度を用いて取得する。

$$\frac{a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2} \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + \dots + b_n^2}} \quad (3)$$

このコサイン類似度は二つのベクトルのなす角のコサインを表しており、-1~1の値をとる。よって、この値が1に近いほど二つの分布は近いと言うことが出来る。ここでは、この類似度が最も高いBRDFを尤もらしい復元結果であると定義する。

#### 4. シミュレーションによる実験

提案手法の有効性を確認するために、まずシミュレーション環境での検証を行った。

##### 4.1 実験環境

BRDFの真値としては、[4]からalum-bronze, fruitwood-241, pink-fabric, blue-acrylic, pink-fabric2, green-latexの6つを用いて検証を実施した。また形状の真値としては、Stanford Bunny及びDragon(Stanford Computer Graphics Laboratory)を用いた。

BRDFの真値としてfruitwood-241, 形状の真値としてStanford Bunnyを使用したシミュレーションにおける例を示す。まず、形状復元のために環境光のある状態で多視点画像を55枚取得した。レンダリングにはpbrt[8]を用いて3000×2000の解像度で作成した。図2(a)はそのうちの1枚である。また、反射率分布を取得するために、55枚の多視点画像のうち11枚と同じカメラ視点から、単一の平行光源下で画像をレンダリングした。図2(b)はそのうちの1枚を示したものである。また、多視点画像からの3次元形状復元にはAgisoft Photoscan(Agisoft LLC, www.agisoft.com)を使用した。

##### 4.2 実験結果

図4はこれらのシミュレーションの結果を示している。左のグラフは、各シミュレーションで復元したBRDF(実

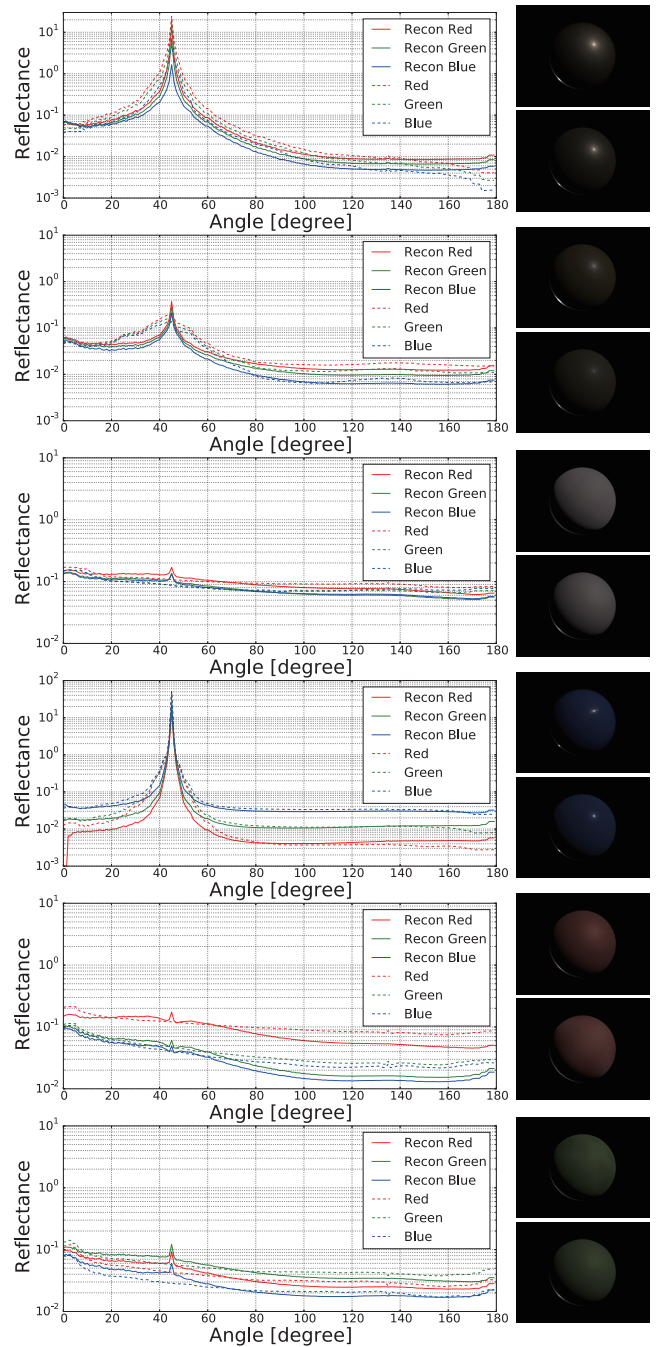


図4 グラフは、物体表面におけるある地点について光線が135度方向から入射した場合において、その光線と同一平面上で視線方向が0度から180度まで変化したときの復元した反射率の変化(実線)及び真値(点線)を表している。球の画像は、上が真値のBRDFでレンダリングしたもの、下が復元したBRDFでレンダリングしたものをそれぞれ示している。シミュレーション環境は上から順に、それぞれBRDFの真値としてalum-bronze, 形状の真値としてDragonを用いたもの、fruitwood-241, Stanford Bunnyを用いたもの、pink-fabric, Dragonを用いたもの、blue-acrylic, Stanford Bunnyを用いたもの、pink-fabric2, Dragonを用いたもの及び、green-latex, Dragonを用いたものを示している。

線)と真値(点線)を示している。これにより、非常に精度の高いBRDFが復元出来ていることが分かる。また、右



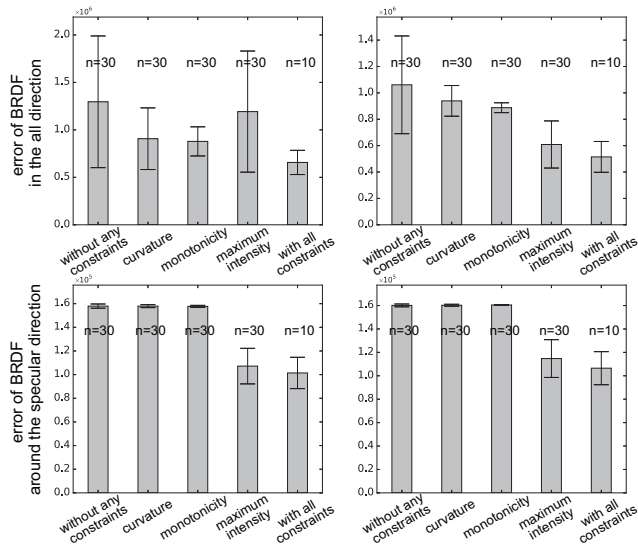


図 5 復元した BRDF と真値との間の誤差における平均及び標準偏差を示したもの。左上及び右上：全領域について BRDF の誤差を計算したもの。各棒グラフは左から順に制約条件無し，曲率についての仮定のみ，単調性についての仮定のみ，最大輝度値を持つ領域についての仮定のみ及び全仮定を用いた場合を示している。左下及び右下：同様に，鏡面反射付近の領域のみにおいて示したもの。

の球の画像は，上が真値の BRDF を用いてレンダリングしたもの，下が復元した BRDF を用いてレンダリングしたものである。これらの画像から，見た目においても真値と非常に近い BRDF が復元出来ていることが分かる。

### 4.3 各仮定における復元結果への影響の評価

ここでは，導入した各仮定がそれぞれ復元結果の向上にどれだけ寄与しているのかを検証した。

図 5 は，BRDF の真値として blue-acrylic，形状の真値として Stanford Bunny を用いた実験，及び alum-bronze，Dragon を用いた実験の検証結果を示している。上段の二つのグラフは BRDF の全領域について  $\frac{\|BRDF_{truth} - BRDF_{reconstruct}\|}{\|BRDF_{truth}\|}$  を合計したものをエラーとして表記している。二つの実験環境においてそれぞれ BRDF の復元を複数回行い，このエラーの平均及び標準偏差を示している。各棒グラフは左から順に仮定を一切用いなかった場合，曲率に関する仮定のみを用いた場合，単調性に関する仮定のみを用いた場合，最大の輝度値を持つ領域についての仮定のみを用いた場合，及び全ての仮定を用いた場合の結果をそれぞれ示している。これにより，仮定を全く用いずに BRDF を復元した場合と比べ，曲率について，単調性についての仮定を用いた場合においてそれぞれ誤差の平均及びばらつきが小さくなっていることが分かる。

また下段の二つのグラフは，見た目に大きく影響する鏡面反射成分について検証するために，正反射方向付近の誤差のみについて同様に示したものである。これにより，正

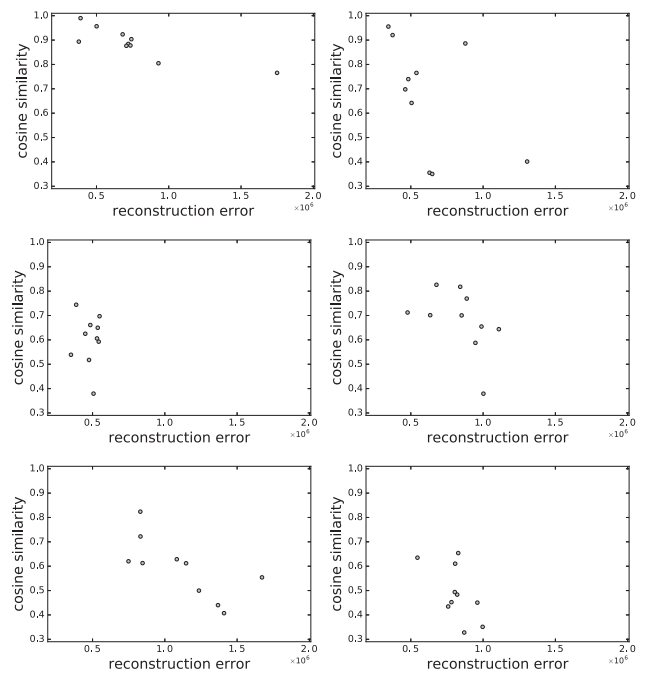


図 6 各実験について 10 回の BRDF 復元を行い，復元した各 BRDF と真値との誤差（横軸）と，復元画像と平行光源画像の輝度値の分布におけるコサイン類似度（縦軸）との関係をプロットしたもの。シミュレーション環境はそれぞれ BRDF の真値として alum-bronze，形状の真値として Dragon を用いたもの（左上），blue-acrylic，Stanford Bunny を用いたもの（右上），fruitwood-241，Stanford Bunny を用いたもの（右中央），green-latex，Dragon を用いたもの（左中央），pink-fabric，Dragon を用いたもの（右下）及び pink-fabric2，Dragon を用いたもの（左下）を示している。

反射方向付近においては，最大の輝度値を持つ領域について導入した仮定を用いた場合について誤差がかなり小さくなっていることが分かる。

これらのことから，曲率について，及び単調性について導入した仮定は BRDF における拡散反射の起こるような領域に関する誤差を減少させており，さらに，最大の輝度値を持つ領域について導入した仮定は鏡面反射の起こるような領域について誤差を減少させていることが分かる。また，全ての仮定を用いた場合においては，いずれの領域についても最も精度の高い復元を行えていることが分かる。

### 4.4 輝度値の分布と BRDF における復元誤差の関係

図 6 は各シミュレーションにおいて，3.3 節にて述べた方法を用いて 10 回の BRDF 復元を行い，各回における真値との復元誤差と輝度値の分布におけるコサイン類似度との関係をプロットしたものである。これらから，一つの実験を除いて，復元結果の中で 1~3 番目に誤差の少ない BRDF が選ばれていることが分かる。しかしながら，pink-fabric を用いた実験（図 6（右下））においては 7 番目に誤差の少ないものが選ばれてしまっている。green-latex を用いた実験（図 6（左中央））でも見られるように，角度によって値

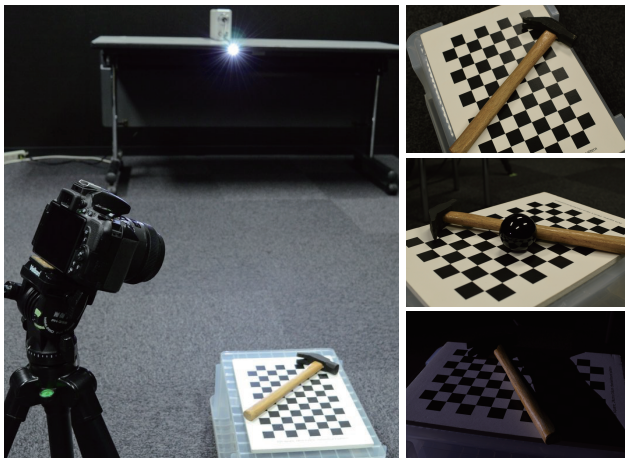


図 7 左: 実験環境. 右上: 3 次元形状復元のための多視点画像の 1 枚. 右中央: 光線方向を求めるために、黒い球と共に撮影した画像. 右下: 反射率分布を取得するための平行光源画像のうちの 1 枚.

の変化が少ない BRDF では輝度値の分布に特徴が少なくなるため、この方法があまり有効でないことが考えられる。

以上より、多くの場合において、輝度値の分布におけるコサイン類似度を見ることでさらに復元誤差を軽減できているといえる。

## 5. 実環境による実験

シミュレーションでの有用性が確認出来たので、実物体に本手法を適用した。

ここでは、ハンマーの BRDF を復元した。実験環境は図 7(左)に示されている。撮影には一眼レフカメラ (Nikon D5500) を使用し、光源には SIGMAKOKI SLA-100A を使用した。光源は対象物体に対して十分に遠方に位置しているとして、平行光源として扱った。また、光源の強さの取得には標準白色板を用いた。フォトグラメトリーのための多視点画像は、解像度  $6000 \times 4000$ 、焦点距離を固定して 73 枚撮影した (図 7 (右上))。また、平行光源画像は 8 枚撮影した (図 7 (右下))。光線方向に関しては、光沢のある黒い球を撮影することでその鏡面反射から取得した (図 7 (右中央))。この実験において、対象物体のハンマーは柄の部分と頭部の二つの単一な材質で構成されていることを仮定しており、これらの部分から個別に BRDF の復元を行った。図 8 (b) はそのために手動で作成したマスク画像である。緑の部分は平行光源によってハンマーに落ちた影の部分を示しており、これらの領域は BRDF の復元から排除した。

図 9 はハンマーの柄の部分及び頭部から復元した BRDF を用いて、異なる環境光源下 (Grace Cathedral and Eucalyptus Grove, [2], ©1998, 1999 Paul Debevec) においてレンダリングしたものである。これらの画像から、尤もらしい BRDF が復元されていることが分かる。

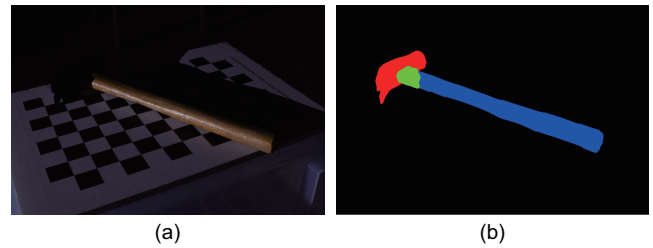


図 8 (a) 平行光源画像. (b) ハンマーの頭部、柄の部分及び影の部分を分けるために手動で作成したマスク画像.



図 9 ハンマーの柄の部分及び頭部からそれぞれ復元した BRDF を用いて、異なる光源環境下でレンダリングしたもの.



図 10 左: 多視点画像の 1 枚. 中央及び右: 復元した BRDF を用いて、異なる環境光源下でレンダリングしたもの.

次に、屋外の実物体に対しても本手法を適用した。図 10 (左) は多視点画像の 1 枚を示している。屋外での場合は光源は太陽であり、その方向は撮影した場所及び時刻から取得した。屋外では光源は太陽光のみであると仮定できるため、多視点画像と平行光源画像は同じものを使用した。また、この実験ではポールを中央の金属の部分及びその他の部分に分けて BRDF の復元を行った。図 10 (中央及び右) は復元した BRDF を用いて異なる環境光源下でレンダリングしたものである。これらの画像における鏡面反射や色味から、本手法は屋外においても尤もらしい復元結果を得ることができていると分かる。フォトグラメトリーは屋外の物体に対して適用される場合も多いため、このことは十分な実用性を示していると言える。

## 6. 結論と考察

本研究では、フォトグラメトリーとの適合性の高い、簡易で実用的な実物体の BRDF 復元手法を提案した。本手法ではフォトグラメトリーに用いる多視点画像に加え、反射率分布を取得するための平行光源画像を数枚使用することで尤もらしい BRDF の復元を達成した。本手法にお

る主な貢献は、復元した形状に関して、法線方向について信頼性の高い領域を定義するために3つの制約条件を導入したことであり、実験結果により本手法の有効性が示されている。

現段階における本手法の制限として、多様なBRDFで構成された物体に対して有効でないという点が挙げられる。例えばハンマーにおける実験では頭部と柄の部分はそれぞれ単一の材質で出来ているとして、手動のマスク画像を用いてそれぞれの部分から一つのBRDFのみを復元した。しかしながら、実物体は一般的に複数のBRDFから構成されており、手動のマスク画像を作成するのは実用面において改善の余地があると言える。

今後の展望としては、上で述べたように物体のテクスチャを考慮することでSVBRDFに対応し、さらにリアルな見た目の復元が可能になることを目標としている。また、復元したBRDFを元に復元形状における法線方向を修正するなど、物体の形状及びBRDFの同時推定にも適用していきたい。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP15K16027, JP26700013, JP15H05918 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] Chandraker, M., Reddy, D., Wang, Y. and Ramamoorthi, R.: What Object Motion Reveals about Shape with Unknown BRDF and Lighting, *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2523–2530 (online), DOI: 10.1109/CVPR.2013.326 (2013).
- [2] Debevec, P.: Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography, *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '98*, New York, NY, USA, ACM, pp. 189–198 (online), DOI: 10.1145/280814.280864 (1998).
- [3] Higo, T., Matsushita, Y. and Ikeuchi, K.: Consensus photometric stereo, *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1157–1164 (online), DOI: 10.1109/CVPR.2010.5540084 (2010).
- [4] Matusik, W., Pfister, H., Brand, M. and McMillan, L.: Efficient Isotropic BRDF Measurement, *Proceedings of the 14th Eurographics Workshop on Rendering, EGRW '03*, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, Eurographics Association, pp. 241–247 (online), available from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=882404.882439> (2003).
- [5] Miyashita, L., Watanabe, Y. and Ishikawa, M.: Rapid SVBRDF Measurement by Algebraic Solution Based on Adaptive Illumination, *2014 2nd International Conference on 3D Vision*, Vol. 1, pp. 232–239 (online), DOI: 10.1109/3DV.2014.41 (2014).
- [6] Müller, G., Bendels, G. H. and Klein, R.: Rapid Synchronous Acquisition of Geometry and Appearance of Cultural Heritage Artefacts, *Proceedings of the 6th International Conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*,

- VAST'05, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, Eurographics Association, pp. 13–20 (online), DOI: 10.2312/VAST/VAST05/013-020 (2005).
- [7] Nielsen, J. B., Jensen, H. W. and Ramamoorthi, R.: On Optimal, Minimal BRDF Sampling for Reflectance Acquisition, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 6, pp. 186:1–186:11 (online), DOI: 10.1145/2816795.2818085 (2015).
- [8] Pharr, M. and Humphreys, G.: *Physically Based Rendering, Second Edition: From Theory To Implementation*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2nd edition (2010).
- [9] Ullman, S.: The Interpretation of Structure From Motion, Vol. 203, pp. 405–26 (1979).
- [10] Vergne, R., Pacanowski, R., Barla, P., Granier, X. and Schlick, C.: Light Warping for Enhanced Surface Depiction, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 3, pp. 25:1–25:8 (online), DOI: 10.1145/1531326.1531331 (2009).