

肥後智昭, 宮崎大輔, 池内克史,
"多視点フォトメトリックステレオを用いた全体形状と反射パラメータの同時推定,"
三次元映像のフォーラム,
2007.6

多視点フォトメトリックステレオを用いた 全体形状と反射パラメータの同時推定

肥後 智昭: 東京大学大学院情報理工学系研究科

宮崎 大輔: 東京大学生産技術研究所

池内 克史: 東京大学情報学環

Abstract

We present a new method for estimating reflection parameters and refining whole shape using multi-view photometric stereo. This technique is simple to implement and has a low computational cost. First, we prepare for rough geometric data and color images taken from multiple viewpoints and under different light source directions. This is easily accomplished by using a simple camera with flash. Second, we apply normal maps to the geometric data, which makes it possible to reduce the amount of data. Then, we refine the normal maps and estimate diffuse reflection parameters based on photometric stereo with choosing three optimal images in each normal. Finally, we estimate specular reflection parameters of Torrance-Sparrow model from the refined normal maps and color images.

1 はじめに

視覚的に現実感の高い画像を生成することは、コンピュータビジョン (CV) やコンピュータグラフィックス (CG) の分野において、重要な課題の一つである。その中でも近年、文化財の保存や鑑賞のための新たな方法としてデジタルアーカイブが注目されてきている [1][5]。現実の物体をコンピュータの中でモデル化し画像として表示するためには、物体の幾何形状、反射特性、物体が置かれている環境における光源の配置などを与えてやる必要がある。さらにデジタルアーカイブなどの目的のために生成される画像は、リアリティを追求し細部までできる限り正確に表現されることが望ましい。しかしながら、生成される画像を細部まで再現しようとすればするほど、先にあげた幾何形状、反射特性、光源環境などの物体の見え方に関するモデルを手作業で準備することが困難になってくる。

このような背景から、CV の分野では現実中存在する

物体を観察することによって、その物体の見え方に関するモデルを自動的に獲得するための研究の必要性が高まってきている。これらの技術は CG における描画 (レンダリング) の逆問題という意味においてインバースレンダリング (inverse rendering) と呼ばれ、実物体やその周辺の環境を撮影した画像をもとにして、物体の形状、反射特性、環境の光源分布などの推定を行う。

反射特性として光の反射モデルに基づいて物体表面の反射を数学的に定式化し、物体表面における反射パラメータを推定することを考える。幾何形状はレンジセンサによって取得した距離画像から、ポリゴンメッシュモデルを作成し、光源環境は既知であるとする。

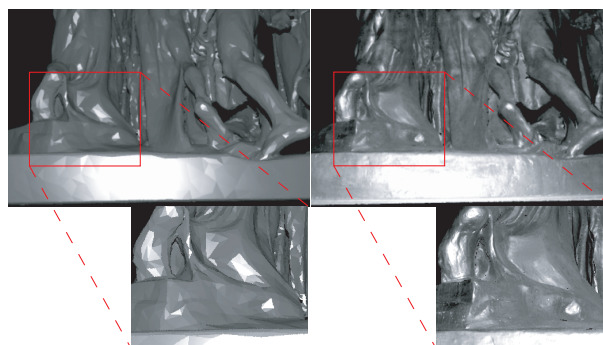


図 1: 左: レンダリング画像, 右: 実画像

図 1 に推定した反射パラメータでレンダリングした画像 (左) とカメラで撮影した画像 (右) を示す。両者を比較すると、全体的な色や鏡面反射の位置など大まかには再現できている。しかしながら細かく見ていくと、滑らかな曲面であるはずの部分に三角メッシュの平面や角の形が残っていたり、鏡面反射部分の明るさが異なる箇所など、違いも見受けられる。このような違いの原因として考えられるのは、レンジセンサで得られた幾何形状の精度や誤差である。

そこで、本稿ではレンジセンサなどで得られた幾何形状データの精度を向上させるとともに、精度良く求めた幾何形状から反射パラメータを求める方法について提案する。形状の修正には法線マップを用いる。法

線マップは Photometric stereo の原理を応用して物体を撮影したカラー画像から修正を行う。また提案手法を用いてシミュレーション実験を行った。

章立ては以下の通りである。次の章では関連研究について紹介する。第 3 章では本手法で用いる反射モデルとして、拡散反射については一般的な Lambertian モデル、鏡面反射については Phong モデルよりも複雑な Torrance-Sparrow モデルについて説明する。第 4 章では法線マップの説明をし、第 5 章では提案手法として法線マップの修正および反射パラメータの推定方法について述べる。そして第 6 章では提案手法によるシミュレーション実験とその結果を示し、最後の章でまとめと今後の展望について述べる。

2 関連研究

反射特性を推定する手法に関しては、池内ら [2] をはじめとしてこれまでに多くの研究が発表されてきた。しかしながら、図 1 で見たように物体の見えのリアリティを高めるためには、反射パラメータだけでなく、幾何形状を十分に精度良く求める必要がある。そこで本稿では特に幾何形状を精度よく求めるとともに反射特性を推定する研究の例として佐藤 [8]、Rushmeier[6]、Lensch[3]、Yu[11] などの手法について紹介する。

佐藤 [8] はレンジセンサとカメラを用いてポリゴンメッシュモデルと画像を取得し、三角メッシュを細かく分けてその中の法線を距離画像から得られた 3 次元点の集合から求めた。また反射パラメータの推定の際には、鏡面反射が観測されない部分を補間によって求めた。

Rushmeier[6] は固定視点のもとで Photometric stereo を用いて法線方向と反射パラメータを推定した。輝度値の値の大きさによって shadow と鏡面反射を取り除き信頼できるデータのみを使用して推定を行った。

Lensch[3] は対象物体の近くに鏡面球を配置して撮影した入力画像から光源方向を推定するとともに、画像とレンジセンサで得られた幾何形状を用いて非線形最適化とクラスタリングを行うことによって BRDF を計算した。さらにポリゴンメッシュモデルに対して法線マップを適用し、得られた BRDF を用いて、非線形最適化によって法線マップの修正を行い見えの形状をより正確に表現した。

Yu[11] は Visual hull によって得られた幾何形状に対して、反射パラメータと形状を交互に繰り返し推定を行い、非線形最適化問題を Trust Region Reflective Newton(TRRN) 法を用いて解いた。さらに形状の精度を上げるために三角メッシュを再分割して行き、Richardson Extrapolation を用いることで分割の収束値を求め、推定を行った。

本稿では [3] と同様に法線マップを修正することで見えの形状を修正するが、非線形最適化問題を解くのではなく、画像列の中から法線を修正するのに最適な画像の組み合わせをうまく選び出し、多視点の Photometric stereo を用いることによって、代数的に法線と反射パラメータを求める。最適な組み合わせを選ぶことで推定の精度の向上を図るとともに、代数的に解くことによって大規模なデータであっても現実的な計算時間で計算を行う。また多視点の Photometric stereo を用いるため、物体全体の形状を修正することが可能である。

3 反射モデル

3.1 Lambertian モデル

拡散反射モデルとして以下の Lambertian モデルを用いる。

$$I_{D,C} = K_{D,C} \cos \theta_i = K_{D,C} \mathbf{L} \cdot \mathbf{N} \quad (1)$$

ここで、 $I_{D,C}$ ($C = R, G, B$) 拡散反射成分の放射輝度、 $K_{D,C}$ は拡散反射成分の反射率、 θ_i 物体表面の法線 \mathbf{N} と光源方向 \mathbf{L} のなす角である。また \mathbf{N} と \mathbf{L} はどちらも単位ベクトルである。ただし $I_{D,C}$ は光源の放射輝度の影響を考慮したものであり、本稿ではこれ以降もこの形式で記述する。

これらのうち拡散反射のパラメータとして推定すべきものは $K_{D,R}, K_{D,G}, K_{D,B}$ の三つである。推定方法については 5.2 節で示す。

3.2 Torrance-Sparrow モデル

鏡面反射を表すための数式モデルの代表的なものとして Torrance-Sparrow モデル [10] がある。このモデルには反射パラメータや幾何学的要因による光の減衰に関するパラメータも入っている。Torrance-Sparrow モデルは式 (2) で表される。

$$\begin{aligned} I_{S,C} &= \frac{K_{S,C}}{\cos \theta_r} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \\ &= \frac{K_{S,C}}{\mathbf{V} \cdot \mathbf{N}} \exp\left(-\frac{\{\arccos(\mathbf{H} \cdot \mathbf{N})\}^2}{2\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $I_{S,C}$ ($C = R, G, B$) は鏡面反射成分の放射輝度、 $K_{S,C}$ は鏡面反射成分の反射率、 σ は物体表面の粗さを表すパラメータ、 θ_i は法線 \mathbf{N} と光源方向 \mathbf{L} のなす角、 θ_r は法線 \mathbf{N} と視線方向 \mathbf{V} のなす角、 α は光源方向 \mathbf{L} と視線方向 \mathbf{V} のなす角を二等分するベクトル \mathbf{H} と法線 \mathbf{N} のなす角を表す (図 2)。

これらのうち鏡面反射のパラメータとして推定すべきものは $K_{S,R}, K_{S,G}, K_{S,B}, \sigma$ の四つである。これらの推定方法については 5.3 節で示す。

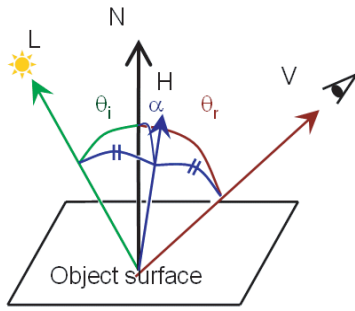


図 2: Torrance-Sparrow モデル

式 (1)(2) より物体の反射光 I_C は以下のように表せる .

$$\begin{aligned}
 I_C &= I_{D,C} + I_{S,C} \\
 &= K_{D,C} \cos \theta_i + \frac{K_{S,C}}{\cos \theta_r} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)
 \end{aligned}$$

また反射パラメータの推定では $K_{D,C}$, $K_{S,C}$, σ を求めることになる .

4 幾何モデル

4.1 法線マップ

本稿では幾何モデルとして, あらかじめレンジセンサや Visual hull などを用いて取得したポリゴンメッシュモデルをベースとし, 三角メッシュの平面それぞれに対して, 法線マップを適用したものをを用いる .

ここでは, ポリゴンの三角メッシュを分割し, 分割された領域それぞれに対してテクスチャのように法線ベクトルを貼り付けたものを法線マップと呼ぶ (図 3) .

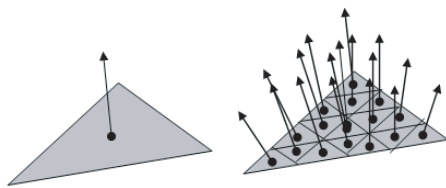


図 3: 法線マップ

左: 三角メッシュ上の法線, 右: 法線マップ適用

3章で見たように物体の見えは, 物体表面の法線ベクトルに大きく依存する . つまり形状そのものを変化させずともポリゴン表面の法線を変化させるだけで, 十分に物体の見えを良くすることができる . そのため法線マップは, 高解像度で取得した形状データから法線マップを作成して, 低解像度のポリゴンメッシュモデルに適用することで, 見た目の形状を改善することを目的として用いられることが多い .

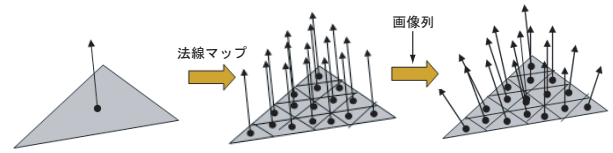


図 4: 法線マップの適用とその修正

本稿では図 4 に示すように, まず既知の形状データの三角メッシュ上に法線マップを配置する . 法線の初期値としてはその面の法線ベクトルを用いる . そして物体を撮影した画像列から Photometric stereo の原理を用いて法線マップの修正を行う . これにより Visual hull などで作成されたポリゴンメッシュデータの見た目の形状を改善したり, レンジセンサでは計測しきれない細かい凹凸を表現することができる .

5 提案手法

5.1 入出力

入力として, 以下のものを与える .

- ポリゴンメッシュの幾何形状データ
- 点光源の位置
- カメラパラメータ
- カメラで撮影した画像列

また本提案手法では物体表面の反射パラメータは位置によらず均一であると仮定する . 複数色やテクスチャのある物体を扱うには, あらかじめ物体色ごとにクラスタリングすることによって実現できると考えられる .

一方出力は, 修正された法線マップおよび推定された反射パラメータ ($K_{D,C}$, $K_{S,C}$, σ) である .

法線の修正には Photometric stereo の原理を用いる . Photometric stereo では, 固定視点のもとで光源位置を変えて撮影した画像が必要となるが, 本手法では, 幾何形状とカメラパラメータを入力として与えるため, 視点を自由に变化させて多視点による Photometric stereo を行うことができる . 従来の固定視点による Photometric stereo では見えている部分の形状復元しか行えない . さらに対象物体の境界付近では形状を復元するのに十分な情報量が得られないため, 境界付近の誤差が大きくなってしまふなどの問題がある . しかしながら本手法では多視点による Photometric stereo によって, これらの問題を解決することができる .

また光源は点光源であるとし, 相互反射については考慮しないものとする . 上述したように, 本手法では視点の位置を自由に与えることができるため, フラッシュ

つきのカメラで普通に撮影を行うといった非常に簡単な計測方法だけで必要な画像列が得られる。回転台の上に載せて計測したり [7], 光源とカメラの光軸を一致させて計測する [4] 必要がないため, 大規模な物体や屋外にも対応することができる。フラッシュ以外の他の光源が存在する場合は, フラッシュあり・なしで撮影を行い, それらの差分をとることによって, フラッシュだけの影響による画像を生成することができる。さらに光源としてカメラに固定のフラッシュを用いた場合の利点としては, 視点と光源を同時にかつ手軽に変化させることができること, 視点位置から光源位置を決定できること, attached shadow や cast shadow が観測されにくいこと, 入力画像から Photometric stereo を行う際により多くの輝度情報を利用できることなどがあげられる。ただし点光源の位置が既知であれば, 自由に動かせる点光源を用いて本手法を行うことも可能である。

カメラパラメータについては, 撮影した画像と形状データを用いてキャリブレーションによって求める。

次の節では法線マップの修正と反射パラメータの推定を行うための具体的なアルゴリズムについて説明を行う。

5.2 拡散反射パラメータと法線ベクトルの推定

ここでは画像列の輝度情報から拡散反射パラメータと法線ベクトルを代数的に求める方法について述べる。

ある法線に関して, 鏡面反射成分の含まれない拡散反射だけの部分を考えると, 反射光 I_C は

$$I_C = K_{D,C} \mathbf{L} \cdot \mathbf{N} \quad (4)$$

で表される。さらに法線 \mathbf{N} は単位ベクトルであるから, その自由度は 2 となる。ここで求めるべき未知数は $K_{D,C}$ と \mathbf{N} (自由度 2) の 3 つであるから, 一つの法線に対して 3 方向から撮影した画像があれば $K_{D,C}$ と \mathbf{N} を代数的に求めることができる。

具体的には, 画像列の中から適当な 3 枚の画像の組み合わせを選び出し,

$$I_{1,C} = K_{D,C} \mathbf{L}_1 \cdot \mathbf{N} \quad (5)$$

$$I_{2,C} = K_{D,C} \mathbf{L}_2 \cdot \mathbf{N} \quad (6)$$

$$I_{3,C} = K_{D,C} \mathbf{L}_3 \cdot \mathbf{N} \quad (7)$$

の 3 式から, まず $K_{D,C}$ を消去すると,

$$(I_{1,C} \mathbf{L}_2 - I_{2,C} \mathbf{L}_1) \cdot \mathbf{N} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{N} = 0 \quad (8)$$

$$(I_{2,C} \mathbf{L}_3 - I_{3,C} \mathbf{L}_2) \cdot \mathbf{N} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{N} = 0 \quad (9)$$

となる。ただし, $\mathbf{A} = (A_x, A_y, A_z) = (I_{1,C} \mathbf{L}_2 - I_{2,C} \mathbf{L}_1)$ とした (\mathbf{B} についても同様)。これら 2 式を用

いて法線の x 成分 n_x および y 成分 n_y を, z 成分 n_z を用いて表すと以下のように求められる。

$$n_x = \frac{A_y B_z - A_z B_y}{A_x B_y - A_y B_x} n_z = \mu n_z \quad (10)$$

$$n_y = \frac{A_z B_x - A_x B_z}{A_x B_y - A_y B_x} n_z = \nu n_z \quad (11)$$

ただし表記簡略のため $\mu = \frac{A_y B_z - A_z B_y}{A_x B_y - A_y B_x}$ とした (ν についても同様)。ここで法線 \mathbf{N} は単位ベクトルであることから

$$n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = (\mu^2 + \nu^2 + 1) n_z^2 = 1 \quad (12)$$

$$n_z = \pm \sqrt{\frac{1}{\mu^2 + \nu^2 + 1}} \quad (13)$$

となり, 法線の成分が求まるが, 正負の曖昧性が残る。これに関しては式 (5) などから

$$\begin{aligned} K_{D,C} &= \frac{I_{1,C}}{\mathbf{L}_1 \cdot \mathbf{N}} \\ &= \frac{I_{1,C}}{l_x n_x + l_y n_y + l_z n_z} = \frac{I_{1,C}}{(l_x \mu + l_y \nu + l_z) n_z} \end{aligned} \quad (14)$$

として, $K_{D,C}, I_{1,C}$ がともに正の値であることにより, n_z の符号を決定する。

この手法では初めに注目している法線に関して, 鏡面反射成分の含まれない拡散反射からなる 3 枚の画像の組み合わせを選ぶ必要があるが, 一般に鏡面反射成分が含まれているかどうかを見分けることは難しい。しかしながら本手法では式 (14) により求めた $K_{D,C}$ の値を評価することによって鏡面反射成分の有無を見分けることができる。

鏡面反射成分が含まれている場合, 式 (4) によってモデル化すると, I_C の値が鏡面反射成分が含まれない場合よりもずっと大きくなる。その結果式 (14) で求めた $K_{D,C}$ の値も非常に大きな値となってしまう。

そこで本手法では以下のようなアルゴリズムによって $K_{D,C}$ の値を推定し, 法線を修正するための最適な 3 枚の画像の組み合わせを選ぶ。

1. ある適当な数の法線をサンプルとして選び出し、画像列から 3 枚の全組み合わせに対して $K_{D,C}$ の値を求める
2. $K_{D,C}$ の値が閾値を超える場合は除外し、残りの値で投票を行い、おおよその推定値を求める
3. さらに多くの数の法線をサンプルとして選び出し、同様に 3 枚の全組み合わせに対して $K_{D,C}$ の値を求める
4. おおよその推定値に近い値をピックアップし、それらの平均値を $K_{D,C}$ の推定値とする
5. 全ての法線に対して、3 枚の全組み合わせにおける $K_{D,C}$ の値を求める
6. その中でもっとも $K_{D,C}$ の推定値に近い 3 枚の組み合わせを、その法線を求める最適な組み合わせとする

このようなアルゴリズムによって、法線ごとに最適な画像の組み合わせを選んで修正を行う。

5.3 鏡面反射パラメータの推定

5.2 によって $K_{D,C}$ と法線マップが求まった。よって鏡面反射成分の放射輝度 $I_{S,C}$ は以下のように求めることができる。

$$I_{S,C} = I_C - I_{D,C} = \frac{K_{S,C}}{\cos \theta_r} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \quad (15)$$

式(15)の対数を取り、 $X = \frac{\alpha^2}{2}$ 、 $Y = \ln I_{S,C} + \ln(\cos \theta_r)$ とおくと、

$$Y = -\frac{1}{\sigma^2}X + \ln K_{S,C} \quad (16)$$

となり、鏡面反射成分を表す式は XY 平面上で直線の式を表すことになる。ここで (X, Y) の値は入力から求めることができるので、たくさんの (X, Y) の組を XY 平面上にプロットし直線近似を行う。そしてこの直線の切片と傾きの値から $K_{S,C}$ と σ の値を求める。

本手法では法線ベクトルを修正するだけで物体表面の位置は変化しない。そのため視線方向ベクトルや光源方向ベクトルについては実際の形状との差異によって多少の誤差が生じ、その結果 (X, Y) のプロットは完全な直線から少し広がりを持った分布となる。そこで外れ値により反射パラメータの推定結果が悪い影響を受けないように直線近似には M 推定を用いる。

6 実験

前章で示した提案手法を用いて、シミュレーション実験を行った。この章ではそのシミュレーション実験

の概要と結果を示す。

対象物体を球とする。光源はカメラに固定のフラッシュのみであるとし、様々な視線、光源方向から球を撮影した画像を入力として用いる。入力の幾何形状としては、三角メッシュ320個からなる geodesicsphere を用いて(図5左)、この各メッシュに対して1600本の法線を法線マップとして貼り付けた。

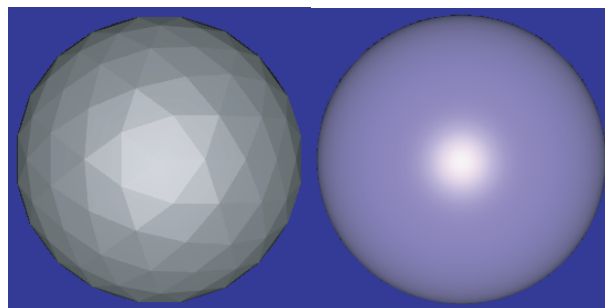


図 5: 左: geodesicsphere, 右: 入力画像のうちの 1 枚

入力画像は 25 枚とし、反射パラメータの推定および法線マップの修正を行った結果を図6および図7、表1に示す。

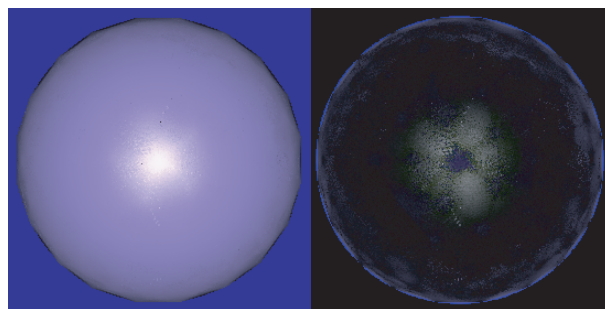


図 6: 左: 推定結果のレンダリング画像, 右: 真値との誤差

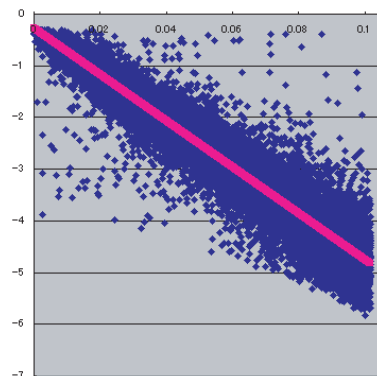


図 7: $K_{S,C}$ と σ の推定直線

反射パラメータについてはほとんどのパラメータで誤差率が1%前後となっており、ほぼ正確に推定ができ

	推定値	真値	誤差率 (%)
$K_{D,R}$	0.3034	0.3	1.13
$K_{D,G}$	0.2021	0.2	1.05
$K_{D,B}$	0.6071	0.6	1.18
$K_{S,R}$	0.7606	0.75	1.41
$K_{S,G}$	0.7037	0.7	0.52
$K_{S,B}$	0.8399	0.8	4.99
σ	0.1495	0.15	0.33

表 1: 推定された反射パラメータ

ている．また三角メッシュの平面や角は，法線の修正によって曲面を表現できている．

レンダリング画像と真値とを比較した図 6 右において，球の縁の部分と中心付近の鏡面反射の部分に誤差が見られるが，縁の部分の誤差は元の形状が真値の球よりも一回り小さいために生じた誤差である．中心付近の誤差に関しては，物体表面の位置が真値とは異なるために生じた視線方向ベクトルや光源方向ベクトルのわずかな違いによるものだと考えられる．

計算時間については，上記の球を扱った例では入力を与えて出力結果を求めるまでに 1 分前後の時間を要した．高速に計算できる理由としては，本手法が形状と反射パラメータを求める際に代数的に計算を行うため，最適化などの交互に繰り返し計算をする必要がない点が挙げられる．また法線の修正に関しては，それぞれの法線を独立に計算することができるため，処理を並列化することでさらに高速に計算を行うことも可能である．

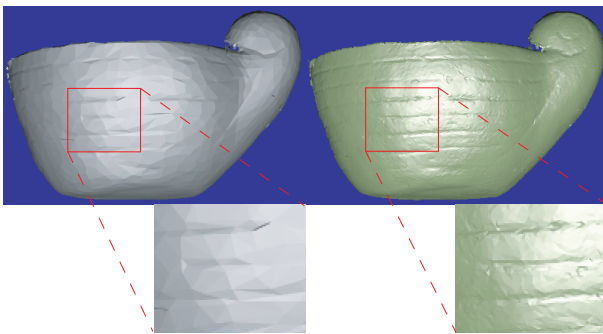


図 8: 左：初期データ，右：入力画像のうちの 1 枚

次にシミュレーション実験として凹凸のある器を扱った結果を示す．図 8 に入力の幾何データと入力画像列のうちの一枚を示す．また提案手法によって求めた反射パラメータと修正された法線マップを用いて，入力に用いたものとは異なる視点位置から見たときのレンダリング画像と真値との比較を図 9 に示す．入力の幾何データでは器の様子がほとんど表現されていなかったが，提案手法を用いて法線マップの修正を行うこと

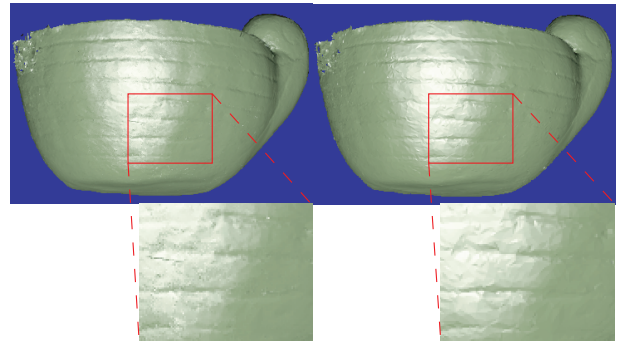


図 9: 左：レンダリング画像，右：Ground Truth

で，より精密な凹凸まで表現することができている．拡大した画像からも形状，反射パラメータが精度良く求まっていることがわかる．

これらの結果から法線マップを修正し反射パラメータを推定する本手法の有効性が示された．

7 むすび

本稿では形状と反射パラメータを推定することによって写実的なレンダリングを行う方法について提案した．この手法では，形状そのものを修正するのではなく，法線マップを修正することによって，簡易ながら非常に効果的な結果が得られる．また入力として粗い形状データを与えることによって，多視点の Photometric stereo を行い，物体全体の形状を修正できる．さらに修正した形状データにおいて反射パラメータを推定した．シミュレーション実験によって提案手法の有効性が示された．

本稿では物体の反射パラメータを均一であるとしたが，今後複数色やテクスチャのある物体にも対応できるようにしていきたい．また，実物体に対して提案手法の評価実験を行うことを考えている．特に大規模な建造物などにおいて，計測時間やデータ処理の都合上レンジセンサでは全体を粗い形状データでしか取得しない場合に，本手法の効果が期待できるだろう．

参考文献

- [1] K.Ikeuchi, K.Hasegawa, A.Nakazawa, J.Takamatsu, T.Oishi and T.Masuda, “Bayon Digital Archival Project,” *Proceedings of the 10th international Conference of Virtual System and Multimedia*, pp.334-343, November 2004
- [2] K.Ikeuchi and K.Sato, “Determining reflectance properties of an object using range and brightness images,” *IEEE Transactions on Pat-*

tern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13,
No.11, pp.1139-1153, November 1991

- [3] H.P.A.Lensch, J.Kautz, M.Goesele, W.Heidrich, and H.-P.Seidel, "Image-Based Reconstruction of Spatial Appearance and Geometric Detail," *ACM Trans. on Graphics*, Vol.22 No.2 pp.234-257, April 2003
- [4] J.Lu, J.Little, "Reflectance Function Estimation and Shape Recovery from Image Sequence of a Rotating Object," *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, pp.80-86, June 1995
- [5] D.Miyazaki, M.Kamakura, T.Higo, K.Ikeuchi, and M.Aoyagi, "3D Digital Archive of the Burghers of Calais," *12th International Conference of Virtual Systems and Multimedia*, LNCS 4270, pp.399-407, 2006
- [6] H.Rushmeier, G.Taubin, and A.Guézic, "Applying Shape from Lighting Variation to Bump Map Capture," *In 8th Eurographics Workshop on Rendering Workshop*, pp.35-44, 1997
- [7] H.Saito, K.Omata, S.Ozawa, "Recovery of shape and surface reflectance of specular object from relative rotation of light source," *Image and Vision Computing*, Vol.21, No.9, pp.777-787, September 2003
- [8] Y.Sato, M.D.Wheeler, K.Ikeuchi, "Object Shape and Reflectance Modeling from Observation," *Proc. ACM SIGGRAPH '97*, pp. 379-387 1997
- [9] S.A.Shafer, "Using color to separate reflection components," in *COLOR Research and Application*, Vol.10, No.4, pp.210-218, 1985
- [10] K.E.Torrance and E.M.Sparrow, "Theory for off-specular reflection from roughened surface," in *Journal of Optical Society of America*, Vol.57, pp.1105-1114, 1967
- [11] T.Yu, N.Xu, N.Ahuja, "Recovering Shape and Reflectance Model of Non-lambertian Objects from Multiple Views", *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, No.2, pp.226-233, 2004