

## 照明条件の異なる画像からの光源方向と反射率の同時推定

立川 雄大† 日浦 慎作† 佐藤 宏介†

†大阪大学 大学院基礎工学研究科

560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

Tel +81-6-6850-6372 tachikawa@sys.es.osaka-u.ac.jp

あらまし: 本稿では照明条件の異なる 2 枚の画像から, 画像撮影時の光源方向と物体表面の反射率分布を同時に推定する手法を提案する. 提案手法では対象物体の幾何学的形状が既知であるという前提のもと, 2 枚のテクスチャ画像が物体表面上で重なる部分の 6 点以上について光源方位・拡散反射率と法線方向の間に成立する条件を用いることで, 光源方位と各点の反射率を同時推定する. シミュレーション実験といくつかの実物体での実験の結果, 相互反射などが起こらない理想的な拡散反射面ならば反射率の推定が可能あることが確認できた.

キーワード インバースレンダリング, 光源推定, 反射特性推定

## Simultaneous Estimation of Light Direction and Reflectance from multiple images under different light condition

Takehiro TACHIKAWA† Shinsaku HIURA† Kosuke SATO†

†Graduate School of Engineering Science, Osaka University

1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

Tel +81-6-6850-6372 tachikawa@sys.es.osaka-u.ac.jp

**Abstract** In this paper, we propose a technique for determining the light direction and reflectance property from two or more images with different light condition. In our technique, It is assumed that the shape of target object is given. Using the relationships between light direction and diffuse reflectance for more than six points on two textures, we prove that we can estimate both light direction and reflectance simultaneously. The good nature of our method in terms of tensibility and stability is shown in experimental results with both simulation data and real images.

**Keywords:** inverse rendering, light direction, reflectance

### 1 はじめに

近年 3 次元情報を管理・提示する計算機システムは様々な分野において利用されている. 例えば劣化や損傷が進む歴史的な文化財を記録し保存するデジタルアーカイブは盛んに行われている. 中でも 3 次元形状は 3 次元情報を提示するうえで必要不可欠な情報であるが, 形状情報だけではリアルな画像を再現し提示することは困難である. 物体には固有の反射特性があり, それを基に光の反射をシミュレートすることでリアリティのある画像を再現し提示できる.

実物体の 3 次元形状はレンジファインダ等で詳細に取得することができるが, それに対し反射特性を取得することは困難である. 反射特性を定義するため, 対象の写

真をそのままテクスチャとすることがよくあるが, 複数の写真をつなぎ合わせると撮影時の光源環境に起因してテクスチャの陰影や, テクスチャ接合部の境界が現れてしまうという問題が起こる.

反射特性を推定する研究は多く行われている. 池内らは, 物体表面が均一の反射特性を持つ場合について, 一組の距離画像と濃淡画像から Torrance-Sparrow(TS) 反射モデルのパラメタを推定している. また, 物体表面の反射モデルパラメタに加え, 単光源の方向も同時に推定している点の特徴となっている [1]. 大槻らは, 既知の場所に設置した単光源下において物体を回転させながら取得した形状情報とカラー画像列をもとに, 物体表面各点に対して簡略化した Cook-Torrance 反射モデルのパラメタを推定している [2]. 佐藤らは鏡面反射光が光

源と同一色となることを利用して拡散反射成分と鏡面反射成分を分離した後、拡散反射成分の色に基づき物体表面を領域分割し、各領域内で均一の鏡面反射特性を仮定することで物体表面全体でTS反射モデルのパラメタを推定する手法を提案している [3]。西野らは、単一光源下での撮影画像を仮定した従来法に対し、いくつかの光源が存在する場合でも対応できる手法を提案した [4]。彼らの手法では異なる方向から反射光を観察した場合に鏡面反射成分の強度のみが変動するというに基づいて反射成分を分離している。高橋らは、偏光光源下で物体を偏光板を通して撮影することにより、表面反射成分と内部反射成分を分離できることを利用し、TS反射モデルのパラメタを決定する手法を提案している [5]。

デジタルアーカイブなど実際の計測の場合、形状はレンジファインダ等で計測されるが、光源分布は未知である場合が多い。よって、光源分布が未知の条件の下で反射特性を求める必要がある。上記先行研究の中で光源分布が未知の条件で反射特性の推定が行えるのは、池内らと西野らの研究である。しかし池内らの手法は反射特性が均一と仮定しており、反射率分布の取得はできない。また、西野らの手法ではTS反射モデルの鏡面反射成分を用いて光源推定を行っているため、Lambert面では光源推定ができない。

本稿では、Lambert面をもつ物体を対象とし、対象物体の幾何学的形状が既知であるという前提のもと、2枚のテクスチャが物体表面上で重なる部分について光源方位・拡散反射率と法線方向の間に成立する条件を6点以上について用いることで、光源方位と各点の反射率を同時推定する。通常3枚以上の画像を要する photometric stereo やその派生による手法とは異なり、2枚の画像から推定を行える点が特徴である。

## 2 光源・反射率の同時推定

本稿では、計測環境として以下のものを仮定する。

- 計測対象の形状は既知である
- 光源は単一の平行光源とする
- 反射特性は Lambert 反射モデルに従う
- 相互反射は存在しないものとする
- 影は取り除き、テクスチャとして利用しない

### 2.1 2枚の画像間で成立する条件

点Pの法線ベクトルを  $N_p$ 、光源ベクトルを  $L$ 、点P表面の放射輝度を  $I_p$  とすると、Lambert 反射モデルの式は

$$I_p = \rho_p N_p \cdot L \quad (1)$$

と表すことができる。

ここで、同じ対象を撮った2枚の画像(画像1, 画像2)のどちらにも含まれている場合について考える。このとき、 $I_{1p}$ ,  $I_{2p}$ をそれぞれ画像1, 画像2上での点Pの明るさ、 $L_1$ ,  $L_2$ をそれぞれ画像1, 画像2撮影時の光源ベクトルとすると、

$$I_{1p} = \rho_p N_p \cdot L_1 \quad (2)$$

$$I_{2p} = \rho_p N_p \cdot L_2 \quad (3)$$

と表せる。さらに

$$L_1 = [L_{1x} \ L_{1y} \ L_{1z}]^T$$

$$L_2 = [L_{2x} \ L_{2y} \ L_{2z}]^T$$

$$N_p = [N_{px} \ N_{py} \ N_{pz}]^T$$

としてこの式を展開すると、

$$I_{1p} = \rho_p (N_{px} L_{1x} + N_{py} L_{1y} + N_{pz} L_{1z}) \quad (4)$$

$$I_{2p} = \rho_p (N_{px} L_{2x} + N_{py} L_{2y} + N_{pz} L_{2z}) \quad (5)$$

という関係が得られる。この2式から  $\rho_p$  を消去し一つにまとめると、

$$\begin{aligned} & I_{2p} N_{px} L_{1x} + I_{2p} N_{py} L_{1y} \\ & + I_{2p} N_{pz} L_{1z} - I_{1p} N_{px} L_{2x} \\ & - I_{1p} N_{py} L_{2y} - I_{1p} N_{pz} L_{2z} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

となる。全ての点について光源方向は同一であるため、

$$L' = \begin{bmatrix} L_{1x} \\ L_{1y} \\ L_{1z} \\ L_{2x} \\ L_{2y} \\ L_{2z} \end{bmatrix} \quad m_p = \begin{bmatrix} I_{2p} N_{px} \\ I_{2p} N_{py} \\ I_{2p} N_{pz} \\ -I_{1p} N_{px} \\ -I_{1p} N_{py} \\ -I_{1p} N_{pz} \end{bmatrix}^T$$

として、式(6)を  $q$  個の点について行列  $M = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_q]^T$  で表現すると、以下ようになる。

$$ML' = 0 \quad (7)$$

この方程式から、ベクトル  $L_1$ ,  $L_2$  を含む  $L'$  の解を導くことができる。

### 2.2 行列 $M$ の階数

行列  $M$  の階数が6だった場合、ベクトル  $L'$  の解は  $L' = 0$  のみになるが、行列  $M$  の階数が6未満である場合は、ベクトル  $L'$  には非自明な解が存在する。通常の光源下 ( $L_1 \neq 0, L_2 \neq 0$ ) で画像を撮ったならば、 $L_1$ ,

$L_2$  を含む  $L'$  は 0 でない解を持つはずなので、行列  $M$  の階数は 6 未満である。

ただし、法線ベクトルのすべてが同一平面上にあった場合や、二つの光源ベクトルの方向が同じだった場合など特異なケースでは、行列  $M$  の階数がより小さくなる。行列  $M$  の階数が最大で 5 であるかどうかは不明であるが、これはシミュレーションにより確認する。

### 2.3 光源方向・光源強度比の獲得

行列  $M$  の階数が 5 である場合、 $L'$  の非自明な解を求めることで光源推定ができる。 $L'$  の非自明な解は、行列  $M$  の直交補空間と同値である。行列  $M$  の直交補空間は行列  $M$  を主成分分析したときの第 1 主成分から第 5 主成分からなる空間の直交補空間として求めることができる。このとき、理想的な値ならば第 6 主成分の寄与率は 0 となる。実際のデータはノイズを含むので、第 6 主成分の寄与率が 0 となることはない。よって、直接第 6 主成分を  $L'$  の解とすればよい。

$L'$  が求められたら、 $L'$  内の  $L_1, L_2$  の絶対値のうち大きいほうで各数値を割って正規化しておく。これにより  $L_1, L_2$  は絶対値の最大値が 1 のベクトルとして扱うことができる。

この手法では光源強度は推定できない。なぜなら、物体表面の反射率を定数倍し、またその逆数で光源照度をそれぞれ定数倍するとともに同じ画像が得られるように、これらの間には不定性があるためである。ただし  $L'$  に含まれる光源ベクトル  $L_1, L_2$  の光源強度比は求められる。

### 2.4 反射率の推定

推定された光源を用いて、反射率の推定を行うことができる。式 (4), (5) を  $\rho_p$  について解いて、

$$\rho_p = \frac{I_{1p}}{(N_{px}L_{1x} + N_{py}L_{1y} + N_{pz}L_{1z})} \quad (8)$$

$$\rho_p = \frac{I_{2p}}{(N_{px}L_{2x} + N_{py}L_{2y} + N_{pz}L_{2z})} \quad (9)$$

という式が得られるので、画像 1 に写っている点、画像 2 に写っている点すべてについて反射率を推定することが出来る。

### 2.5 重ね合わせの工夫

実際のデータを用いた場合、ノイズの影響で光源推定に誤差を生じる。式 (8)(9) より、分母が小さくなるほど誤差が生じやすくなるのが分かる。よって光源推定の誤差は光源ベクトルと法線ベクトルの角度が大きくなるほど反射率の誤差に影響を与える。そこで画像 1 と画像 2 の両方に写っている点については、式 (8)(9) の分母をそれぞれ重み  $\omega_1, \omega_2$  として重み付け平均し、

$$\rho_p = \frac{\omega_1}{\omega_1 + \omega_2} \frac{I_{1p}}{\omega_1} + \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \frac{I_{2p}}{\omega_2}$$

$$= \frac{I_{1p} + I_{2p}}{\omega_1 + \omega_2} \quad (10)$$

とすると、誤差を少なくできる。

## 3 シミュレーション実験

計算機上でシミュレーションを行い、行列  $M$  の階数を含めた理論の評価をする。また、実際のデータではノイズが加わるので、データにノイズを加えてシミュレーションを行い、ノイズに対する性能も評価する。

対象物体を 2 種類の反射率を持つ球とした。図 1(a) が対象物体の表面各点に与えた反射率画像である。反射率、画素値は共に 0.00~1.00 の実数で扱い、画像出力時に画素値に 255 をかけて 8bit グレー画像とした。このときの座標系は球の中心を原点とし、図 1, 2 の各画像でいう右方向を  $x$  軸、上方向を  $y$  軸、手前方向を  $z$  軸とする。この物体を異なる 2 つの光源ベクトル

$$L_1 = [0.52548 \ 0.47315 \ 0.70711]^T$$

$$|L_1| = 1$$

$$L_2 = [-0.26274 \ -0.23657 \ 0.35355]^T$$

$$|L_2| = 0.5$$

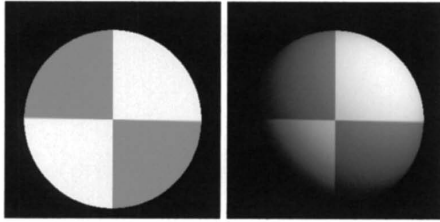
から照らした画像を生成する (図 1(b), (c))。この画像の生成方法は Lambert 反射モデルの式 (1) に従っている。

光源ベクトルの推定値と真値を区別するため、以後推定値を  $\hat{L}_1, \hat{L}_2$  とする。

主成分分析にて推定した  $\hat{L}_1, \hat{L}_2$  の推定結果を表 1, 2 に、このときの寄与率を 3 に示す。光源ベクトルの推定誤差  $|\hat{L}_1 - L_1|, |\hat{L}_2 - L_2|$  は 0 になり、第 6 成分の寄与率も  $5.34 \times 10^{-18}$  とほぼ 0 に近い値が得られたため、特異な場合でなければ行列のランクが 5 となることが示された。第 6 成分の寄与率が 0 にならなかったのは、浮動小数点演算の切り誤差によるものと思われる。

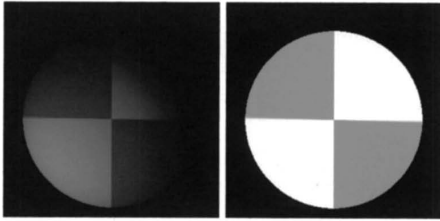
反射率の推定結果から生成した画像を図 1(d) に示す。陰影がなく明るさが一様であり反射率が良好に推定できたといえる。反射率の真値の画像である図 1(a) と見比べても推定反射率は反射率を正確に表しているといえる。さらに、図 1(e) に推定光源ベクトル  $\hat{L}_1$  と推定反射率を使って生成した合成画像を、図 1(f) に推定光源ベクトル  $\hat{L}_2$  と推定反射率を使って生成した合成画像を示す。それぞれ 1(b),(c) を正確に再現しており、推定された反射率と光源ベクトルが正確だったことが分かる。

実際のデータは相互反射や鏡面反射など Lambert 反射モデルでは表現されない反射による誤差、ガンマ補正による誤差、量子化誤差などのノイズを含むため、同様のシミュレーションを  $I_{1p}$  ( $0 \leq I_{1p} \leq 1$ ),  $I_{2p}$  ( $0 \leq I_{2p} \leq 1$ ) にノイズを付加して行った。付加す



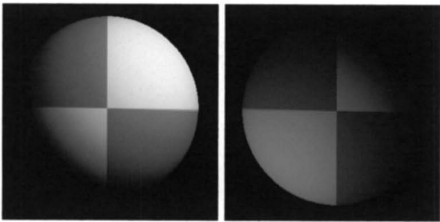
(a)

(b)



(c)

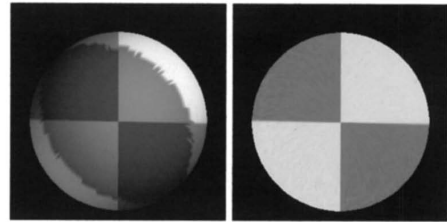
(d)



(e)

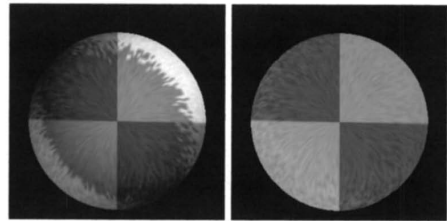
(f)

図1 反射率画像 (a),  $L_1$  照射時の生成画像 (b),  $L_2$  照射時の生成画像 (c), 推定反射率 (d),  $L_1$  で生成した合成画像 (e),  $L_2$  で生成した合成画像 (f)



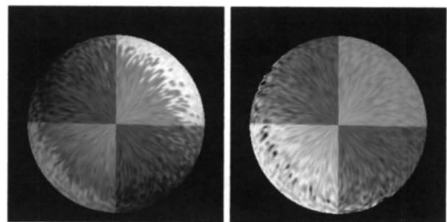
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

図2 ノイズ 0~0.01 の平均画像 (a) とそれから得た反射率画像 (b), ノイズ 0~0.05 の平均画像 (c) と反射率画像 (d), ノイズ 0~0.10 の平均画像 (e) と反射率画像 (f)

るノイズは,

- 0.00~0.01 の一様乱数
- 0.00~0.05 の一様乱数
- 0.00~0.10 の一様乱数

の3種類である。これら乱数を画像に加算しカメラのノイズとした。図2(a)(c)(e)にノイズを加えて各点での輝度値を重ねたときの平均画像を示す。両画像で同じ点が照らされた場合は、その平均を輝度値とした。

図2(a)(c)(e)の平均画像から推定した反射率画像を図2(b)(d)(f)に示す。ノイズ0~0.01, 0~0.05の反射率はノイズの影響でムラが見られるものの、不自然な陰

影がなく良い結果が得られた。しかしノイズ0~0.10の反射率は光源のずれの影響で不自然な陰影が出てしまっていることが分かる。

表1, 表2に推定された光源ベクトルを示す。ノイズが増える毎に光源の推定誤差が大きくなっていることが分かる。表3に主成分分析で得られた寄与率を示す。第6主成分の寄与率に注目すると、ノイズが大きくなるにつれ寄与率が大きくなっている。これは主成分分析では最下位成分にノイズの影響が最も大きく出るためであり、この性質から光源推定に誤差が生まれている。

シミュレーション結果から、ノイズ無しの環境下では

表 1  $L_1$  の推定光源ベクトル

ノイズ	x	y	z	$ \hat{L}_1 - L_1 $
真値	0.52548	0.47315	0.70711	-
なし	0.52548	0.47315	0.70711	0.00000
0~0.01	0.52568	0.47241	0.70745	0.00083
0~0.05	0.55810	0.46222	0.68911	0.03882
0~0.10	0.58303	0.53385	0.61244	0.12633

表 2  $L_2$  の推定光源ベクトル

ノイズ	x	y	z	$ \hat{L}_2 - L_2 $
真値	-0.26274	-0.23657	0.35355	-
なし	-0.26274	-0.23657	0.35355	0.00000
0~0.01	-0.26221	-0.23319	0.35298	0.00348
0~0.05	-0.25599	-0.22446	0.34804	0.01493
0~0.10	-0.19706	-0.15686	0.30664	0.11344

表 3 主成分分析の寄与率

ノイズ	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分	第 5 主成分	第 6 主成分
なし	0.5569	0.2162	0.1649	0.0405	0.02154	$5.34 \times 10^{-18}$
0~0.01	0.5570	0.2166	0.1644	0.0404	0.02140	$1.15 \times 10^{-4}$
0~0.05	0.5565	0.2184	0.1599	0.0416	0.02102	0.00262
0~0.10	0.5414	0.2197	0.1593	0.0474	0.02293	0.00933

第 6 成分の寄与率のみが 0 に近い値をとることが確認でき、行列 M の階数が 5 であることが確認できた。ただし、これは理想的な環境下でのシミュレーションであり、法線ベクトルが同一平面上にあったり、光源ベクトル  $L_1$ ,  $L_2$  の方向が同じであったりすると階数が下がることは明らかである。

ノイズを加えたシミュレーションでは、0~0.05 のノイズまでならば良好な反射率が得られたので、カメラからの画像取得で一般的に用いられている 8bitAD 変換器の量子化誤差や熱雑音程度のノイズであれば反射率の推定に影響を与えないといえ、通常のカメラの画像でも十分反射率の推定は可能である。

#### 4 カメラ画像を用いた実験

カメラ画像を用いて反射率の推定を行う。理想的な計測対象として、反射率が均一の球、反射率が均一でない球を計測し、さらに複雑な計測対象として石膏像を計測した。

本実験では、以下の手順で実験を行う。

- スリット光投影法を用いた 3 次元形状の取得
- 異なる光源環境下での画像の撮影
- 主成分分析による光源推定と反射率推定
- 結果の評価

実験結果の評価は以下のように行う。

- 主成分分析で得た第 6 成分の寄与率の大きさ
- 推定された反射率画像に陰影が出ていないか

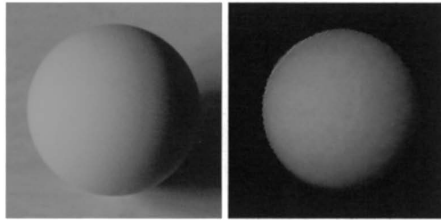
##### 4.1 3 次元形状の獲得と法線の計算

3 次元形状は、スリット光投影法により取得する。テクスチャの撮影には形状計測で用いたのと同じカメラを用いた。なお、画像は 8bit 画像で扱っている。

スリット光投影法では、プロジェクタの解像度より細かい分解能で計測するために、各画素についてスリット番号の重心を求めることで高精度化した。

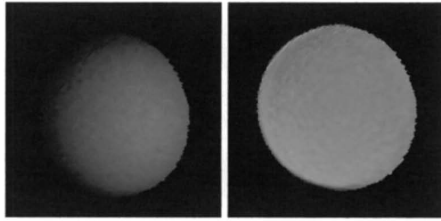
法線の計算に周囲の点との外積を用いた場合、わずかなノイズにより法線に誤差が乗ってしまうおそれがある。そこである点 P を中心とした周囲の点いくつかをサンプリングしたとき、点 P の法線ベクトルはその分散





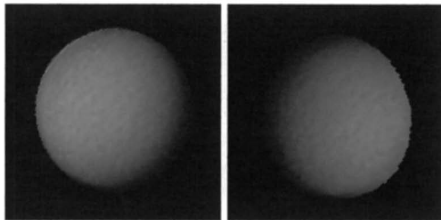
(a)

(b)



(c)

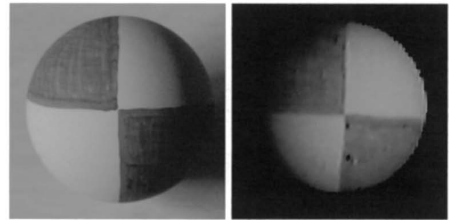
(d)



(e)

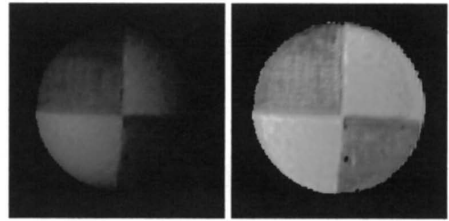
(f)

図3 反射率均一の球体の写真 (a),  $L_1$  照射時の生成画像 (b),  $L_2$  照射時の生成画像 (c), 反射率画像 (d),  $L_1$  で生成した合成画像 (e),  $L_2$  で生成した合成画像 (f)



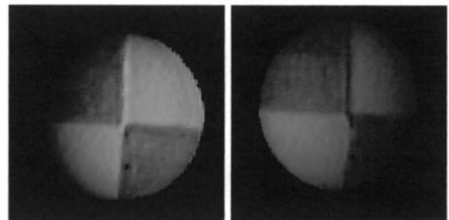
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

図4 反射率不均一の球体の写真 (a),  $L_1$  照射時の生成画像 (b),  $L_2$  照射時の生成画像 (c), 反射率画像 (d),  $L_1$  で生成した合成画像 (e),  $L_2$  で生成した合成画像 (f)

が最も小さい方向に向くことを利用する。分散が最も小さい方向を得るには、主成分分析を用いた。

#### 4.2 反射率が均一の球体での実験

まず、反射率が均一の球体であるソフトテニスのボールで実験を行った。球体は法線ベクトルが一様に分布しており、理想的な行列  $M$  を取得することが期待できる。さらに、反射率が均一なので結果の判断がしやすいといえる。

図3に、反射率が均一の球体の写真 (a) と異なる光源下で撮った2枚の画像から得た各頂点の輝度値 (b),(c), および推定された反射率画像 (d) と推定光源と推定反射

率から生成した合成画像 (e),(f) を示す。

反射率画像から、2枚の画像の境界が消え明るさが一様な良好な反射率を獲得できたといえる。さらに、推定光源と推定反射率から生成した合成画像は光源環境下での画像を再現できており、良好な光源ベクトルと反射率が推定されていることが分かる。表4に主成分分析の寄与率を示す。第6主成分は  $9.69 \times 10^{-4}$  と小さく、極めて良好な推定が出来たことを示している。

#### 4.3 反射率が不均一の球体での実験

ソフトテニスのボールにフェルトペンで色を塗り反射率が不均一の球体として実験を行った。反射率が不均一

になることでどの程度推定反射率の誤差が生まれるかを見る。

図4に、反射率が不均一の球体の写真(a)と異なる光源下で撮った2枚の画像から得た各頂点の輝度値(b),(c)、および反射率画像(d)と推定光源と推定反射率から生成した合成画像(e),(f)を示す。

平均画像と反射率画像を見比べると、反射率均一の球体と同じく2枚の画像の境界が消え明さが一様な良好な反射率を獲得できたといえる。さらに、推定光源と推定反射率から生成した合成画像も、反射率均一の球体と同じくそれぞれの光源環境下での画像を再現できており、良好な光源ベクトルと反射率が推定されていることが分かる。表4に主成分分析の寄与率を示す。これも反射率均一の球体と同じく第6主成分は $4.61 \times 10^{-3}$ と比較的小さく、極めて良好な推定が出来たことを示している。

#### 4.4 複雑な形状の物体での実験

複雑な形状の物体として一様な拡散反射率を持つ石膏の像を計測した。複雑な形状の場合、相互反射の影響により反射率に誤差が生まれることが予測される。

図5に、異なる光源下で取った2枚の画像から得た各頂点の輝度値(a),(b)とそれらを平均した平均画像(c)、および推定された反射率画像(d)と推定光源と推定反射率から生成した合成画像(e),(f)を示す。

目や口の周りの反射率が大きくなっているのは、相互反射の影響を受けた部分の輝度値が大きくなったためである。推定光源と推定反射率から生成した合成画像と入力画像を見比べると、合成画像は入力画像を再現できており、推定光源の誤差は大きくないといえる。表4に主成分分析の寄与率を示す。第6主成分は $8.48 \times 10^{-3}$ であり、第5主成分0.0145の2分の1を超えており比較的大きいといえる。これは相互反射による影響がノイズとして第6主成分に乗ったためと考えられる。

## 5 結論

撮影画像からテクスチャを得るとき、撮影時の陰影がテクスチャに現れたり、テクスチャの接合部に境界が現れる問題を解決するため、本論文ではテクスチャの重なった部分に注目し、光源と反射率を推定した。反射モデルとしてLambert反射モデルを仮定し、その線形性を利用してテクスチャ撮影時の光源ベクトルと法線・画像に関する方程式を導き、その方程式から光源ベクトルの非自明な解を求めることにより光源推定した。推定された光源より反射率を求め、テクスチャの代わりに反射率を色彩情報として用いることで、テクスチャ獲得時の問題点を解決した。

球体などの単純な凸面であれば明さ一様な良好な反

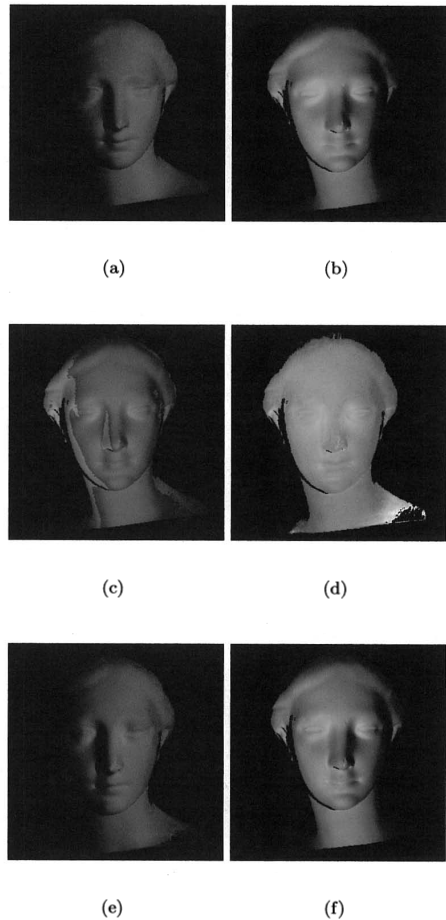


図5  $L_1$  照射時の生成画像 (a),  $L_2$  照射時の生成画像 (b), 平均画像 (c), 反射率画像 (d),  $L_1$  で生成した合成画像 (e),  $L_2$  で生成した合成画像 (f)

射率を得られたが、複雑な形状になると相互反射の影響で誤差が現れた。さらに、現実の物体はLambert反射モデルで表せることはなく、鏡面反射などの非線形成分を含んだり、影が生じたりと非線形性を少なからず含む。この問題を解決するためには、撮影画像を線形成分と非線形成分に分ける必要がある。そのための研究も行われている [6]。

今後はそのような非線形な反射モデルからの反射率の推定方法について検討し、デジタルアーカイブなどの実データへの適用を目指す。

表 4 反射率均一の球体での主成分分析の寄与率

対象物体	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分	第 5 主成分	第 6 主成分
反射率均一の球体	0.3897	0.3585	0.2037	0.0253	0.0218	$9.69 \times 10^{-4}$
反射率不均一の球体	0.4759	0.3019	0.1732	0.0306	0.0137	$4.61 \times 10^{-3}$
石膏像	0.5020	0.2605	0.1946	0.0199	0.0145	$8.48 \times 10^{-3}$

## 参考文献

- [1] Ikeuchi, K. and Sato, K.: "Determining reflectance properties of an object using range and brightness images", IEEE Trans. PAMI, 13(11), pp.1139-1153 (1991).
- [2] 大槻正樹, 三浦淳, 佐藤幸男: "多方向測定による物体形状と表面反射特性の計測", 電子情報通信学会論文誌 D-II Vol.J76-D-II No.8 pp.1536-1543 (1993)
- [3] Sato, Y. and Ikeuchi, K.: "Reflectance analysis for 3d computer graphics model generation", CVGIP Graphical Models and Image Processing, 58(5), pp.437-451
- [4] Nishino, K., Zhang, Z. and Ikeuchi, K.: "Determining reflectance parameters and illumination distribution from a sparse set of images for view-dependent image synthesis", Proc. IEEE ICCV'01, pp.599-606 (2001)
- [5] 高橋徹, 佐藤洋一, 池内克史: "偏光による反射成分の分離および反射パラメータの決定", 情報処理学会研究報告. CVIM Vol.2000, No.106(20001121) pp. 17-24 (2000)
- [6] 石井育規, 福井孝太郎, 向川康博, 尺長健: "光学現象の分類に基づく画像の線形化", 情報処理学会論文誌. CVIM 6 Vol. 44 No.SIG 5 (2003)