

光源色の補空間を用いた物体形状・反射特性・光源の同時推定

祖川 和弘^{†1} 右田 剛史^{†1} 尺長 健^{†1}

従来の形状・反射特性・光源の同時推定法¹⁾²⁾³⁾には鏡面反射パラメータの推定が遅く、打ち切り誤差が大きくなるという問題があった。本稿では、この問題を解決するため、従来法で用いていた残差の二乗和の代わりに、光源色と残差の外積の二乗和を最小化することで鏡面反射成分の影響を受けない推定法を提案する。また、鏡面反射成分を除去し Lambert 反射のみから復元を行うと GBR 不定性が生じるが、近接光源を用いることで GBR 不定性を解消できることを検証する。リングや器、人物顔を対象物体として実験を行い、方法の有効性を確認する。

Simultaneous Estimation of Shape, Reflectance Property and Lightng Conditions based on Complementary Space of Light Color

KAZUHIRO SOGAWA,^{†1} TSUYOSI MIGITA^{†1}
and TAKESHI SHAKUNAGA^{†1}

Simultaneous estimation of shape, reflectance property and lightng conditions¹⁾²⁾³⁾ has a problem of slow convergence caused by specular reflection parameters. This paper proposes an estimation method which avoids the influence of specular reflection component by projecting the residual onto the complementary space of the light-source color. Although the GBR (Generalized Bas-Relief) ambiguity arises when the shape is reconstructed from the Lambertian component, it is verified to be able to solve the GBR ambiguity by using near lighting after the specular reflection component is removed. We verified the effectiveness of the proposed method by the experiments with an apple, a cup and a human face.

1. はじめに

物体形状を復元する方法として、形状・反射特性・光源の同時推定法が右田-荻野-尺長¹⁾によって提案されている。この方法では、反射モデルで生成される画像列と入力画像列の差が最小になるようにパラメータの最適化を行う。しかし、反射モデルが鏡面反射を含んでおり複雑であるため、収束が非常に遅く打ち切り誤差が大きくなるという問題があった。そこで本稿では、2色性反射モデルに基づき、鏡面反射成分の影響を受けない目的関数を構成することで、収束速度と推定精度の向上を目指す。

従来、鏡面反射成分を除去する方法として、色の分布を解析する方法⁴⁾や、光源色の補空間を用いる方法⁵⁾が提案されている。これらの方法では光源色の推定と形状の推定を別々に行っているが、本稿では光源色もその他のパラメータと同時に推定することで、事前のキャリブレーションを行わずに物体形状・反射特性・光源の推定を行う方法を提案する。提案法では拡散反射成分のみを利用して物体形状などの復元を行うため、GBR (Generalized Bas-Relief) 不定性⁶⁾による推定精度の悪化が考えられる。GBR 不定性を解決する方法はいくつか提案されており、岡部-佐藤⁷⁾は近接光源を用いることで GBR 不定性を解消できることを証明している。本稿でも近接光源を用いることで、GBR 不定性による推定形状の不安定化を回避できることを確認する。

2. 物体形状・反射特性・光源の同時推定原理¹⁾³⁾

本章では、右田-荻野-尺長¹⁾が提案した方法を説明するが、本稿の目的に合わせ、一部拡張している。

静止物体に対して光源位置を多様に変化させ、1台の固定カメラで撮影すると、図1のような画像列が得られる。物体形状・反射特性・光源の同時推定では、図1のような画像列から図2で示される形状を復元するとともに、反射特性・光源を同時に推定する。

2.1 反射モデル

画像の各画素は物体の微小面素に対応しており、微小面素で生じる光学現象によって画素値が決定される。右田ら¹⁾²⁾³⁾は光学現象を表現する反射モデルとして Torrance-Sparrow モデルを用いている。このモデルを用いて、 f 枚目の画素 p における画素値 e_{fp} は次式に

^{†1} 岡山大学
Okayama University

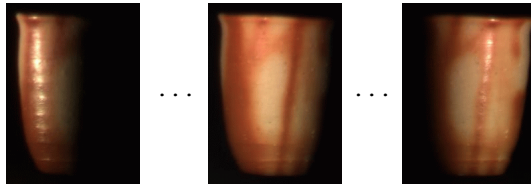


図1 光源を変化させて撮影した画像列

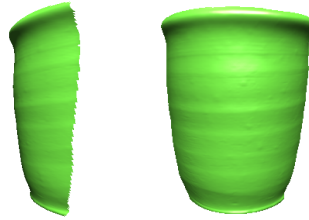


図2 復元形状

よって表現される．

$$e_{fp} = \eta_f d_p \cos \beta_{fp} + \eta_f s_p S \frac{1}{\cos \gamma_p} \exp(\rho \alpha_{fp}^2) + r_{fp} \quad (1)$$

ここで，

$$\begin{aligned} \cos \beta_{fp} &= \mathcal{N}[\mathbf{n}_p]^T \mathcal{N}[\mathbf{l}'_{fp}] & \mathbf{l}'_{fp} &= \mathbf{l}_f - \mathbf{x}_p \\ \cos \gamma_p &= \mathcal{N}[\mathbf{n}_p]^T \mathcal{N}[\mathbf{v}'_p] & \mathbf{v}'_p &= (\mathbf{v} - \mathbf{x}_p) / \ell \\ \cos \alpha_{fp} &= \mathcal{N}[\mathbf{n}_p]^T \mathcal{N}[\mathcal{N}[\mathbf{l}'_{fp}] + \mathcal{N}[\mathbf{v}'_p]] & \eta_f &= |\mathbf{l}_f - \mathbf{x}_p|^{-2} \end{aligned} \quad (2)$$

であり， r_{fp} は観測値に含まれるノイズ， \mathbf{n}_p は法線ベクトル， \mathbf{l}_f は光源位置， \mathbf{v} はカメラ位置， ℓ は焦点距離， d_p は各要素に RGB 成分の拡散反射率を持つ 3 次元ベクトル， s_p は鏡面反射率， S は光源色を表す 3 次元ベクトル， η_f は光源強度の距離減衰を表す係数， ρ は物体表面の粗さを表す係数， $\mathcal{N}[\cdot]$ はベクトルのノルムを 1 に正規化する演算子を示す．

なお，式 (1) 中の第 1 項において， $|\beta_{fp}| \geq \pi/2$ となるときは物体表面の裏側に光源が位置し，attached shadow が生じることを意味する．第 2 項において， $|\gamma_p| \geq \pi/2$ となるときは物体表面の裏側にカメラが位置し，物体がカメラに写らないことを意味する．この条件が成立する時，第 1 項および第 2 項はそれぞれ 0 とする．

2.2 推定対象パラメータ

推定すべきパラメータをベクトル p で表す． p は 4 種類のパラメータ (物体形状・反射特性・光源・その他) から構成される次のようなベクトルである．

$$p = (p_w^T, p_s^T, p_m^T, p_l^T)^T \quad (3)$$

このパラメータの総数は，入力画像枚数 40，推定対象点数 20000 の場合，推定パラメータ

総数は 100124 となり，10 万次元を超える．以下ではそれぞれのパラメータについて説明する．

物体形状パラメータ

物体の形状は画像平面から物体表面までの z 方向距離 λ_p の配列で表現できる． z 方向距離 λ_p は 3 次元点 x_p の z 値と等しく，透視投影において 3 次元点 x_p は対応する画像平面の座標 u_p, v_p とカメラの焦点距離 ℓ を用いて次式で計算できる．

$$\mathbf{x}_p = \lambda_p \left(\frac{u_p}{\ell}, \frac{v_p}{\ell}, 1 \right)^T + (u_p, v_p, 0)^T \quad (4)$$

ただし，ワールド座標系の中心は画像中心であり，カメラ位置 \mathbf{v} は $(0, 0, -\ell)$ とする．この時， $\ell = \infty$ とすると平行投影の式となる．また，法線 \mathbf{n}_p は画素 p の上下左右 4 点 t, b, l, r の 3 次元点から次式によって計算できる．

$$\mathbf{n}_p = (\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_b) \times (\mathbf{x}_r - \mathbf{x}_l) \quad (5)$$

したがって，形状に関する推定対象パラメータは $p_s = (\lambda_1, \dots, \lambda_P)^T$ となる．ここで， P は推定対象点数を示す．

反射特性パラメータ

反射特性を表すパラメータには，拡散反射係数 d_p ，鏡面反射係数 s_p ，粗さ係数 ρ がある．したがって，反射特性に関する推定対象パラメータは $p_w = (d_1^T, s_1, \dots, d_P^T, s_P)^T$ となる (ρ については後述)．

光源パラメータ

光源位置は画像毎に異なるため，全画像に対してその 3 次元座標を推定する必要がある．また，光源色は全ての光源で同じとする．そのため，光源に関する推定対象パラメータは $p_l = (l_1^T, \dots, l_F^T)^T$ となる (光源色 S については後述)．ここで， F は入力画像枚数を示す．

その他のパラメータ

粗さ係数 ρ と光源色 S をまとめて $p_m = (S^T, \rho)^T$ とする．

2.3 目的関数

パラメータを推定するために，式 (1) のノイズ r_{fp} を最小化する．この時，最小化すべき目的関数は次式である．

$$E(p) = \frac{1}{2} \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P |r_{fp}|^2 \quad (6)$$

ただし，画素 p が f 枚目の画像において Saturation または Cast Shadow と判定された場

合は $r_{fp} = (0, 0, 0)^T$ とする. Saturation・Cast Shadow の判定は画像の画素値で行う. 画素値が 8bit 整数の場合, 画素値が 255 以上ならば Saturation, 0 以下ならば Cast Shadow と判定する. この目的関数を最小化するため, 前処理付き共役勾配法を用いる.

2.4 前処理付き共役勾配法

前処理付き共役勾配法によるパラメータ p の更新方法を以下に示す.

$$p_k = \begin{cases} \text{initial parameters} & (k = 0) \\ p_{k-1} - \alpha_{k-1} d_{k-1} & (k > 0) \end{cases} \quad (7)$$

$$d_k = \begin{cases} C_0^{-1} g_0 & (k = 0) \\ C_k^{-1} g_k + \beta_k d_{k-1} & (k > 0) \end{cases} \quad (8)$$

ここで,

$$\alpha_k = \arg \min_{\alpha} E(p_k - \alpha d_k) \quad (9)$$

$$g_k = \nabla E(p_k) \quad (10)$$

$$\beta_k = \frac{g_k^T C_k^{-1} g_k}{g_{k-1}^T C_{k-1}^{-1} g_{k-1}} \quad (11)$$

であり, d_k は反復 k 回目における探索方向ベクトル, ∇E は勾配ベクトルを示す. また, C_k は探索方向を修正する前処理行列を示し, これを適切に選ぶことで, 反復回数を少なくすることができる. 前処理行列には Gauss-Newton 法に基づく次の式を用いる.

$$C_k = J_k^T J_k + \mu I, \quad J_k = \begin{bmatrix} \vdots \\ \frac{\partial r_{fp}^k}{\partial p^T} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで, J_k はヤコビ行列, μ は発散を防ぐための安定化パラメータ, I は単位行列を示す.

式 (12) のヤコビ行列 J_k を用いて作られた係数行列 C_k の構造は次のようになる.

$$C_k = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \text{Block 1} & \text{Block 2} & \text{Block 3} & \text{Block 4} \\ \hline \text{Block 5} & \text{Block 6} & \text{Block 7} & \text{Block 8} \\ \hline \text{Block 9} & \text{Block 10} & \text{Block 11} & \text{Block 12} \\ \hline \text{Block 13} & \text{Block 14} & \text{Block 15} & \text{Block 16} \\ \hline \end{array} \quad (13)$$

ここで, 上式の右辺の各ブロックには左から (上から) 順に, p_w, p_s, p_m, p_l に関する値が格納されている. この係数行列を用いて, 次式を満たす m を求めることで, $C_k^{-1} g_k$ を計算する.

$$C_k m = g_k \quad (14)$$

このような m は, 次式の最小化を前処理付き共役勾配法によって行うことで計算できる.

$$\hat{E}_k(p) = \frac{1}{2} m^T C_k m - g_k^T m \quad (15)$$

この時, 前処理行列には係数行列 C_k (式 (13)) の対角ブロック要素を抜き出した次のような行列を用いる.

$$C' = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \text{Block 1} & \text{Block 2} & \text{Block 3} & \text{Block 4} \\ \hline \text{Block 5} & \text{Block 6} & \text{Block 7} & \text{Block 8} \\ \hline \text{Block 9} & \text{Block 10} & \text{Block 11} & \text{Block 12} \\ \hline \text{Block 13} & \text{Block 14} & \text{Block 15} & \text{Block 16} \\ \hline \end{array} \quad (16)$$

3. 光源色除去を用いた改良

3.1 光源色の補空間を用いた鏡面反射項の除去

以降では 2 章で述べた方法を従来法と呼ぶ. 従来法では, 鏡面反射を含む物体も形状復元

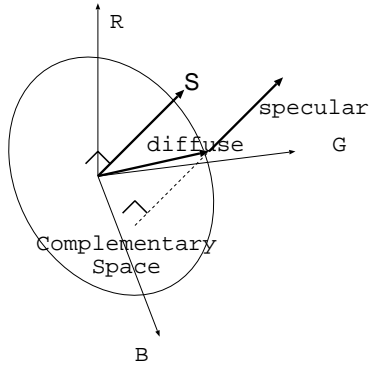


図3 光源の方向とその補空間

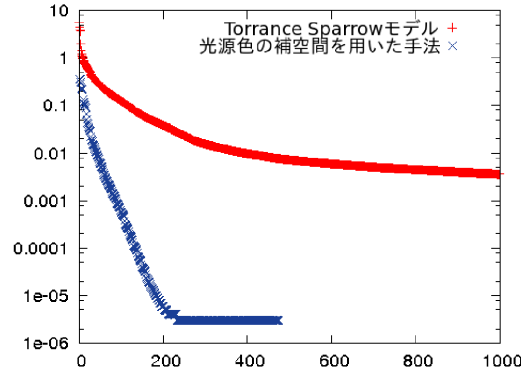


図4 シミュレーションでの残差

の対象にしており、鏡面反射パラメータと拡散反射パラメータを同時に推定することで鏡面反射を含む物体の形状などを推定していた。しかし、従来法は鏡面反射パラメータの非線形性が強いいため正しい値への収束が遅いという問題があった。実際にシミュレーション画像に対して物体形状・反射特性・光源の同時推定を行った時の結果を図4に示す。図4の横軸は反復回数、縦軸は残差であり、赤の線が従来法を示す。これから、シミュレーションにおいても残差を0にするのが難しいことが分かる。この鏡面反射による問題を解決するために、光源色の補空間を用い鏡面反射成分の影響をなくすことを検討した。

物体表面でおこる鏡面反射が Torrance-Sparrow モデルに従うと仮定する。式(1)から分かるように鏡面反射項は光源色ベクトル S のスカラー倍であるため、RGB 空間で鏡面反射色ベクトルは光源色ベクトルと平行になる。そのため、光源色ベクトル S に直交する補空間に輝度ベクトルを射影すると鏡面反射成分を除いた値が得られる(図3参照)。ただし、この方法では鏡面反射成分だけでなく拡散反射成分の光源色成分も除去される。

補空間への射影の式は少し複雑であるため、実際には S との外積によって光源色方向の成分を除去する。式(1)の両辺と $S = (S_1, S_2, S_3)^T$ の外積を求めると次式ようになる。

$$\frac{S_{\times}}{|S|} e_{fp} = \frac{S_{\times}}{|S|} d_p \eta_f \cos \beta_{fp} + \frac{S_{\times}}{|S|} r_{fp} \quad (17)$$

ここで、

$$S_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -S_3 & S_2 \\ S_3 & 0 & -S_1 \\ -S_2 & S_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

であり $S_{\times} S = 0$ なので、式(1)の右辺にある鏡面反射項は0になる。一方、式(17)は拡散反射項も光源色除去の影響を受けることを意味しており、拡散反射係数に光源色方向の不定性が表れるが、形状や光源位置は保存されると考えられる。

したがって、式(6)の代わりに、次式を最小化することで鏡面反射項の影響を受けずに物体形状・反射特性・光源の推定を行うことができると考えられる。

$$E(p) = \frac{1}{2} \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \left| \frac{S_{\times}^T}{|S|} r_{fp} \right|^2 \quad (19)$$

鏡面反射項を除去しているため、式(19)を目的関数とするパラメータ推定では鏡面反射に関するパラメータが推定対象から外れる。そのため、 p_s, p_l は2.2節と同様であるが、 p_w, p_m は次式のようになる。

$$p_w = (d_1^T, \dots, d_p^T)^T \quad (20)$$

$$p_m = (S^T)^T \quad (21)$$

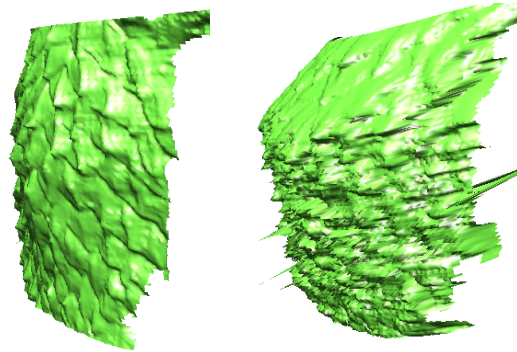
2.2節と比べると、推定パラメータ数は約5分の4となる。このため、鏡面反射の影響を無くしたこと以外に、推定対象パラメータが減ることによる収束速度や計算速度の向上も期待できる。一方、本方法で生じ得る問題について以降で検証する。

3.2 目的関数の正規化

式(19)の最小化により S の推定を行うと、物体色がほぼ単色で鏡面反射の影響が小さい場合には画素値に近い値が局所解となり、形状などの推定がうまくいかない(例:図5)。特に、物体色が単色 $d_p = d$ で、光源色の推定値 $\hat{S} = d$ のとき、

$$\frac{d_{\times}}{|d|} r_{fp} = \frac{d_{\times}}{|d|} e_{fp} - \frac{d_{\times}}{|d|} d \eta_f \cos \beta_{fp} \approx \frac{d_{\times}}{|d|} \eta_f s_p S \frac{1}{\cos \gamma_p} \exp(\rho \alpha_{fp}^2) \quad (22)$$

となり、拡散反射成分が消されるため、鏡面反射が小さな場合は式(19)の値も小さくなる。なお、物体色が様々な色を持つ場合 \hat{S} がどのような値を取っても $\hat{S} \sim d_p$ となる画素 p は少ないので他の画素の情報から正しい \hat{S} を推定できる。一方、物体色がほぼ単色の場合は \hat{S} を物体色に近づけると多くの画素で $\hat{S} \sim d_p$ となるため、物体の形状に依らず式(19)の値が小さくなる。そのため、初期値や物体の特性によっては、他のパラメータを正確に推



(a) 正しい形状 (b) 誤った形状

図 5 形状推定の失敗例

定するよりも、 \hat{S} を物体色に近づける方が式 (19) の値を小さくできることになり、式 (19) の最小化では推定がうまくいかない。この問題を解決するために式 (19) を修正する。具体的には、光源色 S と画素値 e の外積のノルムが小さい場合にペナルティがかかるように式 (19) に次のような正規化を施す。

$$E(p) = \frac{1}{2} \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \left| \frac{|\sum_f e_{fp}|}{|S \times \sum_f e_{fp}|} S \times r_{fp} \right|^2 \quad (23)$$

3.3 GBR 不定性

光源色の補空間を用いて鏡面反射成分を取り除くことで、拡散反射項のみを用いて物体形状の推定を行う方法について述べてきたが、拡散反射画像から形状を復元する場合、GBR 不定性が残る⁶⁾。一方、我々の研究では近接光源を用いており、近接光源は GBR 不定性を解消することが証明されている⁷⁾。本方法でも近接光源を用いることで GBR 不定性を解消できるか実験によって検証する。まず GBR 不定性がどのようなものかを示した後に、近接光源がどのように GBR 不定性を解消するかについて述べ、シミュレーションによる実験を行う。

無限遠光源を仮定し、拡散反射のみの画像から法線 n を復元する場合、光源位置 l を与えれば 3 枚の画像から法線を推定できる。この時、 f 個目の光源で照らされた画素 p の輝

度値 e_{fp} は次式で表される。

$$e_{fp} = n_p^T l_f \quad (24)$$

話を簡単にするために、法線 n はアルベドと法線方向の積、光源位置 l は光源方向と光源強度の積とする。一方、光源位置が未知で、光源と法線を復元した場合、次式のような 3×3 の正則な行列 A で表される不定性が表れる。

$$e_{fp} = n_p^T A^{-1} A l_f \quad (25)$$

この 9 自由度の不定性は、法線に対して積分可能条件を課すことで、3 自由度の GBR 不定性となる。GBR 不定性を持つ法線 n_p^* ・物体の 3 次元位置 x_p^* ・光源位置 l_p^* は GBR 変換を表す行列 G を用いて

$$\begin{aligned} x_p^* = G x_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a & b & c \end{bmatrix} x_p, \quad n_p^* = G^{-T} n_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -a/c \\ 0 & 1 & -b/c \\ 0 & 0 & 1/c \end{bmatrix} n_p \\ l_f^* = G l_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a & b & c \end{bmatrix} l_f \end{aligned} \quad (26)$$

と表される。ここで、 a, b, c は未知パラメータである。この変換では法線方向や光源方向だけでなく、光源強度やアルベドも変化させる。

近接光源を仮定したとき、無限遠光源と違う点は、光源強度の距離減衰と光源方向が各点毎に違う点である。これら考慮すると、近接光源下での輝度値 e_{fp} は次式で表される。

$$e_{fp} = \eta_f \frac{1}{|l'_{fp}|^2} n_p^T \frac{l'_{fp}}{|l'_{fp}|} \quad \text{where } l'_{fp} = l_f - x_p \quad (27)$$

$\hat{\eta}_f$ は光源 f の光源強度を表す。この時、次式を満たす GBR 変換 $G \neq \text{diag}(1, 1, 1)$ が存在するかどうかを調べる。

$$\frac{\hat{\eta}_f}{|l'_{fp}|^2} n_p^T \frac{l'_{fp}}{|l'_{fp}|} = \frac{\hat{\eta}'_f}{|G l'_{fp}|^2} n_p^T G^{-1} \frac{G l'_{fp}}{|G l'_{fp}|} \quad (28)$$

ここで $\hat{\eta}'_f$ は任意の値とする。式 (28) を変形すると

$$\begin{aligned} n_p^T \left(\frac{\hat{\eta}_f l'_{fp}}{|l'_{fp}|^3} - \frac{\hat{\eta}'_f G^{-1} G l'_{fp}}{|G l'_{fp}|^3} \right) &= 0 \\ \left(\frac{\hat{\eta}_f}{|l'_{fp}|^3} - \frac{\hat{\eta}'_f}{|G l'_{fp}|^3} \right) l'_{fp} &= 0 \end{aligned}$$

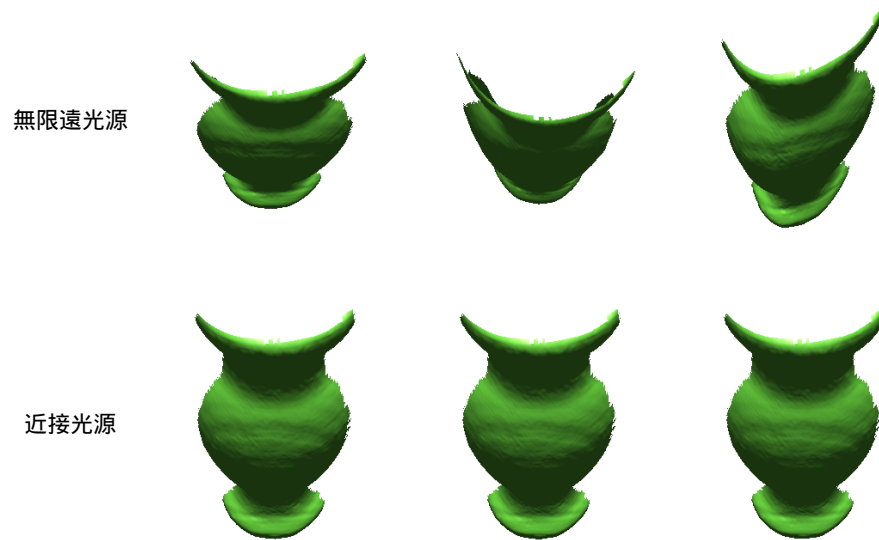


図 6 様々な初期値から推定された形状

が得られる．この式が任意の法線 n_p について成り立つには次式を満たす必要がある．

$$\frac{\hat{\eta}'}{\hat{\eta}} |l'_{fp}|^3 = |Gl'_{fp}|^3 \quad (29)$$

任意の 3 次元位置 x_p から光源位置へ向かうベクトル l'_{fp} の長さが変換 G によって定数倍をのぞいて保存されることから．行列 G は直交行列 U ($U^T U = U U^T = \text{diag}(1, 1, 1)$) に比例することが分かる．この性質を満たす GBR 変換は単位行列のみになるため，理想的には近接光源下で GBR 不定性が発生しない．

上記の証明によって，近接光源下で GBR 不定性が存在しないことが分かったが，実際の計算では，観測誤差と打ち切り誤差の問題で GBR 不定性の影響を受ける可能性がある．観測誤差と打ち切り誤差を考慮すると，推定されるパラメータは $E(p) < \epsilon$ となるパラメータ空間のどこかである．そのため，初期値によっては形状や光源位置が GBR 不定性に似た性質を持って復元される可能性がある．

そこで，近接光源と無限遠光源でシミュレーション画像を作成し，複数の初期値から式



図 7 初期形状

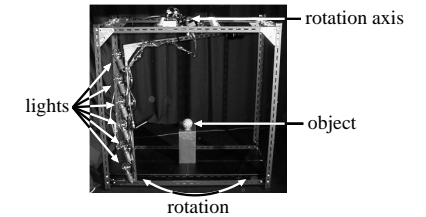


図 8 可動照明システム

(23) の最小化による各パラメータの最適化を行い，提案法で GBR 不定性が表れるかを調べた．この時反復回数は 100 回とした．

結果を図 6 に示す．図の上段が無限遠光源画像から復元された形状，下段が近接光源画像から復元された形状である．無限遠光源画像から復元された形状は，初期値によって様々な形状に復元されているのに対し，近接光源画像からの復元では初期値が違っていてもほぼ同じ形状が復元されている．この結果から，提案法でも近接光源は GBR 不定性除去に有効であることが分かった．

4. 実験

4.1 実験条件

物体形状・反射特性・光源の同時推定実験をおこなった．推定法には 2.4 節で述べた前処理付共役勾配法を用い，各パラメータの初期値として以下のものを用いる．

物体形状

平面を初期値とした場合，クレーター錯視⁸⁾の影響で，凸物体を凹物体として復元することがある．そのため，図 7 のように少し膨らみを持った曲面を初期値とする．この曲面は，次式を用いて計算する．

$$\lambda_p = au_p^2 + bv_p^2$$

ここで， a, b は曲面の出っぱり具合を決める係数であり，復元対象物体に応じて適当に決める．

反射特性

拡散反射係数 d_p は物体色の RGB の比と，明るさの積である．RGB の比は入力画像列を利用して，点毎に全フレームの平均値を用い，明るさは光源強度の距離減衰を考慮し，次

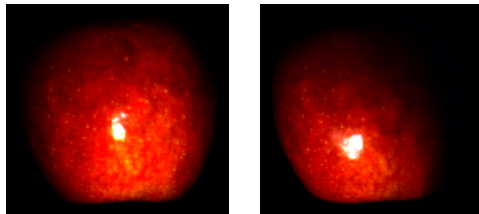


図 9 リンゴの入力画像例

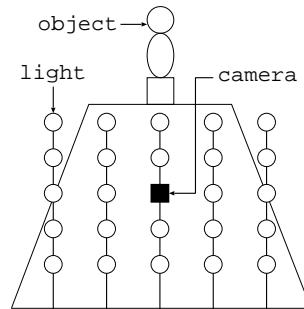


図 10 撮影環境 2

式を初期値とする．

$$d_p = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F l_f^T l_f e_{fp} \quad (30)$$

光源

光源に関するパラメータには光源色 S と、光源位置 l_f がある．このうち光源色は白色光源と仮定して、 $S = (1, 1, 1)^T$ を初期値とする．光源位置は、物体からの距離 d を適当に与え、 $l_f = (0, 0, -d)^T$ を初期値とする．

4.2 実画像を用いた実験

以降では式 (6) を目的関数とする推定を従来法と呼び、式 (23) を目的関数とする推定を提案法と呼ぶ．また、シミュレーション実験において提案法は反復 200 回程度でパラメータが収束しているため、実験では反復回数を 200 回とした．

4.2.1 従来法との比較実験

リンゴを対象として、反射特性・形状・光源の同時推定実験を行った．入力画像には、図 10 の撮影環境で撮影した 24 枚の画像を用いた．ただし、この物体は鏡面反射が強いため、明るさの異なる複数枚の画像を合成して、画素値が 0-4000 程度のハイダイナミックレンジ画像を作成した．画像サイズは 125×133 であり、このうち物体領域内の推定対象点数は 11098 であった．従来法での推定形状を図 11、提案法での推定形状を図 12 に示す．図 11 を見てみると、中心部分以外が手前に反っており推定がうまく行えていないのが分かる．これは鏡面反射強いため鏡面反射が表れている画素をうまく推定できず、それに引きずられて周囲の形状も誤って推定されたためだと考えられる．一方、図 12 では全体が滑らかに復元

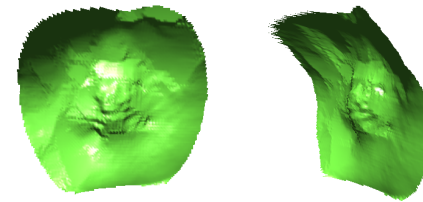


図 11 従来法でのリンゴ推定形状

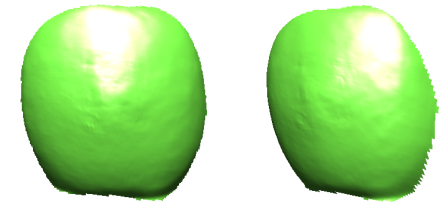


図 12 提案法でのリンゴ推定形状



図 13 木目の器の入力画像例



図 14 木目の器の推定形状

されており、提案法は従来法で復元が難しい物体でも形状を復元できることが確認できた．

4.2.2 提案法での復元実験

木目の器

木目の器を対象として、反射特性・形状・光源の同時推定実験を行った．入力画像には、図 8 の可動照明システムを用いて光源を高さ 6 段階・水平方向 6 段階に変化させて撮影した計 36 枚の画像を用いた．画像サイズは 128×296 であり、このうち物体領域内の推定対象点数は 25480 であった．各画素値は 8bit 整数で表され 0-255 の範囲を取る．推定形状を図 14、光源と物体の位置関係を図 15 に示す．この物体は図 8 の可動照明システムを用いて撮影したため、光源位置は円柱状に並ぶはずである．そこで、図 15 を見てみると、光源位置が物体にそってきれいな円柱状に並んでおり、良好な推定が行えているのがわかる．また、形状についても、良好に推定できている．

人物の顔

人物の顔を対象として、反射特性・形状・光源の同時推定実験を行った．入力画像には、図 10 の環境で撮影した 24 枚の画像を用いた．画像サイズは 185×220 、推定対象点数は

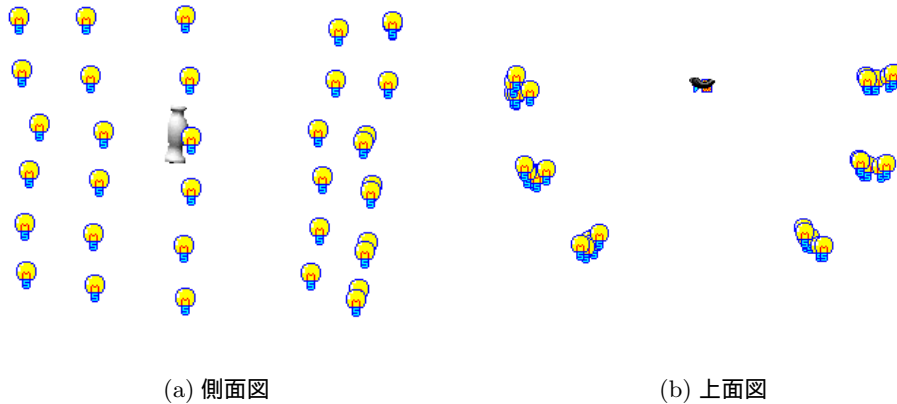


図 15 光源位置と木目の器の位置関係



図 16 人物の顔の入力画像例

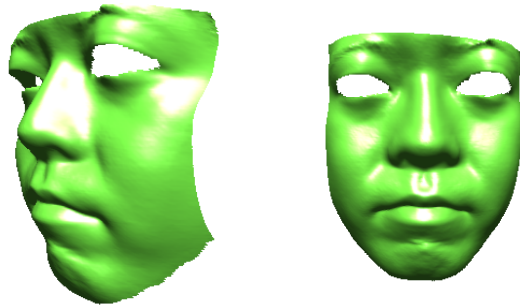


図 17 人物の顔の推定形状

35629 であった。各画素値は 8bit 整数で表され 0-255 の範囲を取る。なお、目の部分は反射特性が二色性反射モデルに従わないと考えられるため、推定対象からはずした。推定形状を図 17 に示す。図 17 を見ると、唇や鼻など細かな部分でも形がしっかりと復元されており、全体的に良好な推定結果が得られている。入力画像野中には鼻周辺では cast shadow が起こっているものも含まれるが、図 17 ではそれに起因する形状の歪みは見られない。

5. ま と め

本稿では、光源色の補空間を用いることで、鏡面反射成分を用いない物体形状・反射特性・光源の同時推定法について述べた。まず、物体形状・反射特性・光源の同時推定の原理について述べた。次に、光源色の補空間による鏡面反射成分の除去について述べた。この時、拡散反射成分のみから形状を推定することになり、GBR 不定性の問題が表れるが、近接光源を用いることでこれを回避できることを示した。

リンゴを対象に、従来法と提案法で形状復元を行い推定形状を比較した結果、従来法で推定が難しい状況でも、提案法では安定した形状復元が行え、提案法の有効性が確認できた。また木目の器や人間の顔についても提案法で推定を行い、良好な推定結果を得られることを確認した。

本研究の一部は文部科学省科学研究費若手研究 (B 22700181) の助成による。

参 考 文 献

- 1) T. Migita, S. Ogino, and T. Shakunaga, "Direct bundle estimation for recovery of shape, reflectance property and light position," Proc. European Conference on Computer Vision ECCV2008, Vol.5304, pp.412-425, 2008.
- 2) 荻野真佑, 右田剛史, 尺長健, "Torrance-sparrow モデルに基づく反射特性・形状・光源位置の同時推定の検討," 情報処理学会研究報告, CVIM, Vol.2008, No.27, pp.557-564, 2008.
- 3) 澤見幸枝, 右田剛史, 尺長健, "形状・反射特性・光源位置の同時推定に基づく顔形状の復元," 電子情報通信学会研究報告, PRMU2009-265, vol.109, no.470, pp.187-192, 2009.
- 4) 肥後智昭, 宮崎大輔, 池内克史, "二色性反射モデルに基づくリアルタイム鏡面反射成分除去," 情報処理学会研究報告, CVIM, Vol.2006, No.93, pp.211-218, 2006.
- 5) T. Zickler, S.P. Mallick, D.J. Kriegman, and P.N. Belhumeur, "Color subspaces as photometric invariants," International Journal of Computer Vision IJCV2008, Vol.79, No.1, pp.13-30, 2008.
- 6) P.N. Belhumeur, D.J. Kriegman, and A.L. Yuille, "The bas-relief ambiguity," International Journal of Computer Vision IJCV1999, Vol.35, No.1, pp.33-44, 1999.
- 7) 岡部孝弘, 佐藤洋一, "近接点光源は未校正照度差ステレオにおける形状復元の不定性を解決するか?," 情報処理学会研究報告, CVIM, Vol.2007, No.1, pp.153-160, 2007.
- 8) J.T. Todd, and F.D. Reichel, "Perceived depth inversion of smoothly curved surfaces due to image orientation," Journal of Experimental Psychology, Vol.16, No.3, pp.653-664, 1990.