

光源の異なる画像を用いた楕円体と一葉双曲面のパラメータ推定  
Parameter Estimation of Ellipsoid and Single Leaf Hyperboloid  
from Images under Various Light Sources

那須 巧海<sup>†</sup> 右田 剛史<sup>†</sup> 尺長 健<sup>†</sup> 高橋 規一<sup>†</sup>  
Takumi Nasu Tsuyoshi Migita Takeshi Shakunaga Norikazu Takahashi

### 1 はじめに

物体を撮影した画像から物体の形状や光源などの情報(パラメータ)を得る手法をインバースレンダリングという[6]。これは、物体の形状や光源などの情報から画像を生成する手法であるコンピュータグラフィックスの逆操作である。この手法はVR空間の実現などに利用が期待される。

文献[1][2]では、非線形最小二乗法を用いて画像から物体の形状や光源の位置などのパラメータを同時に推定している。また、向山ら[3]、浦田[4]はパラメータの推定を画素毎ではなく8×8画素程度のブロック単位で行う方法を提案している。この手法では被写体の形状を少ないパラメータで扱うことができる。

さらにパラメータの数を減らすため、本稿では二次曲面(楕円体や双曲面)を用いて被写体の形状を近似し、そのパラメータと入力画像の光源ベクトルを得ることを検討した。

### 2 画像生成モデル

本研究では以下の画像生成モデルに基づくインバースレンダリングを行う。使用している反射モデルはLambertモデル[6]であり、各画素の画素値は次の式で表される。

$$\mathbf{e} = \mathbf{L}^T \mathbf{N} \cdot \mathbf{C} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{e}$ は画素値(0から255の値をとる $r, g, b$ の3要素のベクトル)、 $\mathbf{L}$ は着目する点から光源に向かう3次元単位ベクトル(光源ベクトル)、 $\mathbf{N}$ は着目する点における法線、 $\mathbf{C}$ は反射率である。また、 $\mathbf{L}$ と $\mathbf{N}$ の内積が負のときは、光が当たっていないため、黒色( $\mathbf{e} = \mathbf{0}$ )とする。

法線 $\mathbf{N}$ は本研究では二次曲面のパラメータを使用して計算する。二次曲面の式は次の通りである。

$$\Phi = \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c}\right)^2 - 1 = 0 \quad (2)$$

ここで、 $(x, y, z)$ は着目点の物体座標系における座標(物体座標)を表し、 $(a, b, c)$ は楕円体の3軸の半径または一葉双曲面のパラメータを表す。また、 $a' = a^{-2}$ 、 $b' = b^{-2}$ 、 $c' = c^{-2}$ とすると、

$$\Phi = a'x^2 + b'y^2 + c'z^2 - 1 = 0 \quad (3)$$

すなわち、 $b' > 0$ のとき、式(3)は楕円体の式になり、 $b' < 0$ のとき、式(3)は一葉双曲面の式になる。そして、平行投影モデルを用いて、画像座標を $(u, v)$ 、その画素に対する深さを $w$ とすると、物体座標 $(x, y, z)$ は回転行列

$\mathbf{R}$ と平行移動量 $(c_x, c_y, c_z)$ によって次の式で表される。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} u - c_x \\ v - c_y \\ w - c_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

### 3 インバースレンダリング

インバースレンダリングによって推定するパラメータを $\mathbf{p}$ とする。本研究において、 $\mathbf{p}$ は式(3)の $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$ (楕円体の場合は3軸の半径の二乗の逆数)、回転行列 $\mathbf{R}$ のパラメータ、平行移動量 $c_x$ 、 $c_y$ 、入力された各画像の光源ベクトル $\mathbf{L}_0, \mathbf{L}_1, \dots, \mathbf{L}_{F-1}$ ( $F$ は全画像数)の要素で構成される。ここで、平行移動量 $c_z$ を推定しない理由は、平行投影モデルを用いているため、 $c_z$ が変化しても画面上の大きさは変化しないからである。

パラメータ $\mathbf{p}$ の推定は、入力画像を最適に近似するパラメータを探索することで行う。具体的には次の式の $E(\mathbf{p})$ を最小にするパラメータ $\mathbf{p}$ を探す。

$$E(\mathbf{p}) = \sum_{f,i} \|\mathbf{r}_{fi}\|^2 = \|\mathbf{r}\|^2 \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{r}$ は残差ベクトルであり、次式のように表される。

$$\mathbf{r}^T = (\dots, \mathbf{r}_{0,i}^T, \mathbf{r}_{1,i}^T, \dots, \mathbf{r}_{fi}^T, \dots, \mathbf{r}_{F-1,i}^T, \mathbf{r}_{0,i+1}^T, \dots) \quad (6)$$

また、

$$\mathbf{r}_{fi} = \mathbf{e}_{fi} - \mathbf{e}'_{fi} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{e}_{fi}$ は推定したパラメータから計算した画素値であり、 $\mathbf{e}'_{fi}$ は入力画像の画素値であり、 $\mathbf{r}_{fi}$ は $\mathbf{e}_{fi}$ と $\mathbf{e}'_{fi}$ の差を表している。なお、 $f$ は入力された画像の番号を表し、 $f$ は $(0 \leq f \leq F-1)$ の値をとる。 $i$ は推定する画素の番号を表し、推定対象の画素数を $I$ とすると $i$ は $(0 \leq i \leq I-1)$ の値をとる。ここで、推定対象の画素とは、各座標で全画像の画素値 $\mathbf{e}'_{fi}$ の最大値のうち、そのすべての要素がある一定の画素値以上の画素である。

式(5)を目的関数とする非線形最小化問題の解法として、Levenberg-Marquardt法(以下LM法)[1][2]を用いる。LM法は次式のようにパラメータ $\mathbf{p}$ を修正量 $\Delta\mathbf{p}$ で更新する。

$$\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p} - \Delta\mathbf{p} \quad (8)$$

ここで、 $\Delta\mathbf{p}$ は次の式で表される。

$$\Delta\mathbf{p} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mathbf{D})^{-1} (\mathbf{J}^T \mathbf{r}) \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{J}$ はヤコビ行列である。また、行列 $\mathbf{D}$ は対角行列であり、LM法の発散を防ぐための補正值である。なお、ヤコビ行列 $\mathbf{J}$ は次式のように表される。

$$\mathbf{J} = \left( \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial p_0}, \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial p_1}, \dots \right) \quad (10)$$

<sup>†</sup> 岡山大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

ただし,  $\mathbf{p} = (p_0, p_1, \dots)^T$  である.

#### 4 実験

図1の壺やいくつかの被写体の画像を用いる. 壺は中部の膨らみを楕円体, 下部と上部の凹みを双曲面モデルで扱い, それぞれ推定を行った. また, 入力画像はカメラと被写体は動かさず, 光源の位置のみを動かした9枚の壺の画像である.

推定するパラメータの初期値は次のように設定した. 形状パラメータ ( $a', b', c', c_x, c_y$ ) は物体の輪郭が被写体の中にあるようにした. 回転行列  $\mathbf{R}$  は単位行列とした. また, 光源ベクトルの初期値はすべて  $(0, 0, 1)$  とした. 反復回数は20回とした.

以上の条件で推定を行い, 得られた結果を図2, 図3, 図4に示す. 図2の青色の点線は壺の上部, 中部, 下部のそれぞれの輪郭の初期値を表し, 白線は推定後の輪郭を表す. 図2から各部位において, 青色の点線よりも白線の方が被写体の輪郭に近づいていることが分かる. 図3は壺の中部の推定における誤差の推移を表す. 図3の横軸は反復回数であり, 縦軸は推定の反復回数に対する Root Mean Squared Error (以下, RMSE) の推移である. ここで, RMSE は  $\|\mathbf{r}\|/\sqrt{I}$  である. また, 青色の実線が壺の中部の RMSE の推移, 橙色の破線が壺の上部の RMSE の推移, 灰色の点線が壺の下部の RMSE の推移である. 図3では各部位の RMSE が7回目付近まで減少している. よって, 推定パラメータから計算された画素値と (入力画像上の) 被写体の画素値の差が小さくなっていることが分かる. また, 各部位の RMSE が7回目付近で収束しており, パラメータ  $\mathbf{p}$  の各要素の変化が小さくなっていったことから, 推定が行われたことが分かる. 図4は壺の中部 (膨らんだ部分を表す楕円体の中心) の位置と入力画像の光源の位置を表す. 図4の赤色の点は光源の位置であり, 番号は入力画像の番号を表す. 青色の点  $O$  は被写体の位置であり, これが  $(0, 0, 0)$  になるように平行移動して表示している. ここで, 光源の距離は考慮しない. 本実験は一方向からのみ光を当てた無限遠点光源モデルを用いるため, 光の入射角にのみ依存するからである. また, 壺の上部と下部の光源の推定結果は図4に似た実験結果が得られた.

ただし, 別の被写体を推定した際に, 推定した輪郭が大きく外れている結果も得られた.



図1 推定する壺の画像

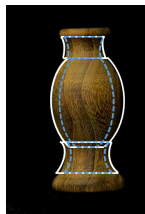


図2 壺の輪郭の推定

#### 5 おわりに

壺を被写体とした実験では, 上部, 中部, 下部の全ての推定した形状パラメータの輪郭が被写体の輪郭に近づいていることから, 壺の形状に近い二次曲面のパラメータを推定できることが分かった. また, 光源に関しては各部位の入力画像の光源の向きが図4に似た実験結果が

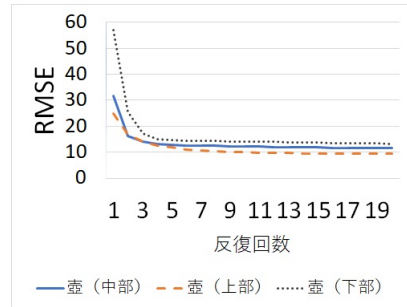


図3 壺(中部)の誤差の推移

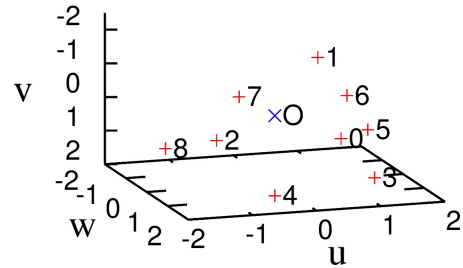


図4 壺(中部)の光源の位置

得られたことから, 光源ベクトルの推定が可能であることが分かった.

ただし, 被写体によっては輪郭の推定がうまくいかない場合もあった. これは, 実装した反射モデルでは鏡面反射を表現することができないことや, 被写体自身による影や遮蔽の影響を考慮できないことが原因であると考えられる. また, 被写体が二次曲面で表しにくい場合も推定の精度が低かった.

今後の課題は Lambert モデル以外の反射モデル (Phong モデル [6] など) や影・遮蔽の考慮が必要であると考えられる. また, 楕円体や一葉双曲面以外の物体も推定できるようにするために, 超二次関数 (superquadrics) [7] を実装することが挙げられる.

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17K00239 の助成を受けた.

#### 参考文献

- [1] 右田剛史, 樋谷洋介, 尺長健, “物体形状・反射特性・光源の同時推定の実装法と評価,” 情報処理学会研究報告 CVIM-181-19, 2012.
- [2] T. Migita, A. Ogino and T. Shakunaga, “Direct bundle estimation for recovery of shape, reflectance property and light position,” In Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV2008), vol.5304, pp.412–425, 2008.
- [3] 向山太基, 右田剛史, 尺長健, “形状のブロック分割と基底を用いた表現によるインバースレンダリングの検討,” MIRU2017, 2017.
- [4] 浦田雅也, “各種反射モデルを選択可能なインバースレンダリングの実現,” 岡山大学大学院自然科学研究科電子情報システム工学専攻 2017 年度修士論文, 2018.
- [5] 藤代一成 編集, “コンピュータグラフィックス [改訂新版],” CG-ARTS 協会, 2015.
- [6] 奥富正敏 編集, “デジタル画像処理 [改訂新版],” CG-ARTS 協会, 2015.
- [7] 八馬遼, 小篠裕子, 齋藤英雄, “制約条件付き非線形最小二乗法を用いた三次元実物体の超二次関数推定,” 情報処理学会研究報告 CVIM-203-25, 2016.