

## 物体の姿勢変化を利用した 3次元形状獲得 -鏡面反射成分への対応-

石垣 智子 牧 淳人 松山 隆司

**概要** 一定の照明条件下で姿勢変化する物体を固定カメラで撮影した少数の画像から、物体の 3次元形状を獲得する手法について提案する。特に物体表面に鏡面反射成分が含まれる状況への対応を考える。ここでは姿勢変化を伴う物体の画像の間に幾何的かつ輝度的に成り立つ拘束条件として Geotensity 拘束を利用する。この拘束に基づき、奥行き探索を繰り返す手法の枠組みに、画素間に対応付けられた物体表面の輝度のセットから法線ベクトルを複数通りに計算し、その分散値から鏡面反射成分の有無を判別する手法を導入する。鏡面反射成分による影響を受けにくくすることで、3次元形状復元の精度の向上を目指す。

### 3D Surface Reconstruction of a Moving Object -Overcoming Specular Reflections-

TOMOKO ISHIGAKI, ATSUTO MAKI and TAKASHI MATSUYAMA

**Abstract** In order to obtain the 3D shape of an object which is moving under a distant point light source, we utilize several images of the object captured by a fixed camera. We base our algorithm on the geotensity constraint which governs the relationship between four or more images of a moving object in spite of the illumination variance due to object motion. In particular, we propose a new method for dealing with specularities which shift on the object surface due to its motion. In the framework of an iterative depth search we discriminate specularities by analyzing the distributions of surface orientations which we compute in several ways by interchangeably using a certain subset of image intensities at corresponding surface points.

#### 1. はじめに

##### 1.1 研究の背景

3次元物体の形状をその2次元の投影画像から復元することは、コンピュータビジョンにおける最も重要な課題の一つである。ここで解くべき問題は2枚以上の画像間で物体上の同一点が投影された画素の対応付けを行うことに帰着される。一般にこの問題には、画像中で対応する部分の物体表面の輝度は等しいという、「等輝度の拘束」が条件として利用される。そして、カメラから撮影対象物体までの奥行き探索を、基準として選んだ画像中の各点において等輝度の拘束により行うことで距離画像を生成することができる。この拘束は、一定の照明の下で対象物体を適当な位置に固定し、それを複数視点から同時に撮影した画像を入力とするステレオ視の場合に有効である。

一方、カメラと光源を適当な位置に固定し、これらに対して対象物体を姿勢変化させることで見え方の異なる複数の画像を生成した場合には、上記の等輝度の拘束が成り立たなくなる。この原因として、入射光と物体表面の法線がなす角度が物体を動かすと変化すること

が挙げられる。他に、ステレオ視の場合でも問題となる鏡面反射成分が物体の表面に含まれる場合があることも原因として考えられる。こうした状況により表面輝度の変化がある場合でも、対応付けを行い奥行き探索を正しく行うことが正確な形状復元のためには必要である。

現在までに、鏡面反射をしない対象については、物体を姿勢変化させながら得られた複数の画像を入力としたときの対応付け方法として Geotensity 拘束<sup>5)</sup>と呼ばれる新しい拘束条件が提案されている。この拘束を用いると、物体表面の対応する部分の表面輝度が変化しても、対応付けを行うことが可能である。Geotensity 拘束は、対象表面の完全拡散反射モデルの仮定の下で、運動物体の一定方向から撮影した4枚以上の画像の間に定義される、幾何的かつ輝度的な拘束である。

この拘束条件は、前処理として画像間で対応付けのとれた少数の特徴点を用い、それらの座標値から物体の運動パラメータを得ること、それらの点での輝度値から光源パラメータを得ることを特徴とする。しかしこのようにして求めた光源パラメータを基にした奥行き探索は、最初に選ばれた特徴点の性質に依存することになる。

そこで、一旦解いた物体上の密な対応付けの結果を利用し、改めて光源パラメータの計算を行うことにより、奥行き探索を高精度化する試みがなされてきた<sup>67)</sup>。この手法は、前処理に用いられる点の数が少ない場合に計算を繰り返すことにより、特に効果があることが確認されている。

また、本稿で扱うような、物体表面に鏡面反射成分が含まれる場合の対応付けとして、次のような手法が提案されている<sup>4)</sup>。入力画像の総数を  $m$  枚とし、基準画像の各画素での奥行き探索において、各奥行きで参照される  $m$  個の画素のセットのうち 1 つに鏡面反射成分が含まれると仮定する。これらを大きさの順に並び替え、輝度が最大となる画素に鏡面反射成分が含まれるとみなし、これを省いた残りの画素を使って奥行き探索を行う。しかしこの手法では、省かれた画素が実際に鏡面反射成分を含んでいたかどうかは考慮されていない。

## 1.2 研究の主題

本稿では、上記の繰り返し手法<sup>67)</sup>の枠組みに鏡面反射成分への対処法<sup>4)</sup>を導入するとともに、繰り返しの際に重要となる輝度行列の再計算法を新しく提案する。すなわち、一旦奥行き探索を行った物体上の各点に対応する画素に鏡面反射成分が含まれるか否かを判別し、鏡面反射成分を含んでいないと判断された表面輝度のセットにより輝度行列を再構成し、そしてこれを基に光源パラメータを求めて奥行き再探索を行うというプロセスを繰り返し、鏡面反射成分による影響を受けにくくすることで 3 次元形状復元の精度の向上を目指す。

## 2. 物体の姿勢変化を利用した奥行き探索

本節では、物体の姿勢変化を用いた奥行き探索の方法について、その概略を紹介する。2.1 節で、想定する物体の撮影環境について具体的に述べ、2.2 節では物体表面の輝度の表現法について述べる。2.3 節において Geotensity 拘束による奥行き探索の手法を紹介する。

### 2.1 光源と表面モデル

ここでは無限遠点光源を仮定し、物体表面の反射強度が光源と対象物体との距離によって変化しないものとする。光源とカメラは適当な位置に固定する。これらに対して被写体の姿勢を変化させることで、見え方の異なる対象物体の画像を複数枚得る。これらを以下では入力画像として用い、その総数を  $m$  枚とする。また対象物体の表面反射特性として、まずは完全拡散反射モデル (Lambertian モデル) を仮定する。

### 2.2 物体表面の輝度

物体表面の輝度を表現するにあたり、まず以下の用語を定義する。座標系は姿勢変化する対象物体を基準にとるものとする。

**法線ベクトル：** 物体表面の法線方向を表す 3 次元ベクトルであり、第一の画像中で、物体表面の各点で

の内向き単位法線ベクトルに、その点での表面反射率を乗じたものを示す。点  $p_i$  における法線ベクトルを  $\mathbf{b}_i$  と表す。

**光源ベクトル：** 光源方向を表す 3 次元ベクトルであり、単位入射光ベクトルにその強さを乗じたものを示す。ここで光源は一定であるが、 $m$  枚の入力画像のうち  $j$  番目の画像中の光源ベクトルを  $\mathbf{s}(j)$  と表すことにする。 $\mathbf{s}(j)$  は第一の画像で定義した光源ベクトル  $\mathbf{s}(1)$  に、物体の  $3 \times 3$  次元の回転行列  $R(j)$  の転置を乗じたものであり、

$$\mathbf{s}(j) = R^T(j)\mathbf{s}(1) \quad (1)$$

である。この表現は、物体の回転を、実際は静止している光源とカメラの同時の逆向きの回転として相対的に解釈すると都合が良いことによる。

**表面輝度：**  $j$  番目の画像中で物体表面上の点  $p_i$  での輝度を指すものとし、 $I_i(j)$  と表す。 $I_i(j)$  はスカラー量である。

複数の入力画像が与えられたとき、 $j$  番目の画像中で物体上の任意の点  $p_i$  の表面輝度は、上記で定義した  $\mathbf{b}_i$ 、 $\mathbf{s}(j)$  を用いて、

$$I_i(j) = \mathbf{b}_i^T \mathbf{s}(j) \quad (2)$$

$$(j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

と表現できる。 $m$  は入力画像の枚数を表す。法線ベクトルを点  $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$  について順に並べた行列を  $B$  とよび、

$$B = [\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_n] \quad (4)$$

とおく。 $B$  は  $3 \times n$  行列である。また、 $m$  枚の入力画像における光源ベクトルを順に並べた行列を  $S$  とよび、

$$S = [\mathbf{s}(1), \mathbf{s}(2), \dots, \mathbf{s}(m)] \quad (5)$$

とおく。 $S$  は  $3 \times m$  行列である。 $m$  枚の入力画像間に対応する  $n$  点の表面輝度を、画素値として並べた行列を「輝度行列」とよび  $I$  とおくと、 $I$  は行列  $B, S$  を用いて

$$I = \begin{pmatrix} I_1(1) & \dots & I_1(m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_n(1) & \dots & I_n(m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{b}_n^T \end{pmatrix} (\mathbf{s}(1) \quad \dots \quad \mathbf{s}(m)) \quad (6)$$

すなわち、

$$I = B^T S \quad (7)$$

と表すことができる<sup>8)</sup>。

### 2.3 Geotensity 拘束に基づく奥行き探索

Geotensity 拘束については文献<sup>5)</sup>が詳しいが、ここではその概略を述べる。

#### 2.3.1 幾何と輝度の問題

前節で既に述べたように、対象物体をカメラに対して姿勢変化させながら撮影すると、複数の入力画像の間で対応点の座標が一致しなくなる。そこで、始めに少数の点について入力画像間での対応付けを行い<sup>10)1)</sup>、それらの座標を基に物体の運動パラメータを求める。幾

何的な拘束条件はこの運動パラメータより導かれる。また対応点における表面輝度の変化から光源の疑似推定,つまり輝度に関する拘束条件を導くことができる。**物体運動の幾何拘束:** 物体表面上の点  $p_i$  を世界座標系で  $\mathbf{X}_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T$  と表し,この点が  $j$  番目の画像中に投影された画素の画像中の座標を  $\mathbf{x}_i(j) = (x_i(j), y_i(j))^T$  とする。この投影は,アフィンカメラモデルによれば次式で表される。

$$\mathbf{x}_i(j) = M(j)\mathbf{X}_i + \mathbf{t}(j) \quad (8)$$

ここで任意の  $2 \times 3$  次元行列  $M(j)$  と 2次元ベクトル  $\mathbf{t}(j)$  は,物体の回転と並進のパラメータを表しているが,これらは3枚以上の画像で4点以上の対応付けが得られれば,自然座標系で一意に決定できる<sup>9)</sup>。座標  $\mathbf{x}_i(j)$  については第一の画素の画像座標系の  $x$  軸,  $y$  軸を世界座標系のそれらに合わせることで  $\mathbf{X}_i = (\mathbf{x}_i^T(1), Z_i)$  と表すことができるため,さらに次式を得る。

$$\mathbf{x}_i(j) = M(j) \begin{pmatrix} \mathbf{x}_i(1) \\ Z_i \end{pmatrix} + \mathbf{t}(j) \quad (9)$$

この関係は実質的に画像2枚の間に成り立つエピポーラ拘束を記述している。つまり,ある画像中に点  $\mathbf{x}$  をとると,もう一方の画像でそれに対応する点は,これら2フレーム間の物体の運動パラメータによって決まるエピポーラ線上にあり,その座標は点  $\mathbf{x}$  における奥行き  $Z$  に依存して決定される。

**光源の疑似推定:**  $m$  枚の入力画像間で対応付けのとれた表面輝度を式(7)の輝度行列  $I$  に格納する。この行列  $I$  を特異値分解(SVD)し,式(7)の近似表現を得る。

$$I = \hat{B}^T \hat{S} \quad (10)$$

特異値分解にはよく知られているように,任意の  $3 \times 3$  の正則行列  $A$  を介した任意性が残っている。このため式(10)は,

$$I = \hat{B}^T A^{-1} \hat{A} \hat{S} \quad (11)$$

とも表される。任意の分解で得られた行列  $\hat{S}$  は,行列  $A$  を介して光源のパラメータを擬似的に表したものであり,真の光源ベクトルを求める問題は,

$$\mathbf{s}(j) = \hat{A} \hat{\mathbf{s}}(j) \quad (12)$$

でベクトル  $\hat{\mathbf{s}}(j)$  を  $\mathbf{s}(j)$  へ変換する行列  $A$  を求める問題と考えることができる。ただし,ここで扱う問題ではこの任意性が影響を与えることはないため,以下では  $\hat{\mathbf{s}}(j)$  あるいは  $\hat{S}$  を用いることにする。

### 2.3.2 奥行き探索の方法

図1は,物体の運動を相対的なカメラの運動と見立てた画像生成の過程を幾何的に表している。基準画像の各画素において物体表面までの奥行き探索をする際,奥行きに依存して決まる他の画像中での対応画素を参照することが必要であるが,その画素値は物体の運動に伴って変化する。Geotensity 拘束は,その変化する画素値を関連づけるもので, Lambertian 表面をもつ運動

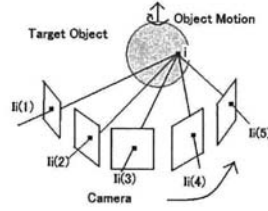


図1 想定環境。物体の動きを固定カメラの逆向きの動きとして相対的に表示している。

物体を一定方向から撮影した4枚以上の画像の間に定義された幾何的かつ輝度的な拘束である。

**表面輝度のセット:** 基準画像中の点  $\mathbf{x}_i$  における奥行きを  $Z$  と推定したとき,式(9)を複数の入力画像に適用すると,各画像で  $\mathbf{x}_i$  に対応する点の輝度として,

$$I(j; \mathbf{x}, Z) = I[\mathbf{x}_i(j)] = I[M(j) \begin{pmatrix} X_i(1) \\ Z \end{pmatrix} + \mathbf{t}(j)] \quad (13)$$

というセットが得られる。 $j$  は画像のインデックスである。この  $I(j; \mathbf{x}, Z)$  の評価方法としては次のようなものが提案されている。

**輝度セットの評価:** 式(2)に基づき,点  $p_i$  について奥行きの推定値  $Z$  により  $m$  枚の画像中で参照された輝度のセットに右辺から  $\hat{S}^T (\hat{S} \hat{S}^T)^{-1}$  を乗じることで

$$\hat{\mathbf{b}}_i^T = [I_i(1), \dots, I_i(m)] \hat{S}^T (\hat{S} \hat{S}^T)^{-1} \quad (14)$$

となる。また表面輝度の推定値を  $\hat{I}(j; \mathbf{x}, Z)$  とおくと,  $\hat{I}(j; \mathbf{x}, Z)$  は

$$\hat{I}(j; \mathbf{x}, Z) = \hat{\mathbf{b}}_i^T \hat{\mathbf{s}}(j) \quad (15)$$

と表すことができる。正しい奥行き  $Z$  から求められた表面輝度の値は,この表面輝度の推定値と一致するはずである。そこで,このような表面輝度を与える奥行き  $Z$  を評価するために,式(13),式(15)を用いて,誤差評価関数  $E(\mathbf{x}, Z)$  を,

$$E(\mathbf{x}, Z) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |I(j; \mathbf{x}, Z) - \hat{I}(j; \mathbf{x}, Z)| \quad (16)$$

と定義する。これは奥行き  $Z$  から参照された表面輝度と,光源ベクトル  $\mathbf{s}(j)$  を用いて法線ベクトル  $\mathbf{b}_i$  の推定値から求めた表面輝度の推定値との差の,画像  $m$  枚の平均値を表している。 $E(\mathbf{x}, Z)$  が最小となるとき  $Z$  を,点  $p_i$  での最良の奥行きとみなす。言いかえると,この  $Z$  を与えた式(13)による  $\hat{I}(j; \mathbf{x}, Z)$  が対応する画素の値となっている。

以上が, Geotensity 拘束に基づく従来の奥行き探索の方法である。このアルゴリズムの流れを図2で示す。図2には,本論文で新しく取り入れた鏡面反射成分を考慮した改良方法も同時に示してある。次節では,その提案方法について述べる。

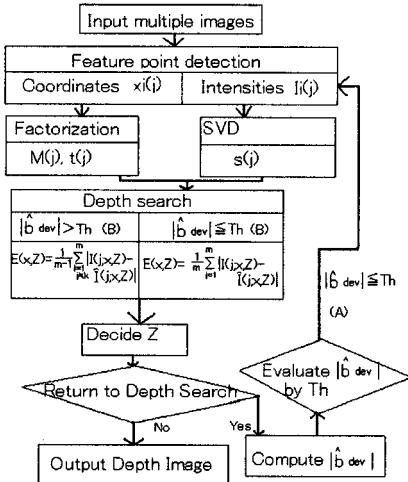


図2 提案アルゴリズムのチャート図

### 3. 鏡面反射を考慮した画像間の対応付け

前節では、物体表面が Lambertian モデルに従うことを前提としていた。しかし実際には物体表面に鏡面反射成分が含まれる場合があり、物体の運動に伴う表面輝度の変化はより急峻なものとなる。そこで本節では、鏡面反射成分を考慮する対応付けの手法に関し、3.1 節では、奥行き探索の繰り返し手法について述べる。3.2 節では、奥行き探索における対応付けにあたり鏡面反射成分の有無を考慮した手法について提案する。

#### 3.1 光源パラメータ更新による繰り返し奥行き探索

3.1.1 節で奥行き再探索を行う意義について述べる。3.1.2 節で鏡面反射成分の有無を判別する手法について具体的に説明する。

##### 3.1.1 奥行き再探索

従来の Geotensity 拘束の枠組において、奥行き探索に用いられる光源ベクトルの精度は最初に選ばれた特徴点の性質に依存する。そこで奥行き探索を一旦行った結果として密に対応付けられた表面輝度を基に輝度行列  $I$  を更新し、その特異値分解によって更新された光源ベクトルを使って奥行き再探索を行う手法が提案されている<sup>6)7)</sup>。

ここで物体表面に鏡面反射成分が含まれる場合、もし輝度行列  $I$  に鏡面反射成分が含まれたまま特異値分解を行うと、光源ベクトルが正しく得られない恐れがある。そこで従来は、対応付け誤差の小さい輝度のセットを用いて輝度行列が更新されているが、各点に対応する表面輝度に鏡面反射成分が含まれるかどうかを明示的に調べた上で、鏡面反射の影響を回避した光源ベクトルの再計算と更新が可能であれば、この光源ベクトルを用いることで奥行き探索がより正確に行えると

考えられる。ここで提案する手法で鏡面反射成分の有無を判別することを「鏡面要素判別」とよび、その具体的な方法を次節で述べる。

##### 3.1.2 鏡面反射成分の有無を判別するアルゴリズム

ここでは任意の点  $p_i$  に鏡面反射成分が生じるとき、それは  $m$  枚の入力画像のうち、1 枚だけに生じると仮定する。簡単のため  $m = 5$  とする。

1 回目の奥行き探索が終了し各点の一応の対応付けがとれて、式 (13) を基に全ての点の表面輝度が求めたとする。5 枚の画像のうち 4 枚の画像中の物体上の点  $p_i$  に対応する画素を使って、法線ベクトルの推定値  $\hat{b}_i$  を式 (14) より求める。全部で 5 通りの  $\hat{b}_i$  が求められるが、もし 1 つの画素に鏡面反射成分が含まれるとすれば、5 通りのうち鏡面反射成分の影響を受けた画素を含む 4 通りは、 $\hat{b}_i$  が比較的大きな値をとり、残る 1 通りではこれらに比べて小さな値となると考えられる。これは、Photometric Stereo<sup>11)</sup> の枠組みで 4 枚の入力画像から鏡面反射成分の有無を判別する手法<sup>3)</sup> と同様、鏡面反射成分が含まれない場合は、5 通り全ての  $\hat{b}_i$  が理想的に等しく、しかも鏡面反射成分の影響が無い分だけ長さが小さくなると考えられるためである。よって点  $p_i$  での  $\hat{b}_i$  の分散値を計算し、これが一定の閾値以下であれば、鏡面反射成分が 5 枚のいずれにも含まれていないと判断できる。このような点における表面輝度のセットを使って、輝度行列  $I$  を再構成し、式 (16) で示した奥行き探索を再度行う。

以上をアルゴリズムとしてまとめる。

- (1) 1 回目の奥行き探索が終了し、各点に対応する表面輝度が求められた 5 枚の入力画像を準備する。
- (2) ある点  $p_i$  について互いに対応する 5 つの画素から 4 つを選ぶことを繰り返し、5 通りの  $\hat{b}_i^T(\vec{k})$  を計算する。

$$\hat{b}_i^T(\vec{k}) = \hat{I}_i(\vec{k}) \hat{S}^T(\vec{k}) (\hat{S}(\vec{k}) \hat{S}^T(\vec{k}))^{-1} \quad (17)$$

ただし

$$\hat{I}_i(\vec{k}) = [I_i(1), \dots, I_i(k-1), I_i(k+1), \dots, I_i(5)] \quad (18)$$

$$\hat{S}(\vec{k}) = [\hat{s}(1), \dots, \hat{s}(k-1), \hat{s}(k+1), \dots, \hat{s}(5)] \quad (19)$$

$$k = (1, 2, 3, 4, 5) \quad (20)$$

- (3) 5 通り全ての  $|\hat{b}_i^T(\vec{k})|$  を計算し平均値  $|\hat{b}_{i,ave}^T|$  を求める。

$$|\hat{b}_{i,ave}^T| = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 |\hat{b}_i^T(\vec{k})| \quad (21)$$

- (4)  $|\hat{b}_i^T(\vec{k})|$  の最小値  $|\hat{b}_{i,min}^T|$  を選び、分散値  $|\hat{b}_{i,dev}^T|$  を次のように定義する。

$$|\hat{b}_{i,dev}^T| = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 \frac{(|\hat{b}_i^T(\vec{k})| - |\hat{b}_{i,ave}^T|)^2}{|\hat{b}_{i,min}^T|^2} \quad (22)$$

- (5)  $|\hat{b}_{i,dev}^T|$  が閾値 (Th) 以下になるときの  $I_i(j)$  を輝度行列  $I$  に格納する。
- (6) 画像中の全ての点に対し、2~5 の操作を行う。

以上により更新された輝度行列  $I$  に基づき、奥行きを再探索する。この作業が図 2 の A の矢印で表される部分であり、そのプロセスは繰り返し行うことができる。

### 3.2 鏡面反射成分を考慮した奥行き探索の方法

奥行き探索を行う際の表面輝度の評価方法として、誤差  $E(\mathbf{x}, Z)$  の計算を行うことを 2 節で述べたが、これは鏡面反射成分を考慮しない場合の方法であった。この節ではまず 3.2.1 節において、鏡面反射成分を考慮した表面輝度の誤差計算の方法について最近提案された手法を紹介する<sup>4)</sup>。次に 3.2.2 節において、逐次画素判別法を伴う表面輝度の誤差計算の方法を提案する。

#### 3.2.1 鏡面反射成分を考慮した誤差計算の従来方法

鏡面反射成分を考慮した誤差計算方法として、鏡面反射成分が含まれるか否かにかかわらず、画像  $m$  枚のうち 1 枚に鏡面反射成分が含まれていると仮定するものがあつた。この手法では、各点各奥行きで参照される表面輝度を大きさの順に並び替え、一番大きな表面輝度をとる画素が  $k$  番目なら、その画素は鏡面反射成分を含むものとみなし、その画素を取り除いた残りの画素の誤差計算から奥行き  $Z$  を決定する。これを式で表すと、

$$E(\mathbf{x}, Z) = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1, j \neq k}^m |I(j; \mathbf{x}, Z) - \hat{I}(j; \mathbf{x}, Z)| \quad (23)$$

となる。しかし、最大の表面輝度を鏡面反射成分とみなして良いかについては詳しい検討がなされているわけではない。そこで新しい方法として、3.1.2 節で述べた判別手法の導入により、従来法の妥当性を検討する。

#### 3.2.2 鏡面反射の有無を考察した誤差計算方法

3.1.2 節の場合と同様、ある点  $p_i$  で鏡面反射が生じるなら、それは  $m$  枚中 1 枚のみのことと仮定する。またここでも簡単のため  $m = 5$  とする。そして提案法では、3.1.2 節で用いた閾値評価方法を利用し、点  $p_i$  に対応する 5 つの画素いずれにも鏡面反射成分が含まれないと判断された場合は、5 つの画素を使って誤差計算を行う。5 つのうち 1 つの画素に鏡面反射成分が含まれると判断された場合は、従来同様その画素を除き、残りの 4 つの画素を使って誤差計算を行う。これにより以下のようなアルゴリズムを提案する。

(1) 画像中の少数の点を基に、各点の一応の対応付けが行われた、5 枚の入力画像を準備する。

(2) ある  $p_i$  点について対応する 5 つの画素から 4 つを選び、5 通りの  $\hat{\mathbf{b}}_i^T(\bar{k})$  を計算する。

$$\hat{\mathbf{b}}_i^T(\bar{k}) = \hat{I}_i(\bar{k}) \hat{S}^T(\bar{k}) (\hat{S}(\bar{k}) \hat{S}^T(\bar{k}))^{-1} \quad (24)$$

ただし

$$\hat{I}_i(\bar{k}) = [I_i(1), \dots, I_i(k-1), I_i(k+1), \dots, I_i(5)] \quad (25)$$

$$\hat{S}(\bar{k}) = [\hat{s}(1), \dots, \hat{s}(k-1), \hat{s}(k+1), \dots, \hat{s}(5)] \quad (26)$$

$$k = (1, 2, 3, 4, 5) \quad (27)$$

(3) 5 通り全ての  $|\hat{\mathbf{b}}_i^T(\bar{k})|$  を計算し平均値  $|\hat{\mathbf{b}}_{i,ave}^T|$  を求める。

$$|\hat{\mathbf{b}}_{i,ave}^T| = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 |\hat{\mathbf{b}}_i^T(\bar{k})| \quad (28)$$

(4) 最小値  $|\hat{\mathbf{b}}_{i,min}^T|$  となる  $|\hat{\mathbf{b}}_i^T(\bar{k})|$  を選び、分散値  $|\hat{\mathbf{b}}_{i,dev}^T|$  を次のように定義する。

$$|\hat{\mathbf{b}}_{i,dev}^T| = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 \frac{(|\hat{\mathbf{b}}_i^T(\bar{k})| - |\hat{\mathbf{b}}_{i,ave}^T|)^2}{|\hat{\mathbf{b}}_{i,min}^T|^2} \quad (29)$$

(5)  $|\hat{\mathbf{b}}_{i,dev}^T|$  が閾値 (Th) 以下ならば、参照した 5 画素全てをそのまま誤差計算に用いる。

$$E(\mathbf{x}, Z) = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 |I(j; \mathbf{x}, Z) - \hat{I}(j; \mathbf{x}, Z)| \quad (30)$$

一方、 $|\hat{\mathbf{b}}_{i,dev}^T|$  が Th 以上ならば 1 つの画素に鏡面反射成分が含まれると考え、 $|\hat{\mathbf{b}}_i^T(\bar{k})|$  が  $|\hat{\mathbf{b}}_{i,min}^T|$  となったときに省かれた画素  $I_i(k)$  を除く、残りの 4 つの画素により誤差計算を行う。

$$E(\mathbf{x}, Z) = \frac{1}{5} \sum_{j=1, j \neq k}^4 |I(j; \mathbf{x}, Z) - \hat{I}(j; \mathbf{x}, Z)| \quad (31)$$

この  $E(\mathbf{x}, Z)$  が最小となるときの  $Z$  を奥行きとして決定する。

(6) 画像中の全ての点に対し、2~5 の操作を繰り返す。

この方法は、奥行き探索の際に各奥行きごとに参照された画素のセットに鏡面反射成分を含むものがあるかどうかを考慮できる点が、前節で述べた従来法と異なる。この作業が図 2 の B で表される部分である。

## 4. 実験

3 節で述べた、鏡面反射成分を考慮した対応付けの方法により奥行き探索を行った実験結果を示す。4.1 節において実験の概要について述べる。4.2 節において、光源ベクトルを更新したのちに奥行きを再探索を繰り返し、奥行き探索が改善されるかについて評価する。最後に 4.3 節では、3.2.1 節と 3.2.2 節で述べた 2 種類の誤差計算の結果を比較する。

### 4.1 実験の概要

実験に用いたデータは、室内で暗幕を壁に貼り、カメラ付近に配置した単一光源を用いて撮影されたものである。カメラに対して約 2m 離れた撮影対象物体を姿勢変化させた画像を、各物体につき 5 枚準備した。撮影対象物体として図 3 の (a) ダルマ、(b) 水差しの 2 種類を用いた。図 3 は、入力に利用した画像 5 枚のうち、3 枚を表示している。入力画像は 2 種類ともに 256 階調の濃淡画像である。入力画像の大きさはダルマが  $320 \times 400$  画素、水差しが  $360 \times 360$  画素である。

実験では初期入力として、画像間で手動により対応付けのとれた点の座標を、ダルマ画像の場合では 19 点、水差しの画像では 20 点について与えた。この初期対

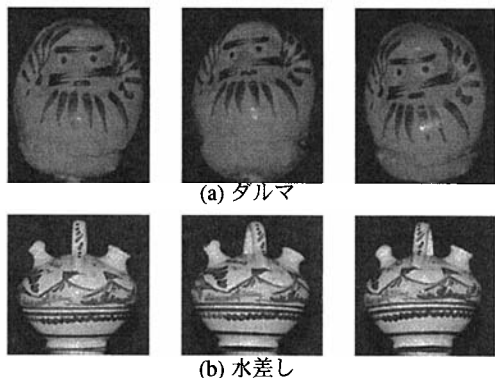


図3 入力画像。単一光源下で、固定したカメラに対して物体を姿勢変化させて撮影されたもので、入力に利用した画像5枚のうち3枚を表示している。

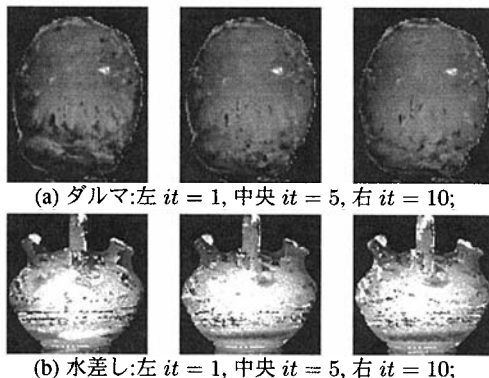


図4 奥行き探索の結果。it = 1 が距離画像の初期解、it = 5, 10 は鏡面要素判別を用いた繰り返し計算の結果である。

応点としては、鏡面反射成分が含まれない点を選ぶようにした。

まず始めに、表面輝度のうちいずれか1つを省いて法線ベクトルを5通り計算し、それらの分散値に従って、いずれの画像中でも鏡面反射が生じていないと判断された点の表面輝度を使って、輝度行列  $I$  を再構成し、これにより光源ベクトルを再計算し、式(16)を使って奥行きを再探索を行った(4.2節)。

次に奥行き探索を行う際に、物体表面の法線ベクトルの分散値を評価し、鏡面反射成分を含むかどうかを考慮した誤差計算の結果と、従来の誤差計算の結果を比較した(4.3節)。

#### 4.2 奥行き再探索

本節では、推定された法線ベクトル  $\hat{b}_i$  の分散値を閾値評価することで、5枚中1枚の画像に鏡面反射成分が含まれるかどうかを調べた結果を基にした光源ベクトルの再計算と更新を行い、奥行き探索を再び行ったときの結果について述べる。4.2.1節で、画像単位の平均的な誤差の推移を比較した。4.2.2節で、奥行き再探索の精度について評価した。

##### 4.2.1 奥行き再探索による平均誤差の推移

以下では奥行き探索を行う回数を  $it$  と表す。繰り返し計算の回数を順に  $it = 10$  まで増やしていき、 $it = 1, 5, 10$  となるとき奥行きを濃淡で表した画像を図4に表す。物体表面の点とカメラの距離が近い程、その点での画素は明るく表示されている。またこれを3次元的に表示した結果を図5に示す。

式(16)より奥行き誤差計算を全ての画素で行い、各画素での最小誤差を順に足していきこの総量を画素数で割ることで、単位画素あたりの平均誤差を求めて、これが繰り返し回数の変化によって、どのように変化するかを調べた。単位画素あたりの平均誤差の推移を図8の丸点でプロットした曲線で表す。横軸は奥行き探索の回数、縦軸は単位画素あたりの平均誤差を256

階調の画素値のオーダーで表している。

**ダルマ:** 図4(a)の3通りを比較する。 $it = 1$  では、ダルマの左下の部分で奥行き探索の誤差が大きくなっている。しかし左下の誤差、腹の辺りの黒い部分の面積が、奥行き探索を繰り返すごとに小さくなっていることがわかる。図5(a)の3通りを見ても、図4と同様、左下の誤差が奥行き探索を繰り返すごとに小さくなり、だんだん腹のへこみが小さくなっている。図8の左に示すように、 $it = 5$  を越えたところで、平均誤差の推移はほぼ横ばいになっている。

**水差し:** 図4(b)の3通りを比較すると、 $it = 1$  では見えにくかった水差しの右上と左上の突起が、 $it = 10$  では観察される。また  $it = 5, 10$  では、 $it = 1$  に比べて花瓶の底部分の誤差が小さくなっている。図5(b)の3通りを比べると、水差しの底の部分が段々丸くなっていき、取っ手の付け根の部分の膨らみが改善されている。図8の右に示すように、他の2種類の画像よりも、奥行き探索を繰り返すごとで、著しく平均誤差が減少し、 $it = 10$  を終えた段階で平均誤差は、 $it = 1$  のときの約70%になった。

##### 4.2.2 奥行き再探索精度の変化

ダルマ、水差しともに、図4、図5における比較および平均誤差の推移のグラフから回数を重ねるごとに、奥行き画像が改善されていることがわかる。つまり、2種類の物体の画像を用いた結果からは、平均的な対応付け誤差を減少させることができ、復元形状が改善されることが示された。一方、ダルマ画像の結果から、撮影対象物体によって平均誤差を減少させるのは5回程程度が限度であり、更に奥行き再探索を行っても、結果は対して変わらない場合があると考えられる。

#### 4.3 奥行き探索の誤差計算の比較

本節では、3.2.1節で述べた従来法と、3.2.2節で述べた鏡面反射成分の有無を考慮した誤差計算法を比較した。4.3.1節で2種類の誤差計算の結果を比較する。



(a) ダルマ:左  $it = 1$ , 中央  $it = 5$ , 右  $it = 10$ ;



(b) 水差し:左  $it = 1$ , 中央  $it = 5$ , 右  $it = 10$ ;

図 5 図 4 に示す結果の 3 次元的な表示.  $it = 1, 5, 10$  のそれぞれの 3 次元形状復元を行ったのちに適当な平滑化を施し, 1 枚目の入力画像のテキスチャを表面に貼りつけた.

4.3.2 節で従来の誤差計算の妥当性について評価する.

#### 4.3.1 奥行き探索の単位画素あたりの平均誤差の比較

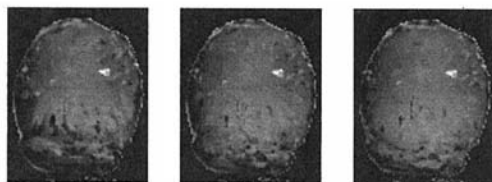
奥行き探索において, 推定された法線ベクトル  $\hat{\mathbf{b}}_i$  の分散値の評価により, 鏡面反射成分の有無を考慮した新しい誤差計算法を用いて, 繰り返し計算の回数を順に  $it = 10$  まで増やしていった. このとき  $it = 1, 5, 10$  となるとき奥行きを濃淡で表した画像を図 6 に示す. 図 4 同様, 物体表面の点とカメラの距離が近い程, その点での画素は明るく表示されている. またこの奥行き探索結果を基に, 物体を 3 次元的に表示した結果を図 7 に示す. また, 新しい誤差計算の方法の単位画素あたりの平均誤差の推移を, 図 8 の四角点でプロットした曲線で表す. 横軸は奥行き探索の回数, 縦軸は単位画素あたりの平均誤差を 256 階調で表している.

**ダルマ:** 図 4(a), 図 6(a) で, 同じ奥行き探索の回数である画像同士を比較しても, 特に目立った変化は見られない. 図 5(a), 図 7(a) の比較でも同様に目立った変化は見られない. しかし図 8 の左をみると, 新しい奥行き探索も, 従来の奥行き探索と同じような平均誤差の推移をするものの, 全体的に従来の方法が新しい方法に比べて, 単位画素あたりの平均誤差が小さくなった.

**水差し:** 図 4(b), 図 6(b) で画像同士を比較しても, 特に目立った変化は見られない. これは図 5(b), 図 7(b) 比較でも同様である. 図 8 の右をみると,  $it = 6, \dots, 9$  では, 新しい奥行き探索の平均誤差が, 従来の奥行き探索の平均誤差に比べ小さくなったが, 最後はほぼ同じ値に落ち着いた. 新しい方法の平均誤差の推移は, 従来の方法と同じように直線的に平均誤差が減少した.

#### 4.3.2 従来の誤差計算の妥当性の評価

ダルマ, 人物顔の画像とともに, 鏡面反射成分が含まれるかどうかを考慮した新しい誤差計算を用いて奥行き探索を行った結果が, 従来の奥行き探索の結果を下回った. このことから, 従来の最大の輝度値を省いて誤



(a) ダルマ:左  $it = 1$ , 中央  $it = 5$ , 右  $it = 10$ ;

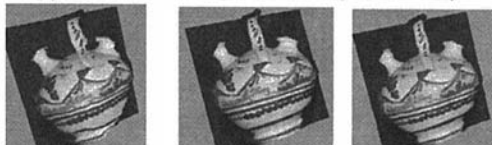


(b) 水差し:左  $it = 1$ , 中央  $it = 5$ , 右  $it = 10$ ;

図 6 鏡面要素判別を奥行き探索の各奥行きにおいても用いた繰り返し計算の結果.  $it = 1$  が距離画像の初期解,  $it = 5, 10$  は鏡面要素判別を用いた繰り返し計算の結果である.



(a) ダルマ:左  $it = 1$ , 中央  $it = 5$ , 右  $it = 10$ ;



(b) 水差し:左  $it = 1$ , 中央  $it = 5$ , 右  $it = 10$ ;

図 7 図 6 に示す結果の 3 次元的な表示.  $it = 1, 5, 10$  のそれぞれの 3 次元形状復元を行ったのちに適当な平滑化を施し, 1 枚目の入力画像のテキスチャを表面に貼りつけた.

差計算を行う方法に, 一定の妥当性が認められる.

以上の実験結果から次の点が考察される.

- 鏡面反射成分の有無を調べた後に輝度行列  $I$  を再構成し, これを特異値分解することで更新された光源ベクトルを使って奥行きを再探索を行うと, 奥行き探索の回数を重ねることに結果は改良される. しかし撮影対象物体によっては, 奥行き探索を繰り返しても結果が大きく変わらない場合があった.
- 従来の誤差計算は, 必ず 1 枚の画像の表面輝度を省いて計算を行っていたが, この方法でも妥当な奥行き探索を行うことができたと考えられる. 逆に法線方向の評価に基づく誤差計算では, 今のところ鏡面反射成分の有無によって点ごとに 4 枚の表面輝度を使ったり, 5 枚の表面輝度を使ったりしているため, 精度が劣化している恐れがある. しかし新しい手法には, 鏡面反射成分の有無によって誤差計算をどのように変えていくかを更に詳しく考慮することで, 今後改善の余地があると考えられる.

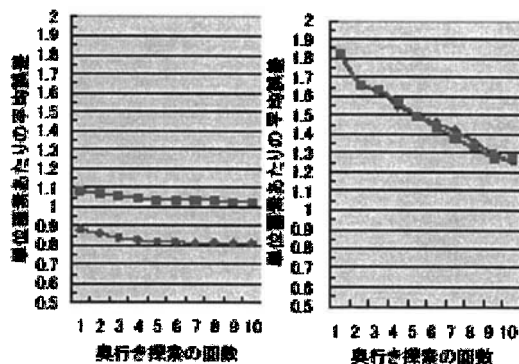


図8 2種類の誤差計算の比較:左 Dalma, 右 水差し. 丸点でプロットされた曲線は輝度行列の更新を伴う繰り返し誤差計算, 四角点でプロットされた曲線は鏡面要素判別を奥行き探索の各奥行きにおいても用いた繰り返し誤差計算による平均誤差の推移である.

## 5. 結論

本論文では, 複数の入力画像から姿勢変化する物体の3次元形状を復元する問題に Geotensity 拘束を用い, 特に以下の拡張について検討し, 有効性を示した.

- ある点  $p_i$  において, 物体表面の法線ベクトルを入力画像の複数の異なるサブセットを用いて推定し, この分散値を評価して鏡面反射成分の有無を判別する.
- 鏡面反射成分を含んでいないと判断された表面輝度から構成される輝度行列を生成し, 特異値分解から光源ベクトルを用いて再計算される奥行き探索を繰り返し行うことで, 奥行き探索の改善を目指す.
- 点  $p_i$  の奥行き探索において, 一度に参照する  $m$  枚の画像の表面輝度のうち, 必ず一つを省いた従来の誤差計算と, 鏡面反射成分の有無を評価した新しい誤差計算の結果を比較し, 従来法の妥当性を示す.

今後は, 本稿で十分に扱うことができなかった下記の項目を含め更に検討を進めていく.

**鏡面反射成分の検出結果の正当性:** 本稿では, 輝度行列に鏡面反射成分を含ませないために, 単純に閾値を厳しく設定したが, 検出された鏡面反射成分の範囲が正しいかどうかを具体的に評価していない. また, 本論文で入力画像の点  $p_i$  において, 鏡面反射成分が含まれる場合  $m$  枚のうち1枚だけに生じるものと仮定しているが, 実際は点によって  $m$  枚のうち2枚以上の画像に鏡面反射成分が含まれる場合も考えられる. 今後, 鏡面反射成分をより丁寧に扱っていくために, どのような仮定を設けるかを考察する必要がある.

**奥行き再探索の回数 の妥当性:** 本論文では, 2種類の対象物体を入力画像として, 奥行き探索の回数を10回までとしたが, この10回以内でDalmaは平均誤差の推移が減衰していったのに対し, 水差しは直線的に平均誤差が減少した. これより奥行き再探索の回数を増やすことで, さらに改善された奥行き画像が得られる可能性がある.

## 謝 辞

研究の遂行にあたり, 研究会でご指導を頂いた松山研究室のスタッフの皆様へ深く感謝します. 本研究の一部は, 科学研究補助金 16680010, および文部科学省プロジェクト「知的資産の電子的な保存・活用を支援するソフトウェア技術基盤の構築」の助成を受けて行った.

## 参 考 文 献

- 1) P.A. Beardsley, P. Torr and A. Zisserman, 3D Model Acquisition from Extended Image Sequences, In Proc. of 4th ECCV, pp.683-695, 1996.
- 2) P.N. Belhumeur and D.J. Kriegman, What is the set of images of an object under all possible lighting conditions?, In Proc. of CVPR, pp.270-277, 1996.
- 3) E.N. Coleman, Jr., and R. Jain, Obtaining 3-Dimensional Shape of Textured and Specular Surfaces Using Four-source Photometry, Computer Graphics And Image Processing 18, pp.309-328, 1982.
- 4) A. Maki, 3D Surface Reconstruction of a Moving Object in the Presence of Specular Reflection, In Proc. of ICIAF, pp.867-875, 2005.
- 5) A. Maki, M. Watanabe, C. Wiles. Geotensity: Combining Motion and Lighting for 3D Surface Reconstruction. IJCV, Vol.48(2), pp.75-90, 2002.
- 6) A. Nakashima, A. Maki. Synthesizing Pose and Lighting Variation from Object Motion. In Proc. of ICIP(3), pp.725-728, 2003.
- 7) 中島朗子, 牧淳人. 物体運動からの任意照明, 画像の生成. CVIM, pp.93-100, 2003.
- 8) A. Shashua, On Photometric Issues in 3D Visual Recognition from a Single 2D Image, IJCV,21(1/2), pp.99-122, 1997.
- 9) C. Tomasi, T. Kanade, Shape and Motion from Image Streams under Orthography: a Factorization Method, IJCV9(2), pp.137-154, 1992.
- 10) C. Wiles, A. Maki, N. Matsuda, Hyperpatches for 3D Model Acquisition and Tracking, IEEE Trans. PAMI 23(12), pp.1391-1403, 2001.
- 11) R.J. Woodham, Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images, Optical Engineering, 19(1), pp.139-144, 1980.