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,画素間で対応付けられた 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 paticular, 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⁵⁾ 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 このようにして求まっ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っ て,奥行き探索を高精度化する試みがなされてきた⁶⁰⁷⁾. 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⁴⁾.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 変え,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⁶⁾⁷⁾の枠組みに鏡面反 射成分への対処法⁴⁾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.

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 の内向きの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 リ,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s(j)と表すことにする.s(j)は第一の画像で定義した 光源ベクトルs(1)に,物体の 3×3 次元の回転行 列 R(j)の転置を乗じたものであり,

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

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,

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

$$=1,2,\ldots,m)\tag{3}$$

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 $p_i(i = 1, 2, ..., n)$ について順に並べた行列を B とよび,

(j

 $B = [\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, ..., \mathbf{b}_n]$ (4) とおく. B は 3 × 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, $S = [\mathbf{s}(1), \mathbf{s}(2), ..., \mathbf{s}(m)]$ (5)

とおく. S は 3 × m 行列である. m 枚の入力画像間で 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

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

すなわち,

$$I = B^T S \tag{7}$$

と表すことができる⁸⁾.

2.3 Geotensity 拘束に基づく奥行き探索

Geotensity 拘束については文献⁵⁾ 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¹⁰⁾¹⁾、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 pi 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 ファインカメラモデルによれば次式で表される.

 $\mathbf{x}_i(j) = M(j)\mathbf{X}_i + \mathbf{t}(j)$ (8) ここで任意の 2 × 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⁹. 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.

$$\mathbf{x}_{i}(j) = M(j) \begin{pmatrix} \mathbf{x}_{i}(1) \\ Z_{i} \end{pmatrix} + \mathbf{t}(j)$$
(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.

$$I = \hat{B^T}\hat{S} \tag{10}$$

特異値分解にはよく知られているように,任意の 3×3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,

 $I = \hat{B}^T A^{-1} A \hat{S}$ (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,

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

でベクトル $\hat{s}(j)$ を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 $\hat{s}(j)$ 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 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 x_i に対応する点の輝度と して,

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

 $\hat{\mathbf{b}}_{i}^{T} = [I_{i}(1), ..., I_{i}(m)]\hat{S}^{T}(\hat{S}\hat{S}^{T})^{-1}$ (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

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

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,

$$E(\mathbf{x}, Z) = \frac{1}{m} \sum_{j=1} |I(j; \mathbf{x}, Z) - \hat{I}(j; \mathbf{x}, Z)|$$
(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 最小となるときの 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 節で奥行きの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 奥行きの再探索

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の再探索を行う手法が提 案されている⁶⁷⁷.

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 *pi* 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 枚だけに生じるもの 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まっ 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 $\hat{\mathbf{b}}_i$ を式 (14) より求める. 全部で 5 通りの $\hat{\mathbf{b}}_i$ 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、 $\hat{\mathbf{b}}_i$ 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 Stereo¹¹⁾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³⁾と同 様,鏡面反射成分が含まれない場合は、5通り全ての $\hat{\mathbf{b}}_i$ 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 $\hat{\mathbf{b}}_i$ 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 $\hat{\mathbf{b}}_i^T(\bar{k})$ を計算する.

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_{i}^{I}(k) &= I_{i}(k)S^{I}(k)(S(k)S^{I}(k))^{-1} \quad (17) \\ \hbar t \overleftarrow{\mathbf{L}} \mathbf{U} \\ \hat{I}_{i}(\overline{k}) &= [I_{i}(1), ..., I_{i}(k-1), I_{i}(k+1), ..., I_{i}(5)] \\ & (18) \\ \hat{S}(\overline{k}) &= [\hat{\mathbf{s}}(1), ..., \hat{\mathbf{s}}(k-1), \hat{\mathbf{s}}(k+1), ..., \hat{\mathbf{s}}(5)] \end{aligned}$$

$$k = (1, 2, 3, 4, 5) \tag{20}$$

(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.

$$|\hat{\mathbf{b}}_{i.ave}^{T}| = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^{5} |\hat{\mathbf{b}}_{i}^{T}(\bar{k})|$$
(21)

(4) $|\hat{\mathbf{b}}_{i}^{T}(\bar{k})|$ の最小値 $|\hat{\mathbf{b}}_{i_min}^{T}|$ を選び,分散値 $|\hat{\mathbf{b}}_{i_dev}^{T}|$ を次のように定義する.

$$\begin{aligned} |\mathbf{b}_{i_dev}^{T}| &= \frac{1}{5} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(|\mathbf{v}_{i}|(\mathbf{v})| - |\mathbf{v}_{_avel})}{|\hat{\mathbf{b}}_{i_min}^{T}|^2} \quad (22) \end{aligned}$$

- (5) $|\hat{\mathbf{b}}_{i_dev}^T|$ 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⁴⁾. 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 のがあった.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変え、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、

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

$$\hat{\mathbf{b}}_{i}^{T}(\bar{k}) = \hat{I}_{i}(\bar{k})\hat{S}^{T}(\bar{k})(\hat{S}(\bar{k})\hat{S}^{T}(\bar{k}))^{-1}$$
 (24)
 $\hbar \hbar \tilde{c}$ U

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

$$\hat{S}(\bar{k}) = [\hat{\mathbf{s}}(1), ..., \hat{\mathbf{s}}(k-1), \hat{\mathbf{s}}(k+1), ..., \hat{\mathbf{s}}(5)]$$

$$k = (1, 2, 3, 4, 5) \tag{27}$$

(26)

(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.

$$|\hat{\mathbf{b}}_{i_ave}^{T}| = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^{5} |\hat{\mathbf{b}}_{i}^{T}(\bar{k})|$$
 (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.

$$|\hat{\mathbf{b}}_{i_dev}^{T}| = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^{5} \frac{(|\hat{\mathbf{b}}_{i}^{T}(\bar{k})| - |\mathbf{b}_{i_ave}^{T}|)^{2}}{|\hat{\mathbf{b}}_{i_min}^{T}|^{2}} \quad (29)$$

 (5) | **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.

$$E(x,Z) = \frac{1}{5} \sum_{j=1, j \neq k}^{*} |I(j;\mathbf{x},Z) - \hat{I}(j;\mathbf{x},Z)|$$
(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の再探索を繰り 返し行い,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 320×400 画素、水差しが360×360 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.

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 て奥行きの再探索を行った (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 奥行きの再探索

本節では、推定された法線ベクトル $\hat{\mathbf{b}}_i$ 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, 奥行きの再 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 となるときの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)より奥行きの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



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

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.

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ことで、 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 奥行きの再探索精度の変化

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 度が限度であり,更に奥行きの再探索を行っても,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.





(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となるときの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,...,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



(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.



(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の再探索を行うと、奥 行き探索の回数を重ねるご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ていたと考えられる. 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 ダルマ,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 pi 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回以内でダルマは平 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 の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に深く感謝します.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板の構築」の助成を受けて行った.

参考文献

- P.A. Beardsley, P. Torr and A. Zisserman, 3D Model Acquisition from Extended Image Sequences, In Proc. of 4th ECCV, pp.683-695, 1996.
- 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.
- E.N. Coleman, Jr., and R. Jain, Obtaining 3-Dimentional Shape of Textured and Specular Surfaces Using Four-source Photometry, Computer Graphics And Image Processing 18, pp.309-328, 1982.
- A. Maki, 3D Surface Reconstruction of a Moving Object in the Presence of Specular Reflection, In Proc. of ICIAP, pp.867-875, 2005.
- A. Maki, M. Watanabe, C. Wiles. Geotensity: Combining Motion and Lighting for 3D Surface Reconstruction. IJCV, Vol.48(2), pp.75-90, 2002.
- 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.
- 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.
- C. Wiles, A. Maki, N. Matsuda, Hyperpatches for 3D Model Acquisition and Tracking, IEEE Trans. PAMI 23(12), pp.1391-1403, 2001.
- R.J. Woodham, Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images, Optical Engineering, 19(1), pp.139-144, 1980.