等濃線とその勾配を用いた 3 次元形状計測

梶 原 良 昌[†], 正会員 中 村 納[†]A Measurement of 3-Dimensional Shape
Using Isodensity Lines and Its GradientYoshiaki Kajiwar[†] and Osamu Nakamura[†]

Abstract The shape from shading, originally proposed by Horn, is well known as a method for reconstructing curved surfaces by means a single picture. However, some problems involved with this method remain to be investigated for its practical application. They include the complexity of determining a reconstruction pass and the sensitivity to noise. To cope with these problems, this paper proposes, simplified algorithm based on isodensity lines in the image plane and a gradient space to extract the reconstruction pass. In the proposed method, the reconstruction passes can be obtained without solving complex differential equations. A computer simulation was been carried out by using two virtual objects and two real images. Judging from the experimental results, the prospects of using this method for practical applications are very encouraging.

1. ま え が き

本論文では等濃線を利用して, 1 枚の濃淡画像から曲面物体の形状を復元する方式について提案する. 単一濃淡画像からの曲面物体形状復元の代表的な方式としては Horn が定式化した shape from shading¹⁾²⁾ があるが, その方式にそのまましたがって処理した場合, 式の中に微分処理が含まれることから, 処理は雑音に対して非常に敏感なものとなる. この問題を解決する方法として, 弛緩法を用いて繰り返し演算により高さを復元する方法³⁾⁴⁾ や物体表面を球面で近似し局所的に求める方法⁵⁾⁶⁾, 等も提案されているが, 処理

時間が膨大になる等といった点が指摘される. また, 相互反射のある凹物体の復元⁷⁾ や, 輝度値そのものから物体の形状を求めるのではなく, 輝度分布のパターンから物体の形状を求める手法⁸⁾ 等も提案されている. さらに, 等濃線を用いた, より簡単な方法⁹⁾ も提案されているが, この方式では, 画像平面上での等濃線とガウス曲率を用いて復元経路を求めているため, 鞍部点(ガウス曲率が負の部分)のある物体を復元する際には曲率が負になる領域と, その領域での最小主曲率の方向を初期値として与えなければならない.

これに対し, 本論文で提案する手法は, Horn の shape from shading と同様に, 明るさ情報のみを用

キーワード: コンピュータビジョン, shape from shading, 反射率分布

1996 年 10 月 31 日, 第 39 回工学院大学研究発表講演会で発表

1996 年 11 月 5 日受付, 1997 年 3 月 31 日最終受付

[†] 工学院大学 電子工学科 (〒163-91 東京都新宿区西新宿 1-24-2, TEL 03-3342-1211)

[†] Department of Electronic Engineering, Kogakuin University (1-24-2, Nishi-shinjuku, Tokyo 163-91, Japan)

いて復元経路を求めているので、文献9)の方法とは異なり、対象物体の局所的な曲率等の情報は一切必要としない。また本手法では、復元経路を求める際に画像平面および勾配空間での等濃線を用いることで、比較的安定かつ容易に3次元形状が復元できるという長所を持っている。

以下、2章では本論文で使用する座標系および明るさと物体表面の傾きについて簡単に説明し、3章ではHornのshape from shadingと本方式の概要について述べる。また、4章で処理の詳細について述べた後、5章で実験結果と考察について述べる。最後に6章で本論文の結果をまとめるとともに、今後の課題について整理する。

2. 準備

本方式では投影法として正射投影法を使用する。また、観測される被写体の表面は拡散反射特性を持ち微分可能であるとする。本方式で使用する観測系を図1に示す。

2.1 反射率分布図

放射輝度 L の光源に照射された拡散反射面を考えると、物体表面の点 $Z(X, Y)$ が画像平面上で観測される明るさ $I(x, y)$ は

$$I(x, y) = \alpha L \cos \theta \quad (1)$$

として表される。ここで、 θ は物体表面の法線と光源方向のなす角、 α は対象物体の反射率である (図1参照)。

物体表面の高さは $Z(X, Y)$ であるため、物体表面の x 方向の傾きを p , y 方向の傾きを q とすると、 p , q はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{\partial Z(X, Y)}{\partial X} \\ q &= \frac{\partial Z(X, Y)}{\partial Y} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

として表される。したがって、物体表面の法線ベクトル $\vec{n}$ は $(-p, -q, 1)$ となる。ここで、物体表面から見た光源の方向 $\vec{v}$ を $(-p_s, -q_s, 1)$ とし、 $\vec{n}$ と $\vec{v}$ の内積をとることによって

$$\cos \theta = \frac{1 + p_s p + q_s q}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} \quad (3)$$

となる。これを(1)式に代入し、両辺を αL で割り、明るさの最大値を1に正規化すると

$$E = \frac{1 + p_s p + q_s q}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} \quad (4)$$

となり、 $E(x, y) = R(p, q)$ という、明るさと物体表面の向きの関係を表す方程式を導くことができる。この

図1 観測系
Coordinate systems.

図2 反射率分布図(光源と視点が一致)
Reflectance map.

式は画像照度方程式と呼ばれる。ここで、 E は正規化された明るさ、 R は物体表面の傾きと明るさの関係を表す関数である。さらに、ここでは光源方向と観測方向は一致しているものとしているため、光源方向 $\vec{v}$ を $(-p_s, -q_s, 1) = (0, 0, 1)$ とし、(4)式を整理すると

$$p^2 + q^2 = \frac{1 - E^2(x, y)}{E^2(x, y)} \quad (5)$$

となる。本条件の下では、画像平面上のある点 (x, y) に対応する物体表面の傾きは $\sqrt{p^2 + q^2}$ となるため、画像平面上の点 (x, y) の明るさが決まれば(5)式から物体表面の傾きの大きさを求めることができる。(5)式を勾配 p, q および明るさ E の関数として3次元空間上の等濃線として表したものが図2である。図では中心が最も明るく、外側に行くにつれて暗くなる。この図は反射率分布図と呼ばれ、後に4章で高さを復元する際、その復元経路を求めるときに使用される。

3. 等濃線を用いた shape from shading

2章では、明るさから物体表面の傾きの大きさが求まることを述べた。したがって次は、求まった傾き

を、その面素が傾いている方向、すなわち、高さの最急上昇方向で積分することによって、その物体の高さは復元されることになる。しかし、これまでの説明では物体表面の面素の傾きの大きさは求めることができたが、その面素の傾いている方向はまだわかっていない。Hornはその方向を求めるために以下の式を導いた。

3.1 shape from shading

画像平面上で高さの最急上昇方向に微小変位 $\delta\xi$ を取ったとする。Horn は以下の5つの常微分方程式により復元経路を求め、物体の3次元形状の復元を行っている。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial \xi} &= \frac{\partial R(p, q)}{\partial p} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} &= \frac{\partial R(p, q)}{\partial q} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial \xi} &= \frac{\partial E(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial q}{\partial \xi} &= \frac{\partial E(x, y)}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\frac{\partial z}{\partial \xi} = p \frac{\partial R(p, q)}{\partial p} + q \frac{\partial R(p, q)}{\partial q} \quad (8)$$

初期値として、物体表面の傾き p, q が与えられれば(6)式および(7)式の4つの常微分方程式は数値的に解くことができ、物体表面に特性曲線と呼ばれる曲線が生成される。この曲線が高さを復元する際の復元経路となる。この曲線に沿って、(8)式により傾きから高さを求め、その微小変位を積分することによって、3次元形状は復元される。

3.2 本方式の概要

本方式は、(6)式、(7)式を数値的に解き特性曲線を求める複雑な方式ではなく、(6)式および(7)式から求める解を、それぞれ画像平面および勾配空間上の復元経路であると位置づけている(図3(a)(b)参照)。このように考えると、その復元経路はそれぞれの平面上的等濃線の垂線方向を用いて求めることができる。

等濃線とは、等しい明るさの画素を結ぶことにより抽出される閉曲線群のことで、その垂線方向は明るさの最急上昇方向を表している。本方式は、等濃線を用いて区分的に復元経路を求めることで、処理を簡略化できると同時に、雑音に対するロバスト性の高いものとなっている。

(1) 復元経路と等濃線の関係

初期値として画像平面上のある点 (x, y) の物体表面の傾き (p, q) がわかったとすると、画像平面上および反射率分布図上で、それぞれ対応する1点をプロッ

図3 復元経路の関係

Reconstruction pass between image plane and reflectance map.

(a) Reconstruction pass in image plane, (b) Reconstruction pass in reflectance map, (c) Magnified scale of rectangle area of (a), (d) Magnified scale of rectangle area of (b).

トすることができる。この点が、それぞれの平面上での復元経路の開始点となる。このとき、画像平面上で復元経路方向に微小変位 $\delta\xi$ を取ったとすると、反射率分布図上でも復元経路方向に沿ってそれに対応する微小変位 $\delta\xi$ を取ることができる。ここで、画像平面上での変化の方向は(6)式から求め、反射率分布図上での変化の方向は(7)式によって求めることができるが、(6)式は、画像平面上で復元経路方向に $\delta\xi$ 変化した際の x, y 座標の変位は、その点に対応する反射率分布図上の点の p, q 方向の勾配となることを示している。したがって、画像平面上で復元経路が変化する方向を $(x_R, y_R)^T$ とし、ベクトルで復元経路の方向を表すと

$$(x_R, y_R)^T = \left(\frac{\partial R(p, q)}{\partial p}, \frac{\partial R(p, q)}{\partial q} \right)^T \quad (9)$$

となる。すなわち、画像平面上の変化の方向は反射率分布図上での対応する点の明るさの最急上昇方向(等濃線の垂線方向)に一致するということになる。(7)式に関しても同様に、反射率分布図上で復元経路方向に $\delta\xi$ 変化した際の p, q 座標の変位は、その点に対応

する画像平面上の点の x, y 方向の勾配となることを表している。したがって、反射率分布図上で復元経路が変化する方向を $(p_R, q_R)^T$ とすると

$$(p_R, q_R)^T = \left(\frac{\partial E(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial E(x, y)}{\partial y} \right) \quad (10)$$

となる。すなわち、反射率分布図上での復元経路の変化の方向は画像平面上での対応する点の明るさの最急上昇方向（等濃線の垂線方向）に一致するということである（図3(c)(d)参照）。この2つの復元経路は互いに影響し合っているため、本手法では、2つの平面上で同時並行的に復元経路を求めていくことになる。

なお、本方式では初期値の物体表面の傾きは、物体の輪郭線上において外縁線拘束¹⁾²⁾によって求めている。したがって、輪郭線上を処理の開始点とし、物体の中心に向かって高さの復元を行っていくことになる。また、高さを復元する際には輪郭線上の画素の高さを基準とし、物体の高さは輪郭線上の画素からの相対的な高さで表される。

4. 処理の手順

本方式では、上記3.2節で説明した処理を画像の輪郭線上のすべての画素に対して行うことで物体表面全体の高さは復元される。処理の流れを図4に示す。手順は以下の通りである。

4.1 等濃線の抽出

等濃線とは、等しい濃度の画素を結ぶことにより抽出される閉曲線群のことで、濃淡画像から比較的安定に、しかも容易に抽出することができる。抽出手順は次の通りである。

- 入力された画像の濃度ヒストグラムを作成する。
- その濃度値のダイナミックレンジを16等分する閾値を決定する。
- 決定した閾値を用いて入力画像を線形量子化する。
- 量子化された画像の濃度値の境界線を抽出する。

図5に等濃線の抽出結果を示す。この図で最も内側の閉曲線を第1レベル等濃線と呼び、最も明るいレベルの等濃線である。外側にいくにつれて暗くなり、一番外側の等濃線を第16レベル等濃線と呼ぶことにする。この第16レベル等濃線が物体の輪郭線を表している。ここで、第1レベルの等濃線を復元経路の終端として高さの復元を行った場合、第1レベル等濃線の内側において高さの変化があるにもかかわらず、その

図4 処理の流れ
Flow of the reconstruction process.

図5 等濃線分布
Isodensity lines extracted from virtual object.

変化分を復元することができない。したがって、上記(a)から(d)の方法で抽出した等濃線とは別に、最も明るい輝度値を持つ領域を抽出し、その境界線(第0レベル等濃線と呼ぶこととする)を最上位の等濃線として復元処理を行うこととする。この場合、第0レベル等濃線の内側の領域では、面素が光源に対して垂直であり、高さの変化がないため、第0レベル等濃線上の高さが正確に復元されていれば、線形補間したとしても誤差を生じることはない(図6参照)。また、本方式では1画素ごとに復元経路を求めるのではなく、等濃線間で区分的に復元経路を求めているが、輝度値に対して線形量子化を行った場合、物体の高さが急激に変化している領域では等濃線の間隔が狭くなり、逆に高さが緩やかに変化しているところではその間隔は広がる。したがって本手法では、区分的に復元経路を求めているにも関わらず、復元経路のずれによる高さ

図 6 最大輝濃度を持つ領域
The area which has maximum intensity level.

の誤差の発生を比較的小さく抑えることができると同時に、処理が大幅に簡略化できるといった利点がある。

4.2 等濃線の垂線方向（明るさの最急上昇方向）の算出

本方式では、画像平面および反射率分布図上での等濃線を用いて復元経路を求めているため、その正確な方向を算出することは非常に重要である。

ここで、反射率分布図上の等濃線の垂線方向（図7参照）は、本観測系の下では原点に向かう方向となるため、その点の座標から正確に算出することができるが、画像平面上の等濃線の垂線方向は、処理に用いる画像がデジタル画像であることに起因し、曲線の厳密な垂線方向を求めることは困難である。そこで、ある程度の近似を行い垂線方向を求めることとした。

垂線方向の算出はその近傍の画素を用いて以下の手順で行う。

- 注目レベルの等濃線の全画素数 w を計数する。
- 注目画素を中心として、その画素に連結している等濃線上の画素を前後 $w/10$ 画素ずつ参照し、それぞれの画素で明るい領域に面している辺に対し、その辺の数を方向コードを用いて x 方向および y 方向で別々に加算する。
- その値を注目画素からの垂線方向ベクトルの成分とする（図8参照）。

4.3 等濃線の追跡方法

4.2 節の処理で等濃線の垂線方向を求める際には、それぞれのレベルの等濃線を追跡し、画素をカウントする必要がある。このとき、雑音のない画像では等濃線は8連結の線幅1の閉ループとして抽出されるが、実画像のような雑音を含んだ画像では、線幅が1になるとは限らず、また、枝を含んだ画像になってしまう可能性がある。そこで、このような等濃線を追跡するとともに平滑化する目的で、以下のようなアルゴリズム

A点からの方向ベクトルは $(-p, -q)$ となる

図 7 等濃線の垂線方向（反射率分布図上）
Perpendicular to the isodensity line in reflectance map.

図 8 垂線方向の抽出
Extraction of a perpendicular from isodensity line.

図 9 等濃線の追跡
Tracking of isodensity line.

ムを使用した（図9参照）。

- 注目画素を中心として 3×3 のマスクを設定し、そのマスク内で時計回りに次の画素を検索する。ここで、初めて見つかった画素を次の注目画素とする。

図 10 高さの復元
Reconstruction of the height (Side view).

(b) 注目画素において連結する画素がない場合には、その画素を消去するとともに注目画素を1つ前の画素に戻し、(a)に戻る。

(c) 上記(a)および(b)の処理を初めの注目画素に戻るまで繰り返す。

以上の処理で等濃線ループを追跡し、4.2節の処理で垂線方向を求める際に邪魔になる枝を消去する。また、抽出した等濃線ループの総画素数が閾値 $th(th=50)$ より小さかった場合には、その等濃線ループを消去する。その理由は、雑音の影響で画像中に微小で突出した濃度変化が存在した場合、その周辺に小さな等濃線ループが抽出されることがあり、このような微小な等濃線ループは画像の全体的な特徴抽出に悪影響を及ぼすためである。ただし、第0レベルの等濃線ループはこの処理の対象外とする。その理由は、第0レベルの等濃線ループはその性質上構成画素数が非常に少なく、また、復元経路の終端として用いているのみで、そのループから傾きを求め、復元経路を引くことがないためである。

4.4 高さの復元方法

本方式では、等濃線間で区分的に高さの復元を行っている。復元経路上の注目点bの高さを Z_b とすると、 Z_b は

$$Z_b = Z_a + h \quad (11)$$

として表される (図 10 参照)。

ただし、 Z_a : 点 a の高さ

h : 点 a, b 間の高さ

$$h = \eta_{ab} l \quad (12)$$

η_{ab} : 点 a, b 間の物体表面の傾き

$$\eta_{ab} l = \tan\left(\frac{\theta_a + \theta_b}{2}\right)$$

θ_x : 点 X の物体表面の角度

l : 画像平面上での基準点から注目点までの距離

以上の処理を等濃線間で繰り返すことにより、復元経路上の高さは復元される。

図 11 復元経路
Reconstruction pass.

4.5 復元経路の決定

(1) 等濃線による復元経路の決定

輪郭線上の任意の画素から、画像平面および反射率分布図上の復元経路を求め、それぞれの平面上で、次のレベルの等濃線と交差するまで直線を引く、その交差した点において新たに復元方向を求め、順次復元経路を等濃線レベルの低い方へ延長していく。

このとき、まず画像平面上で、反射率分布図上の対応する点の等濃線の垂線方向を用いて、1画素ずつ復元経路を延長していくことにより、次の等濃線との交点を求める。次に、反射率分布図上では、すでに画像平面上で求まっている、次のレベルの等濃線との交点の明るさの値 (量子化を行っていない原画像の輝度値) を直接(5)式の $E(x, y)$ に代入することにより反射率分布図上での等濃線の方程式 (円の方程式) を求める。次いで、画像平面上の対応する点の等濃線の垂線方向を用いて直線の方程式 (復元経路の方向) を立て、この2つの方程式の交点を求めることにより、復元経路を求めている。

この処理を両平面上で最も内側の等濃線 (第0レベル等濃線) に到達するまで続ける。もし、この処理の途中で、いずれかの平面で、復元経路が出発した等濃線レベルと同じレベルの等濃線と交差 (図 11 の点 P_2) した場合、そこで復元経路は打ち切り、輪郭線からその前の等濃線との交点まで (図 11 の点 S から点 P_1) の高さの復元を行う (図 11 参照)。

以上の処理で高さの復元は終了するが、復元経路が通過しなかった領域の高さは復元されないことになる。これらの領域は線形的に補間することとした。

4.6 補間処理

復元されなかった領域に対しては補間処理で対処することになるが、その手順は以下の通りである。

- 復元されなかった領域の画素を x 方向および y 方向でそれぞれ線形補間する。
- (a) で求めた2つの値の平均値をその領域の画素の補間値とする。

図 12 実験に使用した画像とその俯瞰図
Intensity and bird-eye-view expressions of images
used in experiments.
(a)Input image of virtual object A and B, (b)
Bird-eye-view of virtual object A and B.

図 13 等濃線図
Isodensity lines extracted from the intensity
images.
(a)Object A, (b)Object B.

5. 実験結果および考察

本手法の有効性を確認するため、コンピュータ上でレイトレーシングにより作成した濃淡画像の復元を試みた。コンピュータで作成した仮想物体であれば、物体の形状、高さ等が正確にわかり、復元結果の評価が厳密に行えるためである。

次いで、本手法の対雑音耐性を検討するため、2つの石膏製の物体を実際に撮影した画像を用いてその復元を試みた。

5.1 理想画像を用いた復元実験

実験には、シミュレーションで作成した512×480画素、各画素256階調の白黒濃淡画像を用いた。作成

図 14 復元結果
Reconstructed images (Intensity expression).
(a)Object A, (b)Object B.

図 15 理論値の高さ画像
Theoretical values of the height.
(a)Object A, (b)Object B.

図 16 補間結果
The interpolated heights (Intensity expressions).
(a)Object A, (b)Object B.

した画像と、その俯瞰図を図12に示す。また、この画像から抽出した等濃線を図13に示す。

図12に示した画像に対して本手法を適用した結果を図14に示す。また、高さの理論値を図15に示す(ただし、ここでは高さは輝度表示で表しており、高い位置の画素ほど明るい色で表されている)。図14で、画像中央部やその周辺に散在する暗い領域は、復元経路がずれたか、あるいは復元経路が正確に求まらなかったために復元経路が延長できず、空いてしまった領域である。このような領域の高さは復元されないため、線形補間で処理している。補間画像を図16に、

(a) 仮想物体 A (b) 仮想物体 B

図 17 補間結果の俯瞰図
Bird-eye-view of the reconstructed objects.
(a) Object A, (b) Object B.

(a) 仮想物体 A (b) 仮想物体 B

図 18 誤差ヒストグラム
Error distributions.
(a) Object A, (b) Object B.

図 19 誤差ヒストグラム
Error distributions. (Object A.)

またその俯瞰図を図 17 に示す。図 18 には復元された高さの誤差ヒストグラムを示す。ここで、補間前のヒストグラムは高さが復元された画素のみを対象として作成している。

誤差の原因としては、

- (1) 等濃線の垂線方向が正確に求まらず、復元経路がずれてしまったことに起因する誤差。
- (2) 復元経路が通過しなかった領域を線形補間したことによる誤差。
- (3) デジタルで処理を行っていることに起因する丸め誤差。

等が考えられるが、主に(1)が大きな誤差要因となっている。(1)の影響を調べるため、等濃線の垂線方向の理論値を初期値として与えて仮想物体 A の復元を

(a) 復元経路 (b) 理論値と復元値の比較

図 20 復元経路上の高さ
Height on the reconstruction pass.
(a) Reconstruction pass, (b) Comparison theoretical height with reconstruction height.

行い、提案手法の結果と比較した。垂線方向の理論値を初期値として与えた場合の誤差ヒストグラムを図 19 に示す。図 19 の実線の誤差は(3)の影響によるもので、図 18(a)の実線と図 19 の実線の差分が主に(1)の影響による誤差である。この図の比較から仮想物体 A の復元結果の誤差の大部分は上記誤差要因内の(1)の影響で生じたものであると考えられる。ここで、復元経路の誤差は復元経路が延長されていくにしたがって徐々に蓄積されていくため、復元経路の終端付近ほど大きな誤差が発生することになる。したがって、輪郭付近と比べると、相対的に画像の中心部ほど誤差が大きくなる(高さが実際の値よりも高めに復元される)傾向がある。図 20 に、1 本の復元経路上の高さの復元値と理論値の比較を示す。

誤差要因のうちの(2)の影響(図 18 の実線と点線の差分)としては、図 14(a)で、物体の周辺にある小さな暗い領域に関しては、線形補間でほぼ正確に復元することができるが、中心の大きな暗い領域では大きな誤差が生じる。理由は、上でも述べた通り、復元経路が延びていく(物体の中心に向かう)につれて解の信頼性が徐々に落ちていくことになるため、その解を用いた線形補間では復元結果はさらに信頼性の低いものとなるということである。

(3)の原因としては次のようなことが考えられる。本手法では、復元経路はサブピクセル単位で求めているが、等濃線の垂線方向は画素単位、すなわち、その画素の中心からの垂線方向で求めている(図 21 では、等濃線の垂線方向を点線のようにまず求め、この方向を元にして、反射率分布図上で復元方向を実線の矢印 R のように求めている)。したがって、復元経路が等濃線と交差したとき、その交点と画素の中心はわずかにずれているが、サブピクセル単位の垂線方向を求めることができないため、その画素の中心からの垂線方

←... の方向を用いて新しい復元経路 R を求める.

図 21 復元経路と等濃線の垂線方向
Reconstruction pass and perpendicular from isodensity line.

図 22 実験に使用した画像
Intensity images and its isodensity lines used in experiments.
(a) Input image of two real images, (b) Isodensity lines extracted from the intensity images.

向を用いて復元経路を求めている. この誤差が復元経路の精度に影響している. しかし, 図 18 からわかるように, この誤差の影響は (1) による影響と比べて非常に少ない.

本方式は, 外縁線拘束により輪郭線上の物体表面の傾きを求め, その傾きを初期値として復元経路を延長していくため, 途中で発生した誤差が徐々に蓄積され, 以降の復元経路に影響を及ぼす. したがって, 初期値として正確な値を知ることが非常に重要である. 実験では, 等濃線の垂線方向を求める際, 等濃線の大局的な形状を反映させるため, 等濃線を構成している画素数に応じて参照画素数を可変とした. しかし, この方法だけでは同一等濃線上で局所的に急激に変化する

図 23 復元結果
Reconstructed images (Intensity expression).
(a) Sphere, (b) Egg.

図 24 復元結果の補間図
The interpolated heights (Intensity expression).
(a) Sphere, (b) Egg.

図 25 復元結果の俯瞰図
Bird-eye-view of the reconstructed objects.
(a) Sphere, (b) Egg.

るような箇所には充分対応することができず, このような領域で垂線方向に誤差が発生し, これが誤差の主な原因となったと考えられる. したがって, 等濃線の垂線方向を求める際に, 等濃線の局所的な曲率に応じて参照画素数を可変に設定する等の方法を取り, さらに正確な垂線方向を求める方法や, サブピクセル単位で垂線方向を求める方法の検討が今後必要である.

5.2 実画像の復元

図 22 に対象とした輝度画像および等濃線図を示す. 入力画像は 512×480 画素, 256 階調の白黒濃淡画像である. 図 23 に復元結果の高さを輝度値で示した画像を示す. その補間画像を図 24 に, またその俯瞰図を図 25 に示す.

撮影画像はカメラ等の撮像系の雑音や量子化雑音、鏡面反射成分の影響を受けているにもかかわらず、比較的良好的な復元結果を得ることができた。この結果から、復元経路を局所的な微分処理によって求めるのではなく、等濃線を用いて大域的に求める方式は、雑音の影響を分散させる上で有効な方式であるということがいえる。また、復元結果の誤差の原因としては、実画像の場合には主に雑音の影響で傾きの値に誤差が生じたために発生したと考えられる。

今回の実験では、対象物体として、物体表面に模様が存在せず、鏡面反射が比較的少ない石膏を使用し復元を行ったが、実用化に際しては鏡面反射成分を含む物体の復元法や、物体表面に何らかの模様が存在していた場合の処理方法について詳細に検討する必要がある。

6. む す び

本論文では、等濃線を用いた曲面物体の形状復元方法について提案し、実験的にその有効性を検証した。実験結果より、等濃線を用いて復元経路を求めることにより、従来、非常に不安定であった復元経路の抽出処理を安定して行うことができ、実際の撮影画像の復元においても比較的安定に処理を行うことができた。

また、本手法ではカメラから物体までの距離、および物体間の距離を計測することは不可能である。そこで、今後はステレオ計測法等と融合することにより、より汎用性の高い高精度な計測法を目指す予定である。

本研究を進めるにあたり、御討論頂いた関東学院大

学工学部 南敏教授、(株)日立製作所 沼上泰彦氏、本学修士課程1年 戸所信樹氏、本学電気工学科4年 大木孝子氏に感謝する。

〔参 考 文 献〕

- 1) Horn: "Robot Vision", The MIT Press (1986)
- 2) Horn: "Shape from Shading", The MIT Press (1989)
- 3) 池内克史: "反射率地図に基づき、二次元濃淡画像より三次元形状を再構成する2方式", 信学論, **J65-D-II**, 7, pp. 842-849 (1982)
- 4) 塩山忠義, 安田武: "明度画像を用いた三次元形状推定アルゴリズムの高速化", 機械学会論 (c 編), **59**, 568, pp. 3792-3797 (1993)
- 5) Pentland A. P.: "Local Shading Analysis", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, **PAMI-6**, 2, pp. 170-187 (1984)
- 6) 伊東敏夫: "局所濃淡値と輪郭線を用いた明るさ解析型形状推定法", 信学論, **J76-D-II**, 8, pp. 1647-1653 (1993)
- 7) 岡本吉郎, 大西昇, 杉江昇: "線画解釈を用いた相互反射のある場合の Shape from Shading", コンピュータビジョン, **76**, 12 (Jan. 23, 1992)
- 8) 築山俊史: "等輝度曲線から平面間の傾き関係の推定", 信学論, **J 75-D-II**, 9, pp. 1504-1513 (1992)
- 9) 沼上, 梶原, 中村, 南: "等濃線を用いた3次元物体形状復元", 画電学誌, **24**, 5, pp. 515-525 (1995)

かじわら よしあき
梶原 良昌 1995年, 工学院大学工学部電子工学科情報工学コース卒業。現在, 工学院大学大学院修士課程在学中。画像処理, コンピュータビジョンの研究に従事。

なかむら おさむ
中村 納 1969年, 工学院大学工学部電子工学科卒業。同年, 同大学助手。以来, 学習理論, 画像処理, 帯域圧縮の研究に従事。1990年, ケベック大招聘教授として1年間同大学に滞在。1993年, 工学院大学教授, 現在に至る。工学博士。正会員。