

照度差ステレオ法による肌表面形状の再構成

新本 浩一* 本多 庸悟** 金子 俊一**

*コーセー 研究所 **東京農工大学 工学部

*114 東京都 北区 栄町 48-18

**184 東京都 小金井市 中町 2-24-16

あらまし 照度差ステレオ法には、既知な光学条件を用いて面素の勾配を決定する解析的な手法と、参照画像から得られたルックアップテーブルを用いて勾配を求める表引きによる手法の2つの方法がある。本論文では、解析的な手法への提案として、参照画像の等輝度平面によるモデル化を用いた光源方向の推定方法とその結果を用いた勾配の決定方法について述べるとともに、表引きによる手法への提案として、参照画像の輝度を逐次分割しつつ内挿ルックアップテーブルを作成する手順について述べる。また、実験によりこれら2つの手法を用いて肌表面レプリカ像の3次元構造の再構成を行い、その結果を示す。

和文キーワード 3次元形状、照度差ステレオ法、解析的手法、等輝度平面、逐次内挿、ルックアップテーブル

Reconstruction of the skin surface orientation by photometric stereo

Kouichi Shinmoto*, Tsunenori Honda** and Shun'ichi Kaneko**

*Research Laboratory, KOSE Corporation

**Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

*48-18 Sakae-cho, Kita-ku, Tokyo 114, Japan

** 2-24-16 Nakamachi, koganei-shi, Tokyo 184, Japan

Abstract There are two approaches in photometric stereo methods. One is the analytical method for determining gradients of surface elements under known optical conditions. The other is the table searching method using the lookup table obtained by reference images. This paper proposes two original approaches in each methods described above. In the analytical method, we propose a method for estimating the incident lights vectors based on the modeling of reference image intensities by iso-brightness planes and a method for determining gradients by the results. In the table searching method, we propose two techniques for making a lookup table by use of averaging and sequential interpolation. It is shown that the 3-D orientation of skin surface replica can be reconstructed by the each new methods.

英文 key words 3D geometry, photometric stereo, analytical method, iso-brightness plane, sequential interpolation, lookup table

1.はじめに

化粧品の開発、評価を行うためには、良い肌とはどのようなものか、化粧後の仕上がり感の良さとはどのような状態であるのか等の不明確な状態を定性、定量的に把握することが必要である。このためには人肌表面の特徴量を把握し、その分類を合理的に行うための手法の開発を行わなければならない。これらの手法を開発し、人肌表面の特徴量を理解する上で、きめやしわに代表される人肌表面の3次元構造を得ることは大きな目標の一つである。また、これらの手法は簡便で、連続的に大量の処理が可能であることが望ましい。そこで我々は、単眼視による画像輝度からの3次元構造の決定手法に着目し、人肌表面のレプリカを用いた肌表面の3次元構造の決定手法について検討を加えることとした。

画像情報から対象物に関する3次元的情報を抽出することは、コンピュータビジョンの研究において重要な課題の一つとなっている。従来から開発されてきた手法には、Shape from shading²⁾, Photometric stereo³⁾, Structured lighting techniques⁴⁾等様々な方法がある。これらは原理的に対象物の光学的性質に制約があり、その応用範囲が限定されている、面素の勾配しか決定できない等の欠点を有しているものの極めて有用な手段である。また、面素の勾配を定めるだけでなく、その位置も特定可能な手法には、レンジファインダにより面の3次元計測を行い、面の方程式のパラメータを決定する方法⁵⁾、既知の光源から格子状のパターンを投影し、その見かけのひずみから奥行きを求める方法⁶⁾など様々な方法がある。これらの方法も特殊な光源や装置を必要とするものの優れた手法である。

これらの手法にはそれぞれ特徴があるが、我々が用いる対象—肌表面レプリカ—は極めて対象が小さく高倍率で撮像せねばならないこと、光源の位置が特定できずその情報を用いることができないこと、その起伏

が単純な格子状の稜線によって構成されているにもかかわらず一様ではないこと等の制約を受けている。これらのことから我々は照度差ステレオ法(Photometric stereo)に着目し、肌表面レプリカからの3次元情報の抽出方法について検討を加えた。

本論文では、照度差ステレオ法の1)解析的手法と2)表引きによる手法のそれぞれについて、1)については参照画像のモデル化手法、2)については参照画像の輝度を逐次分割する内挿法を用いた表の作成手法により、面素の勾配を決定する過程に改良を加え、対象画像の再構成を行なうとともにその結果について検討を加える。

2. 照度差ステレオ法

照度差ステレオ法は、同一の視点から同一の対象物を最低3箇所以上の異なった照明条件により撮像し、それにより得られた任意画素における輝度の組 $I(I_1, I_2, I_3, \dots, I_n)$ から表面の勾配を表すパラメータ (p, q) を求め、それを画像全体において積分することにより3次元形状を得ようとするものである。

カメラと被写体の関係を表すモデルとして正射投影を仮定し座標系を図1に示すように設定する。この条件下では、全ての面素のZ軸方向は視線と一致する。このとき任意の面素を任意の位置に平行移動しても勾配の一般性は失われない。このことから、撮像された画像中の任意勾配はガウス球面上の点として表現することができる。これをガウス球面上の点 $(0, 0, -1)$ において接する平面上(勾配空間)に写像したものが勾配 (p, q) である(図2)。この時、 (p, q) は次式により表される。

$$p = -\frac{\partial z}{\partial x} \quad q = -\frac{\partial z}{\partial y} \tag{1}$$

これらの仮定が成り立つとき、照明条件が等しければ画像間においても勾配の一般性は失われない。

物体表面の輝度は、入射角、反射角、位相角の3つの角度と物体表面の反射関数によって定まる(図3)。いまここで対象物が完全拡散であり照明条件が3種類である

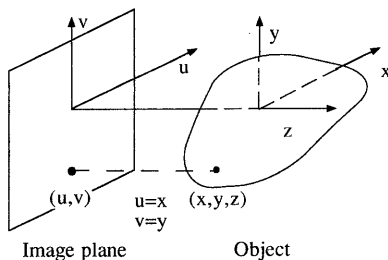


図1 正射投影と座標系

Fig.1 Orthographic projection and coordinate systems

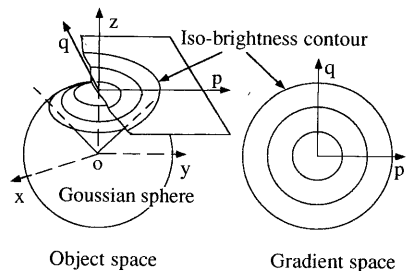


図2 勾配空間

Fig.2 Gradient space

と仮定すると、面素の輝度値は次式により表される。

$$I = R \cdot \vec{N} \cdot \vec{S} \quad (2)$$

このとき、光源等の幾何条件が既知であれば、面素の方向が決定できる。このことから撮像された対象画像の輝度の組Iから(p,q)を求めるための方法には、1)光源の位置、表面の反射関数等の既知な幾何条件を用いて計算により求める解析的な手法と、2)球面などのあらかじめ形状が既知の物体を対象物と同じ光学条件により撮像し、そのときの輝度の組Iから(p,q)を求めるための表(Lookup Table : LUT)を作成しておく表引きによる手法の2通りの方法が考えられることができる。

ただここで1)の方法には、光源位置、表面の反射関数等が既知でなければならないこと、表引きに比べ計算時間がかかること等の問題点がある。また2)の方法には、離散化され限られた分解能しか持たない画像の輝度値から、いかにしてLUT内の全ての領域を埋めるかという問題がある。

3.解析的手法による 法線ベクトルの決定

前章で示した通り、解析的な手法を用いるためには光源の正確な位置と反射関数の値が必要である。このため、対象画像と同じ光学系を用いて撮像された形状既知の物体の画像—参照画像—を用いて等輝度平面によるモデル化を行い、光源方向と面素法線ベクトルの推定を行う。このとき対象物の反射は完全拡散であることを仮定する。

3.1.等輝度平面によるモデル化

正射投影を仮定すると、全ての面素の法線ベクトルはガウス球面上の点として与えられる。このとき、参照画像における等輝度点の法線ベクトルの軌跡は、光源方向を主軸とする円錐とガウス球表面が交差する円で示される。また、勾配空間における等輝度線は、同

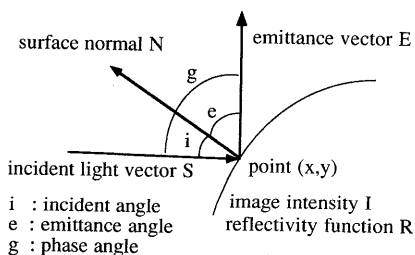


図3 ベクトルの関係と記号

Fig.3 Relationship between vectors and symbols

じ円錐をガウス球面上の点(0,0,-1)における接平面で切断したときの円錐曲線で表すことができる(図4)。対象画像の任意画素における勾配が勾配空間中の等輝度線の交点により求められることを考えると、対象画像の任意画素における勾配の決定は、勾配空間上に投影された等輝度線の基となる等輝度点を代表する等輝度平面を決定し、その交点を求めることと等価である(図5)。また、このときの光源方向は円錐の主軸即ち等輝度平面の法線ベクトルにより表すことができる。ここで、光源方向の単位ベクトルをS(Sx,Sy,Sz)、面素の法線ベクトルをN(x,y,z)、反射率をR、面素の輝度をIとすると、

$$I = R \cdot (xS_x + yS_y + zS_z) \quad (3)$$

$$rI = px + qy - z$$

$$p = -\frac{S_x}{S_z} \quad q = -\frac{S_y}{S_z} \quad r = \frac{I}{RS_z}$$

次式により最小自乗法を用いてp,q,rを決定する。

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum I_i x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum I_i y_i \\ -\sum I_i x_i & -\sum I_i y_i & \sum I_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i y_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum I_i z_i \end{pmatrix} \quad (4)$$

これは、各輝度のガウス球面上の点と、それに平行な原点を通る平面との距離が最小となる様な等輝度平面を決

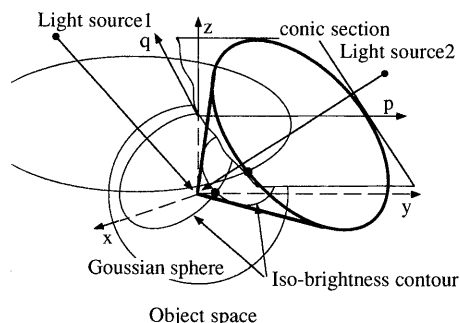


図4 ガウス球と円錐曲線の関係

Fig.4 Relation between Gaussian sphere and conics

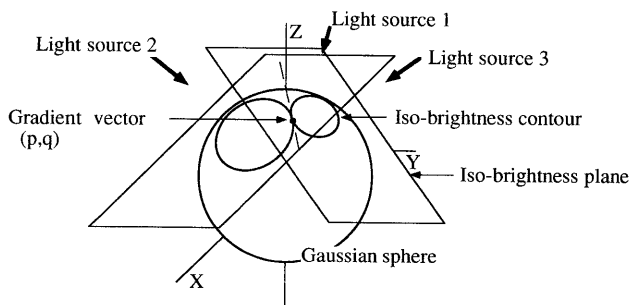


図5 等輝度平面の交点

Fig.5 Cross point of iso-brightness plane

定することを意味する。この操作を各照明条件の画像に対し行うことにより、照明方向による、等輝度平面の方程式を求めることができる(図5)。

3.2.面素法線ベクトルの決定

対象物を異なる照明条件で撮像した3枚の画像について考える。これらの画像上の任意の座標(x,y)における、輝度の組をI(I1,I2,I3)とすると、面素法線ベクトルN(Nx,Ny,Nz)は、次式により表される。

$$\begin{pmatrix} r1I1 \\ r2I2 \\ r3I3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p1, & q1, & -1 \\ p2, & q2, & -1 \\ p3, & q3, & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Nx \\ Ny \\ Nz \end{pmatrix} \quad (5)$$

またこのとき、未定義な輝度(I=0)が発生した場合には決定されるべき平面の交点はガウス球面上にあり半球上しか定義されていないことを利用して、交線とガウス球面の交点であるとして計算した。

4.表引きによる法線ベクトルの決定

照度差ステレオ法において(p,q)の値を決定するためのもう一つの方法に、LUT(Lookup Table)を用いた表引きによる手法がある。

2章において示した仮定を用い、形状既知の対象物を3種の異なる照明条件により撮像した参照画像からのLUTの作成方法について考える。

参照画像の任意の位置(x,y)における輝度の組I(I1,I2,I3)に対応する勾配(p,q)は次式により決定できる。

$$p = -\frac{x}{z} \quad q = -\frac{y}{z} \quad (6)$$

また仮定より、同一の光学条件によって撮像された対象物の画像において、参照画像と同じ勾配(po,qo)を持つ面素の輝度の組Io(Ixo,Iyo,Izo)は参照画像における輝度の組Iに等しい。このことから、参照画像における輝度の組Iに対応する勾配(p,q)を記録しておくことによ

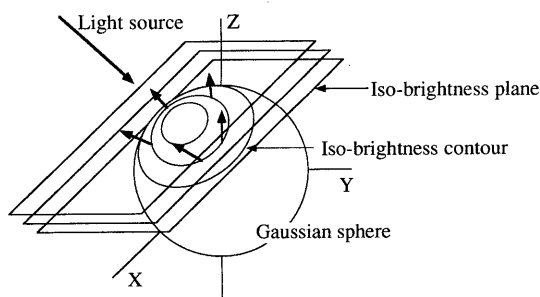


図6 等輝度平面によるモデル化
Fig.6 Modeling method by iso-brightness planes

り、対象画像の輝度の組から面素の勾配を求めることができる。

4.1.LUT(Lookup Table)の作成

実際には、各画像の輝度は離散化されていることから、輝度の全ての組み合わせに対応する勾配(p,q)の値を求め、それを表(輝度値の組み合わせをキーとするハッシュテーブル)にしておく。このとき、3つの照明方向による輝度値I1,I2,I3をその軸とする直交座標を考えると、輝度の組みに対応する勾配(p,q)をその値として持つハッシュテーブルのレコードは、離散化された輝度をその一辺とする立方体として描くことができる(図7)。実際には、各画像の輝度値、座標値がともに離散化されていることから、LUTの中はほとんど値が定まらない極めて粗な状態となり、正射投影等の仮定からのずれ等の原因により対象物の輝度の組に対する勾配値が求められない場合がある。また、同一輝度の組み合わせに対する勾配値が複数定まる場合もある。このため、LUT内を埋めるための内挿方法について検討を加える必要がある。

4.2.滑らかさの仮定による内挿

参照画像が、例えば球のような滑らかな物体であると仮定すると、輝度の変化及び勾配の変化はその近傍点から大きく変化しない。このとき、任意の輝度の組み合わせI(I1,I2,I3)に対応する画像上の位置p(x,y)において、光源1における輝度が±dIだけ変化したと考えると、その値は次のように近似できる(図8)。

$$I = (I1 - dI, I2, I3) \Rightarrow p^-(x - dx, y - dy)$$

$$I = (I1 + dI, I2, I3) \Rightarrow p^+(x + dx, y + dy) \quad (7)$$

$$p(x,y) = \frac{p^+ + p^-}{2}$$

他の光源においても同様に考えることができる。このことから、任意の輝度の組Iにおける勾配(p,q)の値は次式

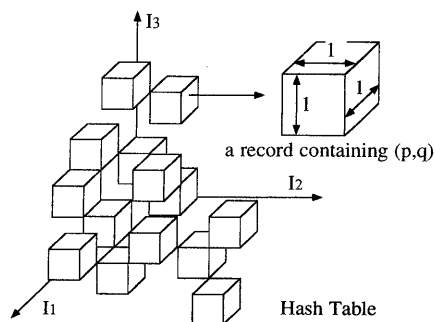
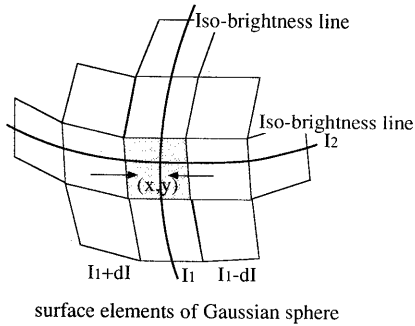


図7 ハッシュテーブルの模式図
Fig.7 Scheme of hash table



surface elements of Gaussian sphere
 図8 近傍点による内挿
 Fig.8 Interpolation by neighboring elements

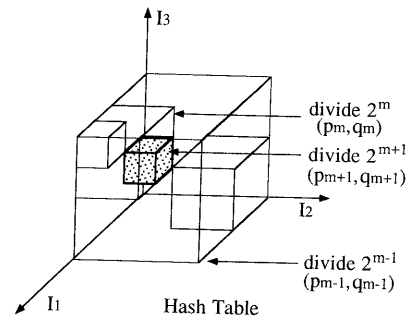


図10 輝度2分割による内挿の模式図
 Fig.10 Scheme of interpolation by partitioned intensities

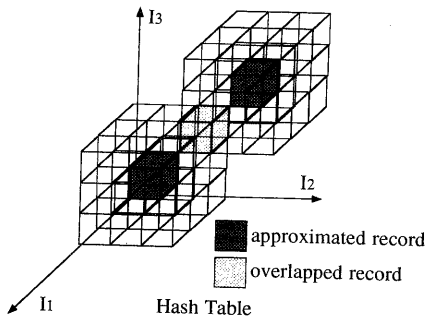


図9 近傍点による内挿の模式図
 Fig.9 Scheme of interpolation by neighboring record

により近似できる。

$$p(p_{0,0,0}, q_{0,0,0}) = \frac{\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \sum_{k=-1}^1 (p_{i,j,k}, q_{i,j,k}) - p(p_{0,0,0}, q_{0,0,0})}{26} \quad (8)$$

先ほどと同様に模式図を描くと、対応する勾配(p,q)は、それに接する立方体に対応する勾配(p',q')の平均によって近似できるということがわかる(図9)。

4.3.輝度に着目した内挿

ここでは、参照画像の輝度に着目し、輝度を組みに分割することによる参照画像の領域分割とその領域の代表値と見なされる勾配の推定という操作を逐次行なうことにより、未確定な勾配を輝度の組みに対応する勾配の代表値によって内挿する手法について述べる。

今ここで、参照画像が輝度レベルが0,1である2値画像であると仮定すると、輝度の組Iは8通りである。参照画像の画素数が9以上であれば、同一の輝度の組み合わせを持つにもかかわらず勾配の値が異なる画素が必ず発生する。このとき、任意の輝度の組み合わせに対する勾配の代表値は、同じ輝度の組み合わせを持つ画素に対

応する勾配の平均値により表わせるだろう。輝度のレベルが2値より大きい場合も同様にして考えることが可能であり、任意の輝度の組み合わせに対する勾配の代表値は、同じ輝度の組み合わせを持つ画素に対応する勾配の平均値によって表せる。

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (9)$$

nは同一の輝度の組み合わせを持つ画素の数。

このことと4.2.に示した仮定を併用して、LUTの内挿を行う。

今ここで、参照画像の輝度が 2^n 階調であったとする。ハッシュテーブルの内部には 2^{3n} 個のレコードが必要となる。この輝度をまず 2^{n-1} をしきい値として2つの輝度の組みとし2階調に変換する。これは、参照画像を輝度を基にして2つの領域に分けるのに等しい。この操作を3つの参照画像に施し、各々の領域に対応する勾配の代表値をハッシュテーブルに格納する。このとき決定できない勾配値(参照画像内に輝度の組み合わせが存在しない)があった場合には、26近傍の値の平均をその勾配値とする。2^m階調での変換において決定された勾配の代表値はハッシュテーブル内の2^{m-1}階調時に決定された勾配値と置換される。決定できない勾配値があった場合には、26近傍の値の平均をその勾配値とする。近傍値が決定されていない場合は2^{m-1}階調分割時のその近傍値を含む領域の勾配の代表値を代用する。この操作をm=nまで行うことにより、LUTを全て埋めることができる(図10)。

4.4.面素法線ベクトルの決定

面素法線ベクトルの決定は、作成したLUTから、任意の輝度の組み合わせに対する勾配の値を取り出すだけである。LUTは輝度の組み合わせをアドレスとするハッシュテーブルで構成されているため、その検索時間は極めて少ない。

5. 勾配からの3次元構造の決定

得られた勾配を基に、3次元構造の決定を行う。対象画像の任意の位置 $P(x,y)$ から微小距離 dx,dy だけ移動したときの高さの変化 dz は、次式により表される。

$$\begin{aligned} dz &= \frac{\partial z}{\partial x} dx + \frac{\partial z}{\partial y} dy \\ dz &= \frac{\partial z}{\partial x} dx \\ dz &= \frac{\partial z}{\partial y} dy \end{aligned} \quad (10)$$

画像の最小単位である画素毎の差分式になおすと、

$$\begin{aligned} z_1 &= z_{i-1,j-1} + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_{i-1,j-1} dx + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_{i-1,j-1} dy \\ z_2 &= z_{i,j-1} + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_{i,j-1} dy \\ z_3 &= z_{i+1,j-1} + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_{i+1,j-1} dx + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_{i+1,j-1} dy \\ z_4 &= z_{i-1,j} + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_{i-1,j} dx \\ z_{i,j} &= \frac{\sum_{k=1}^4 z_k}{4} \quad z_{i,0} = 0.0 \quad z_{0,j} = 0.0 \end{aligned} \quad (11)$$

対象画像の走査方向をラスタ方向とするとすでに高さ

表1 実験条件

Table.1 Experimental conditions

focal distance	8	mm
image resolution	640x400	dots
resolution of pixel	5.83x5.88	μm
light source	halogen light	
distance from object	49	mm
object	poly-vinyl alcohol, colorant skin surface replica (white)	
reference sphere size	1	mm
object size	5x5	mm

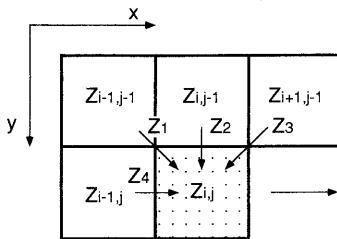


図11 高さの計算方法

Fig.11 Method for calculation of height

の決定されている部分は4箇所である。そのためここで得られた差分式において dz の誤差が最小となるように、すでに高さの決定している部分の勾配から求められた全ての高さの平均値をその高さとして採用する(図11)。

6. 実験

6.1. 実験装置及び実験条件

図12に実験に用いた装置の概略を、表1にその条件を示す。光源等の位置関係は明確ではない。

6.2. 撮像画像

実験に用いた参照画像を図13に、対象画像を図14に示す。参照画像中の球はその表面が滑らかでないがこれ以上の精度の向上は非常に難しい。参照画像の等輝度線を図15に示す。

6.3. 再構成の結果(解析的手法)

推定した等輝度平面のパラメータ p,q,r を表2に、これにより再構成された対象物の立体図を図16に示す。この立体図は x, y のデータ数がともに1/2になるように間引いて描いてある。図にみられるようにかなり精度良く外形を捉えた結果となっている。また、間引かないときの部分図を図17に示す。

表2 光源による平面定数

Table.2 Parameters for light sources

	p	q	r
light source 1	1.27	-.249	3.19
light source 2	-.870	-.759	2.61
light source 3	-.074	1.28	3.21

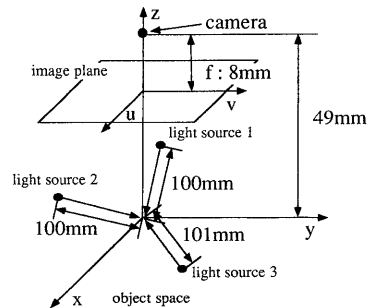


図12 実験装置

Fig.12 Experimental system

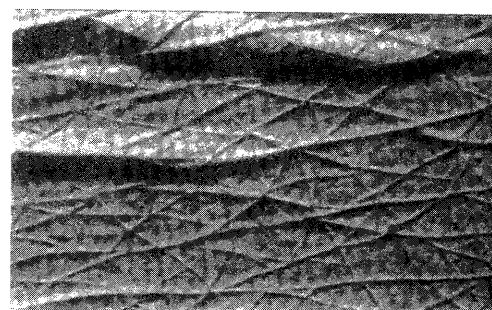
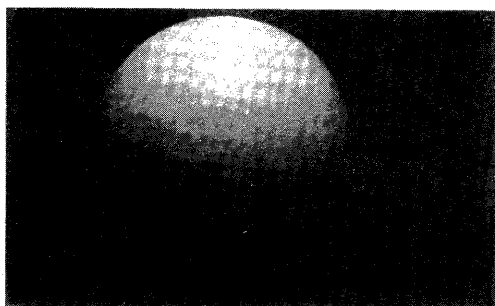
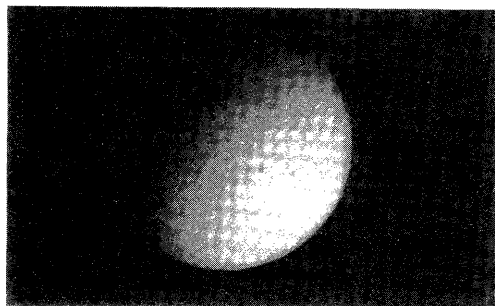
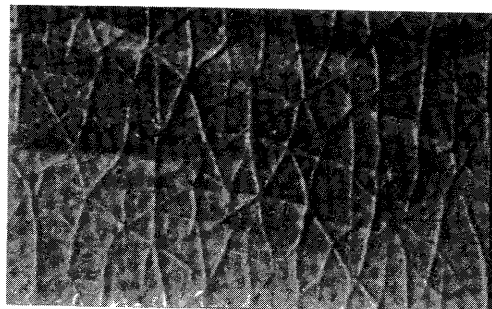
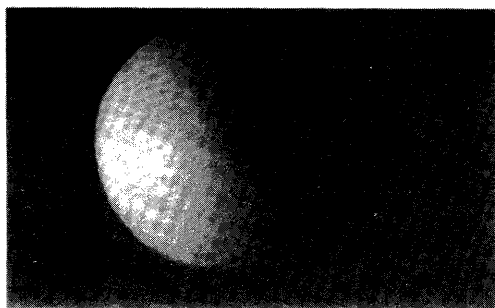


図 1 3 参照画像
Fig.13 Reference images

図 1 4 対象画像
Fig.14 Object images

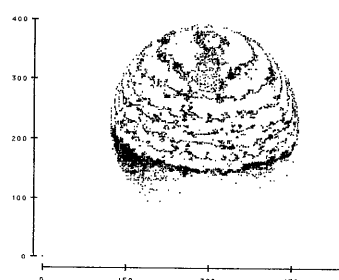
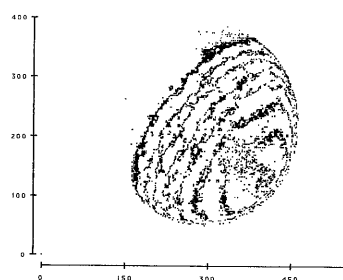
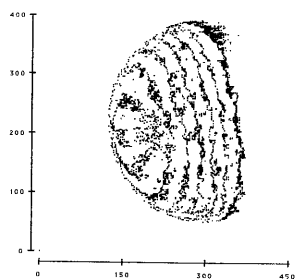


図 1 5 参照画像の等輝度線
Fig.15 Iso-brightness contours of reference image

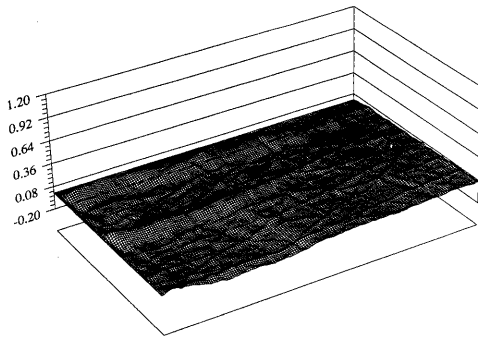


図16 解析的手法による再構成結果
Fig.16 Reconstruction by analytical method

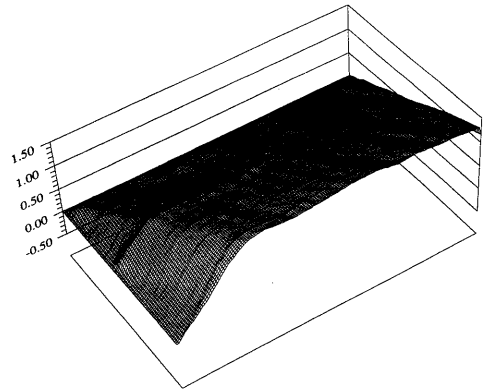


図18 表引きによる再構成結果
Fig.18 Reconstruction by table searching

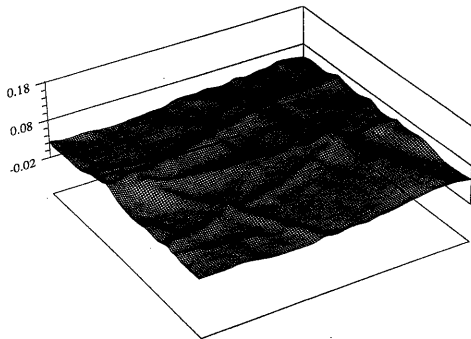


図17 解析的手法による結果(拡大図)
Fig.17 Reconstruction by analytical method(enlarged)

6.4.再構成の結果(表引きによる手法)

内挿なしの場合のLUTの充填率は約2%、表引きしたときの対応率(データの存在した割合)は約4%であり、全く再構成できなかった。部分的に近傍だけを内挿したものは充填率は約5%、表引きしたときの対応率は約60%であり、再構成の結果は輝度分割による補間を施したものとほぼ同じであった。輝度分割による内挿を施した表を用いたときの再構成の結果を図18に示す。表引きによる手法では差分計算を進めるにしたがって、誤差の蓄積が激しく面が傾く。ハッシュテーブル内のデータの特にqの値に定数が加算されたような形状である。対応率が悪いことから、内挿値(特に 2^n-2 階調の代表値)を多用するためと考えられる。

6.5.2つの手法の比較

今回の再構成では、表引きによる手法での結果が悪く、その内挿方法に今一步の工夫が必要である。解析的手法では、形状の再構成はうまくいっている。2手法により再現された結果はドリフトを補正するとほぼ等

しいものとなった。

7.おわりに

2次元画像の輝度分布から3次元形状を再構成するための手段として、照度差ステレオ法に着目し、2つの手法による再構成について論じた。

画素の傾きは2自由度であり、ある画素の輝度値はその自由度を1減らすだけである。残りの自由度について解析的手法では、光源方向の推定と参照画像のモデル化を行なう手法によって光源配置、反射関数が不明であってもその推定を行うことにより対象画像からの再構成が可能であることを示した。

また、表引きによる手法では、LUTの作成方法に改良を加え、LUT内の空隙を輝度の2分割による逐次近似と参照画像の滑らかさの仮定を用いた近傍との直線内挿により埋めることが可能であり、この手法によって作成したLUTを用いて再構成が可能であることを示した。

今後の課題として再構成された高さの誤差を実測値との比較を行なうことにより評価したい。また、LUTの内挿方法にも検討を加える必要がある。

参考文献

- 1) J.Migot et al., "Image analysis and 3-D Profiometry of The Human Skin Surface", IEEE Eighth Annual Conference of Engineering in Medicine and Biology Soc., 13, 1414 (1986).
- 2) B.K.P Horn, "Robot Vision", The MIT Press (1986).
- 3) R.J.Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images", Optical Engineering, 19, 139 (1980).
- 4) 佐藤宏介, 井口征士, "空間コード化による距離画像入力", 信学論(D), J68-D, 3, 369-375 (1985).
- 5) R.A.Jarvis, "A Perspective on Range Finding Techniques for Computer vision", IEEE Trans. PAMI-5, 2, 122-139 (1983).
- 6) 吉沢徹, 鈴木賢策, "格子パターン投影による三次元形状の測定", 精密工学会誌, 53, 3, 422-426 (1987).