

点光源照明ステレオ法 (面素選択解法)

Point Source Illumination Stereo
(Solution by Using Information of Special Surface Elements)

岩堀 祐之 亀井 宏行 山口 昌一郎
Yuji IWAHORI Hiroyuki KAMEI Shoichiro YAMAGUCHI

東京工業大学 工学部
Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology

あらまし 点光源照明により5枚の画像濃淡情報から拡散面に対する各面素までの距離 d 及び傾き (p, q) を得る方法として点光源照明ステレオ法 (一般解法) を先に提案した。^[1] 一般解法は模様物体にも適用可能な方法であるが、量子化誤差の影響を考慮した場合、8ビットの濃度分解能から面素までの距離 d を精度良く復元するためには5枚以上の画像を用いるか、後処理として (d, p, q) からの反復修正が必要である。本論文では反射率が表面全体にわたって一様な物体を対象とし、画像を5枚に限定した上で直接精度良く距離を求める方法 (面素選択解法) を提案する。本方法の有効性を8ビット量子化画像のシミュレーションにより明らかにした。

ABSTRACT

The authors has proposed a new photometric method called Point Source Illumination Stereo to obtain distance d and gradients (p, q) at a surface element. Even though the general solving method of PSIS^[1] is applicable to the objects with nonuniform reflectance, more images must be used or after-process using directly obtained (p, q, d) must be needed for quantization. In this paper, a special solving method for extracting distance information effectively under 8-bit level by using 5 images is proposed. The effect is examined for the objects with uniform reflectance.

1. ま え が き

画像の濃淡情報を利用して対象物体の3次元的情報を抽出するための方法として、筆者らは点光源照明ステレオ法 (PSIS) を提案し、その一般解法として拡散面に対する定式化を行った。^[1]

照度差ステレオ^{[2][3]}が物体に対して平行光線を照射することによって得られる3枚の画像濃度情報から面素ごとの傾き (p, q) を求めることが出来るのに対して、PSISでは点光源による照明を導入し照度の逆2乗法則を利用することによって、(p, q) に加えて面素までの距離 d を抽出することができる。一般に面素に対する照明の方程式は、反射特性パラメータを C とし、(p, q, d, C) の4変数から

なる。これらの変数を面素あたりの濃度情報を用いて解くためには、視点を固定したまま点光源を異なる位置に変えて撮影した5枚の画像を用いる。^[1]

PSISは他の方法、例えば2眼ステレオ^{[4][5]}のように視点を換えることにより伴う対応点探索の問題を回避することができるとともに、光切断法^[6]のように画像入力のための走査時間を要しないため画像入力が簡易であり、照度差ステレオの持つ利点をそのまま受け継ぎ、かつ単一システムで距離情報を直接求めることができる。

一般解法は面素ごとに反射率が異なる物体に対して適用可能な方法であるが、量子化誤差の影響を考慮した場合、8ビット程度の濃度分解能から精度よく距離情報を復元するためには、

5枚以上の画像を用いるか、後処理として得られた結果の d と (p, q) を用いて反復修正を行う必要がある。これに対して本論文では反射率が表面全体にわたって一様な物体を対象とした場合、画像枚数を5枚と限定した上で精度よく効率的に距離情報 d を求めることが出来る方法を提案する。これをPSISの面素選択解法と呼ぶことにする。本方法は画像濃度情報から求める距離の精度自体を上げる工夫を行うために後処理としての反復修正を行う必要がない。

面素選択解法の処理は2手順からなり、手順1で複数の最大輝度面素を選択し、照明の連立方程式を最小2乗法により解くことによって変数 C を拘束する。手順2で定まった C をもとに面素ごとに (p, q, d) を求める。反射率一様な物体を対象とした場合、面素選択解法を導入することによって5枚の画像から直接得られる距離情報の精度を向上させることが出来ることを8ビット量子化画像のシミュレーションにより明らかにした。

2. 照明の方程式

2.1. 座標系

PSISの座標系を図1に示す。PSISでは、

[1] 点光源照明

[2] 中心投影

の条件で、面素の傾き (p, q) と距離情報 d を同時に抽出する。

図1のように、原点 O をピンホールにとり、原点 O に対して3次元座標 (X_s, Y_s, Z_s) の位置に点光源を置く。すると物体表面上の任意の点 $P(X, Y, Z)$ に対してフィルム上の点 $p'(x, y)$ に輝度が生成される。 (x, y) はフィルム面にとった座標系である。

その他の記号は、以下の通りである。

f : 原点 O とフィルム面の距離

d : 原点 O から物体面上の点 P までの距離

α : Z 軸と OP とのなす角

β : x 軸と $o'p'$ とのなす角

(o' はフィルム面上の原点)

2.2. 面素上のベクトルの定義

図1に示すように、面素に対する3つのベクトルを以下に定義する。

n : 面素の単位法線ベクトル

s : 面素から点光源に向かう単位ベクトル

v : 面素から原点 O に向かう単位ベクトル

$$n = \frac{(p, q, -1)}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \quad (1)$$

$$s = \frac{(X_s - X, Y_s - Y, Z_s - Z)}{\sqrt{(X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2}} \quad (2)$$

$$v = \frac{(-x, -y, -f)}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} \quad (3)$$

但し、 (p, q) は各々

$$p = \frac{\partial Z}{\partial X}, \quad q = \frac{\partial Z}{\partial Y} \quad (4)$$

で面素の傾きを表す。さらに、面素の座標 (X, Y, Z) を観測面での座標系 (x, y) と原点 O から面素 P までの距離 d で表した方が都合がよいので、それらで書き表せば、

$$X = d \sin \alpha \cos \beta \quad (5)$$

$$Y = d \sin \alpha \sin \beta \quad (6)$$

$$Z = d \cos \alpha \quad (7)$$

となり、また α, β は各々式 (8), (9) となる。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f} \quad (8)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{x}{y} \quad (9)$$

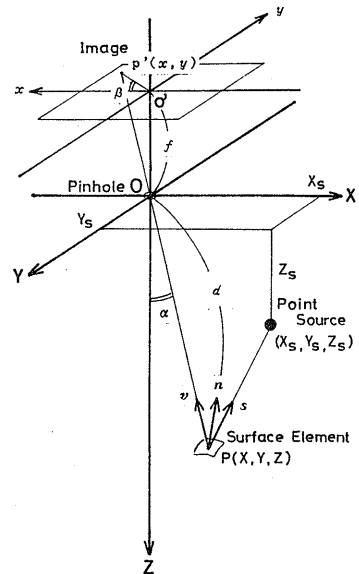


図1. PSISの座標系

Fig.1.A Coordinate System of PSIS

2.3. 照明の方程式

PSISの座標系により観測される面素に関する照明の方程式を示す。物体面の反射特性は完全拡散面に従うとする。光源の光度を I 、面素の反射率を ρ とし、面素に対する入射角を i とすれば、面素の輝度 L はLambertの法則を用いて、

$$L = \rho \frac{I \cos i}{\pi r^2} \quad (10)$$

となる。

$\cos i$ は n と s の内積($n \cdot s$)であるから、

$$\cos i = \frac{p(X_s - X) + q(Y_s - Y) - (Z_s - Z)}{r \sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \quad (11)$$

となる。また、 r^2 は

$$r^2 = (X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2. \quad (12)$$

これより、式(5)(6)(7)(11)(12)を式(10)に代入して整理すると、 L は、式(13)となる。

$$L = \frac{\rho I (pl + qm - n)}{\pi (l^2 + m^2 + n^2)^{3/2} \sqrt{p^2 + q^2 + 1}}$$

$$\text{ここで } l = X_s - d \sin \alpha \cos \beta$$

$$m = Y_s - d \sin \alpha \sin \beta \quad (13)$$

$$n = Z_s - d \cos \alpha$$

観測される画像の濃度を D とすれば D は L に比例し(受光系の γ 特性を1とする)、

$$D = kL \quad (14)$$

となる。但し、 k は受光面での観測輝度から画像濃度へ変換されるとき比例乗数である。

ここで光源の光度 I および面の反射率 ρ が未知の場合はこれらをまとめて C とおき(p, q, d)に加えて C も未知変数となる。(式16参照。)この C を反射特性パラメータと呼ぶ。よって照明の方程式は

$$D(x, y) = C \cdot \varphi(p, q, d) \quad (15)$$

となる。ここで

$$C = k \frac{\rho I}{\pi} \quad (16)$$

$$\varphi(p, q, d)$$

$$= \frac{pl + qm - n}{(l^2 + m^2 + n^2)^{3/2} \sqrt{p^2 + q^2 + 1}}.$$

$$(17)$$

3. 面素選択解法

3.1. 照明の方程式の連立

PSISでは、観測される画素の濃度 D から対応する物体面上の面素の(p, q, d, C)を求めることが目的である。一般解法ではこの(p, q, d, C)を面素ごとに式(18)のように連立させて解く。そのために光源の位置を変えて撮影した5枚の画像を用いる。光源の位置に関する添え字を j とすれば

$$D_j = C \varphi_j(p, q, d), \quad j=1..5 \quad (18)$$

となる。画像は入力の際に量子化されることが前提となるので、1つあたりの面素における観測濃度 D は量子化による誤差を含む。式(18)は、5個の方程式から4つの未知変数(p, q, d, C)を解く問題であるため、結果の精度は D_j ($j=1..5$)の濃度分解能に依存する。

この濃度分解能の制約に対する解決法は連立させる照明の方程式を増やすことである。1つあたりの面素に対する照明の方程式を増やすことは即ち光源の数(画像枚数)を増やすことであるが、画像枚数が増えるためにこの方策は必ずしも有利ではない。もう1つは画像枚数を増やすことなく濃度分解能の制約を画像の空間分解能で補うことである。本論文はこの方法を用いる。

本論文では画面内にあらゆる傾き(p, q)を持ち、反射率 ρ が表面全体にわたり一様な物体が含まれている場合を対象としたPSISの効率的解法を提案する。これをPSISの面素選択解法と呼ぶ。

同一光度 I の点光源による照明条件下では、反射率 ρ が一様な物体に対して変数 C が面素間で一定であることが利用できる。そこで本方法では画像枚数を5枚に限定した上で、面素に関する添え字を k 、光源の位置に対する添え字を j として、複数の面素に対する照明の方程式を以下のように連立させる。

$$D_{11} = C \varphi_1(p_1, q_1, d_1)$$

$$D_{12} = C \varphi_2(p_1, q_1, d_1)$$

$$D_{11} = C \varphi_3(p_1, q_1, d_1)$$

$$D_{14} = C \varphi_4(p_1, q_1, d_1)$$

$$D_{15} = C \varphi_5(p_1, q_1, d_1)$$

...

$$D_{kj} = C \varphi_j(p_k, q_k, d_k) \quad (19)$$

...

$$D_{N1} = C \varphi_1(p_N, q_N, d_N)$$

$$D_{N2} = C \varphi_2(p_N, q_N, d_N)$$

$$DN1=C\varphi3(pN, qN, dN)$$

$$DN4=C\varphi4(pN, qN, dN)$$

$$DN5=C\varphi5(pN, qN, dN)$$

式(19)においてNは連立させる面素数であり、この場合、方程式の数は(5N)個で未知変数の数は(3N+1)個となる。式(19)を解く方法として目的関数Eを式(20)のように誤差の2乗和に設定すれば、最小2乗法によりEの最小値を与える(p_k, q_k, d_k), k=1..Nおよび面素間に共通な反射特性パラメータCが最適解となる。

$$E = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^5 (Dkj - C\varphi(p_k, q_k, d_k))^2 \quad (20)$$

このとき式(20)のEの性質を良くするように面素を選択して連立させる必要がある。画面上に投影される全面素をまとめて式(20)で解く場合、記憶容量および計算量が膨大となり処理時間の観点からも望ましくない。また、対象物体の形状によってはEの性質自体が(p, q, d)に依存して変化してしまい、Eの性質が鈍くなる場合形状決定が出来なくなることがある。

3. 2. 処理の手順

目的関数Eの性質を良くするために、

[1] 照明の方程式を連立させることによって方程式の数を増やす。

[2] 同時に特定の面素間で連立させることにより未知変数の数を減らす。

操作を行う。[1]については3. 1で述べた。ここでは[2]の方針に対して、輝度最大の面素に着目する。

ある位置に点光源をおいて照明したとき、画面内で最大の輝度を持つ面素はφ(p, q, d)が全面素中最大であることから、画面上では

$$Dxy = \max_{x,y} \left\{ \frac{\cos i}{r^2} \right\} \quad (21)$$

となる画素(x, y)に対応する。この式(21)の条件を満たす面素を選択することにより、選択した面素に対する法線ベクトル成分(p, q)は以下のように拘束できる。

・物体の大きさが点光源からの距離rに対して十分に小さいときには、一画面内でのr²による影響は、全面素にわたり小さいと考えること

が出来る。即ち、物体面上の各面素に対して点光源からの距離の差をΔrとした時

$$(r + \Delta r)^2 \approx r^2 \quad (22)$$

の関係が成り立つ。

・この関係を式(21)に用いれば、画面内の全面素に対して輝度が最大になる面素はその法線ベクトルが光源方向を向いていると考えてよい。そのような面素では、

$$\cos i = 1, \quad n = s \quad (23)$$

となる。

PSISの面素選択解法は、このような最大輝度面素を連立させることによって目的関数の性質を良くする方法であり、処理の手順は以下の2手順から成る。

[手順1] 画面内に投影される対象物体の全面素中から輝度が最大となる面素を選択する。この操作を画面数分だけ行い、これらの面素に関するnを式(23)により拘束する。選択した複数の最大輝度面素間で式(20)により連立方程式を解くことによって選択面素のdおよび反射特性パラメータCを決定する。

[手順2] 面素間で共通なCを決定した後、各面素についてCを既知情報として取り扱うことにより、未知変数(p, q, d)を面素ごとに關する目的関数の最小値問題として推定する。

手順1で最大輝度面素を選択して連立させることによって方程式5N個に対して式(19)における未知変数は最初(3N+1)個であったのに対して(N+1)個に減らすことが出来る。これによって目的関数の性質を良くするための方針[2]が果たせる。最大輝度面素は各画面で1つずつ存在するから入力画像が5枚であるときN=5であり、このとき方程式は25個に対して未知変数6個となる。仮に量子化条件下により最大輝度を持つ面素が1画面で2個以上存在した場合、それらを積極的に利用すれば良い。

3. 3. 定式化

手順1において選択した面素に関する添え字をk, 光源の位置に関する添え字をjとして表せば、選択面素kに関する法線ベクトル成分(

p_k, q_k は d_k を用いて表すことが出き、

$$\begin{aligned} l_{kj} &= X s_j - d_k \cdot \sin \alpha_k \cdot \cos \beta_k \\ m_{kj} &= Y s_j - d_k \cdot \sin \alpha_k \cdot \sin \beta_k \quad (24) \\ n_{kj} &= Z s_j - d_k \cdot \cos \alpha_k \end{aligned}$$

とおけば、 (p_k, q_k) は

$$p_k := -\frac{l_{kk}}{n_{kk}}, \quad q_k := -\frac{m_{kk}}{n_{kk}} \quad (25)$$

となる。

また、 φ_{kj} は

$$\varphi_{kj} = \frac{p_k l_{kj} + q_k m_{kj} - n_{kj}}{(l_{kj}^2 + m_{kj}^2 + n_{kj}^2)^{3/2} \sqrt{p_k^2 + q_k^2 + 1}} \quad (26)$$

であるから、式(26)に式(25)を代入し、展開整理することにより式(27)が得られる。

$$\varphi_{kj} = \frac{l_{kk} l_{kj} + m_{kk} m_{kj} + n_{kk} n_{kj}}{(l_{kj}^2 + m_{kj}^2 + n_{kj}^2)^{3/2} (l_{kk}^2 + m_{kk}^2 + n_{kk}^2)^{1/2}} \quad (27)$$

φ_{kj} は d_k のみの関数となり、この φ_{kj} を用いて選択面素に関する目的関数 E を設定すれば、

$$E = \sum \sum (D_{kj} - C \cdot \varphi_{kj}(d_k))^2$$

となる。 E は C に関して展開でき

$$E = (\sum \sum \varphi_{kj}^2) \left(C - \frac{\sum \sum D_{kj} \varphi_{kj}}{\sum \sum \varphi_{kj}^2} \right)^2 + E_2 \quad (28)$$

ここで E_2 は

$$E_2 = \sum_{k,j} D_{kj}^2 - \frac{(\sum \sum D_{kj} \varphi_{kj})^2}{\sum \sum \varphi_{kj}^2} \quad (29)$$

である。 E の最小値探索問題は E_2 の最小値探索問題に置き換えることが出来る。この E_2 に関する未知変数は選択面素に関する距離情報のみであり、 E_2 を最小にする解 $d_k, k=1..5$ の組を求めることによって面素間に共通な変数 C の推定値 C_{est} を

$$C_{est} = \frac{\sum \sum D_{kj} \varphi_{kj}}{\sum \sum \varphi_{kj}^2} \quad (30)$$

により決定する。

式(30)の \sum にかかる総和は、選択面素5面素に対して、これらの面素が共通観測領域(すべての光源 j に対して $D_j > 0$ となる領域)に含まれる場合、各面素あたり5個の方程式が成り立つため最大25個の方程式の情報を含むことになり、単一面素に着目するときよりも C

に対する信頼性を上げることが出来る。

手順1で C に対する推定値 C_{est} を求めた後、手順2により、 C_{est} を用いて各面素ごとに (p, q, d) を推定する。この場合 C_{est} は既知情報として扱うことになり、各面素に関する目的関数 E_3 を

$$E_3 = \sum_j (D_j - C_{est} \cdot \varphi_j(p, q, d))^2 \quad (31)$$

と設定し、 E_3 を最小にする (p, q, d) を最小2乗法により求める。手順2においては5個の方程式から3個の変数を求める問題となるため、面素ごとに4変数 (p, q, d, C) を求める一般解法に比べて量子化誤差の影響を抑えることが出来る。

4. シミュレーション

計算機シミュレーションにより、5枚の観測画像をもとに面素選択解法による3次元物体の形状再構成実験を行った。あらゆる傾きを含み反射特性が表面全体にわたって一様である物体のモデルとして半径32[mm]の球体を用いた。図2にこのシミュレーションモデルの概略を示す。その中心がピンホール直下 $Z_0 = 1292$ [mm] 離れている。ピンホールからフィルム面までの距離 $f = 70$ [mm] とし、カメラのフィルムサイズを 7×7 [mm] とした。フィルム面は 64×64 画素に分割し、それぞれの画素 (x, y) についての濃度値を $C = 1.0 \times 10^8$ として式(15)から算出

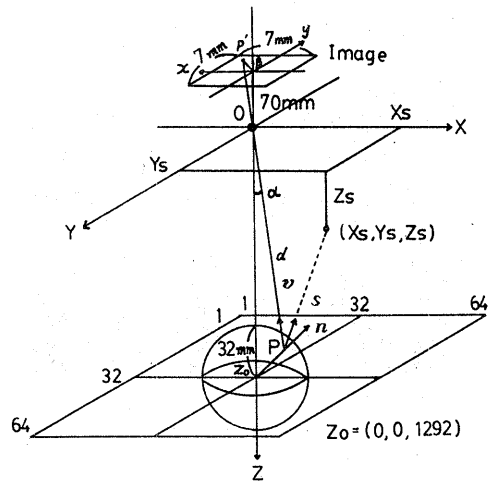


図2. シミュレーションモデル

Fig.2. Model used for Simulation.

し画像を生成し、それを8ビットに量子化した。

点光源の配置は各画面の最大輝度面素がすべて共通観測領域に入ることを考慮し、

$$(X_{s1}, Y_{s1}, Z_{s1}) = (-21.3, 293.5, 463.3)$$

$$(X_{s2}, Y_{s2}, Z_{s2}) = (328.1, -16.1, 439.7)$$

$$(X_{s3}, Y_{s3}, Z_{s3}) = (6.7, -463.0, 403.2)$$

$$(X_{s4}, Y_{s4}, Z_{s4}) = (241.6, 257.9, 760.3)$$

$$(X_{s5}, Y_{s5}, Z_{s5}) = (-22.7, -398.2, 833.2)$$

[mm]

と設定した。

図3に、 $Z = Z_0$ を基準面にしたときの対象物体面の高さ形状 ($Z_0 - Z$) を示す。

実験に用いた5枚の8ビット入力画像および共通観測領域を図4に示す。図4ではそれぞれの画面内で最大輝度面素を選び、これらを黒点で示した。これらの面素を面素選択解法の手順1で用いた。選択面素に対する d_k ($k=1..5$) を式(29)式を用いて最小2乗法により求め、求めた d_k を用いて反射特性パラメータ C_{est}

を式(30)により計算した。

手順1により安定した C_{est} を求めた後、手順2により、その C_{est} の値を既知情報として再度、各面素に対して傾き (p, q) および距離 d の値を最小2乗法により面素ごとの濃度情報 ($D_j, j=1..5$) を用いて式(32)により密に求めた。

形状再構成には得られた各面素の d を用いて d から Z を式(7)により求め、さらに高さ形状 ($Z_0 - Z$) に変換して評価した。5枚の量子化画像濃度情報から直接得られた結果の比較として一般解法により形状を再構成した結果および面素選択解法を用いて形状を再構成した結果の比較を図5に示す。一般解法は、面素ごとに (p, q, d, C) を独立に求める方法であるから、量子化誤差を含む5個の D_j ($j=1..5$) からなる方程式から4変数を解くために、最小2乗法を用いて推定される (p, q, d, C) は必ずしも面素間で C を一定としていない。この結果としてこのままでは形状 (p, q, d) も正しく推定されていない。この場合得られた

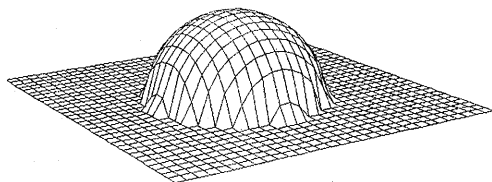
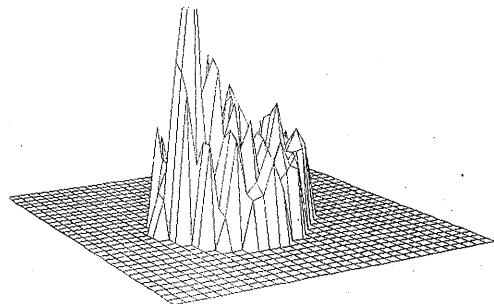


図3. 元の高さ情報

Fig.3.Original Height Information



(a) 一般解法

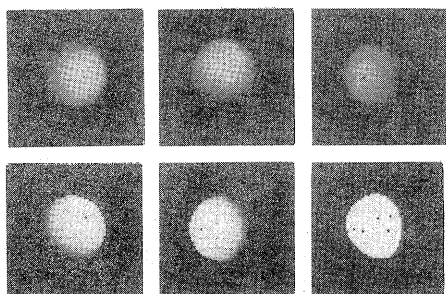
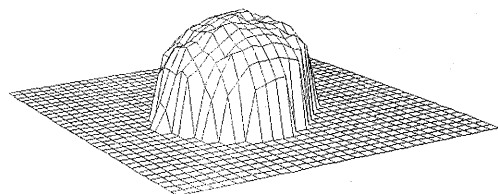


図4. 8ビット入力画像(選択面素)

及び共通観測領域

Fig.4.Input Images (Selected Surface Elements) and Commonly Observed Region



(b) 面素選択解法

図5. 8ビット量子化画像からの再構成結果

Fig.5.Reconstructed Result from 8-bit Digitized Images

(p , q , d) を用いてさらに後処理として (p , q , d) の矛盾をなくすための反復による修正を行う必要がある。このような物体に対しては面素選択解法を適用することにより、同一5枚の条件下でもかなり精度を向上させることが出来ることを確認した。

また、図4により直接得られた距離 d に関する $X-Z$ 断面を図6に示す。同図 (a), (b) はそれぞれ一般解法および面素選択解法による結果であり、同図 (c) は、理論曲線を表したものである。また共通観測領域内における全面素に対して、 d に関する誤差を評価した結果を表1に示す。面素選択解法を用いた場合最大誤差で6mm以内であった。これは対象物体までの距離約1260mmに対して1%以下の精度である。

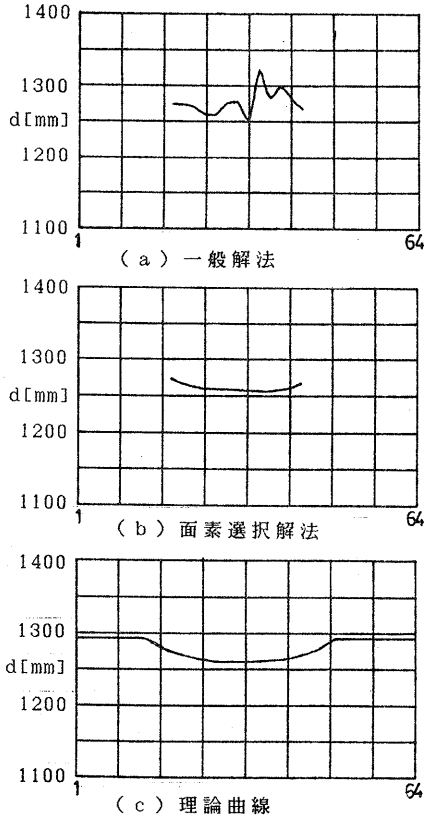


図6. $X-Z$ 断面での距離 d に対する抽出結果
Fig.6.Extracted Result of distance d
on $X-Z$ Axis

表1-1. 共通観測領域

	絶対値誤差 (平均)	2乗誤差 (平均)	最大誤差
一般解法	14.6044mm	615.1133mm ²	184.506mm
面素選択	2.8412mm	9.7500mm ²	6.605mm

表1-2. $X-Z$ 断面

	絶対値誤差 (平均)	2乗誤差 (平均)	最大誤差
一般解法	15.0642mm	513.2430mm ²	62.853mm
面素選択	3.1198mm	10.3549mm ²	4.084mm

表1. 誤差評価

5. おわりに

本論文では画面内にあらゆる傾きを持ち、反射特性が異なる拡散物体が含まれている場合を対象として点光源照明による5枚の濃淡画像から効率的にかつ精度よく距離情報を抽出するための方法を提案した。点光源照明ステレオ法はそのような物体を対象とした場合、面素選択解法を導入することにより、画像の輝度情報が量子化された場合にも入力画像の数を増やすことなく有効であることを示した。

一般解法は面素ごとに方程式を解くことから、拡散面の反射率が面素ごとに異なる物体(例えば模様のある物体)や原理的には多面体のような平面で構成される物体にも可能であるため、面素選択解法に比べて対象物体の適用範囲は広い。但し、8ビット程度の量子化を考慮した場合は、一般解法で精度良く距離情報を得るためには、より多くの入力画像を用いるかまたは修正のための後処理を行う必要がある。これに対して面素選択解法は反射特性が全面素にわたって一様な物体に対してその性質を利用することにより、画像濃淡情報から直接精度良く距離が求まる。また、本方法は複数の最大輝度面素を利用して反射特性パラメータ C を求めることにより、あらゆる傾きを持つ物体であれば目的関数

の性質が物体の形状自体に左右されないという利点を持っている。

本論文では5枚の量子化画像を用いたP S I Sの面素選択解法を扱ったが、観点を変えればこの方法の特徴として反射特性パラメータCを手順1で決定した後、手順2で面素の (p, q, d) を求めることにより、なめらかな曲面に対しては d と (p, q) を隣接面素の連続性の拘束を用いてさらに画像枚数を減らすことが出来る。必要な画像枚数は少ないほど工学的応用に有利であるためP S I Sの画像枚数削減方法についても現在検討を行っている。

文献

[1] 岩堀, 亀井, 山口: "点光源照明ステレオ法(一般解法)", 信学技報 Vol.87, No.133 (PRU87-33), pp.43-50(昭62-7)

[2] R.J.Woodham: "Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images", Opt.Eng., 19, 1, pp.139-144 (Jan./Feb.1980)

[3] R.J.Woodham: "Analysing Images of Curved Surfaces", Artificial Intelligence 17, pp.117-140(1980)

[4] W.E.L.Gimson: "From Images to Surface", MIT Press(1981)

[5] 太田, 正井, 池田: "動的計画法によるステレオ画像の区間対応法", 信学論(D), J68-D, 4, pp.554-561(昭60-04)

[6] 宮本, 北村, 白井: "レンジファインダによる三次元物体の計測", 電総研, 35, 3, p.103(1971)