

投影光学系を用いた光度差ステレオ法 による金属面の形状決定

METAL SURFACE SHAPE FROM PHOTOMETRIC
STEREO METHOD WITH LIGHT PROJECTION

西野 悦二

Etsuji NISHINO

松下電器産業株式会社

Matsushita Electric Industrial
Co. Ltd.

白井 良明

Yoshiaki SHIRAI

電子技術総合研究所

Electrotechnical Laboratory

A conventional photometric stereo method for obtaining a metal surface shape has following the limitations.

- (1) A large 2-D light source is needed to measure even a small object.
- (2) Range information of the object cannot be obtained directly.

We propose a new technique to overcome above limitations. We make a small 2-D light source with light projection on a translucent board and place the object close to it. By observing the light intensity of surface in the image, we can get the surface normal and range information at the same time under certain conditions about the object. The conditions are (1) reflection factor is constant, or (2) the object is polyhedron. The methods for both conditions and experimented results are described.

1. まえがき

一般に、工業部品は、金属より成り、その表面は著しい正反射特性を有することが多い。このような物体（以後、鏡面物体と呼ぶ。）の形状認識は、困難な点が多く、コンピュータビジョン研究の一つの課題となっている。

スリット光投影法 [文献 1] やレーザースポット光投影法 [2] など、これまで主に拡散物体に対して有効とされてきた手法は、原理上、鏡面物体に適用することができない。そこで、鏡面物体の正反射という厄介な特性を逆に積極的に利用することが得策といえる。この考え方に基づいた有効な手法の 1 つとして、光度差ステレオ法を用いた形状決定手法 [3] が従来より提案されている。

一般に、光度差ステレオ法とは、対象物体ならびにカメラの位置は変化させずに、照明状態を変化させて得た複数枚の画像より、物体画素の法線方向を決定する手法を言う。前述の手法では、天井に面状

の反射型光源を作り、その照明下に物体を置き、面素の明るさと法線方向との関係を手がかりに、物体面の形状を決定している。

ただし、この手法は、物体の大きさに対し、物体・面光源間、及び物体・カメラ間の距離が十分大きいことを前提としているので、数 cm の物体の形状を決定するにも、数十 cm 角以上の大きな面光源を必要とする。また、直接決定できるのは、物体面素の法線方向のみであり、物体面の奥行情報は、面法線分布や物体の輪郭線情報などを用いて再構成しなければならない。

本報告では、上述の問題点を解決するために、投影光学系を用いて透過型の面光源を作り、これを対象物体に十分近づけて配置し、物体に関する拘束条件のもとで、物体面の法線方向と奥行情報を同時に得る手法について述べる。ここで用いる拘束条件は 1) 物体面の反射率が一定である、2) 物体が多面体である、のいずれかである。

2. システム構成

Fig. 1に、本報告のシステム構成を示す。面光源を得るための投影系、TVカメラを用いた受光系、及び画像処理専用装置を含む処理系より構成される。

<投影系>

Fig. 1に示すように、物体を照明するための面光源を投影光学系により得ている。拡散板(a)をプロジェクタ(b)の像面に配置し、フィルタ(c)の像を背後より拡散板上に投影し、これを面光源とする。そして、この面光源の前に鏡面物体(d)を置き、物体面での反射を介して見える拡散板の様子を、TVカメラ(e)を通して入力する。プロジェクタの光軸は、カメラの光軸及び拡散板に直交するよう配置する。

また、フィルタには、次式に示す空間透過率分布を持つ3種類のフィルタを用いる。

$$\begin{aligned} T_0(\eta, \xi) &= b_0 \\ T_1(\eta, \xi) &= k_1 \cdot \eta + b_1 \quad (1) \\ T_2(\eta, \xi) &= k_2 \cdot \xi + b_2 \end{aligned}$$

T1及びT2は、それぞれ η 、 ξ の方向に、透過率がウェッジ状に変化するもので、実際には、可変濃度フィルタを使用する。T0は、透過率が一定の仮想的なフィルタを示しており、実際的には、何のフィルタも介さない状態とする。

これらT0～T2のフィルタを順次機械的に差し替えることにより、拡散板上に3種類の面光源を作る。つまり、T1及びT2のときには、拡散板上にZ及びY方向に明るさの勾配のある面光源ができ、T0のときには、ほぼ一律な明るさの面光源ができる。ただ、投影系のレンズのシェーディングの影響により、面光源の明るさは、フィルタの空間透過率とは、一致せず歪んだものとなる。

<受光及び処理系>

受光系には、図形歪が少なく、再現性の良い固体カメラを使用する。また、物体・カメラ間は十分に離し、正射投影近似が可能であるとす。

処理は、ミニコンPrime 450、及び画像処理専用装置4] (DIP; Digital Image Processing System) 上で行なう。TVカメラでとらえた複数枚の物体画像は、DIP内の画像メモリに格納され、主にミニコン上で処理される。また、DIP内部に並列画像演算装置PPP 5]を持ち、積和演算、領域番号付等の基本演算を分担させる。

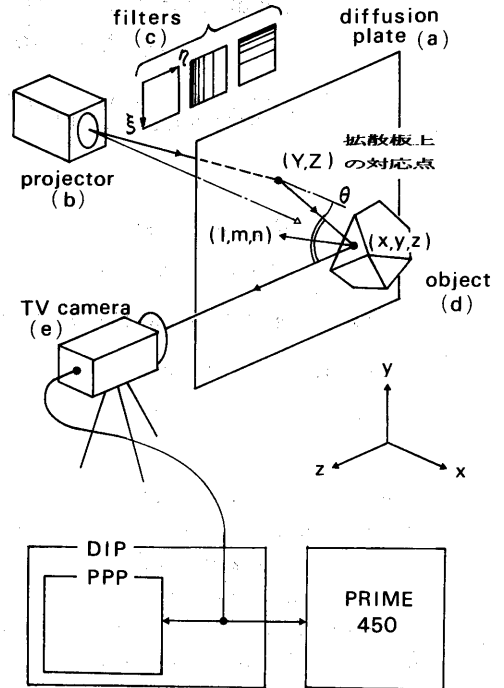


Fig. 1. システム構成

以下に、各部の仕様を示す。

- (a) 拡散板 : アクリル・オーバル板
(アクリライト#432)
全光線透過率 = 5.8 %
800 × 800 mm (2t)
拡散特性 → Fig. 5
- (b) プロジェクタ : レンズ F2.8 60mm
ランプ 24V 300 W
- (c) フィルタ : 可変濃度フィルタ
(エドモンド社製)
リニア率 = ± 5 %
25 × 75 mm (2t)
- (d) 鏡面物体 : 4.1 節参照
- (e) TVカメラ : Mo s 型固体カメラ
最低被写体照度 = 5 lx

3. 原理及び処理の流れ

Fig. 2に、処理の流れを示す。各手続きについて次に詳述し、その原理について説明する。

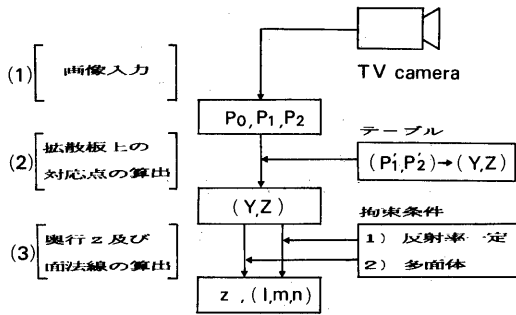


Fig. 2 処理の流れ

3・1 画像入力

Fig. 1の拡散板(面光源)の前に、鏡面物体を置くと、その物体面の反射を介して、拡散板が映る。この様子をTVカメラを通して見るとき、物体面素の3次元位置(x, y, z)及び面素の法線方向(l, m, n)に応じた拡散板上の点(Y, Z)が映し出される。以後、この点を便宜上、“拡散板上の対応点”と呼ぶ。

画像の入力は、3種類の照明下で行う。3種類のフィルタを機械的に差し替えることにより、拡散板上に面光源を作り、この面光源照明下での、物体の濃淡画像値を P0(x, y), P1(x, y), P2(x, y)として入力する。

物体面が完全鏡面のとき、P0, P1, P2は、物体上の(x, y, z)の位置から拡散板上の(X, Y)を見込み角θ(=拡散角)で観測したときの輝度に等しい。これは、光学写像の輝度不変則[6]に基づくもので、反射を起こす物体面の形状に全く依存しない。ただ、完全鏡面でない場合は、吸収もしくは拡散による光量の減少を考慮しなければならない。

3・2 拡散板上の対応点の算出

観測される3つ組の濃淡値 P0, P1, P2は、見込み角θや物体面の反射率Rなどの要因によって、拡散板の対応点と直接的に関係づけることができない。そこで、次式で与えられる量(P1', P2')を考える。

$$\begin{aligned} P1'(x, y) &= P1(x, y) / P0(x, y) \\ P2'(x, y) &= P2(x, y) / P0(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

(P1', P2')は、いわば正規化された量であり、対応点(Y, Z)に1対1対応する。つまり、(P1', P2')は、対応点を見込み角θ、物体面の反射率R、及び投影系・受光系のレンズのシェーディング等に関して不変量となる。

このように、本手法では、拡散板上の任意点で拡散される光束のすべてをその点と対応づけて利用することができる。よって、物体を面光源に十分近づけて配置でき、比較的大きな物体に対しても、従来手法で用いるような大きな面光源を必要としない。

また、事前に(P1', P2')と対応点の座標(Y, Z)との対応関係を表にしておき、実際の処理の際には、表をひく操作だけにして、処理時間の短縮を計っている。対応表は、拡散板(=面光源)を物体を介さずに、正面から見た画像をもとに、作成する。対応表TY, TZは、次のような形式をとり、表サイズは、64×64である。

$$\begin{aligned} (Y, Z) &= (TY(m, n), TZ(m, n)) \\ 1 \leq m, n &\leq 64 \\ 1 \leq Y, Z &\leq 256 \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、

$$\begin{aligned} m &= [P1'(x, y) \times \alpha1] + 1 \\ n &= [P2'(x, y) \times \alpha2] + 1 \end{aligned} \quad [] : \text{ガウス記号}$$

$$\begin{aligned} \alpha1 &= 63 / \text{MAX}(P1'(x, y)) \\ \alpha2 &= 63 / \text{MAX}(P2'(x, y)) \end{aligned}$$

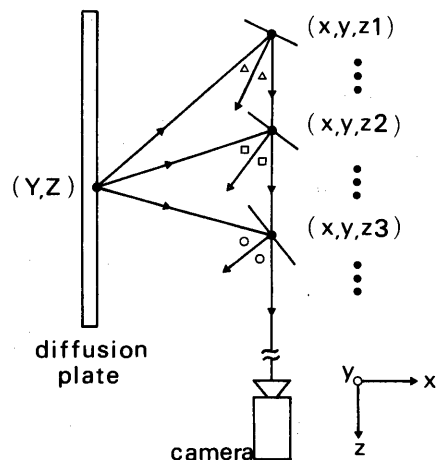


Fig. 3 対応点が求まった時点での1つの自由度

3.3 奥行の算出

拡散板上の対応点 (Y, Z) が求まった時点では、奥行 Z 及び面法線の方向は、一意に決らない。Fig. 3 に示すように一つの自由度が残る。よって、物体に関する拘束条件の付加が必要となる。次に、2つの拘束条件下での奥行 Z の算出法を示す。

1) 物体面の反射率が一定のとき

物体面の反射率が一定のときは、前述の (P1', P2') 以外に、P0 自身の絶対値を用いる事ができる。物体面の反射率が一定値 R であるとするとき P0 は次式で与えられる。(Fig. 4 参照)

$$P_0(x, y) = P_{\perp}(Y, Z) \cdot T(\theta) \cdot R / \cos \theta \quad (4)$$

- $P_{\perp}(Y, Z)$: 拡散板に垂直方向の対応点の輝度
- $T(\theta)$: 拡散特性 (透過率の拡散角依存性) ($T(0) = 1$ に正規化)
- θ : 対応点の見込み角 (= 拡散角)

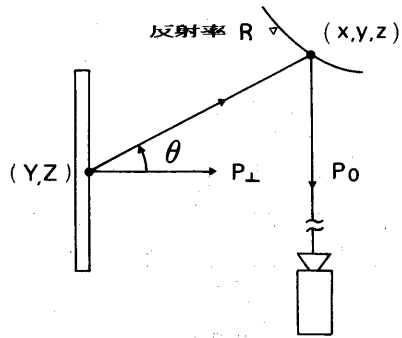
よって、 $P_{\perp}(Y, Z)$, $T(\theta)$, R を事前に測定し、テーブル化しておけば、上式に基づいて、拡散角 θ を求めることができる。

ただし、 $T(\theta) = \cos \theta$ なる完全拡散特性を示すような拡散板を使用した場合、(4) 式は、次式のようになり、 $P_0(x, y)$ より拡散角 θ を導くことはできない。

$$P_0(x, y) = P_{\perp}(Y, Z) \cdot R \quad (5)$$

よって、拡散板には、ある程度指向性の強い拡散特性をもつものを用意するのがよい。Fig. 5 に、実験に使用した拡散板 (アクリル・オーバル板) の拡散特性の実測値を示す。

拡散角 θ が求まれば、TVカメラに入射される光束の道筋が限定される。光束は、Fig. 6 に示すように、対応点 (Y, Z) を頂点とする頂角 θ の円錐面上に乗っていると言える。そこで、TVカメラへの入射軸 (Z軸に平行) と円錐面との交点を求めれば、物体面素の奥行 Z を算出できる。ただし、このとき交点は、2つ求まるので、物体の存在領域の制限や、物体面の連続性などを考慮することによって、いずれか一方の交点を排除する必要がある。



$$P_0(x, y) = P_{\perp}(Y, Z) \cdot T(\theta) \cdot R / \cos \theta$$

Fig. 4 物体面の反射率が一定のときの $P_0(x, y)$ の物理的意味

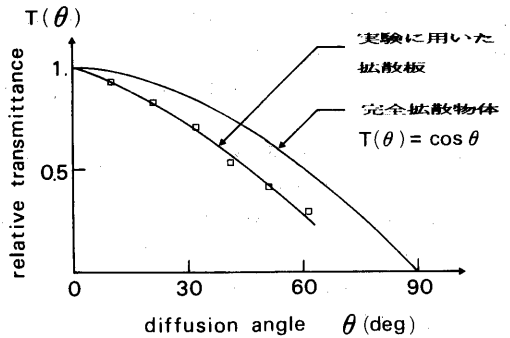


Fig. 5 拡散板の拡散特性 $T(\theta)$

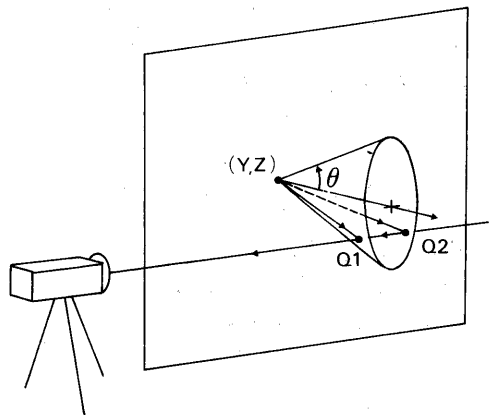


Fig. 6 対応点 (Y, Z) 及び拡散角 θ が求まった時点での奥行 Z の算出法

2) 物体が多面体のとき

Fig 7 (a) は、対象物体が多面体のときの物体像と対応点分布との関係を表している。図にも示すように、同一の物体面内で反射されて見える対応点は、その物体面内では、連続的に変化するが、物体の稜を境いに不連続となり、各物体面に対応した領域を形成する。

この様子をカメラでとらえた物体像と、拡散板上の様子をカメラでとらえた物体像と、拡散板上の対応点の分布図に分けて表すと、Fig 7 (b) のようになる。物体像上で、同じ稜線を共有する平面領域 A, B があるとき、その拡散板上の対応点は、必ず互いに重畳しない領域 A', B' に分布する。また、物体像上で直交格子状にサンプルした画素列に注目すると、それらの拡散板上の対応点は、歪んだ格子状に並ぶ。つまり、物体像上で対応点分布上の座標軸は、反射面の面方向に応じた線型な座標変換の関係にあると言える。

そこで、以上のことをふまえて、具体的な手順をイ)、ロ)の順に示す。

イ) 物体像の領域分割

領域分けは、前述したように、対応点分布が稜線を境いに不連続となることに注目して行う。アルゴリズムは、以下のとおり。(Fig. 8 参照)

- (1) 拡散板上の対応点を2次元配列上にプロットした後、ガウス関数にて平滑化し、疑似的な2次元ヒストグラムを得る。
- (2) (1)の結果をしきい値処理して、対応点のグループングを行い、各対応点にラベル付けを行う。
- (3) (2)でラベル付けされた対応点と関係する物体像上の画素にも同じラベル名を付ける。
- (4) 物体像上で同一ラベルの連結領域を順次抽出し、これらを物体の各平面領域とみなす。

ただし、(4)において、同一ラベルで複数個の連結領域が得られるときは、面積がしきい値以上のものを選び、それぞれ異なった物体平面領域であるとみなす。

この手法の他に、直接、物体像上で、対応点間の距離情報よりエッジを抽出し、領域分割を行うことも可能であろう。しかし、エッジのリンクや、エッジ抽出時のしきい値の設定など、不安定な要素が多く、良い手法とは言えない。その点、上述の手法は、巨視的な観点から領域分割を行うので、ノイズに対して安定であると言える。

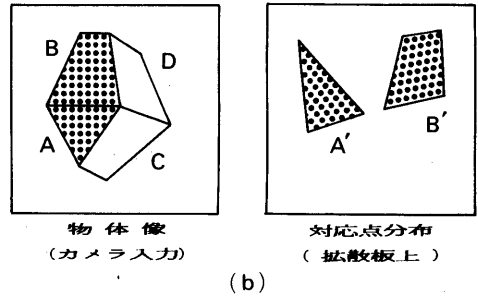
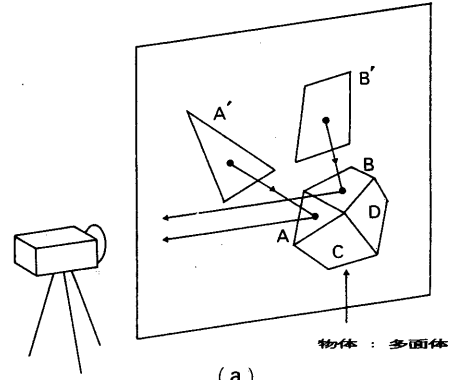


Fig. 7 物体が多面体のときの物体像と対応点分布の関係

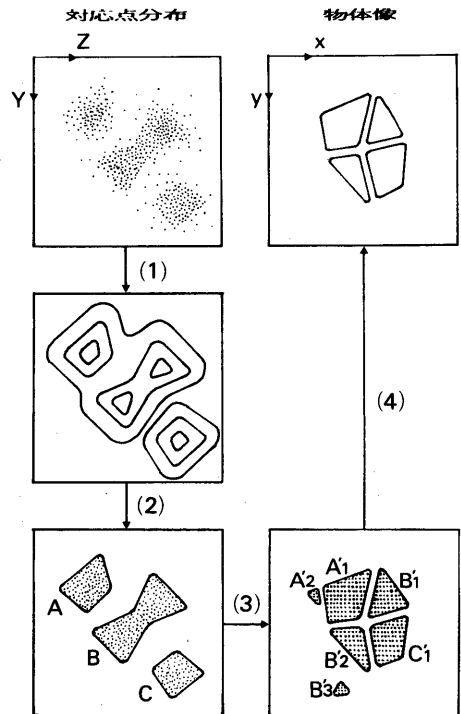


Fig. 8 領域分割の手続

ロ) 物体面の位置・方位の決定

ここでは、イ) で求めた物体像の各領域の平面方程式を最小自乗誤差法で求め、物体平面の位置及びその面法線方向を決定する。

まず、各領域の平面方程式をパラメータ (1, m, n) 及び h を用いて、(6) 式のように表すと、対応点 (Y, Z) の座標は、簡単な幾何代数によって、(7) 式で与えられる。(付録参照)

$$lx + my + nz = h \quad (6)$$

$$Y(x, y) = y - mx / l \quad (7)$$
$$Z(x, y) = (2m^2 - 1) \cdot x / 2nl - my / n + h / n$$

そこで、各領域毎に (7) 式の (Y, Z) と対応点の観測値 (Y', Z') との自乗誤差和 (8) 式) を最小にするパラメータ (1, m, n), h を求め、平面方程式を決定する。

$$D = \sum_{\Phi \ni (x, y)} (Y(x, y) - Y'(x, y))^2 + (Z(x, y) - Z'(x, y))^2$$

$$\Phi: \text{物体像上で分割された各領域} \quad (8)$$

4. 実験

次の物体に関する2つの拘束条件下で、鏡面物体の形状を決定する実験を行った。

- 1) 物体面の反射率が一定のとき
- 2) 物体が多面体のとき

1) の場合については、a) ~ d) の理由で、誤差が大きくなり、良い結果を得るに至らなかった。

- a) 反射率が一定であるという条件自身が、成立しにくい。
- b) (4) 式の $P_{\perp}(Y, Z)$ の値を正確に測定できない。
- c) 拡散板への投影が中心投影であるために、拡散板上の各点での拡散特性 $T(\theta)$ が、一様でない。
- d) 拡散角 θ の誤差が、奥行 Z の誤差に大きく増大されてしまう。

特に、b), c) については、その影響を軽減するために、補償を試みたが、十分な効果が得られなかった。1) の拘束条件下で、物体面を精度よく決定するためには、投影系及び受光系の系配置の見直しが必要であろう。

以下、比較的良い結果の得られた 2) の拘束条件下での処理例を示す。

4.1 処理対象

処理対象には、Fig. 9 に示すような、約 10 cm 大のアルミニウム表面の多面体を用意した。1 つは、正 20 面体、1 つは 8 角錐台を上下に張り合せた多面体である。

画像の入力及び処理には、前述の画像処理専用装置 DIP を使用した。画像サイズは、256 × 256 画素、階調は、8 bit / 画素で入力した。Fig. 10 は、対象物体を拡散板の前方に置き、TV カメラでとらえたもので、拡散板は、処理対象に向かって左側に位置している。よって、拡散板が写っている物体面は、物体の左寄りの 6 面に限られている。

4.2 処理結果

Fig. 11 及び Fig. 12 は、中間結果で、それぞれ対応点分布と物体像上での分割領域を表している。図中の数字の 2 と 3 の領域は、拡散板上では重なり合っているが、物体像上では、2 つの異なる領域に分れているのが判る。

Fig. 13 は、最終結果で、本手法によって決定された物体面を 3 次元表示している。カメラの位置は、z の正の方向にあたる。また、z = 0 及び y = 0 平面に平行な面で切った断面図を Fig 14 (a), Fig 14 (b) に示す。ただし、Fig 14 (b) の切断面は、各領域の中心を通る平面である。それぞれ、物体面の方向及び奥行情報が、正しく求められているのが判る。

Table. 1 は、平面領域の中心の奥行及び面法線の誤差を示している。奥行方向で約 5 ~ 10 mm、面法線の方位で約 2 ~ 5° の誤差内で、物体面の位置・方位が求まっている。

また、処理時間については、CPU time で、90 秒前後 (ミニコン Prime 450)、うち PPP での演算時間が 7 秒程度である。PPP で行った主な画像演算の処理時間は、次のとおり。

・積和演算、ヒストグラム作成	: 65 msec
・加算、大小比較・変換	: 156 msec
・領域番号付	: 195 msec
・重心計算	: 919 msec

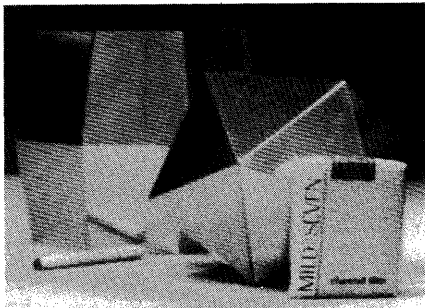


Fig. 9 処理対象

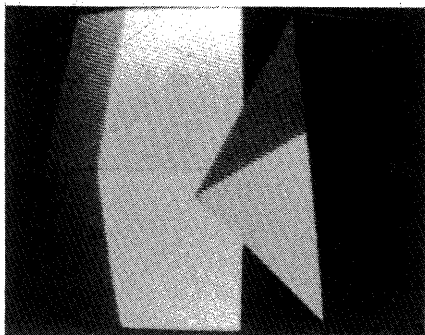


Fig. 10 入力画像

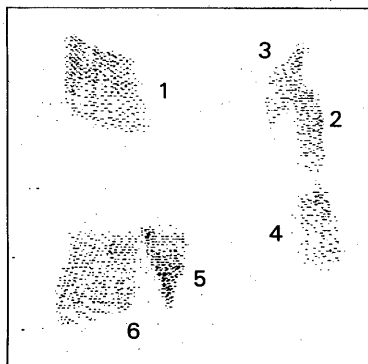


Fig. 11 対応点分布

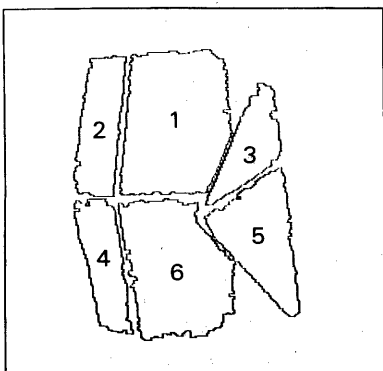


Fig. 12 物体像上の分割領域

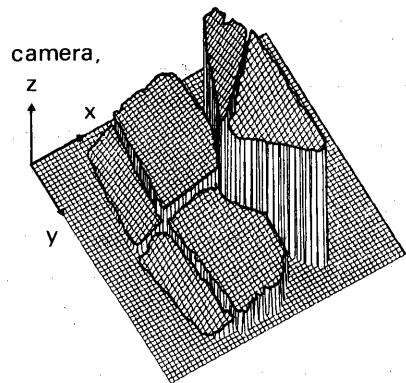
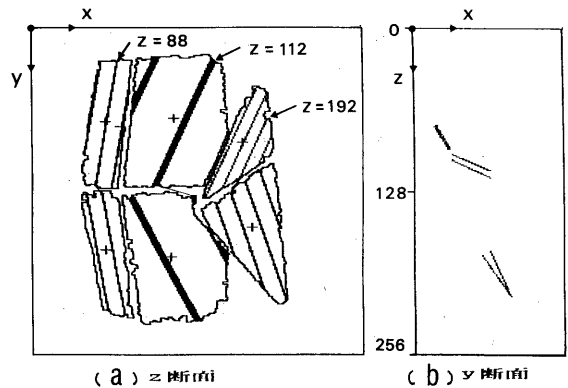


Fig. 13 求められた物体平面



(a) z-断面

(b) y-断面

Fig. 14 Fig. 13のz-, y-断面図

領域番号	1	2	3	4	5	6	単位
中心のz値	+11	+2	-8	-7	+5	+2	mm
面法線	4.0	2.7	2.6	5.1	2.1	1.3	°

Table. 1 奥行及び面法線の誤差

5. あとがき

実験を通して、本手法の有効性を示した。本手法の特長を従来手法と比較してまとめると、次の二点が挙げられる。

- (1) 物体・面光源間距離が、対象物体の大きさのオーダーでよいので、小さな面光源で足りる。
- (2) 奥行情報が直接的に求まるので、面法線分布や輪郭情報からの再構成が不必要である。

今後の課題としては、任意方向の物体面を検出できる系配置の検討、及び複反射する凹物体への対応策の検討などが挙げられる。

最後に、本手法の適用分野としては、正反射物体のピン・ピッキングや、工作具の位置決めなどが考えられよう。

<付録> (7) 式の導出

Fig. 15 に示すように、座標原点を拡散板上隅にとり、拡散板上を $x = 0$ 平面とする。物体面上の点 (x, y, z) での反射を介して、TVカメラに入射する光線を光線1及び光線2とする。

物体面を面法線ベクトル (l, m, n) を用いて表すと、

$$lx + my + nz = P \quad \langle 1 \rangle$$

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1 \quad \langle 2 \rangle$$

光線1を対応点座標 (Y, Z) 及び方向余弦 (a, b, c) を用いて表すと、

$$\frac{x}{a} = \frac{y - Y}{b} = \frac{z - Z}{c} \quad \langle 3 \rangle$$

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1 \quad \langle 4 \rangle$$

また、光線2の方向余弦は、 $(0, 0, -1)$ となる。入射角 $\phi_1 =$ 入射角 ϕ_2 より、

$$(a, b, c) + (0, 0, -1) = k \cdot (l, m, n) \quad \langle 5 \rangle$$

$\langle 4 \rangle, \langle 5 \rangle$ より、 $k = -2n$ 、よって、

$$(a, b, c) = (-2nl, -2nm, -2n^2 + 1) \quad \langle 6 \rangle$$

$\langle 6 \rangle \rightarrow \langle 3 \rangle$

$$\frac{x}{-2nl} = \frac{y - Y}{-2nm} = \frac{z - Z}{-2n^2 + 1} \quad \langle 7 \rangle$$

$\langle 1 \rangle \rightarrow \langle 7 \rangle$

$$Y = y - mx / l \quad \langle 8 \rangle$$

$$Z = z - (2n^2 - 1)x / (2nl)$$

$$= \frac{(2m^2 - 1)x}{2nl} - \frac{my}{n} + \frac{P}{n}$$

以上、(7) 式が導出される。

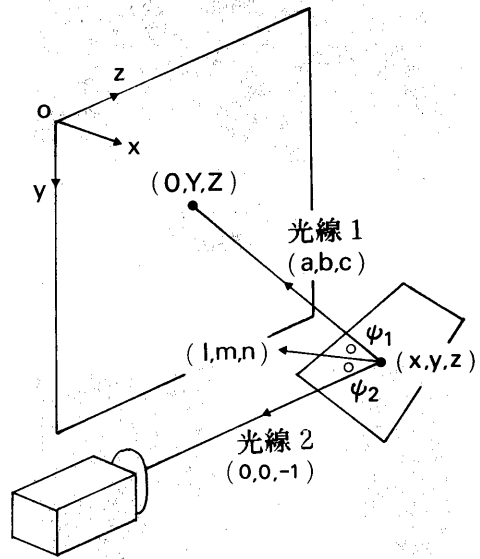


Fig. 15 (7) 式の導出

<参考文献>

- 1] 大島, 白井, "Object recognition using three dimensional information" PAMI-5 4 (1983)
- 2] 石井, "レーザーを用いた物体認識と環境教示システム" オートメーション 27, 2 (1982)
- 3] 池内, "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二手法" 信学論 J65-D 7 (1982)
- 4] 築山, 諏訪, "物体認識用画像処理システム DIPの開発" 電総研イ報 44 P.606 ~ P.614 (1980)
- 5] 森, 篠田, 麻田, "The design and use of Parallel Pattern Processor" PRL76-86 (1977)
- 6] 久保田, 「光学」 P.363 ~ P.364

<謝辞>

御検討頂きました電総研視覚システム研究室の諸氏、ならびに研究の機会を与えて下さった松下電器産業(株)野田克彦氏に深く感謝致します。