

# 複数の鏡像を含む単眼画像からの面对称復元手法による 隠れのない3D物体復元

## Occlusion-Free 3D Recovery Using Mirror Images

田村進一\*\* 光本浩士\* 梶見直樹\* 岡崎耕三\* 副井 裕\*

Shinichi TAMURA\*\*, Hiroshi MITSUMOTO\*, Naoki KAJIMI\*, Kozo OKAZAKI\*, Yutaka FUKUI\*

\*\*大阪大学基礎工学部 \*鳥取大学工学部

\*\*Faculty of Engineering Science, \*Faculty of Engineering  
Osaka University Tottori University

あらまし 本稿では、鏡を使った実画像からの3次元物体復元について述べる。鏡は、直接像・鏡像間に面对称関係を作り出すため、および物体背面画像を得るために使用する。復元は直接像と鏡像間の対応づけの後、既に報告している無限遠点を利用した復元手法によって行う。対応づけには、2種類の拘束を利用した。鏡1枚のみを使用した場合には、直接像、鏡像のどちらにも写らない隠れ部分が残る。したがって、2枚の鏡を使用することによって隠れをなくす。

Abstract: This paper discusses 3D recovery from a 2D real image using mirrors. The mirrors are used for making up symmetric relation between direct image and mirror images. Finding correspondences between direct image and mirror images. 3D will be recovered by plane symmetric recovering method using vanishing point, which we have already reported. Two constrains are used in the correspondence. In case of using only one mirror, unvisible part in direct image and also in mirror image remains. However, using two mirrors, occlusion part will disappear, and the occlusion-free object recovery will become possible.

Key Words: Computer vision, Mirror, Plane symmetry, 3D recovery, Single view image, Perspective projection

### 1. はじめに

従来、画像を用いて3D構造を復元、認識する試みは、単眼視と複眼視とによって行われている。単眼視による復元は、物体特徴を利用した拘束条件から復元されている。複眼視による復元は、一般に3角測量の原理に基づいた手法である。

面对称物体は画像上に、異なった方向から見た2枚の画像が入っていると考えられ、等価的にステレオ視と考えられる。我々は、この見地から、既に面对称物体の無限遠点を利用した場合の3次元復元について報告した<sup>[1]</sup>。本稿では、その応用として面对

称物体でない多面体物体に対しても鏡を使用することにより、強制的に面对称性を作り出し、3次元復元を行う手法を報告する。

鏡を使用し、3次元計測を行うシステムは、いくつか報告されている<sup>[2-4]</sup>。この場合、鏡の位置を既知としている。位置のわかった鏡を使用することは、ステレオ視と等価と考えられる。これに対し、鏡の位置が未知とした場合の復元方法は報告されていない。このような問題に対して検討を行う。この手法では鏡を複数枚使用することによって物体の隠れを除くことができる。

本稿では、まず鏡を1枚使用した場合について処理法および問題点を述べ、次にその発展として2枚の鏡を使用した場合の物体の復元について述べる。

## 2. 鏡像立体視

### 2-1 座標系の設定

原点を視点に一致させ、視線をZ軸に一致させるようなワールド座標系(X, Y, Z)を考える(図2-1)。

透視変換を式(1)に示す。(U<sub>i</sub>, V<sub>i</sub>)は画像座標値、Sはカメラモデルにおけるスケールパラメータであり、焦点距離fと係数dを用いて表される。

$$U_i = \frac{-X_i}{Z_i \cdot S}, \quad V_i = \frac{Y_i}{Z_i \cdot S} \quad (1)$$

ただし  $S = d / f$

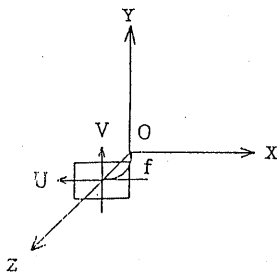


図2-1 座標系の設定

### 2-2 鏡像における仮想的対称面素

図2-2は、多面体物体を鏡の前に置いた場合の図である。物体と鏡に写った鏡像は、鏡面に関して対称な位置関係にある。

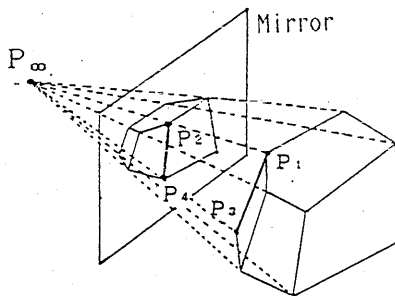


図2-2 多面体物体とその鏡像との関係

鏡面に関して対称な位置関係にある線分P<sub>1</sub>-P<sub>3</sub>、P<sub>2</sub>-P<sub>4</sub>は、仮想的対称面素P<sub>1</sub>P<sub>2</sub>P<sub>4</sub>P<sub>3</sub>を構成し、中心投影図では対応端点は延長線上の交点として無

限遠点(VP; 図2-2 P<sub>∞</sub>)をつくる。面対称復元手法<sup>(1)</sup>により対称面素を復元していくことによって多面体の3D復元を行う。

### 2-3 対称面素の復元式

#### 1) 中点の決定(2D)

2D中での複比の関係式<sup>(5)</sup>(2)を用いると無限遠点から中点までの距離が求められる。これにより3D中のP<sub>1</sub>-P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub>-P<sub>4</sub>の中点であるP<sub>5</sub>、P<sub>6</sub>の画像座標値を求めることができる。

$$\frac{2}{P_5 P_\infty} = \frac{1}{P_1 P_\infty} + \frac{1}{P_2 P_\infty} \quad (2)$$

#### 2) 無限遠点に向かう直線上の点の3D復元

無限遠点を利用すると、それに向かう直線の方向ベクトルが得られ、その線上の点が3D復元できる。透視変換の関係式(1)より

$$X_i = -U_i \cdot Z_i \cdot S, \quad Y_i = V_i \cdot Z_i \cdot S \quad (3)$$

したがってP<sub>i</sub>の3D位置ベクトル $\vec{P}_i$ は

$$\begin{aligned} \vec{P}_i &= (X_i, Y_i, Z_i) \\ &= (-U_i \cdot Z_i \cdot S, V_i \cdot Z_i \cdot S, Z_i) \quad (4) \end{aligned}$$

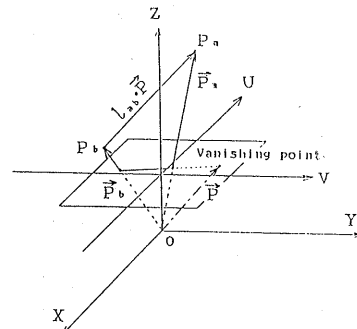


図2-3 無限遠点と直線との関係

図2-3において原点Oから画像平面上の無限遠点にいたるベクトル $\vec{P}$ は

$$\vec{P} = (-U_\infty, V_\infty, 1/S) \quad (5)$$

であり、これを用いると、対応点对やそれらを結ぶ直線上の点(中点など)P<sub>5</sub>、P<sub>6</sub>の間には

$$\vec{P}_5 = \vec{P}_6 + l_{56} \cdot \vec{P} \quad (6)$$

ただしl<sub>56</sub>は係数

なる関係が存在する。

式(4),(5),(6)より

$$-U_1 \cdot Z_1 \cdot S = -(U_2 \cdot Z_2 \cdot S + U_{12} \cdot U_\infty) \quad (7)$$

$$V_1 \cdot Z_1 \cdot S = V_2 \cdot Z_2 \cdot S + l_{12} \cdot V_\infty \quad (8)$$

$$Z_1 = Z_2 + l_{12} / S \quad (9)$$

が得られる。さらに式(7)および、式(9)より

$$Z_2 = Z_1 \cdot \left( \frac{U_1 - U_\infty}{U_2 - U_\infty} \right) \quad (10)$$

これは  $Z_1$  から  $Z_2$  が復元できることを示す。

### 3) 中点の3D復元

3D中において  $P_5$ 、 $P_6$  を結ぶ直線と無限遠点へ向かう直線とは垂直に交わることから式(11)が得られる。

$$\vec{P}_{65} \cdot \vec{P}_{15} = 0 \quad (11)$$

$$\text{但し, } \vec{P}_{15} = \vec{P}_1 - \vec{P}_5$$

$P_1$  は  $P_5$  を用いて表現される。

$$\vec{P}_1 = \vec{P}_5 + l_{15} \cdot \vec{P} \quad (12)$$

式(12)より

$$\begin{aligned} \vec{P}_{15} &= \vec{P}_1 - \vec{P}_5 \\ &= l_{15} \cdot \vec{P} \end{aligned} \quad (13)$$

であり、式(4),(5),(11),(13)から式(14)が得られる。

$$Z_6 = Z_5 \cdot \frac{U_5 \cdot U_\infty + V_5 \cdot V_\infty + 1 / S^2}{U_6 \cdot U_\infty + V_6 \cdot V_\infty + 1 / S^2} \quad (14)$$

これは  $Z_5$  から  $Z_6$  が復元できることを示す。

したがって対称面素上の点  $P_i$ ;  $i=1,2,\dots,6$  の内、ある1点のZ座標がわかれば、以上の1)、2)、3)を利用することにより6点の3次元復元が可能となる。

## 3 鏡像による復元手法

### 3-1 処理の流れ

処理の概要を図3-1に示す。CCDカメラから得た画像に対して、微分処理後2値化処理を行いエッジ画像を得る。その画像に対して、対話形式でHough変換による直線抽出処理。また、交点tableによる頂点抽出処理を行い、直接像、鏡像 別々に頂点、線分を得る。次に直接像、鏡像間の対応づけを行う。そ

の結果から、面对称復元手法を利用し復元を行う。

この際対応づけをどのように行うかが重要な点であり、本報告においては、鏡像に関する2種類の拘束を考えた。

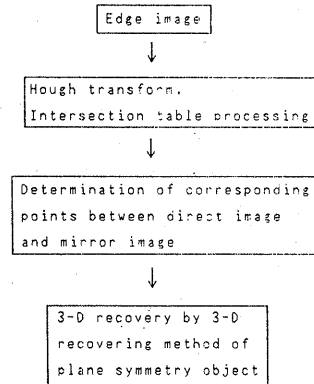


図3-1 処理の流れ

### 3-2 鏡像対応づけ拘束

物体とその鏡像はOcclusion点が異なり、直接対応がつく点は少ないが、以下の鏡像立体視に関する2つの対応づけのための拘束条件を用いる。

#### VP拘束

図3-2のように対応点の延長線上に、VP ( $P_\infty$ ) が存在する。したがって、VP が得られていれば  $P_1$  に対応する点 ( $P_2$ ) は  $P_1$  とVP を結ぶ直線上に存在している。

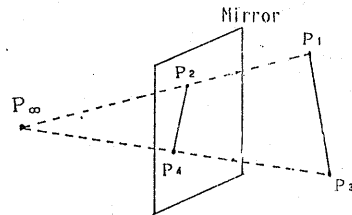


図3-2 VP拘束

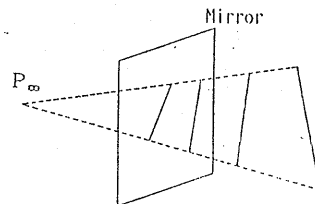


図3-3 鏡像順序拘束

### 鏡像順序拘束

図3-3に示すように直接像、鏡像各2本ずつのVP拘束を満たす線分がある場合、対応するエッジ対は内側同士、外側同士である。

### 3-3 実験

#### (1)線画抽出と交点table処理

図3-4はCCDカメラ( $f=8\text{mm}$ )により多面体を撮影( $512 \times 480 \times 8\text{bit}$ )し、エッジ強調した後、2値化処理したものである。

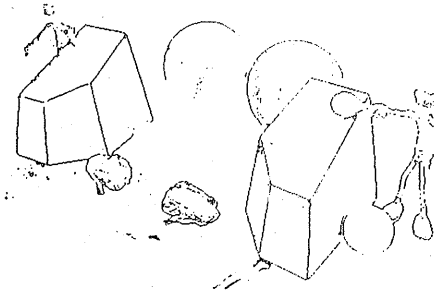


図3-4 入力画像

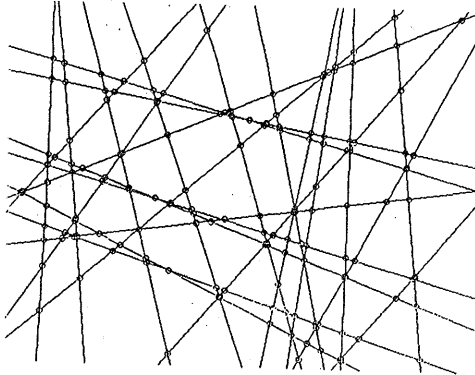


図3-5 Hough変換による直線抽出結果

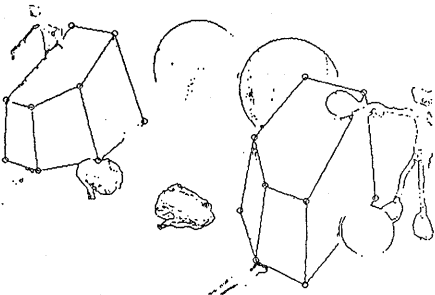


図3-6 交点table処理による頂点抽出結果

これに対し、Hough変換による直線抽出した結果を

図3-5に示し、交点table処理による頂点・線分抽出を行う。また、頂点抽出結果を入力画像に○印で重ねて表示する(図3-6)。

交点tableとは、文献[1]に示されている手法である。簡単に言えば、Hough変換によって抽出された直線群の中から交差直線数3(3本の直線からなる交点)の交点を物体頂点候補とし、それをどの直線の交点であるかというtable上で操作することによって物体頂点、線分を抽出するものである。また、入力画像とのANDを頂点ではなく直線上で行うことによって、物体頂点がOccludeされている場合や、偶然起こる交差直線数3の交点についても対処できる。しかし、今のところT型頂点はないと仮定している。したがって、凸物体や、T型頂点の出てこない凹物体の処理は可能であるが、T型頂点の出る凹物体の処理は不可能である。

#### (2)接続、面情報の取得

(1)によって抽出された線分から、次に各頂点についての接続関係を探査する。すなわち、ある点が何個の頂点と線分を通じてつながっているかというTree型情報を得ることである。各頂点に関する接続関係が得られれば、それを利用して面情報を探査する。面の探査については接続関係を右回り(時計回り)に進んで面情報を得る。

この処理は、対応づけが行われた後の情報の補充において必要となる。

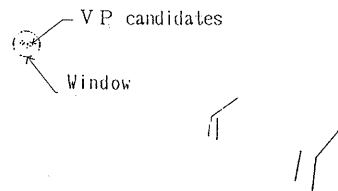


図3-7 無限遠点候補○の最大集積域○とそれを形成するエッジ対

#### (3)各線分ごとの交点の作成。

対応している線分同士の端点を結べば無限遠点を生成することから、給当たりで直接像、鏡像の各エッジ対が対応していると仮定し、各々の交点を求める。

#### (4)無限遠点の決定

(2)で求めた無限遠点候補を位置に依存するサイズ(遠方は大)の窓を用いて統合する。最大集積域の中心を無限遠点とし、それを形成するエッジ対を対応線分と仮定する(図3-7)。

(5)順序拘束による対応候補の絞り込み

図3-3に示すように直接像2本のエッジに対し鏡像側にも2本のエッジがいずれもVP拘束を満たすように対応している場合、鏡像順序拘束によってたすぎがけ対応のほうの対応候補を取り除く。

(6)接続関係を利用した候補の探索・選択

以上のままではすべてのエッジ対応を求めることは難しい。理論的には、対応点同士を結べばその直線はVPを必ず通るはずであるが、実際にはVPが遠方で形成されるためエッジ端点が誤差などのために数画素ずれただけで直線はVPから大きく外れる(図3-8)。

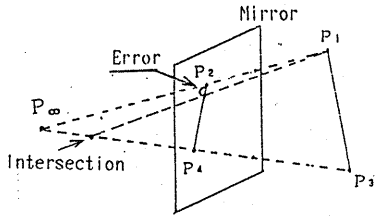


図3-8 P<sub>2</sub>の小さな誤差による交点の大きなずれ

物体の位置姿勢がかわっても接続関係は保存される。そこで、この既知のエッジ対応に付随する対応点対を利用し、その点の持つ接続関係の中から対応点対候補をVP拘束を使って探索していく。この場合、VP拘束の使い方はVPと直接像の頂点とを結んだ直線を

$$V = aU + b$$

とし、評価関数  $f(U, V)$  を

$$f(U, V) = V - aU - b$$

として評価する。ここで、 $(U, V)$  は鏡像の対応点候補の画像座標である。条件は

$$f(U, V) \leq d \quad (15)$$

である。この条件を満たす場合、対応点と判定する。実験において  $d$  は5とした。

次に、具体的に対応点の探索例を示す。図3-9には物体エッジ(破線)に重ねて、図3-7で抽出された対応エッジ対候補(実線)を表示している。この状態において対応エッジ対候補のうち例えば  $(ME_2 - DE_2)$  について、対応している端点を基点として1組選ぶ  $(MP_1 - DP_1)$  (図3-9, ○印)。次にこの対応点に接続されている点(図3-9, △印)の内から対応する点対を調べる。  $DP_1$  と接続されている点のうちの1つ  $DP_2$  と対応している点を求めるため  $MP_1$  と接続されている3つの点  $(MP_2, MP_3, MP_4)$  から  $DP_2$  に関するVP拘束を満たし

ているものを探索する。そして  $MP_2$  が対応点と決定される。次は  $DP_3, DP_4$  の順に対応しているものを探索する。  $DP_1$  に接続している頂点について探索が終われば次は  $DP_2$  に接続している頂点について行われる。このとき  $DP_2$  の対応は既に  $MP_2$  に決定されているので鏡像側も  $MP_1$  から  $MP_2$  に基点をシフトし、その接続している点の内から対応点を探索する。枝が伸びるようにこれを繰り返し新たな枝(対応点)がなくなるまで行う。これを1セットとして以上の処理を図3-7のエッジ対応対すべてについて対応点候補を探索していく。最後に、直接像の頂点に対応する鏡像側の頂点ナンバーの内全セットを通して、最大多数の頂点ナンバーを対応点と決定する。図3-10に正しく対応が得られた頂点を・で示す。

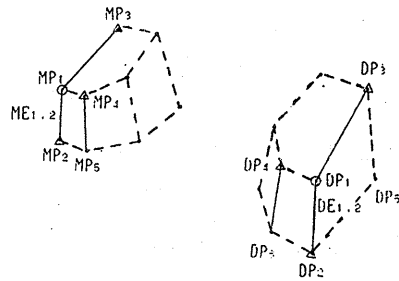


図3-9 対応探索

(○)は対応点(基点), △は対応点に接続している頂点, 添字 M: 鏡像, D: 直接像, P: 点, E: 線分を示す)

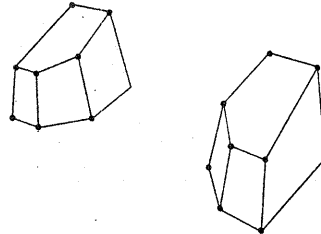


図3-10 対応結果

(7)情報の伝播, 補充

直接像においてOcclusionであっても鏡には写っている部分や、直接像では見えているが鏡には写らない部分、これらは互いに対応する部分がないので復元はできない。しかし、互いに情報を伝播し補え合えば復元可能である。対応点がない点については対応する点がOccludeされていると解釈し相手側に新たに点のコードナンバーを作り、それを対応点とする。次に、結線情報についても対応する点対を比較し補充。直接像、鏡像間の対応点同士の接続Treeを比較し、不足していれば、補充する。次に、直接像、鏡

像別々に面情報を再度抽出し、その結果から面情報に関して比較、補充する。これによって、図3-11のようにエッジが1本誤って抽出されない場合も、エッジを補って同様の結果を得ることができる。

3D座標については対応がある点を先ず復元し、復元されない点については既知の平面から代数的に計算する。同時にOcclusion部分も復元する。

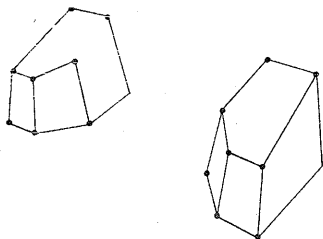
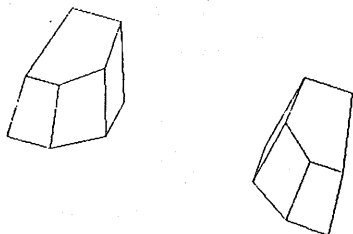


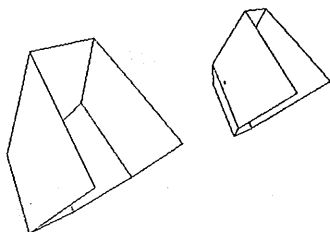
図3-11 エッジが一本ない場合

### 3-4 実験結果

復元結果をY軸回りに回転した線分グラフィックスを図3-12に示す。図3-12(a)は-30°回転表示したものである。対応点がOcclusionであっても直接像、鏡像とも復元がなされている。図3-12(b)これとは逆に100°回転表示したものであるが、背面、底面が復元されていない。



(a) Y軸回りに-30°回転表示



(b) Y軸回りに100°回転表示  
(背面、底面が復元されていない)

図3-12 復元物体を回転表示

これは、図3-4において直接像、鏡像どちらに

も、背面、底面が写っていないため、面の認識がなされていないためである。従って、問題点として1枚の鏡だけでは隠れの部分を除くことができず、物体の復元は不十分であることである。

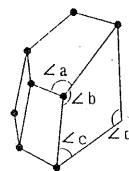
またTable-1に復元の結果として辺(線分)の長さを与えた場合の長さの比較および角度の比較を示す。誤差の原因としては量子化誤差、画像中心と視線のずれ、実験的に求めたスケールパラメータ精度、そしてHough変換による直線抽出誤差などが考えられる。

Table-1 線分の長さの比較および角度の比較

Number of line segment	Recovered value (mm)	Real value (mm)	Relative error (%)
1	79.19	80.00	-1.01
2	57.50	56.57	1.64
3	41.50	40.00	3.75
4 (given)	120.00	120.00	...
5	79.81	80.00	-0.24
6	69.81	70.43	-0.88
7	47.62	44.40	7.25
8	31.85	31.00	2.74
9	102.31	104.02	-1.64
10	50.89	50.00	1.78
11	101.50	101.15	1.50
12	74.90	72.92	2.72
13	64.76	59.98	7.97
14	65.18	60.65	7.19
15	105.74	101.15	4.54

Angle	Recovered value (°)	Real value (°)	Relative error (%)
∠a	89.59	88.76	0.94
∠b	102.32	105.88	-3.36
∠c	85.65	85.14	0.60
∠d	85.89	84.49	1.66

[ Relative error=(recovery-real)×100/real ]



## 4. 2枚の鏡を使用した復元

3章においては、1枚の鏡を使用して復元を行った。これを鏡像復元手法と呼ぶ。1枚の鏡のみでは、復元されなかった背面部分を復元するために、本章ではもう1枚の鏡を使い復元を行う。

### 4-1 鏡の使い方

図4-1に2枚の鏡を使用した場合の配置を示す。左側の鏡像を鏡像A、右側の鏡像を鏡像Bと呼ぶ。

### 4-2 処理の流れ

図4-2に処理の流れを示す。1枚の画像において、左側、右側の双方の鏡について直接像との組み合わせでそれぞれ鏡像復元手法によって復元を行い、復元されない点については、鏡像同士の対応を調べる。もし直接像に写ってなくても、2つの鏡像に写

ってれば、鏡像A、鏡像Bから復元を行う。次にその3つの結果を統合し、また情報を補充し合い、直接像の物体を復元する。

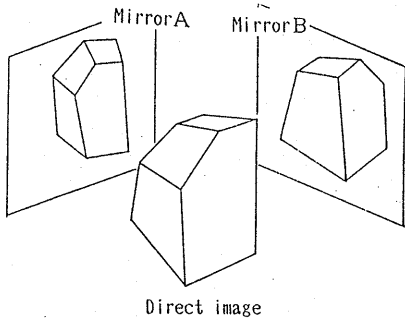


図4-1 2枚の鏡の配置

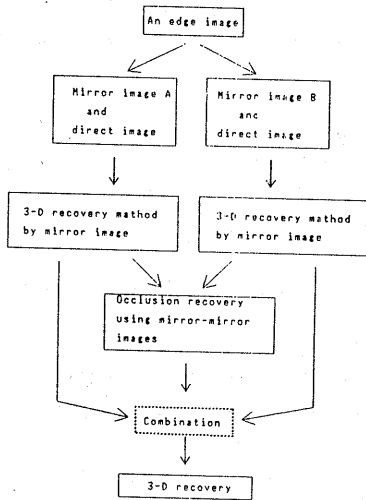


図4-2 処理の流れ

#### 4-3 鏡像の対応によるOcclusion復元

直接像に写っていないが、2枚の鏡像双方に写っている場合、鏡像間の対応付けによって復元ができる。前提として鏡像間の対応付けができており、その点の画像座標値は既知で、また直接像、鏡像双方に写っている点は鏡像復元手法によって復元できており、その結果から鏡A、Bの面の方程式(16),(17)が得られているとする。

Mirror A:

$$n_{a1}x + n_{a2}y + n_{a3}z + n_{a4} = 0 \quad (16)$$

Mirror B:

$$n_{b1}x + n_{b2}y + n_{b3}z + n_{b4} = 0 \quad (17)$$

ここで

$$\vec{n}_a = (n_{a1}, n_{a2}, n_{a3}) \quad (18)$$

$$\vec{n}_b = (n_{b1}, n_{b2}, n_{b3}) \quad (19)$$

は鏡A、Bの法線ベクトルである。

図4-3で示すようにOcclusion点をPとし、鏡に写る点を $P_a(x_a, y_a, z_a)$ 、 $P_b(x_b, y_b, z_b)$ とする。Pは $P_a$ の面対称点であると同時に $P_b$ の面対称点でもあるから

$$P = P_a + t_a \cdot \vec{n}_a \quad (20)$$

$$P = P_b + t_b \cdot \vec{n}_b \quad (21)$$

が得られる。

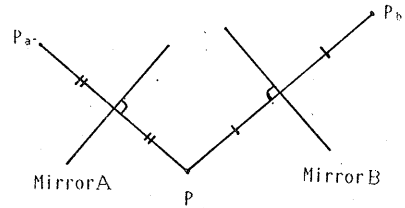


図4-3 上からみた直接像、鏡像の配置

(20)=(21)より、

$$P_a + t_a \cdot \vec{n}_a = P_b + t_b \cdot \vec{n}_b \quad (22)$$

また $t_a, t_b$ は

$$t_a = -2 \cdot \frac{(n_{a1}x_a + n_{a2}y_a + n_{a3}z_a + n_{a4})}{|\vec{m}_a|^2} \quad (23)$$

$$t_b = -2 \cdot \frac{(n_{b1}x_b + n_{b2}y_b + n_{b3}z_b + n_{b4})}{|\vec{m}_b|^2} \quad (24)$$

である。

式(22)はx,y,z成分に分解でき、加えて、(3),(23),(24)式から、未知数6個( $x_a, y_a, z_a, x_b, y_b, z_b$ )に対し、関係式は7個得られるため、関係式を1つ使わず未知数はすべて計算できる。(20)または(21)式よりPの3D座標も計算できる。これにより、1枚の鏡では対応点がOccludeされている場合、その頂点は構成する面が四角形以上でなければ、復元ができなかったが、2枚の鏡を使用することで、直接像はOccludeされていても2枚の鏡に写すことができ、かつそれら鏡像間の対応付けができれば構成する面に関わらず復元ができる。

#### 4-4 実験

図4-4に人力画像をエッジ強調した後、2値化したものを示す。

つぎに、図4-5に復元した物体をY軸まわりに回転したものを、table-2に復元結果として角度の比較および1辺の長さを与えた場合の長さの比較を示す。

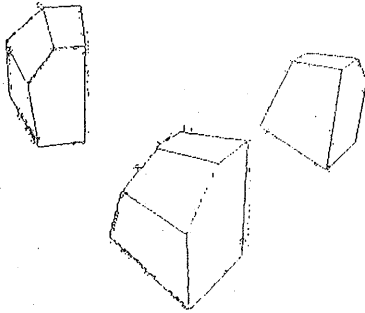
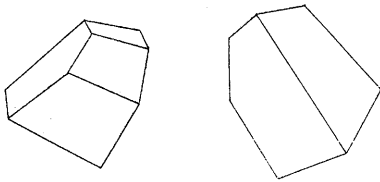


図4-4 入力画像



(a) 60° 回転 (b) -90° 回転

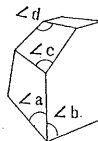
図4-5 復元物体のY軸回り回転表示

Table-2 線分の長さの比較および角度の比較

Number of line segment	Recovered value (mm)	Real value (mm)	Relative error (%)
1 (given)	81.00	81.00	--
2	58.81	57.00	3.17
3	39.70	41.00	-3.18
4	128.84	121.00	6.48
5	83.59	81.00	3.19
6	72.35	71.00	1.91
7	48.88	45.00	4.17
8	31.92	32.00	-0.26
9	108.84	104.00	4.46
10	51.47	50.50	1.93
11	108.20	101.00	5.15
12	77.38	74.00	4.57
13	62.32	61.00	2.17
14	65.15	61.50	5.93
15	104.28	102.00	2.24

Angle	Recovered value (°)	Real value (°)	Relative error (%)
∠a	82.46	81.47	1.22
∠b	86.14	90.00	-4.29
∠c	84.97	83.93	1.24
∠d	112.83	112.94	-0.10

[ Relative error=(recovery-real)×100/real ]



## 5. むすび

鏡を使用することにより面対称復元手法を面対称物体でない多面体に適用することができた。直接像と鏡像間の対応づけには2種の拘束を用いた。複数の鏡像を用いた場合、直接像と鏡像双方に写っている点は、面対称復元手法によって復元できる。次に直接像に写っていないとも2枚の鏡像双方共に写っている場合復元可能である。そして、写っている像が1つの場合は、その頂点を構成する面の1つが復元できれば復元可能である。従って、複数像の内少なくとも2つの像に写っていれば物体構成(面が何角形であるのか)に関係なく復元可能となり、多くの鏡像を用いることで隠れない3D物体復元が可能となる。多くの鏡像を用いた場合には、復元された3D座標値にはそれぞれ誤差があるので、それらの統合という問題が出てくる。

本手法は両眼ステレオ視の一般化にもなっており、2台のカメラの光軸がかなりずれているような場合でも、カメラの向きが面対称関係であるかあるいはそのように画像変換できれば本手法が適用できる。

## 参考文献

- [1] 田村, 光本他: "面対称性に基づく単眼視からの3次元復元", 信学会画像工学およびパターン認識・理解研究会資料, IE86-129, PRU86-130(1987.3)
- [2] M. Idesawa: "A New Type of Miniaturized Optical Range Sensing Scheme", Proc. 7th ICPR, pp.902-904(1984).
- [3] 安居院, 斉藤, 中島: "背面鏡を用いた3次元物体データ入力システム", 信学論(D), J70-D, 5, pp995-1002(1987).
- [4] 金子, 本多: "直接像及び鏡像を利用した多面体対象物の位置計算", 精密工学会誌, PP.149-155, 52/1/1986.
- [5] R.O.Duda and P.E.Hart, "Pattern classification and scene analysis", pp.407-411, John Wiley & Sons, New York(1973).