OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	面対称性に基づく単眼視画像からの3次元復元に関する研究
Author(s)	光本, 浩士
Citation	大阪大学, 1992, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3087969
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

面対称性に基づく単眼視画像からの3次元復元に関する研究

平成4年1月

大阪大学大学院基礎工学研究科

光　本　浩　士

内容梗概

本論文は，筆者が大阪大学大学院基礎工学科博士課程（物理系情報工学科専攻）在学中および大阪大学基礎工学部研究生期間中に行った画像処理・理解に関する研究の内，面対称性に基づく単眼視画像からの３次元復元に関する研究についてまとめたものであり，全体は５章からなる．

第１章では，面対称性に基づく単眼視からの３次元復元に関して，問題の所在を明らかにし，本論文の位置づけと意義について述べる．

第２章では，無限遠点を利用した対称面素復元手法を提案し，多面体車模型を撮影した実画像を用い，この手法を利用した面対称物体の３次元復元手法の有効性を示す．また対称性を利用した隠れ問題の検討も行う．

第３章では，無限遠点が必ずしも利用できない場合につき，２つの面対称線分はお互いに仮想的な回転軸のまわりを回転したものであるとの仮定に基づき関係式を得る．この仮定のもとで，解析的な３次元復元の手法を提案し，実験的検討を行う．

第４章では，第２章で提案した面対称復元手法の応用として面対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，強制的に面対称性を作り出し，３次元復元を行う手法を提案し，実画像を用いた実験的検討も加える．

第５章の結論は，本研究で得られた結果をまとめたものである．

目次

第　1　章　　緒　論　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　1

第　2　章　無限遠点を用いた面対称性に基づく
　　単眼視からの3次元復元　・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4

　第1節　　緒言　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4
　第2節　　無限遠点の利用による対称面素の3次元復元　・　6
　第3節　　多面体車模型の3次元復元　・・・・・・・・・・11
　第4節　　曲線の復元　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・22
　第5節　　結言　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・26

第　3　章　局所的回転対称性を利用した
　　面対称物体の単眼視からの3次元復元　・・・・・・・・・・27

　第1節　　緒言　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・27
　第2節　　問題の設定　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・29
　第3節　　鉛直軸回り回転の仮定による3次元復元　・・・31
　第4節　　任意軸回りの仮定による3次元復元　・・・・・40
　第5節　　結言　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・46
　　付録　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・48

第　4　章　複数の鏡像を含む単眼画像からの
面対称復元手法による隠れのない３Ｄ物体復元　・・・・・５０

第１節　緒言　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５０
第２節　鏡像立体視　・・・・・・・・・・・・・・・・・５２
第３節　鏡像による復元手法　・・・・・・・・・・・・・５５
第４節　２枚の鏡を使用した復元　・・・・・・・・・・・６７
第５節　結言　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７２

第　5　章　結　論　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７３

謝　辞　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７５

参考文献　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７６

関連発表論文　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８０

<緒論>

第１章　緒　論

人間は自らの眼を用いて外界の情報を得る視覚機能を持っている．この視覚機能を機械で実現することが，コンピュータビジョンと呼ばれる研究分野の目的[1.1]であり，人工知能の重要な一分野として，この研究の必要性，重要性は近年益々増大している[1.2].

画像から３次元を復元する問題はこの中の重要な問題である．２次元の画像データから元の３次元世界を復元する３次元復元処理の際，２枚以上の画像を使うと計測機能が飛躍的に向上することが多い．両眼立体視はその１つであり，３次元情報を三角測量原理に基づき直接得る方法として有名である．一般に２つ以上のカメラを用いた複眼視は，各画像の位置ずれから３次元を復元する有効な手法として多くの研究がなされている．この場合，特徴点の各画像間の対応付けが重大な問題となる．直接，センサーによって距離画像が得られたとしても，距離画像から物体を切り出す問題が残される．これに対し，人間はたとえ１枚の写真からでも元の世界の３次元情報を推測することができる．このことに着目し，複眼ではなくまず単眼によって３次元情報を抽出しようという立場がある．これが単眼視による知識を利用した手法であり，単眼視による成果を逆に複眼視の対応付けに利用することも可能である．単眼視の定義を『固定した１台のカメラで静止した対象を自由な形の照明下で観測する』とすると『単眼視』と『単一画像の処理』とはほとんど同等になる．この手法の処理の特徴は，例えば，北橋[1.3]が提案しているように主として画像中の無限遠点を利用した手法が多く提案されているが，単一画像の処理であるから複眼視のような対応付け処理が不要である長所がある.

単眼視による３次元計測手法の研究は，人間が通常用いているであろうと考えられる世界に関する知識の一つ一つを明確に切り分け，その特性を明らかにすることにより計算機上にアルゴリズムとして実現することを目標としている．この知識として現在考えられているものは，位置に関するもの，明暗に関するもの，形に関するものに大別できる．位置に関する知識とは，対象点が既知の面上に載っているとか，いくつかの点の相対配置がわかっているような場合である．この

場合に，最も基本となる幾何学的条件は『レンズ中心と画像上の点とシーン中の点は同一直線上になければならない（共線条件）』というものである．いくつかの点の相対的配置が既知であるとは，剛体上の数点が観測できる場合である．未知数は６個のままで，点の数が増えただけ方程式が多く得られ，原理的に解けるようになるが，形状を決定するためには多くの観測点が必要になるなどの問題がある．

明暗に関する知識を用いる場合[1.4]には，物体の反射特性に基づいて方程式がたてられる．この場合にも１点を独立に観測した場合には，未知数の数が方程式の数を上回るので，対象物の形状に対してなんらかの仮定を設定したり，光源を切り替えて複数の観測を行ったりして，方程式の数を増やすことが必要となる．また明暗を利用するため，観測する上での制限がある．

形に関する知識を用いる場合にも，同様の考え方が適用できる．Mackworth[1.5]は，画像上で観察している直線が３次元空間中の２平面の交線であることが既知との仮定のもとで，勾配空間における幾何学的制限を与えた．Kanade[1.6]は正射影下で２直線の３次元空間中での交角が既知とした場合の手法を示した．Kender[1.7]は同一平面上に存在する２組の２直線の平行性が既知とした復元手法を示した．いずれの場合にも，その条件に基づいて復元すべき３次元情報に関する方程式が得られる．このように単眼視により３次元計測を行う場合には，１つ１つではあいまい性の残る観測事象をいかに組み合わせ３次元情報を復元するかが重要な点となる．筆者ら[1.8][1.9][1.10]は人体運動や人工物，例えば建物や自動車，飛行機など面対称性を持つものが多く存在することに着目し，対象物の面対称性を既知とした３次元復元手法を示した．この手法は面対称性を利用しているので未知パラメータの数が減るばかりでなく，従来からコンピュータビジョンの大きな課題であった対象物体の見え隠れする隠れ問題に対しても有効に３次元復元が行われる特長がある．さらに，Terzopoulosら[1.11][1.12]は，面対称物体の２次元シルエットから３次元像の復元を行う対称性探索モデルを提案している．これは，手動または自動的におおよその対称軸を設定し，評価関数を最小にするように３次元のイメージモデルを変形させ復元を行う．イメージモデルを変形させながら復元するという点でたいへん興味深い．

本論文では単眼視による３次元復元について，形状の面対称性を仮定した手法

を述べる.

まず第２章では，面対称関係にある点を結ぶ線分は３次元中では互いに平行であることに着目し，それらが画像上で示すただ１つの無限遠点を利用した対称面素復元手法を提案する[1.8]．次に，多面体車模型を撮影した実画像を用い，対称面素復元手法を利用した面対称物体の３次元復元手法を示す．また対称性を利用した隠れ問題の検討も行った.

第３章では，無限遠点が必ずしも利用できない場合につき，対称面素（二等辺台形）の対応線分（斜辺）対が片方の線分をある回転軸の回りに回転したとき，もう一方の線分になるという構成原理のもとに復元問題を考える．回転軸は鉛直方向に限った場合と，任意方向の場合に分けて考察する．実験例として人体スティックモデル，飛行機模型および車模型による３次元復元を行い，その有効性を示した[1.9].

第４章では，第２章で提案した面対称復元手法の応用として面対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，強制的に面対称性を作り出し，３次元復元を行う手法を提案する[1.10]．鏡は，直接像・鏡像間に面対称関係を作り出すため，及び物体背面画像を得るために使用する．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.

第５章の結論は，本研究で得られた結果をまとめたものである.

<２章>

第２章　無限遠点を用いた面対称性に基づく単眼視からの３次元復元

第1節　緒言

２次元画像から物体の３次元構造を復元する問題は，コンピュータビジョンにおける中心的課題の一つである．このような復元問題に対しては複眼視による手法と単眼視による手法が研究されている．複眼視による手法は異なった視線方向の画像間の視差から３次元を復元する．この場合，異なった複数の画像間における点の対応づけや，遠方の物体では視差がないため復元できない，などの問題がある．単眼視による手法としては，各種の知識を用いた手法が提案されている．たとえば単眼視から対称性や無限遠点（Vanishing point）を用いて３次元復元を行う研究がいくつか報告されている．

Kanade[2.1]は，正射影下で斜め対称図形の対称軸とそれに直交する軸との角度の見え方から２軸を含む平面の拘束を論じ，それをもとに多面体の３次元復元を行っている．しかしながら，Kanadeは平面図形や物体の対称性を積極的に利用しているわけではなく，その理論は対称軸に限らない一般既知角度の見え方からの平面の拘束に拡張することができる[2.2]．

Kender[2.3]は，透視法下で同一平面上（ビルの壁など）の２組の平行線から導かれる２つの無限遠点から無限遠線を作り，その平行線を含む平面の傾きを求めた．しかし，これらは３次元物体までは復元していない．北橋ら[2.4]は無限遠点を用いた情景中の対象物の３次元構造の復元手法を示しているが，形状に対する条件をつけていない点で一般的であるが，見え隠れする隠れ部分の復元にはふれていない．

筆者ら[2.5]は，人工物体には車や飛行機など面対称性を持つものが多いことに着目し，単眼視画像からの３次元復元について形状の面対称性を仮定した復元法を提案した．面対称関係にある点を結ぶ線分は３次元中では互いに平行である．それらが画像上で示すただ１つの無限遠点を利用し，画像座標値からその物体の３次元座標値の復元を行う手法を基本にしている．この手法では隠れ部分の復元

<2章>

が可能となる特長がある.

本章では，単眼透視画像における面対称拘束について考察し，それによる面対称物体の3次元復元について述べる.

まず，第2節では，2組の対応点対からなる対称面素を仮定し，基本復元式および基本復元手法を述べる.

第3節では3次元復元への応用として多面体車模型について考察し，多面体車模型を撮影した実画像を用い，対称面素復元手法を利用した面対称物体の3次元復元手法をおよび処理例を示す．また対称性を利用した隠れ問題の検討も行った.

第4節では，対称面素復元手法が面対称関係にある曲線にも適用できることを，シミュレーションによって示す.

＜２章＞

第２節　無限遠点の利用による対称面素の３次元復元

２．１　対称面素の設定

対称面素を図２．１に示す．P_1に対称な点をP_2，P_3に対称な点をP_4とし，この４点によって区切られた面を対称面素と呼ぶ．線分P_1-P_2，P_3-P_4は互いに平行であり，対称面に対し垂直に交わる．線分P_1-P_2，P_3-P_4は，３次元中では平行線であるので透視図ではその延長線上の交点として無限遠点をつくる（図２．１　P_∞）．また，線分P_1-P_3，P_2-P_4は画像上で平行でないと仮定するとそれらの線分の延長上に交点として焦点をつくる（図２．１　P_0）．

以下ではP_iに対応する画像座標，３次元座標をそれぞれ（U_i，V_i），（X_i，Y_i，Z_i）；i=0, 1, …, 6, ∞としておく．

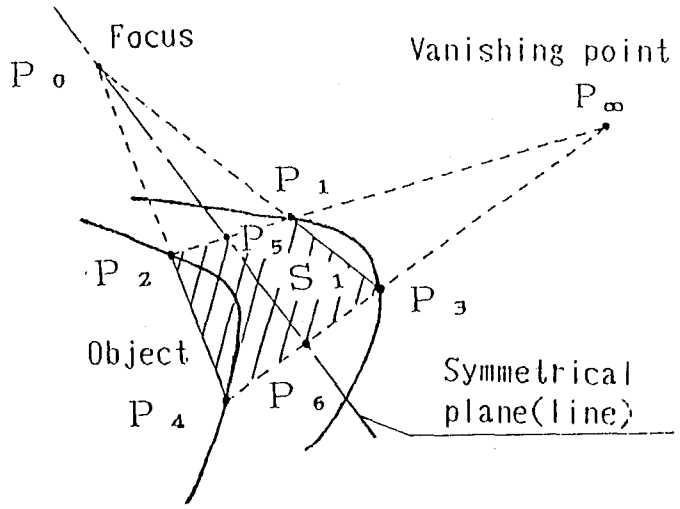


図２．１　対称面素

２．２　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を考える（図２．２）．

透視変換を式(2.1)に示す．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．

＜２章＞

$$U_i = \frac{-X_i}{Z_i \cdot S}, \quad V_i = \frac{Y_i}{Z_i \cdot S} \qquad (2.1)$$

ただし　$S = d / f$

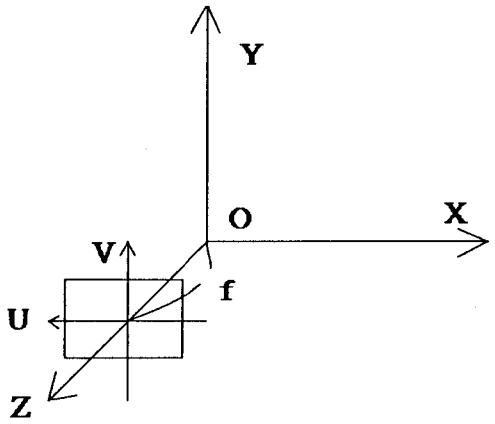


図２．２　　座標系の設定

２．３．　基本復元式

１）　中点の決定（２次元）

２次元中での複比の関係式[2.6](2.2)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３次元中の$P_1 - P_2$，$P_3 - P_4$の中点であるP_5，P_6の画像座標値を求めることができる．

$$\frac{2}{\overline{P_5 P_\infty}} = \frac{1}{\overline{P_1 P_\infty}} + \frac{1}{\overline{P_2 P_\infty}} \qquad (2.2)$$

２）　無限遠点に向かう直線上の点の３次元復元

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３次元復元できる．

＜２章＞

透視変換の関係式(2.1)より

$$X_i = -U_i \cdot Z_i \cdot S, \quad Y_i = V_i \cdot Z_i \cdot S \qquad (2.3)$$

したがってP_iの３次元位置ベクトル$\vec{P}_i$は

$$\vec{P}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$$
$$= (-U_i \cdot Z_i \cdot S, \ V_i \cdot Z_i \cdot S, \ Z_i) \qquad (2.4)$$

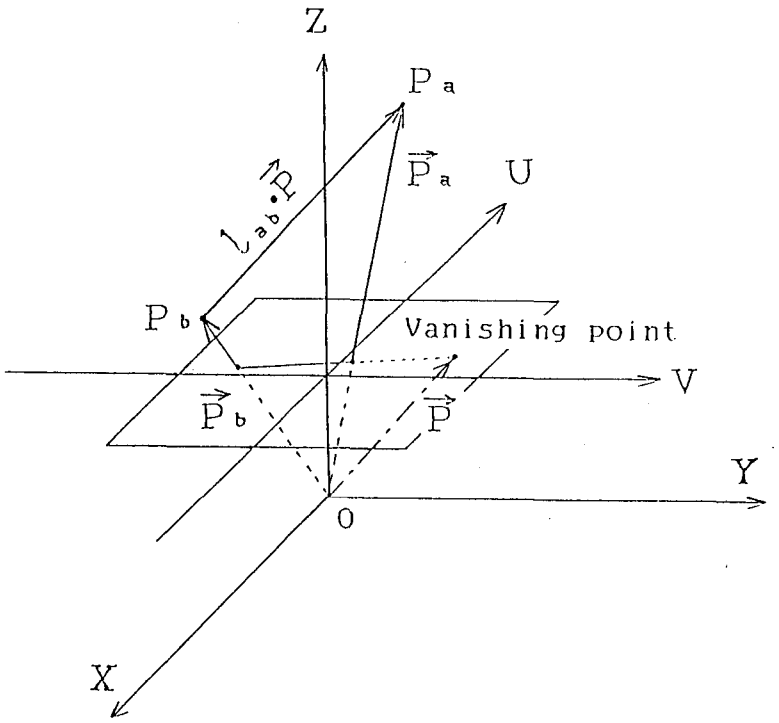


図２．３　　無限遠点と直線の関係

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

$$\vec{P} = (-U_\infty, \ V_\infty, \ 1/S) \qquad (2.5)$$

であり，これを用いると，対応点対やそれらを結ぶ直線上の点（中点など）P_a P_bの間には

<2章>

$$\vec{P}_a = \vec{P}_b + \ell_{ab} \cdot \vec{P} \qquad (2.6)$$

ただしℓ_{ab}は係数

なる関係が存在する[2.4].

式(2.4),(2.5),(2.6)より

$$-U_1 \cdot Z_1 \cdot S = -(U_2 \cdot Z_2 \cdot S + \ell_{12} \cdot U_\infty) \qquad (2.7)$$

$$V_1 \cdot Z_1 \cdot S = V_2 \cdot Z_2 \cdot S + \ell_{12} \cdot V_\infty \qquad (2.8)$$

$$Z_1 = Z_2 + \ell_{12} / S \qquad (2.9)$$

が得られる. さらに式(2.7)および, 式(2.9)より

$$Z_2 = Z_1 \cdot \left(\frac{U_1 - U_\infty}{U_2 - U_\infty} \right) \qquad (2.10)$$

これはZ_1からZ_2が復元できることを示す.

3) 中点の3次元復元

3次元中において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(2.11)が得られる.

$$\vec{P}_{65} \cdot \vec{P}_{15} = 0 \qquad (2.11)$$

但し, $\vec{P}_{ij} = \vec{P}_i - \vec{P}_j$

P_1はP_5を用いて表現される.

$$\vec{P}_1 = \vec{P}_5 + \ell_{15} \cdot \vec{P} \qquad (2.12)$$

より

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

$$= \ell_{15} \cdot \vec{P} \qquad (2.13)$$

であり, 式(2.4),(2.5),(2.11),(2.13)から式(2.14)が得られる.

$$Z_6 = Z_5 \cdot \frac{U_5 \cdot U_\infty + V_5 \cdot V_\infty + 1/S^2}{U_6 \cdot U_\infty + V_6 \cdot V_\infty + 1/S^2} \qquad (2.14)$$

これはZ_5からZ_6が復元できることを示す.

<2章>

したがって対称面素上の点P_i；i=1,2,…,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．

例として，P_3のZ座標がわかった場合に順次各点が復元可能となる手順を図2．4に矢印で示す．

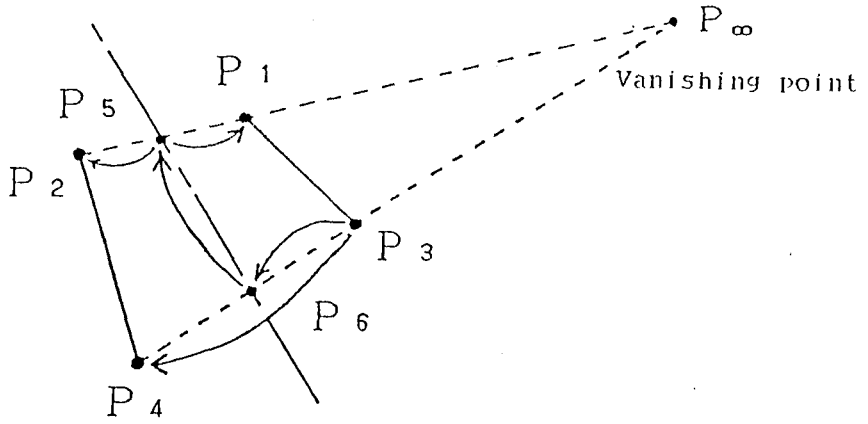


図2．4　　対称面素の復元手順

<＜２章＞

第３節　多面体車模型の３次元復元

図２．５はCCDカメラ(f=8mm)により障害物を含む車模型を撮影(512×480×8bit)したものである．これを，エッジ強調した後，二値化処理した（図２．６）．

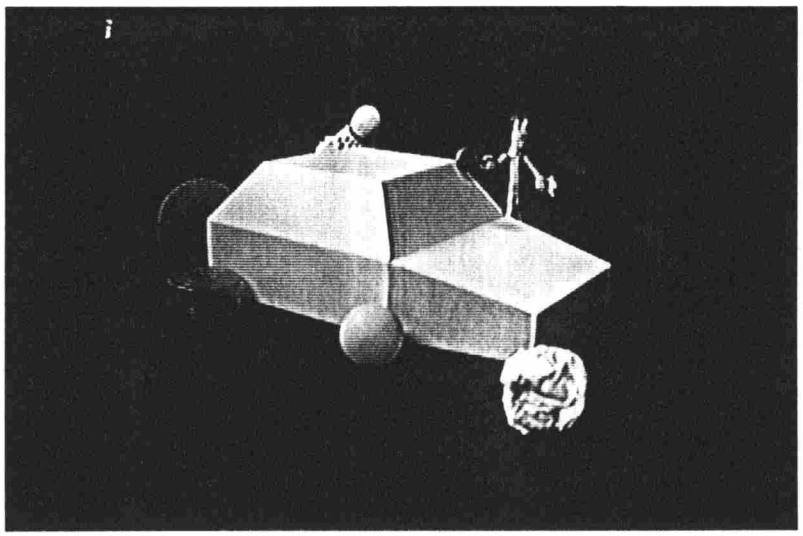


図２．５　　車模型

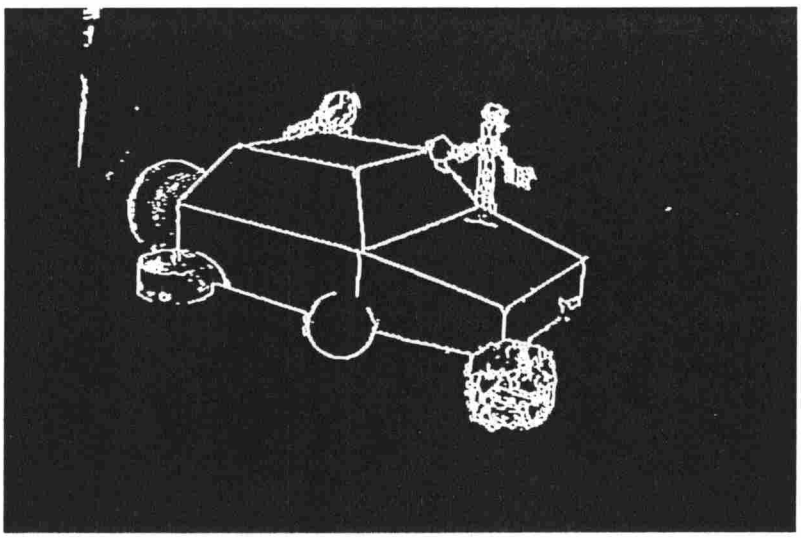


図２．６　　入力エッジ画像

＜２章＞

次の４段階の処理によって車の各点を３次元復元する.

（１）Hough変換による直線抽出

（２）無限遠点および頂点の抽出

（３）対称面素の復元

（４）隠れ部分の復元

以下，各処理について述べる.

３．１　Hough変換処理による直線抽出

図２．６のような自動車模型の入力画像に対してHough変換処理[2.7]を行い，図２．７に示すような19本の直線を抽出した．本実験ではメモリ制約のため，画素をHough空間に投票した後，最大値の付近を拡大して再度投票することにより，抽出する直線の精度を上げた.

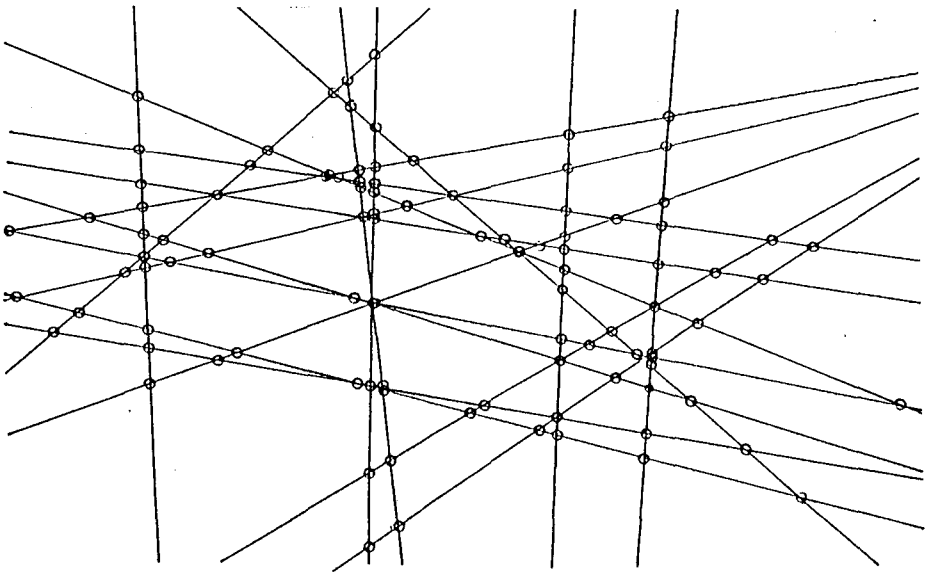


図２．７　　Hough変換による直線抽出と交点の算出

Line number

Line number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1		3	2	2	2	3	3	2	2	2	2	0	2	2	0	0	0	0	3
2	3		2	2	2	2	3	2	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	2
3	2	2		2	0	0	0	2	3	3	2	2	0	0	2	2	2	2	0
4	2	2	2		0	0	0	0	3	3	2	2	2	0	2	3	2	3	0
5	2	2	0	0		0	0	3	2	2	3	2	0	2	2	2	2	2	3
6	3	2	0	0	0		0	3	3	2	2	2	0	2	2	2	2	2	3
7	3	3	0	0	0	0		2	5	5	2	5	2	2	2	2	3	4	0
8	2	2	2	0	3	3	2		3	2	3	0	2	2	0	2	2	0	0
9	2	0	3	3	2	3	5	3		5	2	5	5	2	2	0	0	2	2
10	2	0	3	3	2	2	5	2	5		2	5	5	2	2	0	0	2	2
11	2	0	2	2	3	2	2	3	2	2		3	2	3	2	2	2	3	2
12	0	2	2	2	2	2	5	0	5	5	3		5	3	0	2	2	0	0
13	2	2	0	2	0	0	2	2	5	5	2	5		0	3	3	2	2	2
14	2	2	0	0	2	2	2	2	2	2	3	3	0		3	2	3	2	3
15	0	0	2	2	2	2	2	0	2	2	2	0	3	3		3	3	0	0
16	0	0	2	3	2	2	2	2	0	0	2	2	3	2	3		0	3	2
17	0	0	2	2	2	2	3	2	0	0	2	2	2	3	3	0		3	2
18	0	0	2	3	2	2	4	0	2	2	3	0	2	2	0	3	3		0
19	3	2	0	0	3	3	0	0	2	2	2	0	2	3	0	2	2	0	

図２．８（ａ）　交点テーブル初期値

Line number

Line number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1		3	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
2	3		2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	2		0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0		0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	0
5	0	0	0	0		0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	2
6	3	0	0	0	0		0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
7	3	3	0	0	0	0		0	5	5	0	5	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	3	3	0		3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	3	5	3		5	0	5	5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	3	3	0	0	5	0	5		0	5	5	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0		3	0	3	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	5	0	5	5	3		5	3	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	5		0	3	3	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0		3	0	3	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3		3	3	0	0
16	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3		0	3	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0		2	0
18	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2		0
19	3	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

図２．８（ｂ）　　交点テーブル処理結果

図２．８　　交点テーブル処理

<2章>

3．2　無限遠点および頂点の抽出

面対称性を利用する本章の手法では物体の頂点情報が必要である．しかしHough変換はノイズに強く物体の直線を抽出できる利点がある一方，そのままでは物体の頂点までは抽出できない．したがって各直線間の交点をすべて求め，交点テーブル処理により入力エッジ画像上での物体の頂点及び無限遠点を決定する．

（1）　直線交点の算出

線画の頂点を求めるために，まずそれぞれの直線同士のすべての交点を求める．このとき傾きが等しい直線群（鉛直線など）は互いに交点をもたない．

求められた交点を図2．7中に○印で記す．但し，近傍(7×7 pixel)の交点は統合して考える．

（2）　交点テーブル

(1)の処理によって得られた各交点を構成する直線の数に関するテーブルを考え（図2．8（a）），これを交点テーブルと呼ぶ．縦，横軸とも直線ナンバーであり，横軸を基準にし横1列をレコードと呼ぶ．テーブルには，対応する統合された交点は何本の直線より生成されているかという数値（交差直線数）が入れられる．なお，画像枠外における交点は除外しておく．

テーブル操作による頂点の基本的決定原理は，より確かな端点から決定をおこなっていくことである．すなわち，まず交差直線数3以上の交点のうち物体の頂点であると考えられるものを以下のように決定していく．最初に，図2．9に示すように交差直線数3の交点が同一直線上に丁度2つあるものを直線の2つの端点すなわち物体頂点と決定し，その直線上にある他の交点は削除する．まだ1レコード中に頂点候補点がまだ3つ以上ある場合，それらがその交点を構成する他の直線中で端点と決定されているか調べ，決定されていれば頂点と決定する．

交点テーブル操作上注意することは，1レコード中において交差直線数nを持つ交点に対応する要素（entry）はn－1個あることである．たとえば，交差直線数3の要素が4つあると云うことは，3直線が交わる交点が2つあると云うことになり，1本の線分が決定される．さらに，テーブルは対称性を持たなければならないことより，対称でない要素は小さい方に合わせる．これにより，頂点でな

い交点は削除されていく．同一直線上に交差直線数２以上の交点が丁度２個残ればそれらは頂点と決定する．たとえば後で説明する実験例（図２．１０）において交差直線数２である交点P_{10}と交差直線数３である交点P_9のみが直線P_9-P_{10}上に残ればP_9およびP_{10}は頂点として決定される．

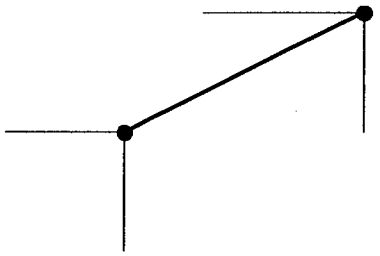


図２．９　　端点の決定

以上のようなテーブル操作により一般位置にある物体の完全線画の頂点が決定される．しかしながら，障害物などでエッジが途切れた場合や，偶然，線分の延長上に他の頂点が存在して見かけ上交差直線数３以上の交点ができる場合，２つの線分が同一直線上に乗る場合等に対処するため以下のように処理を追加する．

１レコード中において線分端点の未決定のものがあれば，交点の組合せの中から真の端点を探索する．そのため，各交点対がつくる仮の線分と入力エッジ画像とのANDをとる．実験においては仮の線分上９点についてANDを取って実在線分か否か判定を行なった．すなわち，ANDが取れた点数が最大の仮の線分のうち，最大長のものを実在線分とする．排除された交点についてはその都度テーブルを対称性条件に基づいて整理する．上記のように入力エッジ画像とのANDを交点ではなく直線上で行うことによって，物体頂点や線分の部が隠されている場合も頂点，線分が抽出できると共に偶然起こる交差直線数３の交点を排除できる（図２．８（ｂ））．平面物体についても頂点，線分が抽出できる．しかし，凹物体については特にサポートはしていない．以上の処理により，頂点，線分を抽出する．

（３）　無限遠点の決定

無限遠点を用いた３次元復元アルゴリズムを利用するために，無限遠点を決定する必要がある．そこで先の交点の中で決定ずみ頂点を除き交差直線数が最も大きいものを無限遠点として決定する．このとき，点を統合する操作を２段階にわ

けて正確な無限遠点を求める．すなわち，初めに各頂点を中心とする比較的大きい窓（59×59 pixel）を設定し，交点が最も多く集積している窓内の各交点を無限遠点候補とする．したがって面対称となる対応点候補対も決定される．次にそれらの候補点を 中心とする20×20 pixelの窓の内で，その中に最も多くの交点が入っている窓内の交点座標の平均を取り，より正確な無限遠点とする．これらの窓操作は画像枠外の交点を含めた交点について行う．すなわち，実画像上で行うのではなく，Hough変換により求めた直線間の有限個の交点を中心とする窓内のみを調べることによって行われる．但し，前項（２）で抽出された頂点についてはこの操作を行わない．窓が物体からどの程度離れているかにより窓サイズは変更する必要がある[2.8]が，本章の実験では行わなかった．その代わり，最初に大きな窓を設定して取りこぼしをなくし，その次により小さな窓で無限遠点を決定するという２段階方式でそれをカバーした．

しかし，ここで注意すべきことは，交点の集積度が最大となる点が必ずしも無限遠点とは限らない場合があるということである．また，無限遠点が正確に求まったとしても，無限遠点を通る直線を生成する端点の組が必ずしも対称関係にあるとの保証はない．すなわち，対称関係でない点同士を結んだ直線が，偶然に無限遠点を通る場合である．これに対しては，より詳細な対応点の決定手順が必要である．しかしながら，無限遠点は画像中心から比較的遠方に存在することが多く，直線が偶然に無限遠点を通ることは稀であると考えられる．そのため，本実験では交差直線数が最大の点を無限遠点とした．

なお，頂点ナンバー付けについては，無限遠点を形成した線分群をまず考え，その線分の２つの端点の内無限遠点から遠いほうを2k-1，近いほうを2kなる識別番号をつける(k=1,2,…)．同時にこの一組の２次元座標値を配列にいれておく．すなわち座標値を$P_X(2k-1), P_Y(2k-1), P_X(2k), P_Y(2k)$に代入する．以上の処理を無限遠点を形成する線分すべてについて行う．これらに入らない（無限遠点を形成する線分群には含まれない）残った点（図２．１０のP_{11}，P_{13}，P_{15}）は対称点がその物体自身によって隠されているなどの理由で，対応点（P_{12}，P_{14}，P_{16}）が見つからないと解釈される．このとき無限遠点から遠い方が見えていると理解し，その座標値を$P_X(2k-1), P_Y(2k-1)$に代入する．

<2章>

3．3　対称面素の復元

無限遠点に向かう直線は，先の車のモデルでは5本ある．線分P_1-P_2（図2．10）を基準にし，他の対称点対とからなる仮想的な対称面素に対して復元アルゴリズムを適用し各点を復元する．

対称面素を作り対称関係にある各点を順次3次元復元していく様子を図2．10（a），（b），（c），および（d）に示す．なお，対称面素の復元はこのように仮想的対称面素を順次復元する方法以外に実対称面素（$P_1P_2P_4P_3$や$P_3P_4P_6P_5$など）を順次伝播復元することも考えられるが，この方法は

(i) 実対称面素がどれか判定しなければならない．

(ii)復元誤差が累積する．

の理由により採用しなかった．

3．4　隠れ部分の復元

対称関係にある点が隠されている時は，以上の方法だけでは復元できない．面を形成する各点の内少なくとも3点が復元されていればその面は復元でき，その面上に存在する点は画像座標値から3次元復元できる．これを利用し，面の伝播によって復元を行う．

はじめに，線分連結情報をツリー型配列に格納する．頂点間の接続関係は一般にグラフとなるが，テーブル処理後のデータは各線分がばらばらの状態で得られる．接続関係の探索にはこれで十分であるのでグラフ構造までには統合せず，ツリー構造のままとした[2.9]．これを連結ツリーと呼ぶ．次に，連結ツリーを利用して右回りに面を探索し，復元されていない点は，その点を構成頂点とする面から復元を行う．そして同時にその点と対称関係にあり，その物体自身によって隠されている点も対称面が計算可能であるため代数的に求めることができる．図2．11では，面a，b，cの順番で面の伝播が行われ頂点を復元する。したがって，頂点は，P_{11}，P_{12}，P_{15}，P_{16}，P_{13}，P_{14}の順番で復元される．ここでP_{12}，P_{16}，P_{14}，はそれぞれP_{11}，P_{15}，P_{13}の隠されている対応点である．

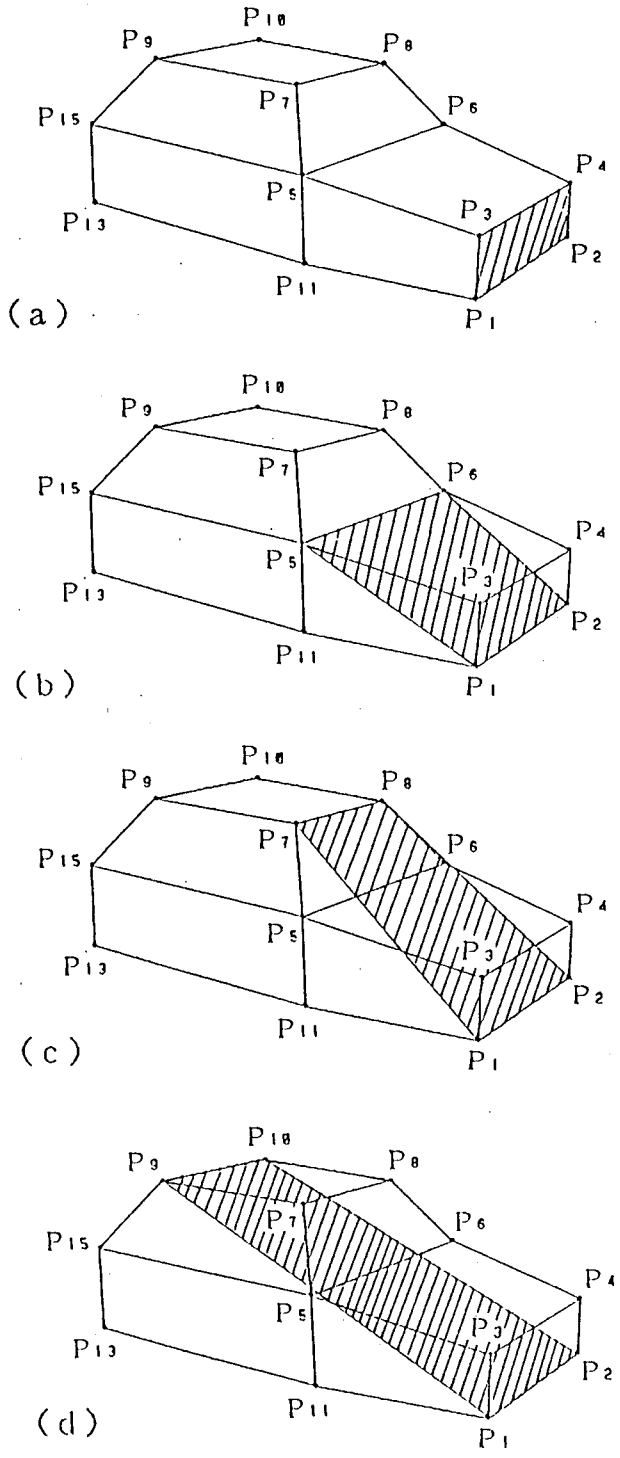


図２．１０　　仮想的対称面素を復元する様子

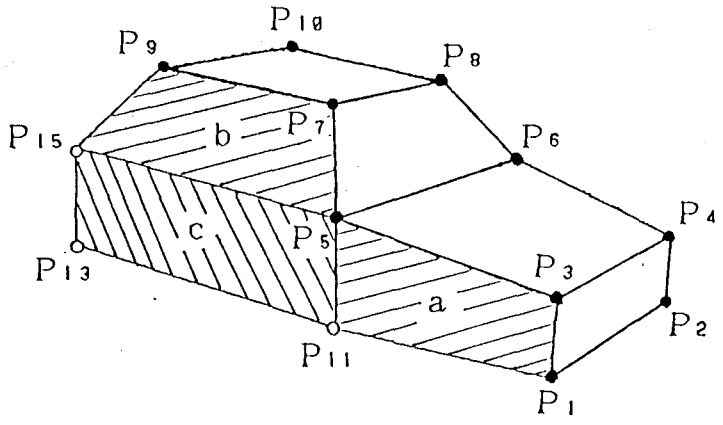


図２．１１　　面の伝播による復元

（●：復元されている点，○：復元されていない点）

３．５　定量評価

以上によって各頂点は復元できる．パソコンNEC PC-9801VM2および日本アビオニクスTVIP4100フレームメモリを中心としたシステムによって実験を行った．言語はMS-DOS上で動作するN88BASICを用いた．単眼視による３次元復元では絶対スケールは得られない．したがって，まず絶対スケールに関わりのない辺の比，また辺のなす角を実際の値と復元値について比較した結果を表２．１に示す．これらは誤差2.0%以内に収まっている．次に，辺P_5-P_6の実際の長さを与え，辺の長さを比較したものを表２．２に示す．最大誤差6.57%，平均２乗誤差の平方根は3.61%である．また比較する意味で双方を後からみた図と上からみた図を図２．１２に示す．見た目には，ほとんど差異はない．誤差の原因としては，画像値の量子化誤差，Hough変換による直線抽出精度，無限遠点決定時の誤差などが考えられる．また，CCDカメラ自身のスケールパラメータの値は，わからないため実験的に求めた．したがって，その値に誤差が含まれている可能性がある．ビデオ信号を画像装置に取り込む過程で生じる光軸と画像中心とのずれ，縦横比の変化も考えられる．

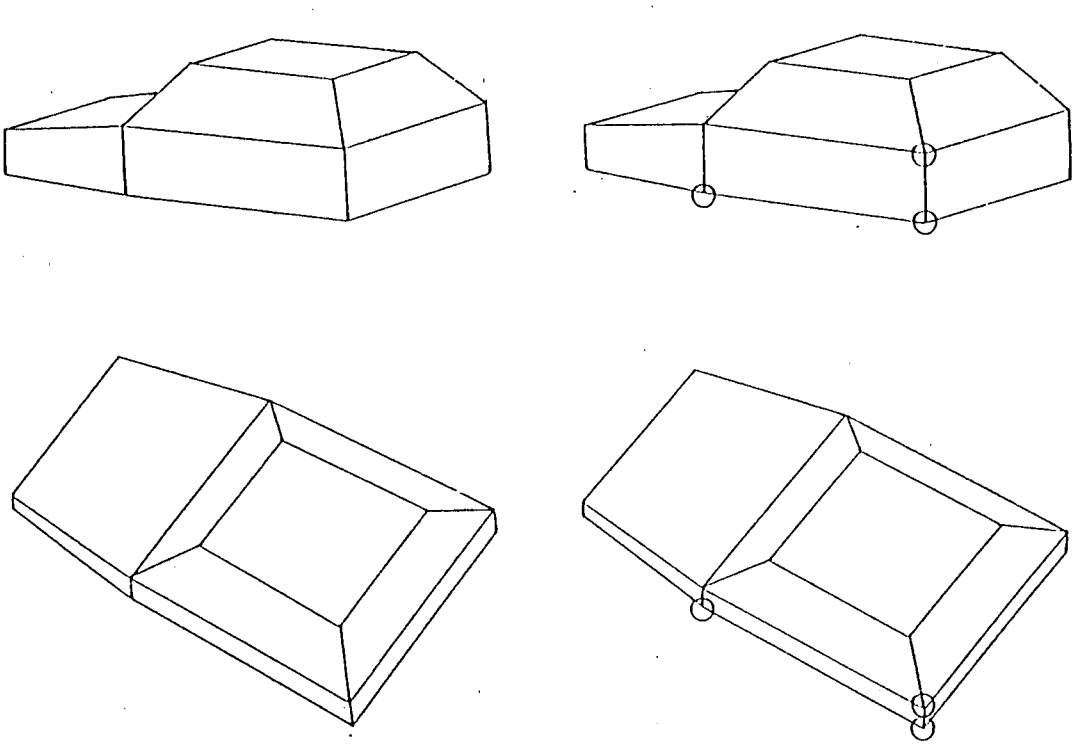
表２．１　辺の比，辺のなす角

	Real value	Recovered value	Relative error(%)
P_3P_5 / P_3P_4	0.8135	0.8289	1.89
P_5P_6 / P_3P_4	1.2829	1.2916	0.68
$\angle P_5P_3P_4$	100.013°	99.697°	-0.32

表２．２　辺の長さの比較

Line segment	Real value	Recovered value	Relative error(%)
$P_1 - P_2$	123.00	123.32	0.26
$P_3 - P_4$	123.00	123.28	0.22
$P_5 - P_6$ given	158.00	158.00	--
$P_7 - P_8$	100.00	93.43	-6.57
$P_9 - P_{10}$	100.00	102.19	2.19
$P_7 - P_9$	100.00	104.86	4.86
$P_8 - P_{10}$	100.00	104.83	4.83
$P_5 - P_{15}$	157.70	163.50	3.60
$P_3 - P_5$	100.00	102.19	2.19
$P_4 - P_6$	100.00	102.19	2.19

Unit: [mm]



実際のモデル（裏面）　　復元した自動車（裏面）

図２．１２　後ろからみた図　，上からみた図
（○印：隠れ点）

<2章>

第4節　曲線の復元

曲線に対する本手法の復元アルゴリズムの有効性をシミュレーションによって確かめた.

図２．１３のような同一平面上にない面対称関係にある３次元的な２本の曲線について考える．無限遠点は曲線の端点が対応していることを利用して求める．無限遠点を通る直線がこれらの曲線と交わる２つの点は面対称関係にあることを利用し２曲線間の対応点を見つける(図２．１４).

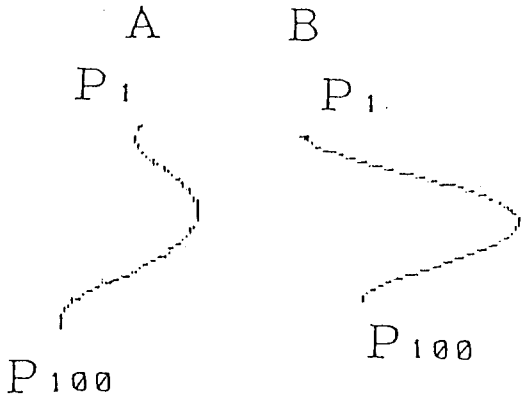


図２．１３　　曲線モデル

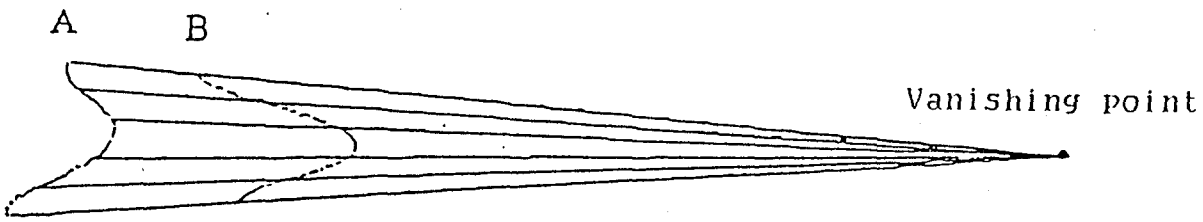


図２．１４　　無限遠点と対応点の決定

曲線Ａの上端点のＺ座標がわかっているとして曲線を復元する．ここでは曲線を100個の画素（整数値）からなるものと近似し，その画素点について復元アルゴリズムを適用する.

<２章>

例として100点の内，1，21，71番目の点の実際の値と復元値を表２．３に示す．また実際のモデルと復元曲線を視点を変え，中点群が視線を含む平面内に入るような位置（正面位置）近くに回転して比較したものを図２．１５に示す．

表２．３　　曲線の復元例（1，21，71:点番号）

		X		Y		Z	
		Real value	Recovered value	Real value	Recovered value	Real value	Recovered value
A	P_1	185.471	185.818	-49.000	-49.755	513.346	513.346
	P_{21}	160.438	160.547	-27.000	-27.211	458.335	458.566
	P_{71}	154.343	155.640	23.000	23.058	413.355	416.324
B	P_1	113.346	113.506	-49.000	-49.804	585.471	585.552
	P_{21}	58.335	58.731	-27.704	-27.704	560.438	560.232
	P_{71}	16.355	16.475	23.065	23.065	554.343	555.285

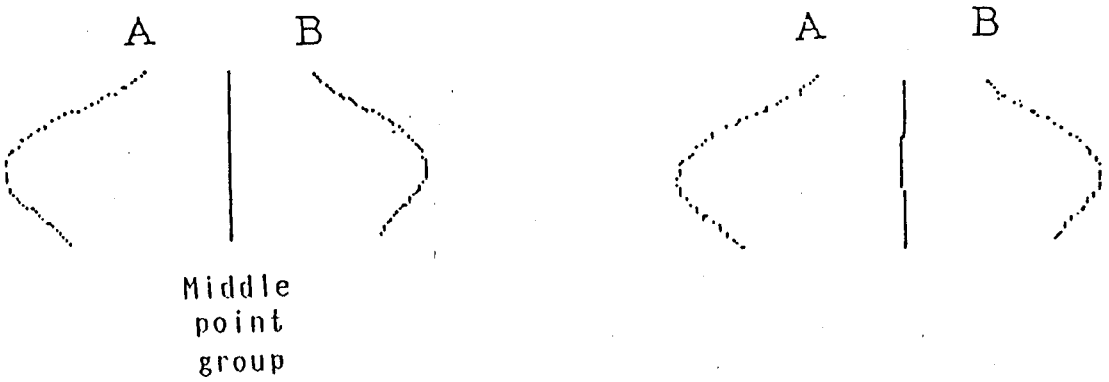
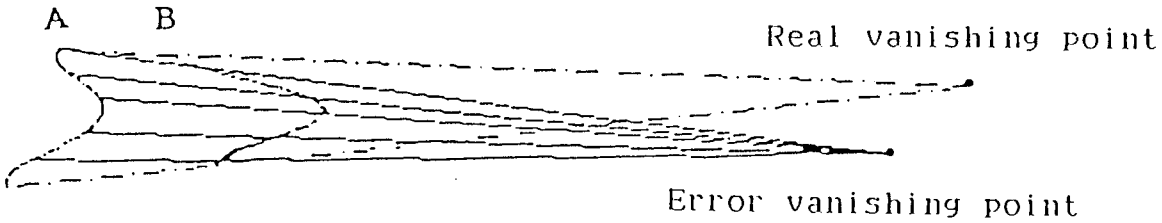


図２．１５　　視点をかえてみた図

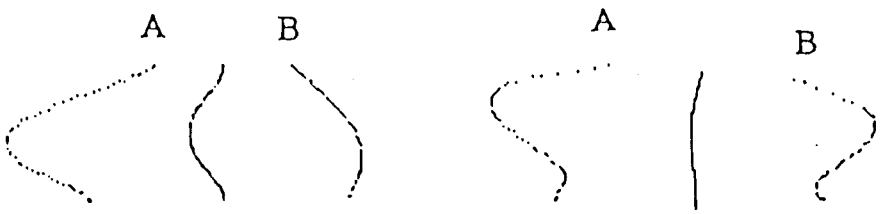
しかし２つの曲線が一端でつながってしまっているような場合や端点の一方が隠されている場合のように，対称関係にある２組の端点が利用できず無限遠点が求まらない場合も考えられる．

<2章>

そのような場合を想定し，図２．１４に対してわざと無限遠点の位置を誤って本復元アルゴリズムを適用し３次元復元した例を図２．１６に示す．この場合，モデルと異なって復元されていることがわかる．また，図２．１７には直感的には面対称に見えないでたらめに作った２つの折線（（ａ）および（ｂ））を端点から求めた”無限遠点”を使って復元した例（ｃ）を示す．無限遠点の位置を変えても何らかの３次元復元は可能である．したがって，正確な無限遠点を求めることは必要である．それができない場合は，２本の曲線間の曲率などの特徴量の類似度の利用，または，対称性拘束に加えて復元曲線の滑らかさなど別の拘束を使うことが必要となる．たとえば，いろいろな場所に無限遠点を仮定して復元される曲線のうち，滑らかさが最大となるものを選択する[2.10]ことでもっともらしい復元曲線が定まる可能性がある．



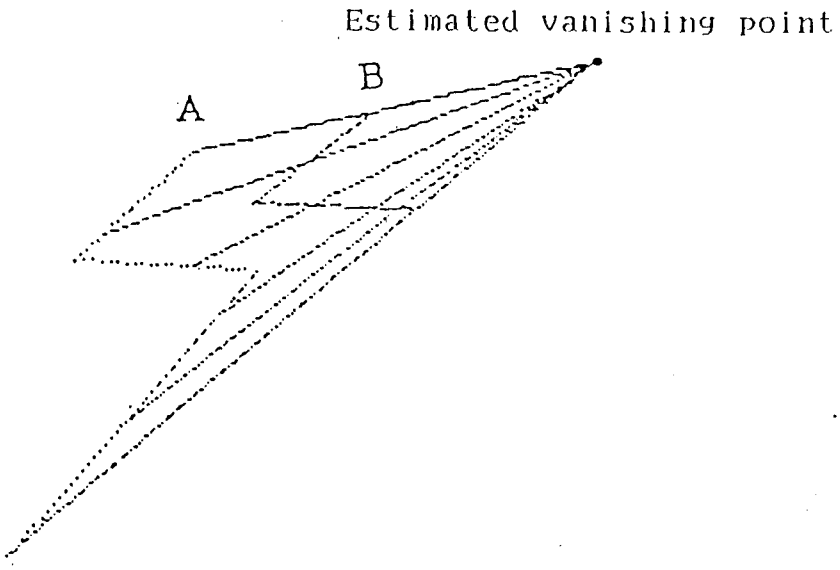
(a)　無限遠点と対応点の決定



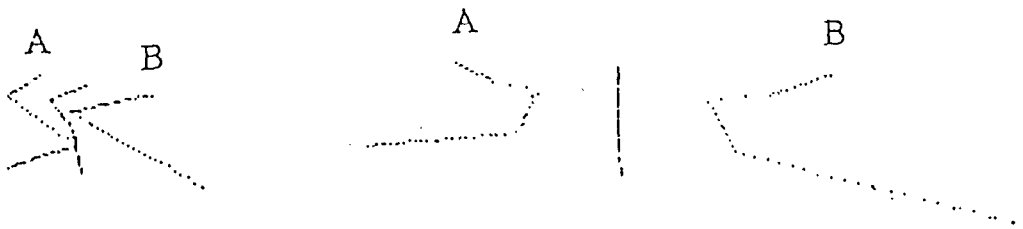
（ｂ）　実際のモデル　　（ｃ）　復元した曲線

（正面位置付近像）

図２．１６　誤対応による復元



（ａ）　無限遠点と対応点の決定



（ｂ）　実際のモデル　　（ｃ）　復元した曲線（折線）

図２．１７　折線の復元

<2章>

第5節 結言

単眼透視画像における面対称拘束について考察し，それによる面対称物体の3次元復元手法を示した．面対称関係にある点を結ぶ線分は3次元中では互いに平行である．それらが画像上で示すただ1つの無限遠点を利用し，画像座標値からその物体の3次元座標値の復元を行った．例として，多面体の自動車模型の対応点の決定法について述べ，有効性を示した．また面の伝播による復元，およびそれを用いた見えない点の復元法について述べた．さらに，曲線の復元についても考察した．面対称物体は，片側の物体を対称に配置し合成したものである．これは，面対称位置関係にある2方向から片側の物体を見た画像を合成したものと等価である．そのため，本手法はステレオ視の一般化になっていると考えられる．本章で述べた手法は対称関係にある対応点を正しく求めなければならないという対応点問題が存在し，これもステレオ視における対応点問題と類似している．したがって，その対策法もステレオ視における成果が利用できると考えられる．

本章で述べた手法は以下のような特長を持っている．

（1）Hough変換による直線抽出，交点テーブル処理による頂点抽出を行うため，エッジ，頂点の一部が障害物などで隠されていても復元が可能となる．

（2）複雑な面対称物体に対して対称面素という要素に分割することにより，復元を行える．

（3）物体自身による隠れ部分について対称性を利用した復元が行える．その際，面の伝播によって一方の点は復元されていることが必要である．

（4）多面体物体に限らず，面対称関係にある曲線にも適用できる．

人工物体は面対称性を持つことが多く，本手法の適用範囲は広いと思われる．なお，端点が不明確なときは無限遠点は求められない．そのような場合の解析的な復元法については3章で述べる．

本章では，面対称性を持つ物体の無限遠点を用いた単眼視による3次元復元法について提案し，車模型及び曲線を例にとり実験によりその有効性を示した．

<3章>

第3章　局所的回転対称性を利用した面対称物体の単眼視からの3次元復元

第1節　緒言

人工物体には面対称性を持つものが多く，第2章ではこの特性を持つ物体の無限遠点を用いた3次元復元手法ついて提案し，実画像を用いた実験によって有効性が示されている．しかしながら，無限遠点情報が部分的にしか存在しない場合も数多く存在する．本章では無限遠点の代わりに面対称関係にある線分対の構成が，ある回転軸回りに回転したと仮定することによりその延長上に交点として得られる焦点を使用した解析的な復元手法について述べる．

3次元空間内で剛体は適当な軸回りの回転運動と平行移動の合成によって任意の位置の，任意の姿勢に写し換えることができる．6点の特徴点について，移動前後の画像間の対応づけがわかっていると仮定すれば，回転運動，平行移動の未知数6個のパラメータすべてを解くことができる．この問題に先鞭をつけたUllmanは，平面上を移動する物体をそれに平行な視軸を持つカメラによって撮影した場合について解を求めている[3.1]．Nagelは，ベクトル方程式を利用して，未知数を減らす手法を提案[3.2]し，道路上の自動車の画像を解析した．さらに，彼はこの手法を自動車がターンをしている連続した一連の画像に適用することによって，より正確な自動車の多面体近似を行った[3.3]．これらの手法は，一般的であるが対象物の形状に対して面対称性の制限を加えればより容易に3次元復元できると考えられる．筆者ら[3.4],[3.5]は，面対称物体の基本要素を対称面素とし，その対称面素（二等辺台形）の対応線分（斜辺）対が片方の線分をある回転軸の回りに回転したとき，もう一方の線分になるという構成原理のもとに連立方程式をたて復元問題を考えた．この手法の特長は，軸に対して条件を与えることで無限遠点がわからなくても復元可能となることである．解析的手法に対する問題点としては，いずれの手法も本質的に対応づけが行われていることを前提にしてい

ることや，理論的には興味あるものでもノイズを含む実画像に対しては直接利用できるものが少ないなどが挙げられる．

本章では，まず第2節において問題の設定として面対称物体の局所部位を基本単位として対称面素を定義する．

第3節において，回転軸を鉛直軸方向に限った場合について，関係式を導出し，人体スティックモデルの屈伸状態の復元，飛行機模型の両翼の角度の復元を行い，その有効性を示す．

第4節においては，第3節の軸方向を任意方向に拡張した場合について検討を行い，傾斜させた車模型のボンネット部分について3次元復元の実験と検討を行った．

<3章>

第2節　問題の設定

2．1　対称面素

対称面素とは面対称物体の2つの対応点対（計4点）がつくる実在または仮想的な面のことである（図3．1）．P_1に対称な点をP_2，P_3に対称な点をP_4とし，この4点によって区切られた面が対称面素である．線分P_1-P_2，P_3-P_4は互いに平行であり，対称面に対し垂直に交わる．線分P_1-P_2，P_3-P_4は，3次元中では平行線であるので透視変換図ではその延長線上の交点として無限遠点をつくる（図3．1　P_∞）．また，線分P_1-P_3，P_2-P_4は画像上で平行でないと仮定するとそれらの線分の延長上に交点として焦点をつくる（図3．1　P_0）．ここでP_iに対応する画像座標，3次元ワールド座標はそれぞれ（U_i，V_i），（X_{wi}，Y_{wi}，Z_{wi}）；i=0, 1, …, 6, ∞としておく．

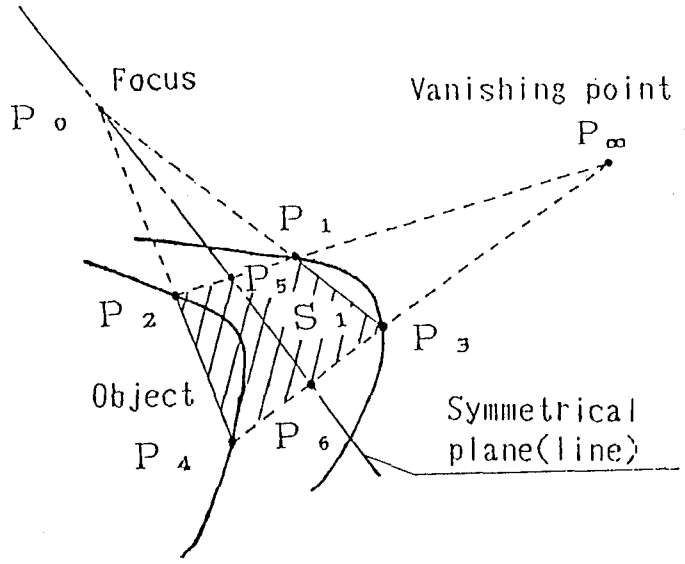


図3．1　　対称面素

<3章>

2．2　座標系の設定

ワールド座標系は原点を視点に一致させ，Z_w軸を視線に一致させたものを考える（図3．2）．

透視変換を式(3.1)に示す．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．

$$U_i = \frac{-X_{wi}}{Z_{wi} \cdot S}, \quad V_i = \frac{Y_{wi}}{Z_{wi} \cdot S} \tag{3.1}$$

ただし　$S = d / f$　　である．

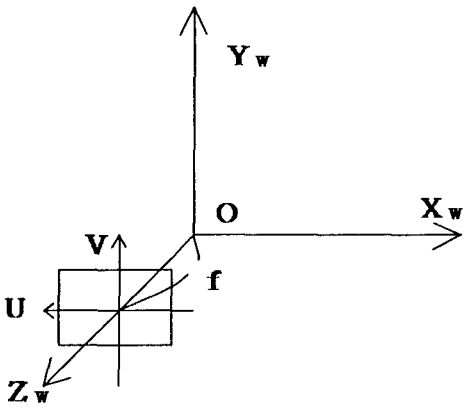


図3．2　　座標系の設定

<3章>

第3節　鉛直軸回り回転の仮定による3次元復元

現実の世界では，建物や飛行機といった対称面が鉛直である人工物体が多い．このとき対称面素の斜辺同士を回転により重ね合わせる軸は鉛直方向に設定できる．このためにこの条件を用いることはあまり大きな制限でないと考えられる．また，任意軸に比べて回転パラメータが少なくてすむので解法が簡単になる利点がある．

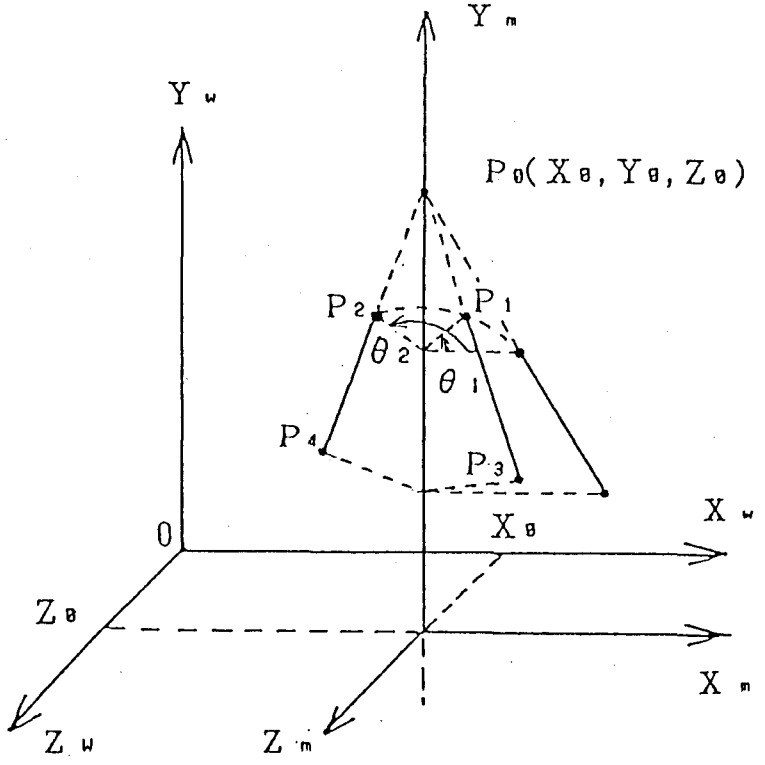


図３．３　　鉛直軸回りの回転による対称面素線分の構成

３．１　対称面素線分の解釈

図３．３のようなワールド座標系（X_w，Y_w，Z_w）において，２組の対応点をP_1，P_2及びP_3，P_4とする．このとき，これらの線分によって区切られた領域（台形）が対称面素である．この対称面素が含まれる面対称物体をカメラ（透視変換）により撮影し，２次元画像を得る．３次元空間内の点を２次元画像上へ透

視変換したものと実際の画像上の点との対応づけから，この対称面素の位置パラメータ及び回転軸の方向を決定する．

３．１．１　関係式の導出

モデル座標のX_m-Y_m平面上にある線分が，Y_m軸回りにθ_1だけ回転したものをP_1-P_3，またθ_2だけ回転したものをP_2-P_4であるとし，さらにモデル座標系はワールド座標系より（X_0，0，Z_0）だけ平行移動したものと解釈する（図３．３）．このとき，視点からの透視変換による像と３次元配置との関係は式(3.2)のようになる[3.6]．

$$(u_j, v_j, t_j) = (X_{mi}, Y_{mi}, 0, 1) \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot M_3$$
$$;(i, j, \theta)=(1,1,\theta_1),(1,3,\theta_2),(2,2,\theta_1),(2,4,\theta_2) \qquad (3.2)$$

これは同次座標表現によるモデル座標（$X_{mi}, Y_{mi}, 0, 1$）と画像座標（u_j, v_j, t_j）との関係式である．$M_1 \cdot M_2 \cdot M_3$は変換行列である．M_1はY_m軸回りの回転，M_2は平行移動，M_3は透視変換であり，これらは次のように与えられる．

M_1：Y_m軸回りのθ回転を表すマトリックス

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

<3章>

M_2：平行移動を表すマトリックス

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ X_0 & 0 & Z_0 & 1 \end{bmatrix}$$

M_3：透視変換を表すマトリックス

$$M_3 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & S \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

したがって式(3.2)は

$$(u_j, v_j, t_j) = (X_{mi}, Y_{mi}, 0, 1) \cdot \begin{bmatrix} -\cos\theta & 0 & \sin\theta \cdot S \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \cdot S \\ -X_0 & 0 & Z_0 \cdot S \end{bmatrix} \qquad (3.2)$$

;$(i, j, \theta) = (1, 1, \theta_1), (1, 2, \theta_2), (2, 3, \theta_1), (2, 4, \theta_2)$

このマトリックスを展開すると，以下のような２次元画像と３次元配置の基本関係式が得られる．

$$\begin{aligned} u_1 &= -X_{m1}\cdot\cos\theta_1 - X_0 \\ v_1 &= Y_{m1} \\ t_1 &= X_{m1}\cdot\sin\theta_1\cdot S + Z_0\cdot S \end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned} u_2 &= -X_{m1}\cdot\cos\theta_2 - X_0 \\ v_2 &= Y_{m1} \\ t_2 &= X_{m1}\cdot\sin\theta_2\cdot S + Z_0\cdot S \end{aligned} \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned} u_3 &= -X_{m2}\cdot\cos\theta_1 - X_0 \\ v_3 &= Y_{m2} \\ t_3 &= X_{m2}\cdot\sin\theta_1\cdot S + Z_0\cdot S \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned} u_4 &= -X_{m2}\cdot\cos\theta_2 - X_0 \\ v_4 &= Y_{m2} \\ t_4 &= X_{m2}\cdot\sin\theta_2\cdot S + Z_0\cdot S \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$U_i = u_i/t_i, V_i = v_i/t_i \quad (i=1,2,3,4) \tag{3.7}$$

また焦点（U_0，V_0）と（X_0，Y_0，Z_0）の関係式は，

$$\begin{aligned} X_0 &= -U_0\cdot Z_0\cdot S \\ Y_0 &= V_0\cdot Z_0\cdot S \end{aligned} \tag{3.8}$$

と表せる．関係式(3.5)～(3.8)を，θ_1，θ_2に関して整理すると，

$$A\cdot\sin\theta_2 + B\cdot\sin\theta_1 + C\cdot\cos\theta_1 = 0 \tag{3.9a}$$

$$D\cdot\sin\theta_1 + E\cdot\sin\theta_2 + F\cdot\cos\theta_2 = 0 \tag{3.9b}$$

となる．ただし，

$$A = S\cdot V_4\cdot(U_0 - U_3)$$

$$B = S\cdot(V_4\cdot U_3 - V_3\cdot U_0)$$

$$C = V_4 - V_3$$

$$D = S\cdot V_3\cdot(U_0 - U_4)$$

$$E = S\cdot(U_4\cdot V_3 - U_0\cdot V_4)$$

$$F = V_3 - V_4$$

<3章>

なお，ここでは5点P_0～P_4のうちP_0，P_3，P_4に関する式(3.5)～(3.8)のみ使用して式(3.9)を導いた．同様に式(3.3)，(3.4)，(3.7)および(3.8)の組み合せからや，(3.3)～(3.7)の組み合せから式(3.9)と同様の式を導くことができ，それらを解くことで，θ_1，θ_2を求めることができる．
なお，

$$\theta_1=\theta_2=\sin^{-1}\left(\pm\sqrt{\left(1/(1+S^2U_0^2)\right)}\right)$$

の時も式(3.9)は満たされるが，これは線分P_1-P_3，P_2-P_4が一致した状態であり，これらは偽の解として除外する．以下の実験ではそのような点をA点，B点とマークして解から除外する．

θ_1，θ_2を復元した後，点P_i;i=0,1,…,4の内の3次元座標（X_{wi}，Y_{wi}，Z_{wi}）のどれか1つの値，たとえばZ_{w1}がわかれば他の各点の3次元復元が可能となる．

3．2　実験例

3．2．1　飛行機模型

図3．4はCCDカメラ(f=8mm)により飛行機模型を撮影(512×480×8bit)したものである．この飛行機模型の両翼の復元を考える．この場合，翼の一端が飛行機自身に隠されP_1の対応点P_2（隠れ部分）がわからない．P_1-P_3とP_2-P_4が画像上で平行でないのでそれらは対称面上で交点（焦点）P_0を持つ．　この焦点P_0，およびP_3，P_4を利用することによって式(3.9)より翼は復元可能になる．P_1，P_3，P_4と線分P_2-P_4上の任意の点をその対応関係と共にマウスにより外部から与え，P_0の画像座標値は2線分の延長上の交点として得る．θ_1，θ_2が得られれば，隠れ点P_2も代数的に求めることができる．

連立方程式(3.9)は横軸をθ_1，縦軸をθ_2とする直交座標上で2本の曲線（図3．5）になる．図に示すようにθ_1を-180°～180°まで動かして行くことによって得られる4本の曲線の交点がθ_1，θ_2の解である．但し，A点，B点は$\theta_1=\theta_2$になる条件より除外する．したがって，（θ_1=-18.30°，θ_2=85.56°）と（θ_1'=161.70°，θ_2'=-94.43°）の2つの解が求まる．これらの2つの交点はθ_1，θ_2とも180°異なる。2組の解のうち一方（θ_1，θ_2）がたとえば2象限に位置すれば他方（θ_1'，θ_2'）は4象限に位置することになる．これは$\sin\theta$，$\cos\theta$または$\sin(\theta\pm$

π），cos（$\theta \pm \pi$）が式(3.9a,3.9b)を共に満たすことにより生ずるものである．これを３．１．１で設定した線分の解釈（図３．３）の立場からいえば，(i)$X_m - Y_m$平面上の線分をθ_1, θ_2回転させたものと，(ii)$X_m - Y_m$平面上でその線分とY_m軸に関して対称な関係（鏡像関係）にある線分をθ_1'およびθ_2'回転させてできたものとの区別はできない．このモデル座標内の$X_m - Y_m$平面上にある回転前の鏡像関係にある線分をそれぞれ（θ_1, θ_2），（θ_1', θ_2'）回転させて同じ３次元の値を得る様子を図３．６に示す．

単眼視による復元は，絶対スケールは得られないため，絶対スケールに関係ない線分のなす角，辺の比の比較，およびX_{w1}を与え，復元した線分の長さの比較を示す（表３．１）．

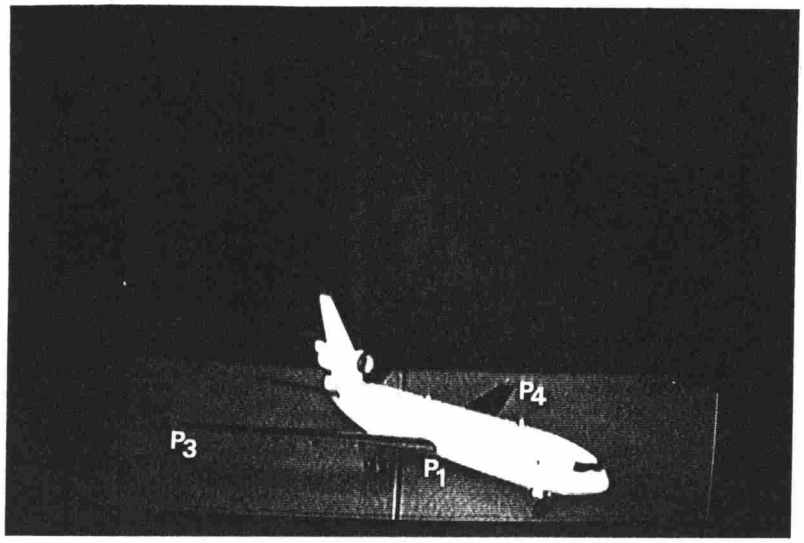


図３．４　　飛行機模型

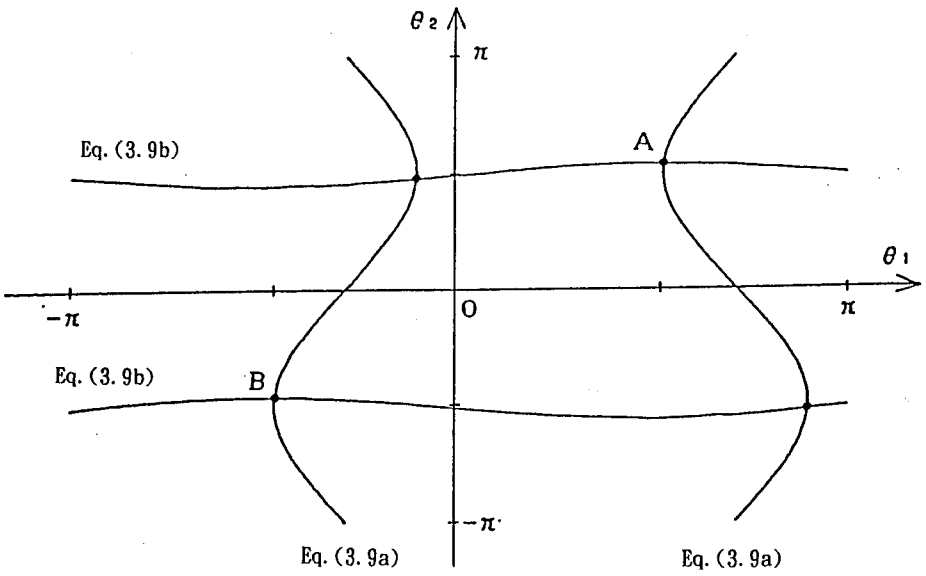


図３．５　　飛行機模型のグラフ的解法

（●：解，Ａ，Ｂ：偽解）

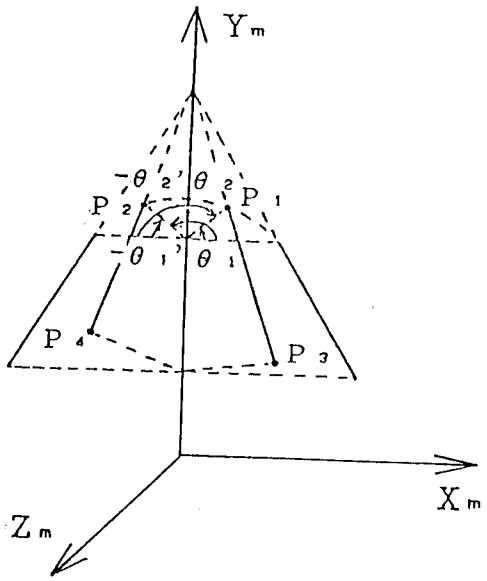


図３．６　　モデルの鏡像関係から生じる２つの解

表３．１　飛行機模型の翼の復元値

Angle	Real value	Recovered value	Relative error(%)
∠$P_1P_0P_2$	142.5	141.93	-0.40

Unit: [°]

Ratio	Real value	Recovered value	Relative error(%)
P_1P_2/P_3P_4	0.126	0.125	-0.96
P_1P_3/P_3P_4	0.552	0.556	0.70

Length of line segment	Real value	Recovered value	Relative error(%)
P_1-P_2	31.5	30.97	-1.67
P_2-P_4	138.0	137.97	-0.02
P_3-P_4	250.0	248.21	-0.72
P_1-P_3	138.0	137.97	-0.02

Unit: [mm]

３．２．２　人体スティックモデル

人体はいろいろな運動をする．その状態を識別，測量することは興味深く，種々の報告がなされている[3.7]．また人体はほぼ左右対称であり，運動の中にも面対称性を持つもの（屈伸状態など）も多くあり，これが本節の条件に一致する．本項では，人体スティックモデルが屈伸状態をしている透視変換図よりその復元を試みる．

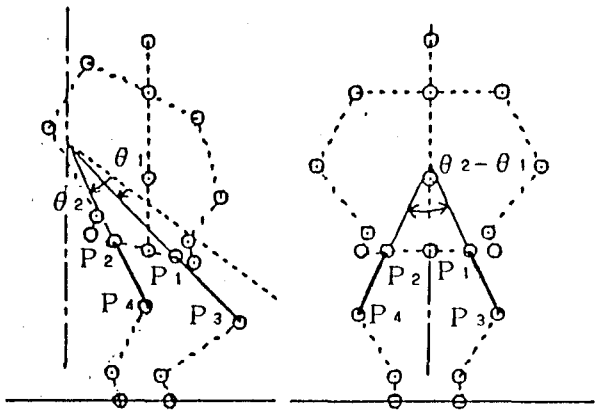
図３．７はコンピューターシミュレーションによって生成された人体スティックモデルである．このモデルでは（ａ）図において面対称位置にある左右大腿部P_1-P_3およびP_2-P_4の開き角度を求めている．ここで，（ａ）は，斜め前方からみた図，（ｂ）は，参考のため正面からみた図を示している．この場合も３．

<3章>

2．1の方法と同様に復元可能である．

なお，使用する式により解法がいく通りか出てくる．今の場合対応線分の延長上の交点として定まる焦点P_0は使わずに2対の対応点P_1，P_2およびP_3，P_4のみを使って式(3.9)と同様の連立方程式を作り，解を求めた．この連立方程式においてP_1およびP_2をP_0に一致させると式(3.9)になる．

このとき画像座標値は整数化したものを使用した．真値(θ_1=35°, θ_2=65°)に対し同じ値の復元値(θ_1=35°, θ_2=65°)が得られた．表3．2にP_1のX_w座標を与えた場合の各点の復元値を示す．



（a）斜め前方図　　（b）正面図（参考）

図3．7　人体スティックモデル

表3．2　人体スティックモデルの復元値（画像値は整数値）

Real value (θ_1 θ_2)=(35°, 65°)			Recoverd value (θ_1, θ_2)=(35°, 65°)			
	X_w		Y_w		Z_w	
	Real	Recovery	Real	Recovery	Real	Recovery
P_1	given	given	255.86	255.87	855.71	855.72
P_2	-49.87	-50.12	255.86	255.87	772.00	772.01
P_3	135.58	134.42	131.17	131.45	795.69	795.70
P_4	-5.65	-4.87	131.17	131.44	677.18	677.19

<3章>

第4節　任意軸回り回転の仮定による3次元復元

本節では，鉛直軸の問題設定を任意軸に拡張した場合の検討を行う．この場合には鉛直軸と異なり未知パラメータが2つ（X_w軸，Z_w軸回り）増え問題を複雑化する．3．1と同様の考えから関係式を得る．これは非線形方程式となりブレント法[3.8]（逐次近似法の一種）で解く．なお今の場合，回転軸は対称面内で自由度が1つ残り，回転軸は一意的には定まらない．

4．1　対称面素線分の解釈

図3．1の線分モデルをワールド座標中に配置すれば図3．8のようになる．モデル座標において，X_m-Y_m平面上にある線分を，Y_m軸回りにθ_1だけ回転したものをP_1-P_3，またθ_2だけ回転したものをP_2-P_4とする．次に，はじめワールド座標系と一致していたこのモデル座標をX_w軸回りにαだけ回転し，次にZ_w軸回りにγだけ回転したものをP_0（X_0，Y_0，Z_0）だけ平行移動したものと解釈することにする．

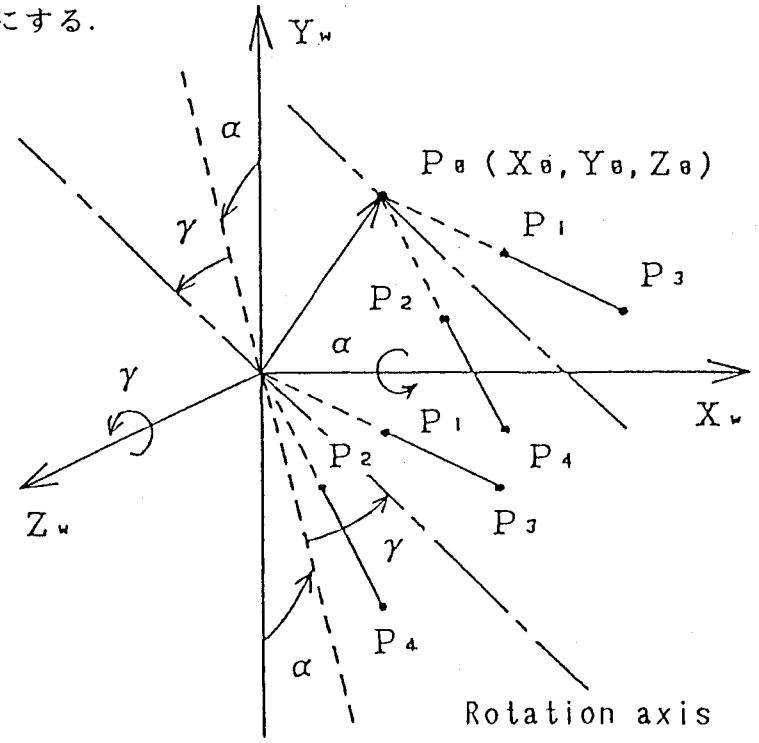


図3．8　　対称面素線分の解釈

＜3章＞

回転軸パラメータは，α，γの2個あるが回転軸は対称面内に存在すればよく実際には自由度が1つあり，回転軸は一意的には定まらない．したがってα，γのどちらか一方を決めてもよく，γを任意に定めて扱うことにする．

同次座標表現によるモデル座標と画像座標との関係を以下に示す．

$$(u_j, v_j, t_j) = (X_{mi}, Y_{mi}, 0, 1) \cdot M_1 \cdot M_4 \cdot M_5 \cdot M_6 \cdot M_3$$
$$;(i, j, \theta) = (1, 1, \theta_1), (1, 2, \theta_2), (2, 3, \theta_1), (2, 4, \theta_2) \qquad (3.10)$$

ここで$M_1 \cdot M_4 \cdot M_5 \cdot M_6 \cdot M_3$は変換行列である．$M_1$は$Y_m$軸回りの回転，$M_4$は$X_w$軸回りの回転，$M_5$は$Z_w$軸回りの回転，$M_6$は平行移動，$M_3$は透視変換である．これらは次のように与えられる．

M_4：X_w軸回りのα回転を表すマトリックス

$$M_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

M_5：Z_w軸回りのγ回転を表すマトリックス

$$M_5 = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

＜３章＞

M_6：平行移動を表すマトリックス

$$M_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ X_0 & Y_0 & Z_0 & 1 \end{bmatrix}$$

透視変換後の画像座標と３次元配置の関係より付録の式(A.1)～(A.5)が得られる．未知数θ_1，θ_2，α，γに関して式を整理することによって４つの非線形連立方程式(A.6)～(A.9)が得られる．

４．２　実験例

図３．９は，CCDカメラ(f=8mm)により車模型を斜め上方より撮影(512×480×8 bit)し，エッジ強調した後，二値化処理したものである．対称関係にあるP_1-P_2，P_3-P_4はその対応関係と共にマウスにより外部から与えた．但し文献[3.9]に示すように自動的に求めることも可能である．これによりそれらの画像座標値が得られ，θ_1，θ_2，αが求まる．γの値は（任意の値 ）30°を与えた．実験結果の３例を表３．３に示す．初期値の与え方によって計算結果が変わってくるのがわかる．初期値の与え方によって収束する解として，（１）真の解と，（２）偽の解の２種類が求まり双方とも関係式を満たすことがある．偽の解の例（２）を再投影グラフィックス表示したものが図３．１０である．P_2-P_4は，正しい位置に存在しておらず，画面からはみ出している．また真の解の例（１）を再投影グラフィック表示したものを図３．１１に示す．この場合，正しい点を示している．したがって，真の解の判定は２次元画像上に再投影して行えばよい．表３．４には表３．３中の（１）において，得られた解からの復元値を示す．線分のなす角，線分の長さの比および，X_{w1}を与え復元した線分の長さの比較を示す．線分長の相対誤差の最大は3.53%，平均２乗誤差の平方根は2.44%である．

次にγを変えた場合の検討を行う．上の条件下において(i)γ=23.58°($\sin\gamma$=0.4)，(ii)γ=36.86°($\sin\gamma$=0.6)を与え，ブレント法で計算を行った．偽の解を

<3章>

除いた残りの解の一部を再投影した場合，図３．１１と復元値は表３．４と同等の結果が得られた．軸に対して自由度が１つ存在していることが認められる．これらの軸はいずれも対称面内に存在していることが検証された．

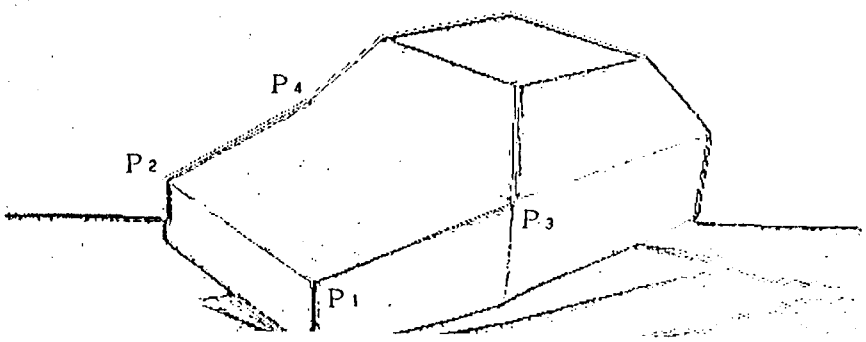


図３．９　　車模型のエッジ画像

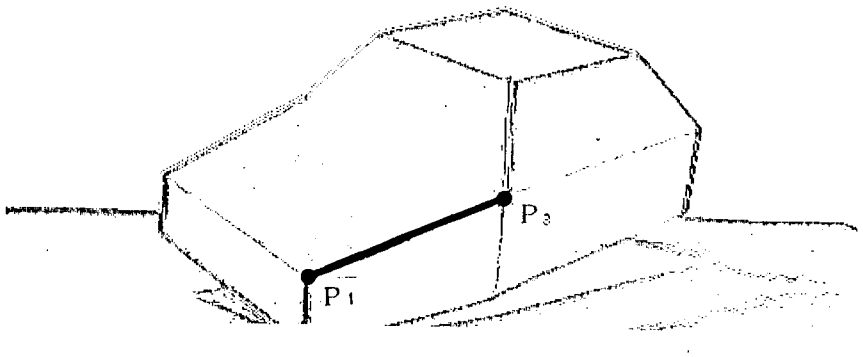


図３．１０　　偽の解の線分復元値の再投影グラフィックス表示
（P_2-P_4は画像面外下方）

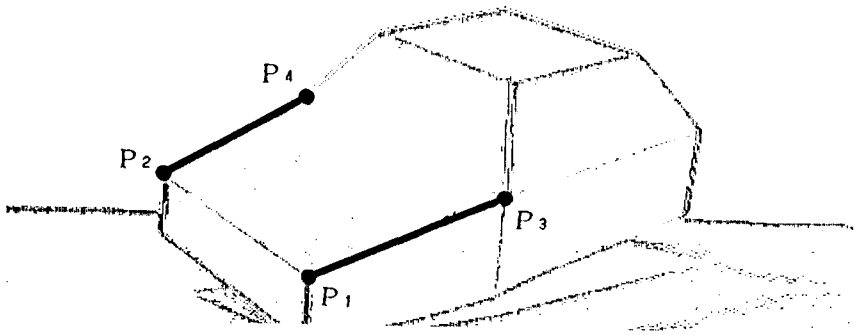


図３．１１　　線分復元値の再投影グラフィックス表示

表３．３　初期値を変えたときの復元結果（任意回転軸）

	Initial value			Calculation result		
	$\sin\theta_1$	$\sin\theta_2$	$\sin\alpha$	$\sin\theta_1$(arcsin)	$\sin\theta_2$(arcsin)	$\sin\alpha$(arcsin)
(1)	0.0	0.1	0.5	0.517(31.13°)	0.857(59.02°)	0.167(9.64°)
(2)	0.0	0.2	-0.1	0.792(52.34°)	0.920(66.97°)	-.960(-73.55°)
(3)	0.0	0.1	0.3	Unconverged		

表３．４　車模型の復元値

Angle	Real value	Recovered value	Relative error(%)
$\angle P_1P_0P_2$	20.00	19.08	-4.59

Unit: [°]

Ratio	Real value	Recovered value	Relative error(%)
P_1P_2/P_3P_4	0.780	0.791	1.36
P_1P_3/P_3P_4	0.634	0.632	-0.29

Length of line segment	Real value	Recovered value	Relative error(%)
P_1-P_2	123.01	127.36	3.53
P_3-P_4	157.74	161.12	2.14
P_1-P_3	100.00	101.84	1.84
P_2-P_4	100.00	101.84	1.84

Unit: [mm]

<3章>

第5節 結言

対称面素を構成する2本の対応線分は，モデル座標内にある線分をある回転軸のまわりに回転して得られたものであるという構成原理に基づいて3次元復元を行った．ここでは回転軸が鉛直方向の場合と，任意方向である場合について検討した．

鉛直回転軸の場合，回転角はグラフ的に解を求めた．また，この場合については，隠れ問題も検討した．

任意回転軸の場合は，回転軸に1自由度が残るが，これは隣接した2つの対称面素の回転軸を一致させたり，対称面素に垂直な回転軸に限定するなどして自由度をなくすことも考えられる．回転角についての非線形方程式はブレント法により数値計算的に解いた．一般に多次元空間における解の探索は初期値に大きく依存することが多く，初期値をうまく選ぶ方法については今後の検討課題である．

結論として，鉛直軸の場合には1組の対応点と焦点の画像座標値がわかれば対称面素の3次元復元（但し，奥行きを除く；以下同じ）が可能となる．また，任意方向軸の場合には3次元復元には2組の対応点の画像座標値が必要となる．回転軸を対称面素に垂直な方向に限定するなどしても1組の対応点と焦点の画像座標値だけからでは一意的な復元はできない．なお，本章では対応点は与えられていると仮定して解析を行った．対応点を見つけるためには，まず局所的な対称軸を見つける[3.8],[3.9]ことなどが有効であると考えられるが，これらの具体策については今後の検討課題である．

本章の手法は第2章の無限遠点を利用する方法に比べ，次のような長所・短所を持つ．

長所

（1）無限遠点に比べ，焦点はより物体近くに存在することが多く，焦点を利用する本方式の方が全体として復元精度がよい．

（2）鉛直回転軸の場合，対応線分の一端が不明で1組の対応点しか得られなくても，本方式では，焦点を利用して復元を行うことができた．同じ状況下で，無限遠点法では対称面が鉛直であることになり，無限遠点は無限遠線上に存在する

ことになる．したがって，無限遠線が使えるときには１組の対応点からでも復元可能となる．但し，このときでも，（１）の長所に加え，本方式では焦点を求めるとき端点のみでなく対応線分全体の情報が使えるため，この点からも復元精度がよくなる可能性がある．

また，必ずしも長所とは言えないが以下のような特徴がある．

（３）回転角を画像から計測したい場合にはより直接的に解が求まる．

短所

（４）非線形方程式を解く必要があり，数値解やグラフ的解法に頼らざるを得ない．このとき，偽の解が出たり，逐次近似法を用いたとき初期値によっては解自体が求まらないことがある．

本章では，面対称物体の局所的回転対称性を利用した，解析的手法による復元手法を提案し，実験例でその有効性を示した．

＜３章＞

＜付録＞　任意軸回り回転の３次元復元関係式

$$
\begin{aligned}
u_1 &= -X_{m1}\cdot(\cos\gamma\cdot\cos\theta_1-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1)+Y_{m1}\cdot\sin\gamma\cdot\cos\alpha-X_0\\
v_1 &= X_{m1}\cdot(\sin\gamma\cdot\cos\theta_1+\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1)+Y_{m1}\cdot\cos\gamma\cdot\cos\alpha+Y_0\\
t_1 &= (-X_{m1}\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1+Y_{m1}\cdot\sin\alpha+Z_0)\cdot S
\end{aligned}
\qquad (A.1)
$$

$$
\begin{aligned}
u_2 &= -X_{m1}\cdot(\cos\gamma\cdot\cos\theta_2-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_2+Y_{m1}\cdot\sin\gamma\cdot\cos\alpha-X_0\\
v_2 &= X_{m1}\cdot(\sin\gamma\cdot\cos\theta_2+\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_2)+Y_{m1}\cdot\cos\gamma\cdot\cos\alpha+Y_0\\
t_2 &= (-X_{m1}\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_2+Y_{m1}\cdot\sin\alpha+Z_0)\cdot S
\end{aligned}
\qquad (A.2)
$$

$$
\begin{aligned}
u_3 &= -X_{m2}\cdot(\cos\gamma\cdot\cos\theta_1-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1)+Y_{m2}\cdot\sin\gamma\cdot\cos\alpha+X_0\\
v_3 &= X_{m2}\cdot(\sin\gamma\cdot\cos\theta_1+\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1)+Y_{m2}\cdot\cos\gamma\cdot\cos\alpha+Y_0\\
t_3 &= (-X_{m2}\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1+Y_{m2}\cdot\sin\alpha+Z_0)\cdot S
\end{aligned}
\qquad (A.3)
$$

$$
\begin{aligned}
u_4 &= -X_{m2}\cdot(\cos\gamma\cdot\cos\theta_2-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_2)+Y_{m2}\cdot\sin\gamma\cdot\cos\alpha-X_0\\
v_4 &= X_{m2}\cdot(\sin\gamma\cdot\cos\theta_2+\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_2)+Y_{m2}\cdot\cos\gamma\cdot\cos\alpha+Y_0\\
t_4 &= (-X_{m2}\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_2+Y_{m2}\cdot\sin\alpha+Z_0)\cdot S
\end{aligned}
\qquad (A.4)
$$

$$
\begin{aligned}
X_0 &= -U_0\cdot Z_0\cdot S\\
Y_0 &= V_0\cdot Z_0\cdot S
\end{aligned}
\qquad (A.5)
$$

$$
\begin{aligned}
&(\cos\gamma\cdot\cos\theta_2-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_2-U_2\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_2\cdot S)\\
&\cdot\{(U_0-U_1)\cdot(\cos\alpha\cdot\cos\gamma-V_1\cdot\sin\alpha\cdot S)-(V_0-V_1)\cdot(\cos\alpha\cdot\sin\gamma-U_1\cdot\sin\alpha\cdot S)\}\\
&+(\cos\alpha\cdot\sin\gamma-U_2\cdot\sin\alpha\cdot S)\\
&\cdot\{(-\cos\theta_1\cdot\sin\gamma-\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1-V_1\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\cdot(U_0-U_1)\\
&-(\cos\gamma\cdot\cos\theta_1-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1-U_1\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\cdot(V_0-V_1)\}\\
&+(U_0-U_2)\cdot\{(-\cos\theta_1\cdot\sin\gamma-\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1-V_1\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\\
&\cdot(\cos\alpha\cdot\sin\gamma-U_1\cdot\sin\alpha\cdot S)-(\cos\gamma\cdot\cos\theta_1-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1\\
&-U_1\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\cdot(\cos\alpha\cdot\cos\gamma-V_1\cdot\sin\alpha\cdot S)\}\\
&=0
\end{aligned}
\qquad (A.6)
$$

$$
\begin{aligned}
&(-\cos\theta_2\cdot\sin\gamma-\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_2-V_2\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_2\cdot S)\\
&\cdot\{(U_0-U_1)\cdot(\cos\alpha\cdot\cos\gamma-V_1\cdot\sin\alpha\cdot S)-(V_0-V_1)\cdot(\cos\alpha\cdot\sin\gamma-U_1\cdot\sin\alpha\cdot S)\}\\
&-(\cos\alpha\cdot\cos\gamma-V_2\cdot\sin\alpha\cdot S)\\
&\cdot\{(-\cos\theta_1\cdot\sin\gamma-\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1-V_1\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\cdot(U_0-U_1)\\
&-(\cos\gamma\cdot\cos\theta_1-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1-U_1\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\cdot(V_0-V_1)\}\\
&+(V_0-V_2)\cdot\{(-\cos\theta_1\cdot\sin\gamma-\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1-V_1\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\\
&\cdot(\cos\alpha\cdot\sin\gamma-U_1\cdot\sin\alpha\cdot S)-(\cos\gamma\cdot\cos\theta_1-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1\\
&-U_1\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\cdot(\cos\alpha\cdot\sin\gamma-V_1\cdot\sin\alpha\cdot S)\}\\
&=0
\end{aligned}
\qquad (A.7)
$$

$$
\begin{aligned}
&(\cos\gamma\cdot\cos\theta_2-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_2-U_4\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_2\cdot S)\\
&\cdot\{(U_0-U_3)\cdot(\cos\alpha\cdot\cos\gamma-V_3\cdot\sin\alpha\cdot S)-(V_0-V_3)\cdot(\cos\alpha\cdot\sin\gamma-U_3\cdot\sin\alpha\cdot S)\}\\
&-(\cos\alpha\cdot\sin\gamma-U_4\cdot\sin\alpha\cdot S)\\
&\cdot\{(-\cos\theta_1\cdot\sin\gamma-\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1-V_3\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\cdot(U_0-U_3)\\
&-(\cos\gamma\cdot\cos\theta_1-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1-U_3\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\cdot(V_0-V_3)\}\\
&+(U_0-U_4)\cdot\{(-\cos\theta_1\cdot\sin\gamma-\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1-V_3\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\\
&\cdot(\cos\alpha\cdot\sin\gamma-U_3\cdot\sin\alpha\cdot S)-(\cos\gamma\cdot\cos\theta_1-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1\\
&-U_3\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\cdot(\cos\alpha\cdot\cos\gamma-V_3\cdot\sin\alpha\cdot S)\}\\
&=0
\end{aligned}
\qquad (A.8)
$$

$$
\begin{aligned}
&(-\cos\theta_2\cdot\sin\gamma-\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_2-V_4\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_2\cdot S)\\
&\cdot\{(U_0-U_3)\cdot(\cos\alpha\cdot\cos\gamma-V_3\cdot\sin\alpha\cdot S)-(V_0-V_3)\cdot(\cos\alpha\cdot\sin\gamma-U_3\cdot\sin\alpha\cdot S)\}\\
&-(\cos\alpha\cdot\cos\gamma-V_4\cdot\sin\alpha\cdot S)\\
&\cdot\{(-\cos\theta_1\cdot\sin\gamma-\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1-V_3\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\cdot(U_0-U_3)\\
&-(\cos\gamma\cdot\cos\theta_1-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1-U_3\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\cdot(V_0-V_3)\}\\
&+(V_0-V_4)\cdot\{(-\cos\theta_1\cdot\sin\gamma-\cos\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1-V_3\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\\
&\cdot(\cos\alpha\cdot\sin\gamma-U_3\cdot\sin\alpha\cdot S)-(\cos\gamma\cdot\cos\theta_1-\sin\gamma\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta_1\\
&-U_3\cdot\cos\alpha\cdot\sin\theta_1\cdot S)\cdot(\cos\alpha\cdot\sin\gamma-V_3\cdot\sin\alpha\cdot S)\}\\
&=0
\end{aligned}
\qquad (A.9)
$$

<4章>

第４章　複数の鏡像を含む単眼画像からの面対称復元手法による隠れのない３Ｄ物体復元

第1節　緒言

筆者らは，単眼視による３次元復元について形状の面対称性の条件下の手法[4.1][4.2]を提案し，さらに曲線形状のものについても有効であることを示した．人工物体には面対称性を持つものは非常に多く有用な手法と考えられるが，面対称性を持たない多面形状物体には適用できなかった．しかし，鏡を使用すれば鏡像・直接像間に強制的に面対称性を作り出すことができる．

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[4.3],[4.4],[4.5]．Idesawa[4.3]は，レンジファインダーのカメラレンズ前部に内側が鏡である円筒を取り付け，ステレオ視の見かけの基線長拡大からレンジファインダーの小型化を行った．安居院ら[4.4]は，鏡を背面に配置し，物体に当たるレーザ光を別の方向から見て３次元計測を行っている．平面鏡を使用し，直接像と鏡像間の対応づけから３次元計測を行う手法は，金子ら[4.5]によって報告されている．彼らは，鏡に写った像が物体を違った視点から見た像であることに着目し，３次元中のカメラと鏡の幾何学的な関係から復元を行っている．しかし，このためには鏡の位置，姿勢が既知でなければならない．したがって，撮影の状況が変わるたびに鏡面を正確に決定する必要がある．また，１枚の鏡の使用にとどまっている．

本章では，物体自身と鏡に写しだされた物体像との間に面対称性が作り出されることに着目する．復元は直接像と鏡像間の対応づけの後，２章で述べた無限遠点を利用した面対称復元手法によって行う．したがって，鏡の位置，姿勢は未知

<4章>

でよく，ただ鏡像が画像内にあれば良い．鏡を利用する点から，

（１）物体の直接像と平面鏡に写った鏡像を同一画像内に撮影することにより，１枚の画像のみ処理すればよい．

（２）直接像では隠れていても鏡像において見えていればその部分の情報を得ることができる．

などの特長がある．しかし，鏡１枚のみを使用した場合には，（２）で得られる情報は頂点の有無，接続関係や面の存在などであり，鏡のみに写っている頂点の復元はその頂点を含む面の復元にかかっている．したがって，１枚の鏡のみでは復元不可能な面が残る場合には，２枚の鏡を使用することによって隠れをなくす．その際，復元は直接像に写ってなくても２つの鏡像共に写っていれば可能である．鏡像復元手法は，鏡を１枚使った場合を基本にし，１枚だけでは，復元できない場合には，さらに鏡の数を増やせば良い．その増やした鏡に対しても１枚の鏡の時と同じ鏡像復元手法を用い，復元を行う．鏡像同士からの復元も可能である．より複雑な物体に対してはより多くの鏡を使用すれば良いと考える．なお，ここで言う複雑な物体とは，１枚の鏡だけでは写らない物体線分がある凸多面体で，一意的に区分することが不可能な曲線は含まないと仮定する．

本章では，まず第２節において多面体物体とその鏡像との関係，対称面素の定義，および復元式を示す．

第３章では鏡像対応づけ拘束を用いた鏡像復元手法を提案し，実験例を示す．

次に，第４章では１枚の鏡だけでは隠れ部分がある場合，鏡を増やすことによって，隠れ（Occlusion）をなくす物体復元手法，および実験例を示す．

<4章>

第2節　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4．1）．

透視変換を式(4.1)に示す．（U_i，V_i）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．

$$U_i = \frac{-X_i}{Z_i \cdot S}, \quad V_i = \frac{Y_i}{Z_i \cdot S} \qquad (4.1)$$

ただし　$S = d / f$

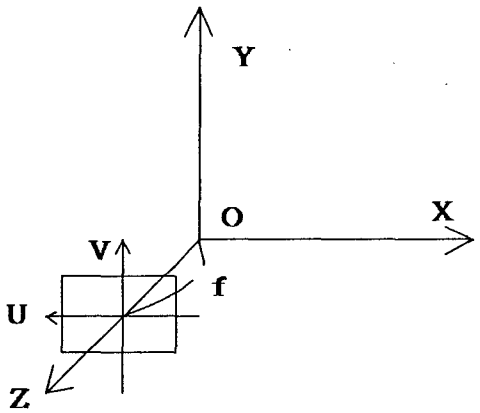


図4．1　　座標系の設定

2．2　鏡像における仮想的対称面素

図4．2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．

鏡面に関して対称な位置関係にある線分P_1-P_3，P_2-P_4は，仮想的対称面素$P_1P_2P_4P_3$を構成し，P_5，P_6は線分P_1-P_2，P_3-P_4の3次元上の中点すなわち鏡面上の点である．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4．2P_∞）をつくる．面対称復元手法[4.1]により対称面素を復元していくことによって多面体の3次元復元を行う．

<4章>

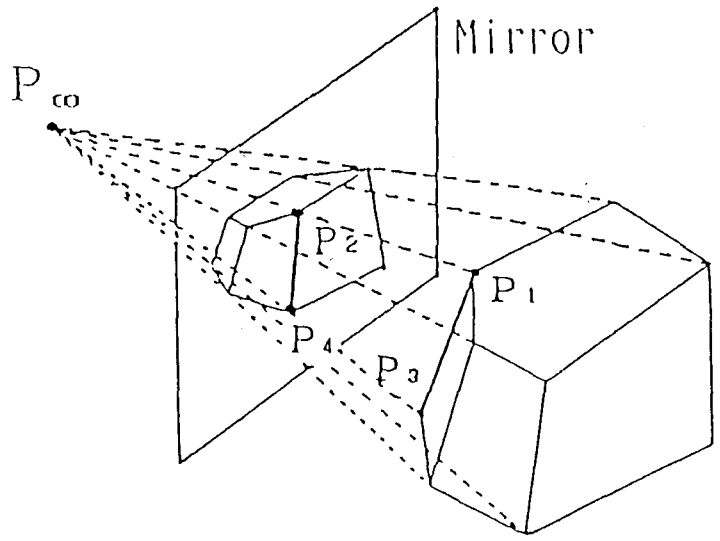


図４．２　　多面体物体とその鏡像との関係

２．３　対称面素の復元式

１）　中点の決定（２次元）

２次元中での複比の関係式[4.6](4.2)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３次元中のP_1-P_2，P_3-P_4の中点であるP_5，P_6の画像座標値を求めることができる．

$$\frac{2}{\overline{P_5P_\infty}} = \frac{1}{\overline{P_1P_\infty}} + \frac{1}{\overline{P_2P_\infty}} \qquad (4.2)$$

２）　無限遠点に向かう直線上の点の３次元復元

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３次元復元できる．

透視変換の関係式(4.1)よりP_iの３次元位置ベクトルは

$$\vec{P}_i = (X_i,\ Y_i,\ Z_i)$$
$$= (-U_i \cdot Z_i \cdot S,\ V_i \cdot Z_i \cdot S,\ Z_i) \qquad (4.3)$$

で与えられる．また，原点Ｏから画像平面上の無限遠点にいたるベクトルは

<4章>

$$\vec{P} = (-U_\infty,\ V_\infty,\ 1/S) \tag{4.4}$$

となる．これを用いると，対応点対やそれらを結ぶ直線上の点（中点など）P_a，P_bの間には

$$\vec{P}_a = \vec{P}_b + \ell_{ab} \cdot \vec{P}_\infty \tag{4.5}$$

なる関係が存在する．ただしℓ_{ab}は係数である．式(4.3),(4.4),(4.5)より

$$-U_1 \cdot Z_1 \cdot S = -(U_2 \cdot Z_2 \cdot S + \ell_{12} \cdot U_\infty) \tag{4.6}$$

$$Z_1 = Z_2 + \ell_{12}/S \tag{4.7}$$

が得られる．さらに式(4.6)および，式(4.7)より

$$Z_2 = Z_1 \cdot \left(\frac{U_1 - U_\infty}{U_2 - U_\infty} \right) \tag{4.8}$$

これはZ_1からZ_2が復元できることを示す．

3）中点の3次元復元

3次元中において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(4.9)が得られる．

$$(\vec{P}_6 - \vec{P}_5) \cdot (\vec{P}_1 - \vec{P}_5) = 0 \tag{4.9}$$

また式(4.5)より

$$\vec{P}_1 - \vec{P}_5 = \ell_{15} \cdot \vec{P}_\infty \tag{4.10}$$

であり，式(4.3),(4.4),(4.9),(4.10)から式(4.11)が得られる．

$$Z_6 = Z_5 \cdot \frac{U_5 \cdot U_\infty + V_5 \cdot V_\infty + 1/S^2}{U_6 \cdot U_\infty + V_6 \cdot V_\infty + 1/S^2} \tag{4.11}$$

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,…,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．

＜４章＞

第3節　鏡像による復元手法

３．１　処理の流れ

まず処理の概要を図４．３(a)に示す．CCDカメラから得た画像に対して，微分処理後二値化処理を行いエッジ画像を得る．その画像に対して，Hough変換による直線抽出処理，また，交点テーブル処理[4.1]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．その際，直接像，鏡像の区別は与えたが，物体像の大小関係から自動的に識別することも可能である．次に直接像，鏡像間の対応づけを行う．その結果から，面対称復元手法を利用し復元を行う．その際，対応づけをどのように行うかが重要な点であり，本章においては，鏡像に関する２種類の拘束を考えた．次に図４．３(b)には，対応点がわかった後の復元手順，図４．３(c)には，対応探索に関する詳細な処理の流れを示す．

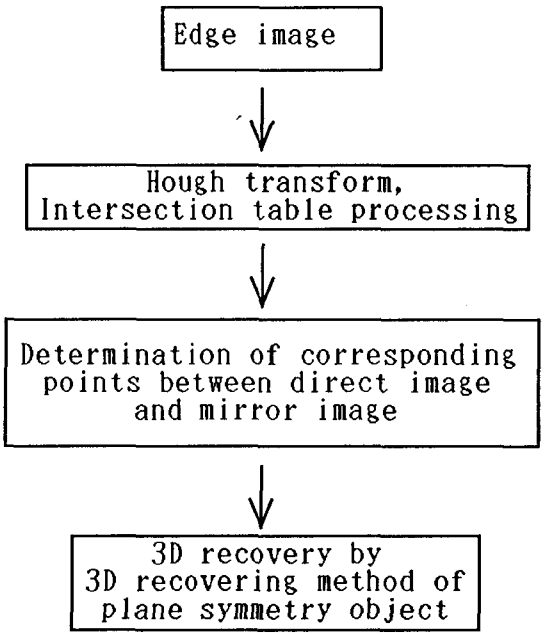


図４．３(a)　　処理の流れ

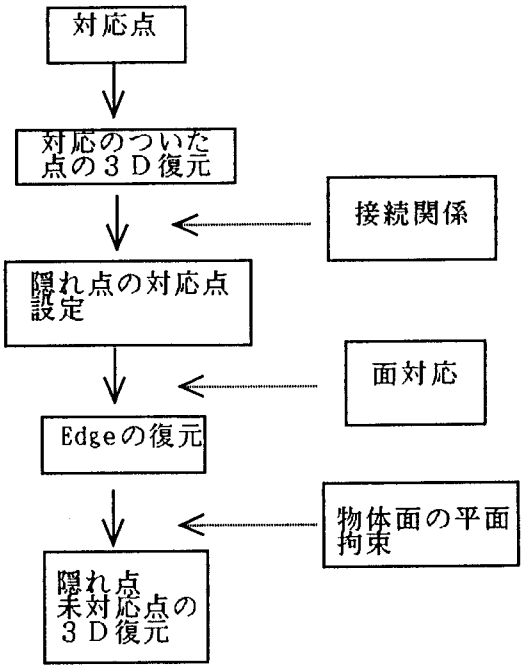


図４．３(b)　３次元復元

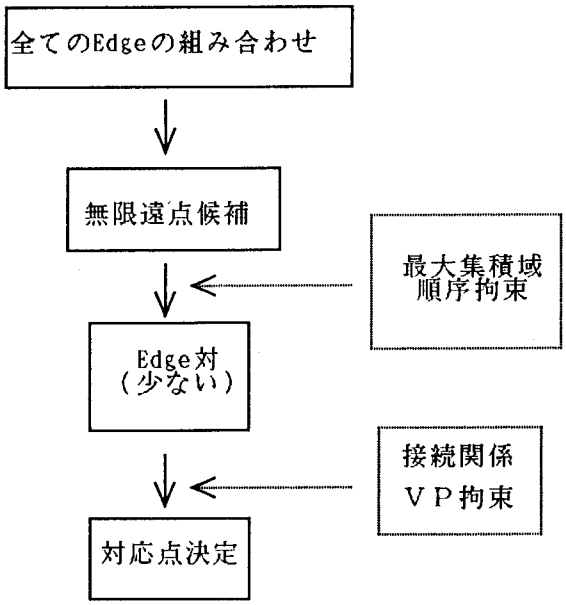


図４．３(c)　　対応点探索

<4章>

3．2　鏡像対応づけ拘束

物体とその鏡像は隠れ部分が異なり，直接対応がつく点は多くはないが，以下の鏡像立体視に関する対応づけのための２つの拘束条件を用いる．

（１）ＶＰ拘束

図４．４のように対応点の延長線上に，無限遠点（図４．４P_∞）が存在する．したがって，無限遠点（ＶＰ）が得られていればP_1に対応する点（P_2）はP_1と無限遠点を結ぶ直線上に存在している．

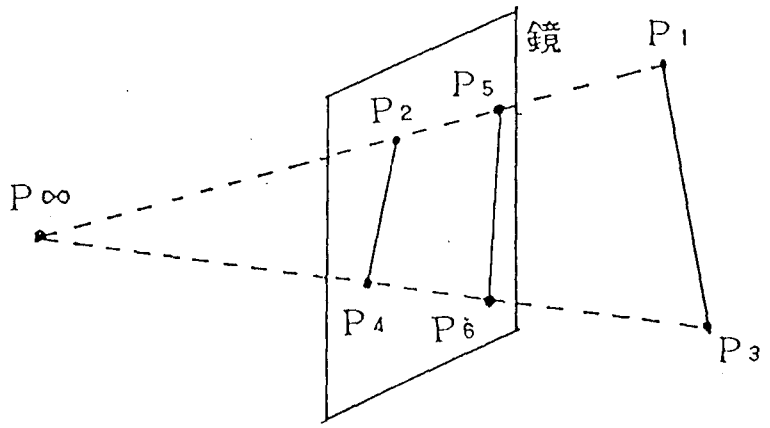


図４．４　　ＶＰ拘束

（２）鏡像順序拘束

図４．５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．

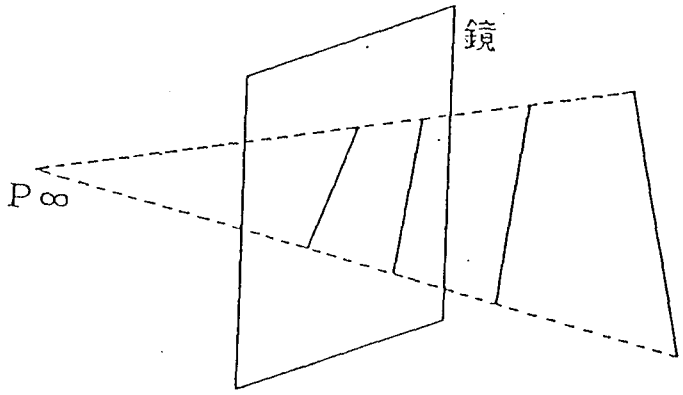


図４．５　　鏡像順序拘束

<4章>

3．3　実験手順

（1）線画抽出と交点テーブル処理

パソコンNEC PC-9801VM2および日本アビオニクスTVIP4100フレームメモリを中心としたシステムによって実験を行った．言語はMS-DOS上で動作するN88BASICを用いた．図4．6はCCDカメラ(f=8mm)により多面体を撮影(512×480×8bit)し，エッジ強調した後，二値化処理したものである．実験を行う際，暗幕を使い，鏡に多面体以外のものが写らないよう配慮した．

これに対し，Hough変換による直線抽出した結果を図4．7に示し，交点テーブル処理による頂点・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4．8）．

交点テーブル処理とは，簡単に云えば，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テーブル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（交差直線数3以上も可能）．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，物体頂点が隠されている場合や，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型頂点の出てくる凹物体の処理は除外して考える．

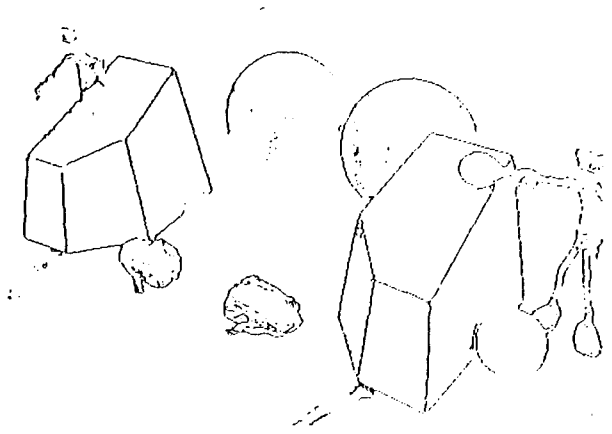


図4．6　　入力画像

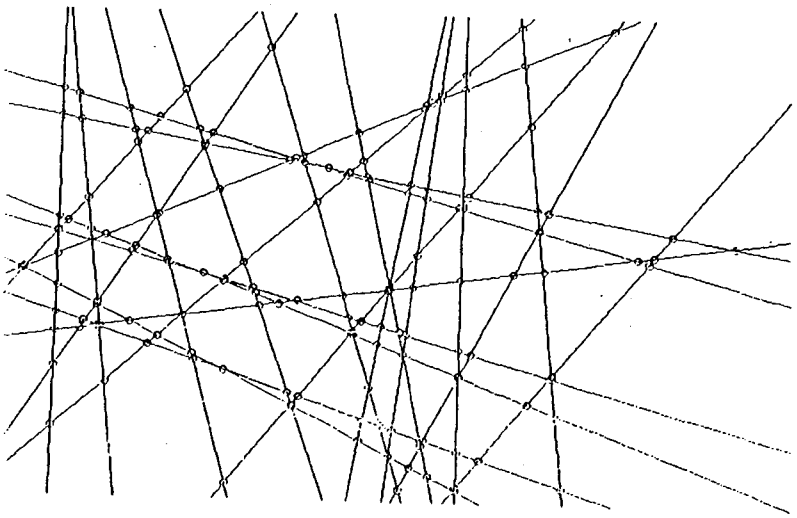


図４．７　　Hough変換による直線抽出結果

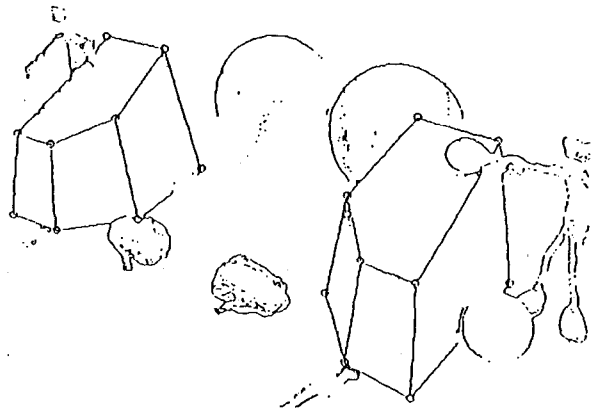


図４．８　　交点テーブル処理による頂点抽出結果

（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索する．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接続情報を得る．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索する．面の探索については２次元上で接続関係を時計回りに進んで面情報を得る．

<4章>

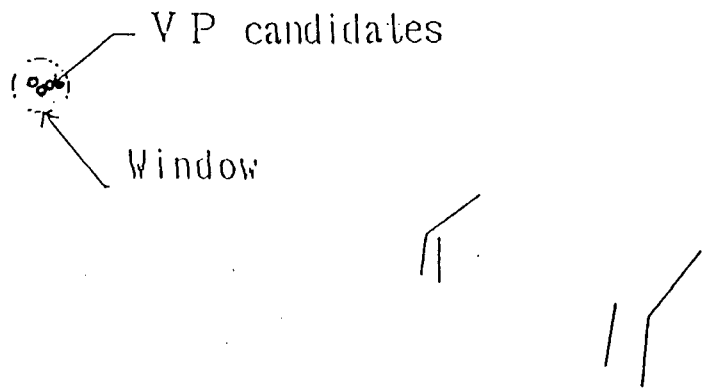


図４．９　　無限遠点候補◦の最大集積域○とそれを形成するエッジ対

（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，総当たりで直接像，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

（３）で求めた各々の交点を中心とした，位置に依存するサイズ（画像中心からの距離に依存し，遠方になるほど大になる）の窓を用いて統合する．最大集積の窓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４．９）．その際，決定した無限遠点は対応探索のためだけに使用し，対応が決定した後は，より精度の高い無限遠点を（８）で再度求め直す．

（５）順序拘束による対応候補の絞り込み

図４．５に示すように直接像２本のエッジに対して鏡像側にも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きがけ対応の方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対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無限遠点を必ず通るはずであるが，実際には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無限遠点から大きく外れる（図４．１０）．

<4章>

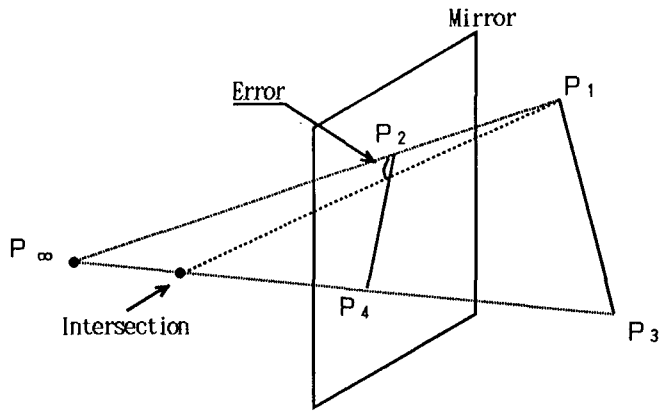


図４．１０　　P_2の小さな誤差による交点の大きなずれ

これは無限遠点が遠方で形成されるためである．

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，無限遠点と直接像の頂点とを結んだ直線を

$$V = aU + b$$

とした時，評価関数ｆ(Ｕ，Ｖ)を

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

とし，鏡像の頂点（Ｕ，Ｖ）が

$$|f(U, V)| \leq d \qquad (4.12)$$

を満たす場合に，それらは対応すると決定する．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４．１１には物体エッジ（破線）に重ねて，図４．９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候補のうち例えば（$ME_{12}-DE_{12}$）について，対応している端点を１組選ぶ（MP_1-DP_1）（図４．１１，○印）．次にこの対応点に接続されている点（図４．１１，△印）の内同士から対応点を調べる．DP_1と接続されている点のうちの１つ，例えばDP_2と，対応している点をMP_1と接続している点｛MP_2，MP_3，MP_4｝から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．同様にDP_3，DP_4に対して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すべ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４．９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，全セットを通して，候補点数最大のものを対応点と決定する．正しく対応が得られたものを図４．１２に・で示す．

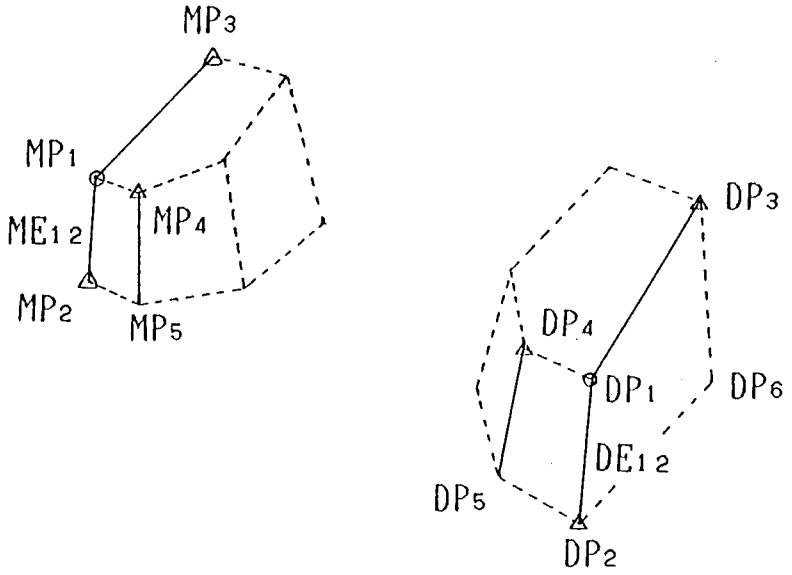


図４．１１　　対応探索

（○は対応点，△は対応点に接続している頂点）

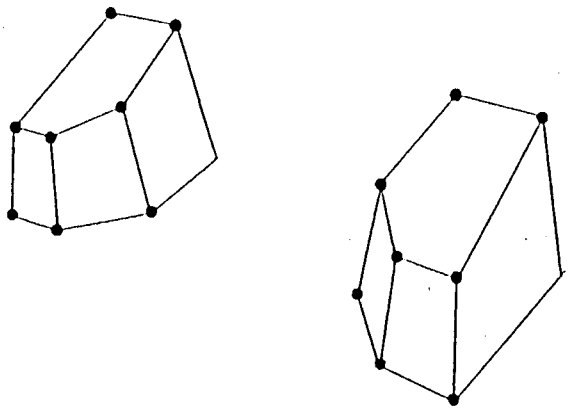


図４．１２　　対応結果

<4章>

（７）情報の伝播，補充

直接像において隠されてい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隠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．結線情報についても対応する点対を比較し補う．直接像，鏡像間の対応点同士の接続情報を比較し，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４．１３のようにエッジが１本誤って抽出されないとしても，点の対応から，エッジを補うことができる．

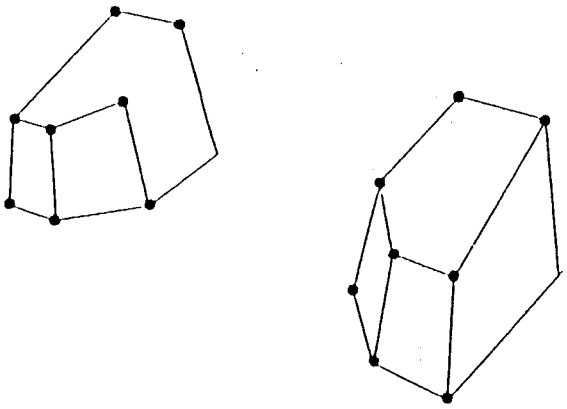


図４．１３　　エッジが一本ない場合

（８）無限遠点の最適化，３次元復元

（４）では，エッジの総当たりで求めた交点の最大集積域の中心を無限遠点とした．集積域を形成する交点にはばらつきがあり，その上誤った対応による交点も含まれる可能性がある．対応対を得る処理（（６））のためには，無限遠点としては，この最大集積域の中心のままで十分であるが，復元を行うためには，誤差が大きい．そこで，対応がついた対だけから得た無限遠点を最小２乗法を適用し精密化を行い，より精度のよい無限遠点を求め，復元を行う．まず対応点対を結ぶ直線を計算する．これら一点（無限遠点）に交わる直線群は直線の傾きとｙ切片のパラメータ空間へ写像すると，直線群は交点（無限遠点）の画像座標値を

直線の傾きとｙ切片とする直線上に変換される．したがって，パラメータ空間上で直線に関する最小２乗法を適用することによって画像平面上の無限遠点の最適化を行う．

３次元座標については対応点対から順次対称面素をつくり復元を行う．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．同時に対称性から隠れ部分も復元する．

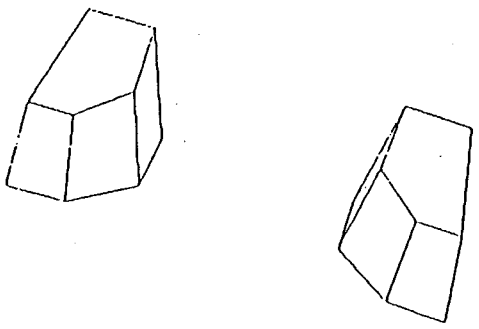
３．４　　実験結果

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４．１４に示す．図４．１４（ａ）は３０°回転表示したものである．対応点が隠されていても直接像，鏡像とも復元がなされている．図４．１４（ｂ）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．これは，図４．６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．このように，１枚の鏡だけでは隠れの部分を除くことができず．物体の復元が不十分になることがある．

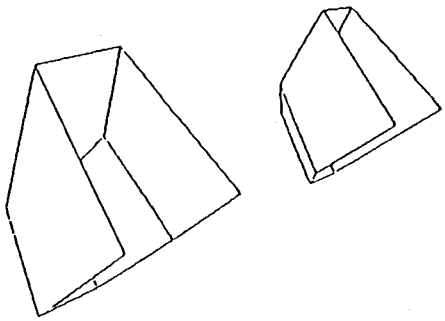
また表４．１に復元の結果として辺の線分の長さを与えた場合の長さの比較および角度の比較を示す．誤差の原因としては量子化誤差，画像中心と視線のずれ，実験的に求めたスケールパラメータの精度，そしてHough変換による直線抽出誤差などが考えられる．

演算量については，無限遠点の決定において直接像－鏡像間のすべてのエッジについて総当たりで交点計算を行うため，もしn本ずつのエッジがあれば交点演算量は，$O(n^2)$になる．また，交点をすべて計算したのち，同一の点と見なす探索に関しては，もし，m個交点があれば判定演算量は$O(m^2)$になる．

実際の演算時間は，対応点決定処理（３．３．（２）～（８））においてPC9801VM2 N88BASICインタプリタ上でほぼ３分ほどであった．なお，これには，グラフィックスなどのユーザーインターフェースのためのルーチンも含まれている．



（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４．１４　　復元物体を回転表示

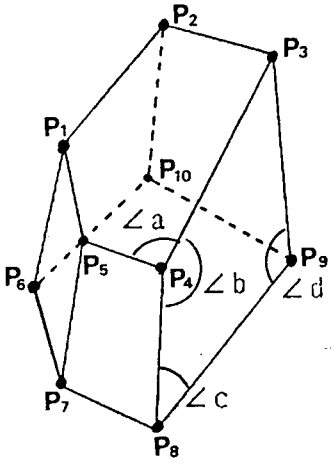
<4章>

表４．１　線分の長さの比較および角度の比較

Line segment	Recovered value (mm)	Real value (mm)	Relative error (%)
P_1-P_2	68.93	71.00	-2.92
P_1-P_5	45.86	45.00	1.91
P_1-P_6	75.55	74.00	2.10
P_2-P_3	48.44	50.50	-4.07
P_2-P_{10}	103.47	101.00	2.44
P_3-P_4	100.62	104.00	-3.25
P_3-P_9	109.00	102.00	6.87
P_4-P_5	29.90	32.00	-6.57
P_4-P_8	65.77	61.50	6.94
P_4-P_9	65.16	61.00	6.82
P_6-P_7	55.77	57.00	-2.16
P_6-P_{10}	80.46	81.00	-0.66
P_7-P_8	39.63	41.00	-3.35
P_8-P_9(given)	121.00	121.00	--
P_9-P_{10}	77.71	81.00	-4.06

Angle	Recovered value (°)	Real value (°)	Relative error (%)
∠a	85.52	86.69	-1.35
∠b	123.66	121.18	2.05
∠c	81.17	81.47	-0.37
∠d	79.65	81.47	-2.23

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



<4章>

第4節　2枚の鏡を使用した復元

第3節においては，1枚の鏡を使用した場合の復元を行った．これを鏡像復元手法と呼ぶ．その際，復元されなかった背面部分を復元するために，もう1枚の鏡を使い復元を行う．

4．1　　鏡の使い方

図4．15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．

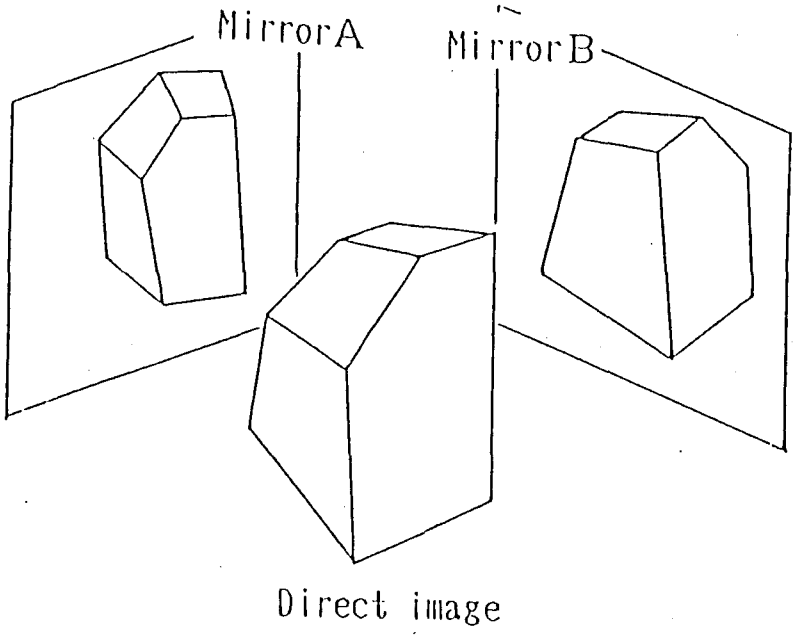


図4．15　　2枚の鏡の配置

4．2．　処理の流れ

図4．16において，鏡像A－直接像，鏡像B－直接像それぞれ別々に第3節で述べた鏡像復元手法によって復元を行う．

次に，別々に得られた結果（頂点，面情報）を直接像を仲立ちとして統合する（Combination）．その際，不都合が起きるのは直接像に写っていなくて鏡像のみ

に写っている場合である（隠れ問題）．

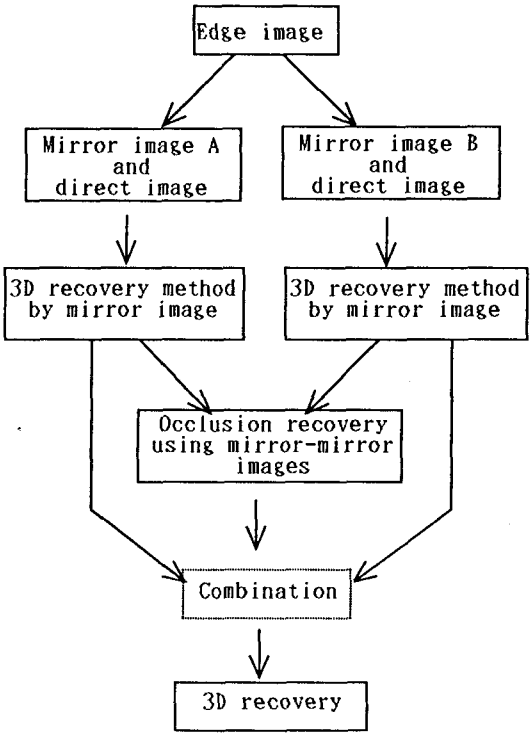


図４．１６　　処理の流れ

４．３．　鏡像間の対応による隠れ部分の復元

直接像に対応点が存在しない（隠されている）頂点として，鏡像ＡにＰ$_a$，鏡像ＢにＰ$_b$があり，それぞれの無限遠点をＰ$_{a\infty}$，Ｐ$_{b\infty}$とする．Ｐ$_a$とＰ$_b$が対応しているかどうかは以下の処理によって判定できる．まず，対応点はそれらの無限遠点と結んだ直線上に存在することから，Ｐ$_a$－Ｐ$_{a\infty}$を通る直線とＰ$_b$－Ｐ$_{b\infty}$を通る直線との交点（Ｐ$_d$）を計算する．もし，この交点が正しい物体頂点であるなら，鏡Ａ，Ｂを使ってそれぞれ別々に３次元復元したとき同じ座標を示さなければならない．ここでは，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の面の方程式が得られているとする．鏡の面の方程式と対応点対の画像座標値があれば代数的に３次元復元できる．鏡Ａの面の方程式を式(4.13)に示す．

$$n_{a1}x + n_{a2}y + n_{a3}z + n_{a4} = 0 \qquad (4.13)$$

<4章>

ここで

$$\vec{n}_a = (n_{a1},\ n_{a2},\ n_{a3}) \qquad (4.14)$$

は鏡Aの法線ベクトルである.

隠されている点を$P_d(x_d, y_d, z_d)$，鏡に写る点を$P_a(x_a, y_a, z_a)$とする．P_dはP_aの面対称点であるから

$$P_d = P_a + t_a \cdot \vec{n}_a \qquad (4.15)$$

$$t_a = -2 \cdot \frac{(n_{a1}x_a + n_{a2}y_a + n_{a3}z_a + n_{a4})}{|\vec{n}_a|^2} \qquad (4.16)$$

が得られる.

式(4.15)はx,y,z成分に分解できる．加えて,式(4.1)，(4.16)から，未知数７個（x_a，y_a，z_a，x_d，y_d，z_d，t_a）に対し，関係式は８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．鏡Bに関しても同様の関係式が得られる.

これにより，対応点が隠されている場合，１枚の鏡ではその頂点を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枚の鏡では面が３角形であっても，２枚の鏡に写っていれば復元ができる．但し，これらは，鏡（無限遠点）２つの誤差が入るため復元誤差が大きく，面が四角形以上の時は１個の鏡像上での平面拘束の利用の方がよい.

４．４　実験

図４．１７に入力画像をエッジ強調した後，二値化したものを示す.

つぎに，図４．１８に復元した物体をＹ軸まわりに回転したものを示す．第３節では復元できなかった背面の隠された部分が完全に復元できている．表４．２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.線分長は誤差７％以内で，角度は３％以内で復元されている.

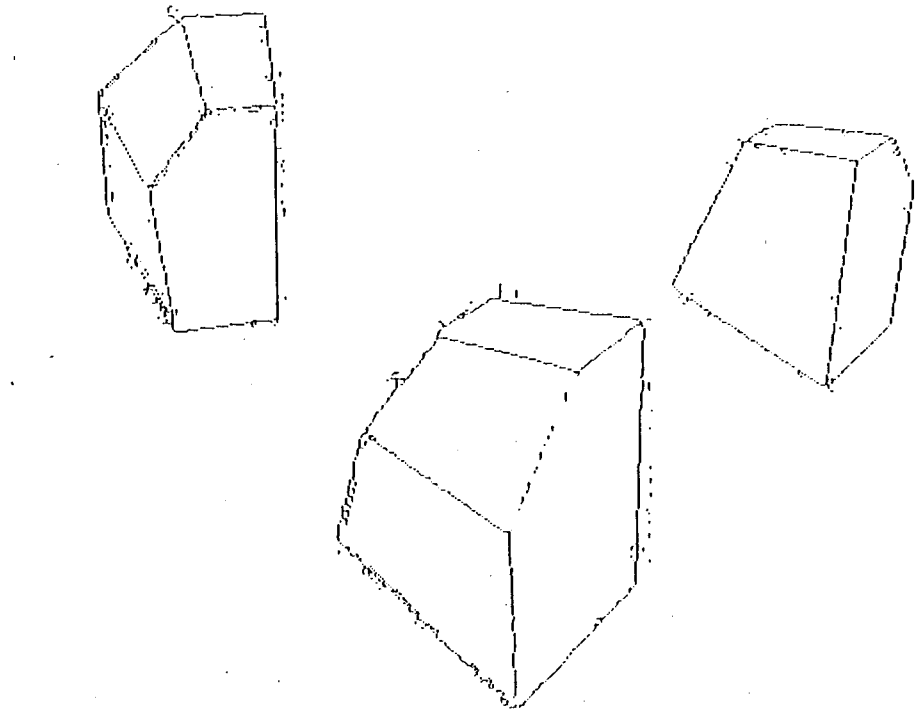
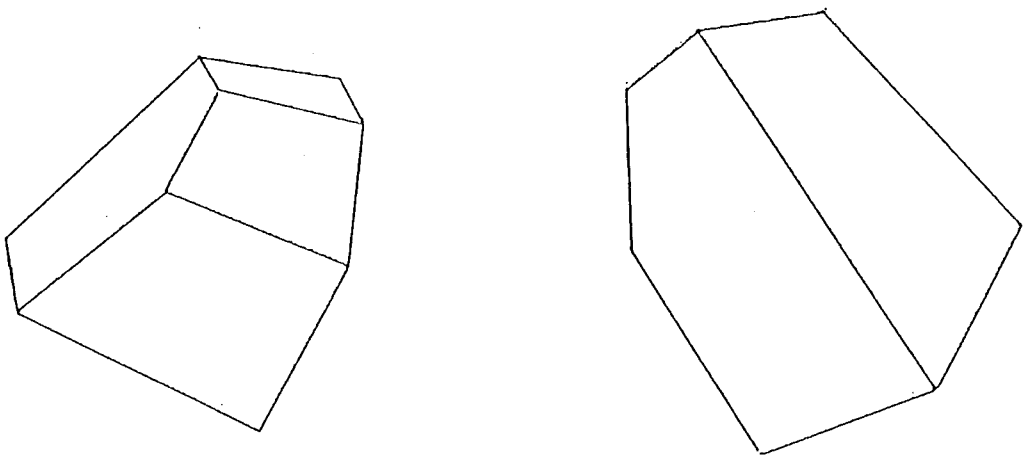


図４．１７　　入力画像



（a）　６０°回転　　（b）　－９０°回転

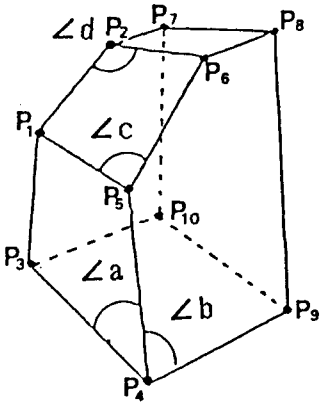
図４．１８　　復元物体のＹ軸回り回転表示

表４．２　線分の長さの比較および角度の比較

Line segment	Recovered value (mm)	Real value (mm)	Relative error (%)
P_1-P_2	44.39	45.00	-1.35
P_1-P_3	66.86	71.00	-5.84
P_1-P_5	70.91	74.00	-4.17
P_2-P_6	57.37	61.00	-5.95
P_2-P_7	31.88	32.00	-0.38
P_3-P_4	96.66	101.00	-4.30
P_3-P_{10}	52.46	50.50	3.89
P_4-P_5(given)	81.00	81.00	--
P_4-P_9	82.20	81.00	1.49
P_5-P_6	56.87	57.00	-0.22
P_6-P_8	41.39	41.00	0.96
P_7-P_8	59.70	61.50	-2.94
P_7-P_{10}	105.17	104.00	1.12
P_8-P_9	125.79	121.00	3.96
P_9-P_{10}	100.77	102.00	-1.21

Angle	Recovered value (°)	Real value (°)	Relative error (%)
∠a	80.43	81.47	-1.28
∠b	91.41	90.00	1.57
∠c	83.47	83.93	-0.55
∠d	113.19	112.94	0.49

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



<4章>

第5節 結言

第2章，第3章で提案した面対称復元手法は，対象物の適用に制限があったが，本章では鏡を使用することにより面対称物体でない多面体に応用可能な手法を提案した．

本手法は次のような特徴を持っている．

（1）鏡を使用することにより，多面体物体に対し強制的に面対称性を作り出し，面対称復元手法を応用することにより3次元復元できる．

（2）直接像と鏡像間の対応づけにはＶＰ拘束，および鏡像順序拘束の2種の拘束が有効である．

（3）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くとも2枚の鏡像双方共に写っている場合復元できる．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が復元できる，という条件付きで復元可能である．

（4）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のない3次元物体復元が可能となる．

（5）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．

問題点として，多くの鏡像を用いれば，復元された3次元座標値誤差から物体を再構成する際に最適化手法が必要となることが挙げられる．

本章では，多面体に対し鏡を使用することにより得られる直接像・鏡像間に面対称復元手法を適用し，物体の隠れ部分を含めた3次元復元手法を提案し，実験例によってその有効性を示した．

<5章>

第5章　結　論

本研究では，面対称性に基づく単眼視画像からの3次元復元について考察を行った．

各章において得られた結果を要約すると次のようになる．

第2章では，

（1）Hough変換による直線抽出，交点テーブル処理による頂点抽出を行うためエッジ，頂点の一部が障害物などで隠されていても復元が可能となる．

（2）複雑な面対称物体に対して対称面素という要素に分割することにより，復元を行える．

（3）物体自身による隠れ部分について対称性を利用した復元が行える．その際，面の伝播によって一方の点は復元されていることが必要である．

（4）多面体物体に限らず，面対称関係にある曲線にも適用できる．

第3章では，

（5）回転軸を鉛直方向に仮定することで未知数を減じ，1組の対応点対と対称面素の焦点の各画像座標値からグラフ的に解を求めることができる．その場合，隠れ部分の復元も可能である．

（6）鉛直回転軸の場合，人体の3次元復元では，動画像的解釈が可能となる．

（7）任意回転軸の場合，3次元復元には2組の対応点対の画像座標値がわかればよい．

（8）任意回転軸の場合，回転軸に関して1自由度が残るが，これは2つの対称面素の連結を考えたり，対称面素に垂直な回転軸に限定するなどして自由度をなくすことも考えられる．

第4章では，

（9）鏡を使用することにより，多面体物体に対し強制的に面対称性を作り出し，面対称復元手法を応用することにより3次元復元できる．

＜５章＞

（１０）直接像と鏡像間の対応づけにはＶＰ拘束，および鏡像順序拘束の２種の拘束が有効である．

（１１）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くとも２枚の鏡像双方共に写っている場合復元できる．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が復元できる，という条件付きで復元可能である．

（１２）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のない３次元物体復元が可能となる．

（１３）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．

なお，本研究においては，形状の面対称性を仮定した単眼視画像からの３次元復元法について示し，実験によってその有効性を確かめた．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始御配慮，直接の御指導，および御鞭撻をいただいた医学部　田村進一教授に深く心より感謝の意を表します．

本論文に対し有益なる御助言，御批判をいただきました産業科学研究所の北橋忠広教授，および情報工学科の谷内田教授に心より感謝の意を表します．

大学院博士課程，研究生としての期間において，ご指導，ご教示をいただいた情報工学科　嵩忠雄教授，都倉信樹教授，鳥居宏次教授，谷口健一教授，柏原敏伸教授，首藤勝教授，橋本昭洋教授，産業研究所の豊田順一教授，溝口理一郎教授，大型計算機センター　宮原秀夫教授，教養学部　藤井護教授　に感謝の意を表します．

鳥取大学工学部　岡崎耕三助教授，大阪電通大学短期大学部　河合秀夫助教授には，研究面および研究生活を通して多数の助言をいただき深謝いたします．

鳥取大学工学部　副井裕教授　松岡節講師には，特別な御配慮をいただき心より感謝の意を表します．

客員研究員　呉簡彤氏，大学院生　林成起氏には，田村研究室発足当初よりいろいろな面でお世話になり，感謝致します．

実験等研究の際には多大なる御助力をいただいた梶見直樹氏（現　中国電力），岩本純氏（現　富士通），大野修司氏（現　日本電気），医学部研究生　竹谷尚氏に厚くお礼申し上げます．

最後に，医学部機能画像診断学研究部および嵩研究室の多くの方々に心より感謝の意を表します．

<参考文献>

参考文献

第１章

[1.1] 辻：”コンピュータビジョンへの道”，情報処理24,12,1414(昭58-12).

[1.2] 太田，池内：”３次元情報の再構成とモデル化”，O plus E,71,85 (1985.10).

[1.3] 中谷，北橋：”無限遠点を用いた情景中の対象物の３次元構造の復元”，信学論（Ｄ），J68-D,8,pp.1481-1488(1985.08).

[1.4] B.K.P.Horn：” Obtaining shape from shading information”，Artificial Intelligence 8,201(1977).

[1.5] A.K.Mackworth:"Interpreting pictures of polyhedral scenes", ibid.4,121(1973).

[1.6] T.Kanade："Recovery of the Three Dimensional Shape of an Object from a Single View",Artificial Intelligence, Vol.17, pp.409-460 (1981)

[1.7] J.R.Kender："Shape from Texture", Carnegie Mellon University Computer Science Report CMU-CS-79-153(1980)

[1.8] 光本，岡崎，田村，梶見，副井："面対称性に基づく単眼視からの３次元復元"，信学論（Ｄ），Vol.J71-D,No.10,pp.2032-2040(1988.10).

[1.9] 光本，岡崎，田村，梶見，副井："局所的回転対称性を利用した面対称物体の単眼視からの復元"，信学論（Ｄ），Vol.J71-D,No.10,pp.2041- 2049(1988.10).

[1.10]光本，岡崎，田村，梶見，副井："複数の鏡像を含む単眼画像からの面対称復元手法による隠れのない３Ｄ物体復元"，信学論（Ｄ），Vol.J71-D,No.11, pp.2300-2310 (1988.11).

[1.11]D.Terzopoulos:"The computation of visible-surface representations", IEEE Trans. on PAMI.,10,pp.417-438(1988).

[1.12]D.Terzopoulos,J.Plat,A.Barr and K.Fleischer:"Elastical deformable models",Computer Graphics,21,4,pp.205-214(1987).

＜参考文献＞

第２章

[2.1] T.Kanade:"Recovery of the three-dimensional shape of an object from single view", Artificial Intelligence, Vol.17, pp.409-460 (1981).

[2.2] 尺長，金子："透視角度変換－角度情報からの形状情報復元－"，信学論（Ｄ），J70-D,10,pp.1931-1940（1987.10）.

[2.3] J.R.Kender:"Shape from Texture",Carnegie-Mellon University Computer Science Report CMU-CS-79-153(1980).

[2.4] 中谷，北橋："無限遠点を用いた情景中の対象物の３次元構造の復元"，信学論（Ｄ），J68-D,8,pp.1481-1488(1985.08).

[2.5] 光本,岡崎,田村,梶見,副井："面対称性に基づく単眼視からの３次元復元"，信学論（Ｄ）,Vol.J71-D,No.10,pp.2032-2040(1988.10).

[2.6] R.O.Duda and P.E.Hart:"Pattern classification and scene analysis", pp.407-411,John Wiley & Sons,New York(1973).

[2.7] P.V.C.Hough,:"Method and Means for Recognizing Complex Patterns", U.S.Patent 306954, December 18,1962.

[2.8] 田村，光本，梶見，岡崎，副井："複数枚の鏡像を含む単眼画像からの面対称復元手法による隠れのない３Ｄ物体復元"，情報処理学会コンピュータビジョン研究会資料，CV52-02(1988).

[2.9] 田村，光本，岩本，梶見，岡崎，副井："面対称性に基づく単眼視からの３次元復元"，信学技報，IE86-129，PRU86-130(1987).

[2.10]T.Poggio , V.Torre and C. Koch:"Computational vision and regularization theory",Nature,317,pp.314-319(1985).

第３章

[3.1] S.Ullman:"Interpretation of visual motion",MIT Press,Cambridge, MA(1979)

[3.2] H.-H.Nagel:"Representation of moving rigid objects based on visual

<参考文献>

observation",Computer,vol.14,No.8,pp29-39(1981)

[3.3] H.Westphal and H.-H.Nagel:"Toward the derivation of three-dimensional descriptions from image sequence for nonconvex", Computer vision,graphics,and image processing 34, pp302-320(1986)

[3.4] 光本,岡崎,田村,梶見,副井:"局所的回転対称性を利用した面対称物体の単眼視からの復元",信学論(D),Vol.J71-D,No.10,pp.2041-2049(1988.10).

[3.5] 光本, 岡崎, 副井, 田村:" 面対称性にもとづく単眼視からの3次元復元", 情報処理学会, 3P-2(1986.10).

[3.6] 山口:" コンピュータディスプレイによる図形処理工学", pp.108-133, 日刊工業新聞社(1981).

[3.7] H.J.Lee and Zen.Chen:"Determination of human body postures from a single view",Computer Vision,Graphics,and Image Processing,30, pp.148-168(1985)

[3.8] J.J.More and M.Y.Cosnard:" Numerical solution of nonlinear equations",ACM Transaction on Mathematical Software,Vol.5,No.1, pp.64-85(1979).

[3.9] 田村, 光本, 岩本, 梶見, 岡崎, 副井:" 面対称性に基づく単眼視からの3次元復元", 信学技報, IE86-129,PRU86-130,pp.61-68(1987).

[3.10]S.A.Friedberg:" Finding axes of skewed symmetry", Comput. Vision ,Graphics & Image Process. ,34,pp.138-155(May 1986).

[3.11]呉, 浅田, 辻:" 図形中に存在する斜め対称軸の抽出", 信学論(D), J70-D, 3, pp.553-559(1987.03).

第4章

[4.1] 光本,岡崎,田村,梶見,副井:"面対称性に基づく単眼視からの3次元復元", 信学論(D),Vol.J71-D,No.10,pp.2032-2040(1988.10).

[4.2] 光本,岡崎,田村,梶見,副井:"局所的回転対称性を利用した面対称物体の単眼視からの復元",信学論(D),Vol.J71-D,No.10,pp.2041-2049(1988.10).

＜参考文献＞

[4.3] M.Idesawa:"A New Type of Miniaturized Optical Range Sensing Scheme",Proc.7th ICPR,pp.902-904(1984).

[4.4] 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,pp.995-1002（1987.05）.

[4.5] 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，52/1/1986,pp.149-155（1986.01）.

[4.6] R.O.Duda and P.E.Hart,"Pattern classification and scene analysis", pp.407-411,John Wiley & Sons,New York(1973).

関連発表論文

論文誌

本論文に関して

[1] 光本,岡崎,田村,梶見,副井："面対称性に基づく単眼視からの３次元復元",信学論（Ｄ）,Vol.J71-D,No.10,pp.2032-2040(1988.10).

[2] 光本,岡崎,田村,梶見,副井："局所的回転対称性を利用した面対称物体の単眼視からの復元",信学論（Ｄ）,Vol.J71-D,No.10,pp.2041-2049(1988.10).

[3] 光本,岡崎,田村,梶見,副井："複数の鏡像を含む単眼画像からの面対称復元手法による隠れのない３Ｄ物体復元",信学論（Ｄ）,Vol.J71-D,No.11, pp.2300-2310 (1988.11).

[4] H. Mitsumoto, S. Tamura , K. Okazaki , N. Kajimi,and Y. Fukui:"3D Reconstruction using mirror images based on plane symmetry Recovery Method" , IEEE Trans. on PAMI. (to appear).

その他

[1] 光本,岡崎,梶見,田村,河合,副井："エネルギー関数とオプティカルフローを用いた口唇輪郭の抽出・補完と追跡",情報処理学会論文誌,Vol.31,No.3, pp.444-453(1990.03).

[2] 呉,田村,光本,河合,黒須,岡崎："音声・口形特徴量を併用するニューラルネットを用いた母音認識",信学論（ＤⅡ）,Vol.J73-D-Ⅱ,No.8, pp.1309-1314(1990.08).

[3] 河合,岡崎,大野,田村,可児,光本,副井："ランダムドットステレオグラムによる立体知覚時眼球輻輳運動の解析", テレビジョン学会誌, Vol.45, No.1, pp.77-85(1991.01).

[4] 岡崎,光本,田村,河合,可児,信岡,副井："エネルギー関数を用いた角膜内皮細胞の輪郭抽出と補完",Medical Imaging Technology,Vol.9, No.4,pp.45-50(1991.09).

[5] J.T.Wu, S.Tamura, H. Mitsumoto, H. Kawai, K. Kurosu,and K. Okazaki: "Neural vowel-recognition jointly using voice features and mouth

shape image " , Pattern Recognition, Vol. 24, No. 10, pp. 921-927(1991).

シンポジウム

本論文に関して

[1] K. Okazaki, H. Mitsumoto, Y. Fukui, and S. Tamura:"3-D recovery based on plane symmetry from single view image", Regional Symposium on Computer Science and Applications, Bangkok, Thailand(1987. 01)

[2] K. Okazaki, H. Mitsumoto, N. Kajimi, Y. Fukui, and S. Tamura:"Occlusion-free 3D recovery using mirror images", 9th International Conference on Pattern recognition, Italy(1987. 10)

その他

[1] K. Okazaki, H. Taketani, H. Mitsumoto, S. Tamura, H. Kawai, and Y. Fukui: "Detection and normalization of pattern location by neural network", Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, Nov. 14-16, Japan(1990. 11).

[2] K. Okazaki, H. Taketani, H. Mitsumoto, S. Tamura, T. Hoshi, S. Torii, M. Iwasaki, and Y. Fukui:"Neural approach to remote sensing image classification", Procific 10th Asian Conference on Remote Sensing, pp. (H-2-6-1) - (H-2-6-6), Malaysia(1989. 11).

[3] K. Okazaki, Y. Nobuoka, H. Mitsumoto, S. Tamura, G. Shi, T. Hoshi, K. Torii and Y. Fukui:"Coause-fine classification of landsat image using neural network ", Proceeding of the 11th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 1990) , pp. (H-1-3-1)-(H-1-3-6), China(1990. 11).

[4] K. Okazaki, H. Mitsumoto, S. Tamura, H. Kawai, K. Kani, H. Taketani, and Y. Fukui:"Contour extraction and complement of corneal endothelial cell using energy function", First Korea-Japan Joint Conference on Computer Vision , pp. 495-499, Korea(1991. 10).

研究報告

本論文に関して

[1] 田村,光本,岩本,梶見,岡崎,副井："面対称性に基づく単眼視からの３次元復元",信学技報,IE86-129,PRU86-130(1987.03).

[2] 光本,梶見,岡崎,副井,田村："部分的回転対称性を利用した面対称物体の単眼視からの復元",信学技報,PRU87-13,pp.57-64(1987.05).

[3] 田村,光本,梶見,岡崎,副井："複数の鏡像を含む単眼画像からの面対称復元手法による隠れのない３Ｄ物体復元",信学技報および情処会コンピュータビジョン研究会資料,PRU88-2(1988.01).

その他

[1] 岡崎,山本,光本,副井,田村："超音波エコーアクイジションシステムの試作研究",計測自動制御学会中国支部研究会(1987.09).

[2] 田村,光本,梶見,岡崎,副井,河合："エネルギー関数とオプティカルフローを用いた口形輪郭の抽出・補完と追跡",信学技報,PRU89-20,pp.9-16(1989.06).

[3] 呉,田村,光本,河合,黒須,岡崎："口形・音声統合ニューロ母音認識",テレビジョン学会視聴覚技術研究会,pp.1-6(1989.09).

[4] 竹谷,岡崎,光本,田村,河合,副井："ニューラルネットワークによるパターン位置の抽出と正規化",信学技報,PRU89-93,pp.33-39(1990.01).

[5] 河合,岡崎,大野,田村,可児,光本,副井："Random-Dot Stereogram立体知覚時の眼球運動解析",テレビジョン学会技術報告,Vol.14,No.50,pp.25-30,VAI'90-3(1990.09).

[6] 光本,田村,岡田,増山："バウンドラインプロセス",信学技報（発表予定）(1991.12)

口頭発表

本論文に関して

[1] 光本,岡崎,副井,田村："面対称性にもとづく単眼視からの３次元復元",情報処理学会,3P-2(1986.10).

[2] 光本,岩本,梶見,岡崎,副井,田村："面対称性にもとづく単眼視からの３次元復元（２）",情報処理学会,4D-4(1987.03).

[4] 光本,梶見,岡崎,副井,田村："面対称復元手法による鏡像立体視",情報処理学会,5J-2,pp.2041-2042(1987.09).

[5] 光本,梶見,岡崎,副井,田村："複数の鏡像を含む単眼画像からの面対称復元手法による隠れのない３Ｄ物体復元",情報処理学会,5W-5(1988.03).

[6] 光本,岩本,梶見,岡崎,副井,田村,"面対称関係にある線分の単眼視からの復元（１）－任意方向対称軸の場合－",昭和６２年電気四学会中国支部大会,102112,p.218(1986.10).

[7] 光本,岩本,梶見,岡崎,副井,田村,"面対称関係にある線分の単眼視からの復元（２）－鉛直方向対称軸の場合－",昭和６２年電気四学会中国支部大会,102113,p.219(1986.10).

[8] 光本,梶見,竹谷,岡崎,副井,田村,"面対称復元手法による鏡像からの３次元復元",昭和６２年電気四学会中国支部大会,112223,p.265(1987.10).

[9] 梶見,光本,大野,岡崎,副井,田村："単眼視からの面対称物体復元の実験的考察－隠れのある場合－",昭和６２年電気四学会中国支部大会,112222,p.264(1987.10).

[10]岡崎,光本,副井,宇田,吉田,河野,田村："鏡像３Ｄ復元法を利用した画像処理による体積の測定",昭和６２年電気四学会中国支部大会,112224,p.266(1987.10).

その他

[1] 田村,光本,河合,岡崎,副井,黒須："ニューラルネットワークによる口形からの母音識別",情報処理学会,5W-9,p.1643(1988.09).

[2] 梶見,竹谷,岡崎,副井,田村,光本："エネルギー関数を用いた口形輪郭の抽出",情報処理学会,3V-7,p.1551(1988.09).

[3] 大野,岡崎,副井,河合,光本,田村,可児："ＲＤＳ提示時における両眼眼球運動計測",情報処理学会,pp.2236-2237(1989.10).

[4] 竹谷,岡崎,光本,田村,星,鳥居,岩崎,副井："リモートセンシングマルチスペクトル画像のニューラルネットを利用した分類",情報処理学会,p.495(1989.10).

[5] 竹谷,光本,田村,河合,岡崎,副井："ニューラルネットワークによる２次元パターン位置の正規化",情報処理学会(1990.9).

[5] 竹谷,光本,田村,河合,岡崎,副井："ニューラルネットワークによる２次元パターン位置の正規化",情報処理学会(1990.9).

[6] 光本,田村,河合,可児,"エネルギー関数によるヒトの角膜内皮細胞の形状抽出・補完",日本ＭＥ学会,p.353(1989.05).

[7] 河合,田村,光本,可児,大野,岡崎："ＲＤＳによる立体視メカニズム分析－眼球運動の立場から－",日本ＭＥ学会,p.68(1989.05).

[8] 光本,田村："ホップフィールドネットワークによるデータ平滑化",1990年信学会全国大会,D-28,p.6-28(1990.10).

[9] 河合,岡崎,大野,田村,可児,光本："ＲＤＳによる立体知覚時の眼球運動解析",1990年信学会全国大会,p.6-504(1990.10).

[10]光本,田村："バウンド機能を入れたラインプロセス",1991年信学会全国大会,D-55,p.6-55(1991.03)

[11]岡田,増山,光本,田村："視覚領における方向性検出器間の抑制モデル",1991年信学会全国大会,SD-2-1,p.6-303(1991.03).

[12]梶見,竹谷,岡崎,副井,田村,光本："対称性拘束を入れたエネルギー関数による口形輪郭の抽出",昭和６３年度電気四学会中国支部大会,102318,p.196(1988.10).

[13]竹谷,梶見,岡崎,副井,田村,光本,河合："ニューラルネットワークによる位置の正規化学習",昭和６３年度電気四学会中国支部大会,102319,p.197(1988.10).

[14]岡崎,副井,光本,田村,河合,郡司,浅川,稲林,小川："ニューラルネットワークによる複数人の口形からの母音識別",昭和６３年度電気四学会中国支部大会,102320,p.198,(1988.10).

[15]竹谷,岡崎,副井,田村,光本,河合："ニューラルネットワークによる位置の正規化学習",平成１年度電気四学会中国支部大会,112412,p.216(1989.10).

[16]竹内,大野,岡崎,副井,河合,光本,田村,可児："ＲＤＳ呈示時における両眼眼球運動計測－－実験システム－－",平成１年度電気四学会中国支部大会,112413,p.217(1989.10).

[17]大野,竹内,岡崎,副井,河合,光本,田村,可児："ＲＤＳ呈示時における両眼眼球運動計測－－立体知覚実験－－",平成１年度電気四学会中国支部大会,

112414, p. 218(1989. 10).

[18]久野, 信岡, 岡崎, 副井, 光本, 田村, 河合, 可児："ヒトの角膜画像における内皮細胞形状抽出のための前処理", 平成２年度電気四学会中国支部大会, 092416, p. 210(1990. 10).

[19]竹内, 田中, 岡崎, 副井, 大野, 河合, 光本, 田村, 可児："複数のＲＤＳパターンを呈示したときの立体知覚時の眼球運動解析", 平成２年度電気四学会中国支部大会, 092417, p. 211 (1990. 10).

[20]小池, 信岡, 岡崎, 副井, 光本, 田村, 星, 鳥井, 馬庭："パソコンを用いたマルチスペクトル衛生画像のニューラルネットによる分類", 平成２年度電気四学会中国支部大会, 092418, p. 212(1990. 10).

[21]信岡, 久野, 岡崎, 副井, 光本, 田村, 河合, 可児："エネルギー関数による角膜細胞の欠落形状の抽出・補完", 平成２年度電気四学会中国支部大会, 092419, p. 213(1990. 10).

[22]竹内, 岡崎, 副井, 光本, 田村, 吉野, 鳥井, 副井："運動方程式を考慮した両眼立体視による流体の３次元解析, 平成２年度電気四学会中国支部大会, 092420, p. 214(1990. 10).

[23]光本, 田村："バウンドラインプロセスによる初期視覚処理統合", 平成３年電気関係学会関西連合大会, S9-5, p. S60(1991. 11).

その他参考となる資料

[1] 光本："リモートセンシングマルチスペクトル画像のニューラルネットを利用した分類", ＮＥＣニューロコンピュータフォーラム(1989. 11).

[2] J. Wu, S. Tamura, H. Mitsumoto, H. Kawai, K. Kurosu, and K. Okazaki : "Neural Vowel-Recognition Jointly Using Voice Features and Mouth Shape Image", System & Computers in Japan, SCRIPTA TECHNICA INC, BOOK.