

最大クリークによる物体の4自由度復元と認識

深田陽司

三菱電機産業システム研究所

〒661 尼崎市塚口本町8-1-1

物体がワールド座標系に対して鉛直軸まわりの回転と3軸方向へ平行移動している状況における、単眼画像からの4自由度復元と物体認識について述べる。物体稜との対応仮定には、頂点を必ずしも含まない部分画像エッジを採用する。まず、エッジの対応を仮定した時回転角が2意にきまること、平行移動に対する拘束が平面であることを示す。手法の手続きは、エッジ対応より回転角を算出(即ち、仮説を生成)する。仮説集合からエッジの解釈と回転角が互いに適合するクリーク群を抽出する。各クリーク内の画像エッジに対して平面を求め、これらの交点として平行移動を算出し、クラスタリングによって解候補を見つける。解候補を用いて物体像を作成し、画像エッジとの一致度によって解を決定する。

Structure Recovery and Object Recognition
using Cliques of Hypotheses

Youji FUKADA

Industrial Electronics & Systems Development Lab., Mitsubishi Electric Co.

8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661, Japan

In this paper, a new algorithm for 4 degrees of freedom and recognition of polyhedrons has been proposed. Image features corresponding to object ones are edge segments. The constraint for rotation is derived using a Gaussian sphere. The constraint for translation is newly derived and shown to be a plane. First, every possible hypothesis composed of edge interpretation and rotation angle is made by hypothesizing the correspondence between each image edge and every object edge. Second, cliques composed of compatible hypotheses are constructed. Translational parameters are calculated using hypotheses in each clique and candidates are determined by clustering. Finally, solutions are determined by testing the coincidences between original image edges and constructed ones using them.

1. ま え が き

画像からそれに投影された物体の3次元の構造(即ち、位置・姿勢)を復元することは、物体認識や環境理解などの知的処理を行なう知能ロボットの開発にとって必須である。それ故、復元・認識はコンピュータビジョンの重要課題であり、復元に関してはいわゆる"Shape from X"(面の傾きの復元)とか"Structure from X"(面の傾きと奥行きの復元)とか呼ばれて精力的に研究されている⁽¹⁾。

構造復元問題においては、ステレオビジョンは人間の両眼立体視機能に見られるように自然な方法であり、しかも特定の物体を想定しないので初期視覚における重要なプロセスの一つであるが⁽²⁾、複数枚の画像間における特徴の対応問題が依然障害として残されている。それ故、一方のカメラのかわりに能動的に投光する方式が開発され、広く活用されている。しかし、複数枚の画像を処理しなければならない、装置がおおがかりになってしまう、光源としてレーザを用いる場合には危険である等の工学的実用上の問題が残る。

3次元構造はステレオでなくても1枚の画像にも含まれていることが知られており、絵画はいくつかの面の向きや奥行きの手がかりを含むように描かれているので我々には立体的に見える⁽³⁾。そこでこれらの手がかりを利用して単眼から構造を復元する手法が数多く研究されている⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾。これらの文献のうち前二者は形状復元であり、他は構造復元である。文献⁽⁶⁾では代数式により解の数を論じている。復元に際して使われる画像特徴は様々であるが、エッジはそのうちで最も典型的な特徴である⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。特に室内等の人工的な環境や都市では屋外においても多面体が数多く存在するので、有効な特徴である。

物体は一般的には3次元空間で6自由度(回転3と平行移動3)を持つ。文献⁽⁵⁾では画像特徴として2本のエッジでできるL角を採用し形状復元のための基本的で強力な拘束を導出している。ここで環境理解に限ると、自由度は3⁽⁷⁾又は4⁽⁸⁾に制限できる場合が多い。つまり、回転1と平行移動2又は3である。

3(又は4)自由度復元の研究においても採用されている画像特徴はL角であり、この時には頂点位置情報を利用して平行移動パラメータが算出されている。しかし、画像内に多数の物体が重複して見える状況や普通の照明を考えると、各物体の構造復元・認識に充

分な数のL角が得られることはまれである。2本の孤立したエッジのペアとしてL角とみなす場合には、組合せの爆発等の問題が生じる。

認識手法としては、仮説検証法、ハフ変換、弛緩法や最近ではコネクショニストのアプローチ⁽⁸⁾等の手法が研究されている。このうち仮説検証法は逐次処理であり、その他は並列処理である。いずれにも長所と短所があるが、最近では目や脳の構造を考慮にいたした局所並列処理機構の研究がさかんになっている。

本論文では、画像特徴と物体特徴の対応仮定には頂点を必ずしも含まない部分エッジを採用する。そして幾何モデルを持つ多面体の4自由度復元・認識を中心に投影された単眼画像より行なう。まず、エッジの対応を仮定した時回転角が2意にきまること、平行移動に対する拘束が平面であることを示す。4自由度復元・認識の手続きは、エッジ対応より回転角を算出(即ち仮説を生成)する。全ての仮説集合から、エッジの解釈と回転角が互いに適合する最大の集合(クリーク)群を抽出する。次に、クリーク内の画像エッジ群に対して平面を求め、これらの交点として平行移動を算出し、クラスタリングによって解候補をみつける。解候補の決定に寄与したエッジ群が対象物体の稜に対応しているはずなので、解候補を用いて物体の像を作成し画像エッジとの一致度によって解を決定する。

2. 問題設定

2.1 座標系

3次元空間における物体は一般的には6自由度をもつが、本論文では自由度4(回転1と平行移動3)に制限する。自由度4の状況の典型的な例として、物体が鉛直軸まわりのみの回転と垂直・水平方向へ平行移動している情景を考える。このような情景には、ロボットの環境認識やベルトコンベア上に製品が安定姿勢で流れてくる場合等がある。対象とする物体は多面体であり、1つの物体モデルは2つの頂点情報からなる稜線群で構成されている。情景には複数個の物体が含まれており、それらは同種の物体でもよい。

図1に示すように、ワールド座標系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 、カメラ座標系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 、物体座標系 $O_n X_n Y_n Z_n$ 、画像座標系 $O_i U V$ を設定する。これらの座標系はすべて左手系である。本論文では点やベクトルの、それぞれの座標系における表現を区別するために上に述べた順に、 $(\cdot)$ 、 $\langle \cdot \rangle$ 、 $[\cdot]$ 、 $\{\cdot\}$ の表記を使用する。回転は軸の正方向からみて時計まわりとする。

2. 2 座標系間の関係

カメラ座標系はワールド座標系から $t_c = (t_x, t_y, t_z)$ 平行移動しており、 Y_c, X_c, Z_c 軸まわりに β ($-\pi \leq \beta < \pi$), α ($-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$), γ ($-\pi \leq \gamma < \pi$) 回転しているとする。この時、点 P 及びベクトル E は回転行列を R_{cu} とすると

$$\begin{aligned} (P) &= \langle P \rangle R_{cu} + t_c, \\ (E) &= \langle E \rangle R_{cu} \end{aligned} \quad (1)$$

の関係にある。行列の具体的表現は下段に示す。

カメラ光軸は Z_c 軸と一致しており、画像面は Z_c 軸上の焦点距離 f の位置、つまり $\langle 0, 0, f \rangle$ にある。すると、点 $P = \langle X, Y, Z \rangle$ が画像上の点 $p = \{u', v'\}$ に中心投影される時、これらの値には次の関係

$$u = f_x X/Z, \quad v = f_y Y/Z \quad (2)$$

がある。ここで、アスペクト比を r とする時、 $u = u', v = v' r$ である（以下の展開においては、画像座標値 u', v' が与えられた時、この関係にある u, v を使用する）。 f_x は u 軸方向の焦点距離（単位は画素）である。

構造復元・認識に先だて、カメラ及びカメラ座標系に関するこれらのパラメータは既知とする⁽⁹⁾。

物体座標系とワールド座標系の Y 軸方向は一致しており、物体座標系は Y_M 軸まわりに θ 回転し $t_n = (T_x, T_y, T_z)$ 平行移動しているとする。この時点 P 及びベクトル E は回転行列を R_{nu} とすると (1) と同様の

$$\begin{aligned} (P) &= [P] R_{nu} + t_n, \\ (E) &= [E] R_{nu} \end{aligned} \quad (3)$$

の関係にある。行列の具体的表現は下段に示す。

問題は上記の (1) ~ (3) で関係づけられた単眼画像上のエッジと物体稜の対応をとることにより、4 つの自由度 (t_n と θ) を決定することである。なお、本論文ではエッジは不完全でもよい。即ち、物体頂点像は検出されていなくてもよい。

3. エッジ対応による移動量の決定

3. 1 回転角の算出

物体 (図2 参照) の回転は鉛直軸まわりのみなので、物体の任意の回転角に対して Y_w 軸と物体稜はそれに固有な一定の角度を成す。このことを O_w を中心とするガウス球を用いて示すと、物体稜 A の単位方向ベク

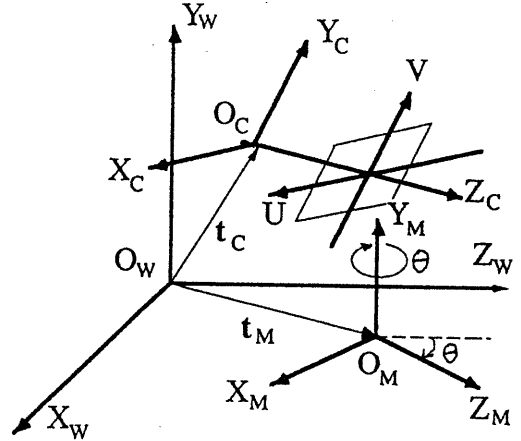


図1 座標系の設定

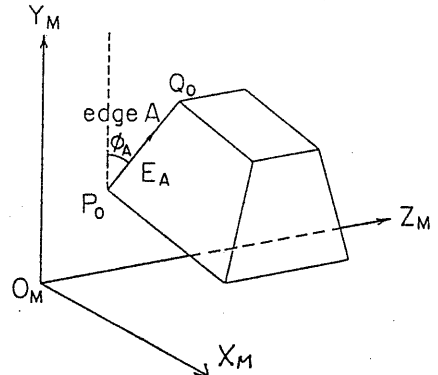


図2 物体モデル

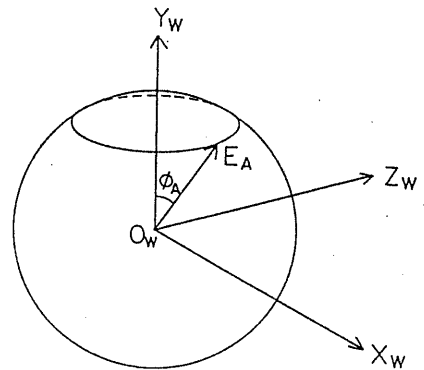


図3 物体稜に対する拘束

$$R_{cu} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma \\ -\cos \beta \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma & \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma \\ \cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad R_{nu} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

トル E_n は図3における軌跡上に存在する。

次に画像エッジ pq について考えると、図4に示すように pq に対応する3次元空間の稜 PQ は、 O_c と pq でできる平面 Γ 上に存在するから、 Γ の単位法線ベクトル E_n と直交する。即ち、図5に示すように PQ の方向単位ベクトル E_L は O_w を中心とするガウス球において E_n を法線とする大円上になければならない。以下において、まず (E_n) を算出する。

視点 O_c から画像上の点 $p = \{u_o', v_o'\}$, $q = \{u_o'', v_o''\}$ への視線ベクトル上の単位ベクトルを E_o 、 E_o' とすると、 Γ の単位法線ベクトル E_n は

$$E_n = E_o \times E_o' / |E_o \times E_o'| \quad (4)$$

となる。ここで、 $\times$ はベクトル積を表し $|E|$ はベクトル E の大きさを表す。

視線単位ベクトルは、 $E_i = 1 / \sqrt{u_i^2 + v_i^2 + f_x^2} \langle u_i, v_i, f_x \rangle$, ($i = p, q$) と表せるので、 E_n のカメラ座標系表現 $\langle E_n \rangle = \langle n_x, n_y, n_z \rangle$ は

$$\begin{aligned} n_x &= f_x (v_o - v_o') / \sqrt{d}, \\ n_y &= -f_x (u_o - u_o') / \sqrt{d}, \\ n_z &= (u_o v_o - u_o' v_o') / \sqrt{d} \end{aligned}$$

と計算できる。ここで、

$$d = f_x^2 (v_o - v_o')^2 + f_x^2 (u_o - u_o')^2 + (u_o v_o - u_o' v_o')^2 \text{ である。}$$

よって、(1)の後者を用いて E_n のワールド座標系表現 $(E_n) = (N_x, N_y, N_z)$ が得られる。 E_{yw} を Y_w 軸の方向単位ベクトルとすると、 $E_n \cdot E_{yw} = N_y$ より E_n は Y_w 軸と

$$\eta = \cos^{-1} |N_y|, \quad (0 \leq \eta \leq \pi/2)$$

なる角を成している。

画像エッジ pq が物体稜 A の像であると仮定する時、 E_n が拘束される曲線(図3)と、 E_L が拘束される曲線(図5)は図6に示すように交点をもたねばならない。逆に交点をもたない時はこの仮定が成り立たないことを示している。以下に解(交点)を導く。

交点への単位ベクトルを $E = (a, \cos \phi_a, c)$ とすると、

$$E \cdot E_n = 0 \quad (5)$$

$$|E| = 1 \quad (6)$$

より、 a, c は

$$a = (-N_x N_y \cos \phi_a \pm N_z \sqrt{\sin^2 \phi_a - N_y^2}) / (1 - N_y^2)$$

$$c = (-N_y N_z \cos \phi_a \mp N_x \sqrt{\sin^2 \phi_a - N_y^2}) / (1 - N_y^2) \quad \text{複号同順} \quad (7)$$

と算出される。

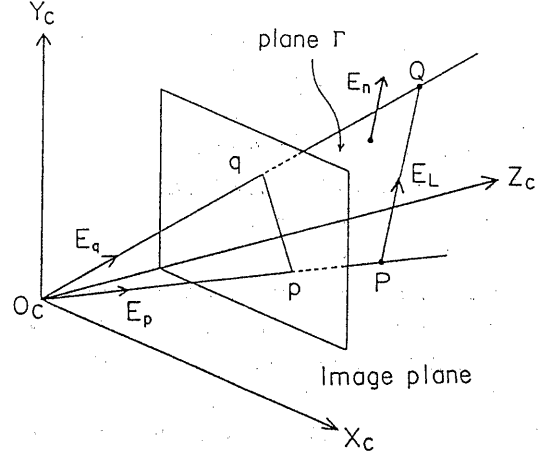


図4 中心投影

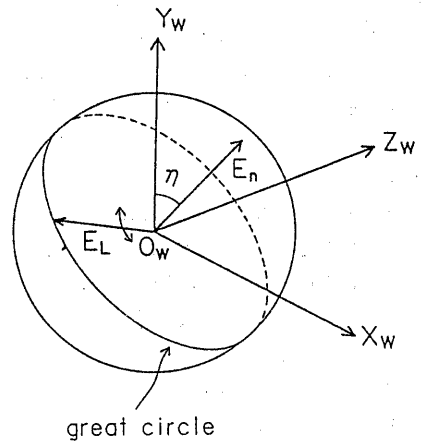
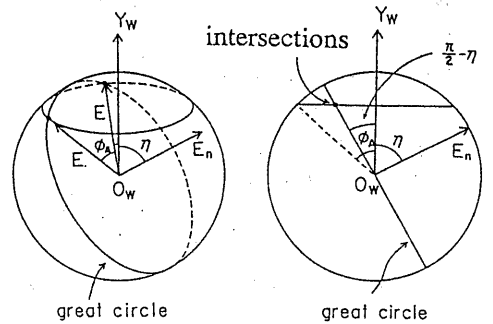


図5 画像エッジに対する拘束



(a) ふかん図

(b) 切断図

図6 物体稜と画像エッジの対応

ところで、物体稜Aは Y_n と ϕ_n 、 X_n と ψ_n の角を成すとする、Aの上向き単位方向ベクトル E_n は

$$E_n = [\sin \phi_n \cos \psi_n, \cos \phi_n, \sin \phi_n \sin \psi_n] \quad (8)$$

と表現される。ここで、 $0 \leq \phi_n \leq \pi/2$, $-\pi \leq \psi_n < \pi$ である。すると交点へのベクトルEが E_n だから、

$$(E) = (E_n) = [E_n] R_{nu} \quad (9)$$

に(8)を代入して展開することにより、

$$\begin{aligned} \sin(\psi_n - \theta) &= c / \sin \phi_n, \\ \cos(\psi_n - \theta) &= a / \sin \phi_n \end{aligned} \quad (10)$$

となるので、

$$\theta = \psi_n - \tan^{-1}(\sin(\psi_n - \theta) / \cos(\psi_n - \theta)) \quad (11)$$

に(7)で求めた2組のa、cを代入すると、2つの回転角 θ_1 、 θ_2 が求まる。

3.2 平行移動に対する拘束の導出

画像エッジpqが物体稜Aに対応するという仮定による回転角を θ とする。点Pはカメラ座標系において奥行き変数k。を用いると $\langle P \rangle = k \cdot \langle E \rangle$ と表せるから(1)に代入して整理すると、

$$(P) = k \cdot (E_0) + t_c$$

となる。(P)は(3)とも表現されているので、

$$k \cdot (E_0) = [P] R_{nu} - t_c + t_n \quad (12)$$

の関係にある。

本論文ではPQは部分稜でもよいとしているので、稜Aの頂点の1つを P_0 とし λ を線分 P_0P の長さを表す変数とすると、[P]は

$$[P] = [P_0] + \lambda [E_n]$$

と表せるので(12)に代入し(3)を適用すると、

$$k \cdot (E_0) = [P_0] R_{nu} + \lambda (E_n) - t_c + t_n$$

となる。すると、 E_n は E_0 及び E_n と直交しているので両辺と内積をとることにより、

$$([P_0] R_{nu} - t_c + t_n) \cdot (E_n) = 0 \quad (13)$$

が導かれる。

式(13)において $[P_0]$ と t_c は定数、 R_{nu} と (E_n) は算出されているので、変数は t_n における T_x 、 T_y 、 T_z の3つである。つまり、(13)は $T_x T_y T_z$ 空間で平面を表しており、 T_x 、 T_y 、 T_z は平面上に拘束されている。平面の法線ベクトルは (E_n) であり、定点 $t_c - [P_0] R_{nu}$ を通る。

ここで $T_0 = 0$ が成り立つ場合には T_x 、 T_z は直線 $N_x T_x + N_z T_z$

$$= (E_n) \cdot (t_c - [P_0] R_{nu}) \quad (14)$$

に拘束される。

4. 自由度復元と物体認識

4.1 仮説の生成

3.で展開した議論は、画像エッジと物体稜の対応がとれれば、物体座標系のワールド座標系に対する回転角が決定しその後平行移動が決定する、即ち4自由度の復元ができることを示している。

しかし、画像に対してなんらの情報も与えられないので、各画像エッジがどの物体稜に対応するかは不明である。そこで第一段階として、エッジと稜の対応を仮定しその時の回転角を仮説としてたてる。画像エッジeが物体稜Eに対応し、その時の回転角が θ と算出される時、仮説は以下に示す形式

$$H(e, E, \theta)$$

をしている。

ある画像エッジに対してあらゆる仮説(即ち、対象物体のモデルとして登録されている全ての物体稜との対応と回転角)をたてることを全ての画像エッジに対して行い、可能な仮説を全て生成する。

4.2 仮説の統合

まず仮説の適合性について述べる。2つの仮説を

$$H_i(e_i, E_i, \theta_i), H_j(e_j, E_j, \theta_j)$$

とすると、以下の条件(適合条件と呼ぶ)

$$1) e_i \neq e_j \text{ かつ } E_i \neq E_j$$

$$2) |\theta_i - \theta_j| \leq d\theta$$

を満たすならば H_i と H_j は適合するという。

仮説集合から互いに適合する仮説(以下において適合仮説と呼ぶ)を統合して、クリーク⁽¹⁰⁾を生成する。クリークは、その要素である任意の2つの仮説をとっても適合仮説である最大の集合である。クリークは次のようにして生成される。まずある仮説に注目し、これに適合する仮説をすべて集める。この仮説集合に対して、文献⁽¹⁰⁾を改良したクリーク生成アルゴリズム⁽¹¹⁾を適用する。これまでに生成されたクリークとの包含関係をチェックし、包含されるクリークを削除する。この操作を全ての仮説に対して行う。

4.3 平行移動

クリークに属する仮説は適合条件を満たしていればよく、対象物体の稜の像だけで構成されている保証はない。つまり復元された回転角が近似しているために、誤った画像エッジを対象物体の稜の像と判断している可能性がある。しかし物体が不透明であればこの画像エッジは画像上のあるべき位置からへだたっており、このような仮説による平行移動は正しい値とは大きく

かけ離れているはずである。このことを利用して平行移動の決定と誤った仮説の排除を行う。

クリークを構成する仮説の回転角の平均を復元された回転角として採用する。すると1つの仮説に対して平行移動は1枚の平面に拘束されるので、理論的には各平面上に拘束された点を全て T_x, T_y, T_z 空間に分布させればよいが、平面は無限遠までひろがっているのでこのままではハフ変換の考え方は使えない。次に平面の交線が考えられるが、交線も無限遠までのびているのでこのままでは使えない。そこで交線の交点を利用する。ところが誤差を含む画像から算出された線が3次元空間で交わることは期待できないので、直線間の最短距離とそれを与える直線上の点(最接近点)を求めて、2つの最接近点の中点を擬似的に交点とする⁽¹²⁾。交点の集合をクラスタリングし、各クラスターの平均を平行移動量の候補とする。

垂直移動が無い($T_z=0$)と分かっている場合には、1つの仮説から1本の拘束直線が得られるので、 T_x, T_y 面上の直線の交点を算出し、2次元空間のクラスタリングによって平行移動量候補を見つける。

4. 4 物体認識

復元された4自由度の検証を行う。復元値による対象物体の中心投影像を生成し、前節で抽出されたクラスターに寄与した仮説の画像エッジとの一致度を計算する。生成エッジと画像エッジは重複の度合いが大きく、距離が近いならば正しいとし、正しいエッジがある程度数の本数以上あるなら、復元値は正しいと判定する。

これらのエッジの集合として、対象としていた物体が認識される。情景理解のためには、画像中に存在すると期待される物体もしくはシステムに記憶されている全ての物体を対象にして本手法を順次適用する。

5. 実験結果

3次元構造復元手法の効果及び精度を検証するため、積木と事務用品を対象にして実験を行なった。幾何モデルは、稜の2端点をあらかじめメジャーで計測しこれらの稜集合として登録されている。基本的にはこれだけでよいが、本論文では以下の理由で、物体が厚みをもち稜を構成する面が存在する場合にはそれらの外向き法線ベクトルも記憶している。

仮説はあらゆる対応仮定によって生成されるので多数存在する。クリーク生成のための処理時間は仮説の数に大きく依存するので、次のようにして仮説の発生を抑制する。現実の物体は殆どが不透明であり、見え

ない稜が存在する(即ち、画像エッジとして存在しない)。この場合には仮説は不適切と判断できるので採用しない。復元角による2つの面の外向き法線ベクトルがカメラ座標系とともに正である時、見えない稜であると判断される。

情景画像は、Sobel微分、2値化、細線化、直線点列分割、直線近似される。画像の横縦は 512×480 画素である。図7に示す情景のうち、手前の立方体は $(80, 70, 60)$ mmの大きさであり、画像における内部の頂点Pをワールド原点としている。つまり、テーブル面は -70 mmの高さである。カメラ及びカメラ座標系のパラメータは実験にさきだって計測されており、以下の値である⁽⁹⁾。

$$\begin{aligned} \text{画像中心} &= (249.510, 229.736), \\ \text{rat} &= 0.9876, f_x = 2013.2 \text{ 画素}, \\ (\alpha, \beta, \gamma) &= (13.002, -36.890, \\ &\quad 0.526) \text{ 度} \\ (t_x, t_y, t_z) &= (668.0, 278.7, \\ &\quad -773.6) \text{ mm} \end{aligned}$$

節4. 4で述べた解の判定のための一致度は、重複度は0.8以上、エッジ間距離は5画素以下であればエッジは一致しているとし、一致エッジがモデルエッジ総数の $2/3$ 以上であれば解とする。

図7に示す積木情景の線画(図8)のエッジは26本である。右の三角錐を対象物体とする時、仮説総数は140本(透明とすると218本)、 $d\theta=9$ 度で統合した時3個以上の仮説から成るクリークは363個である。この時、解として2つのクリークが抽出された。1つは正解であり、4つの仮説より成っている。もう1つは同図において*をつけた4本のエッジに対する仮説より成っており、視点に近い値が平行移動として得られている。 $T_z=-70$ mmとした時は、正解のみ得られた。左の正三角錐台を対象とした時は、仮説数は291(透明なら371)本、 $d\theta=5$ 度で統合した時5個以上の仮説より成るクリークは550個である。この例では正解の3つ(物体は鉛直軸まわりに 120 度毎に対称)が得られた。

図9と10にパンチ器、図11と12にブックエンドの情景およびその線画を示す。前者のモデル稜は上部の回転部分の18本を、後者は8本採用している。後者は厚みのない物体なので、エッジがみえるかどうかの仮説生成抑制は施していない。

表1にこれらの物体の復元解(正しい解のみ)と正解を示す。

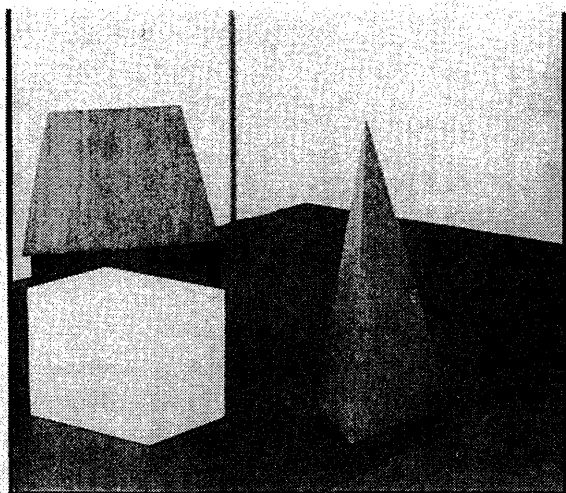


図7 情景1

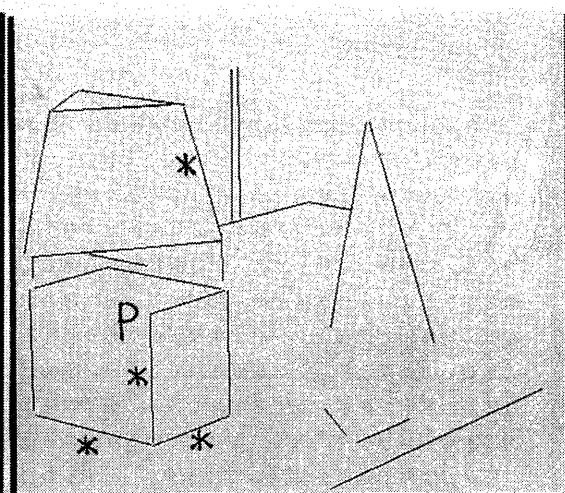


図8 エッジ画1

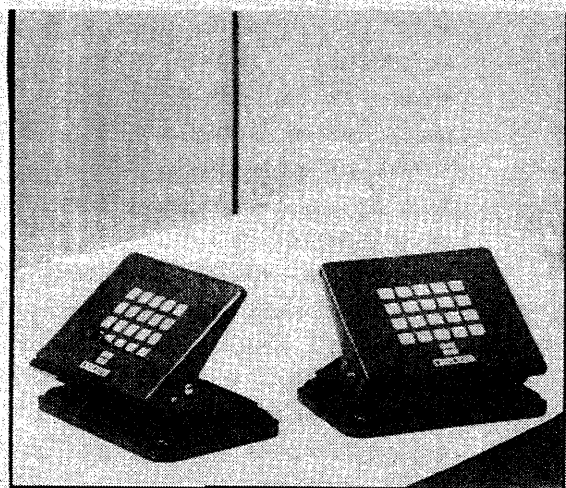


図9 情景2

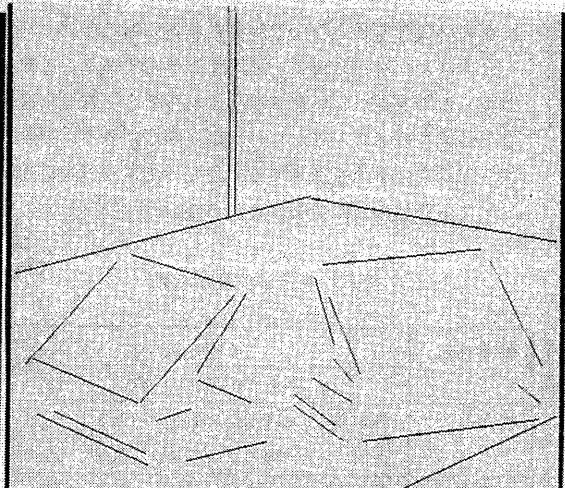


図10 エッジ画2

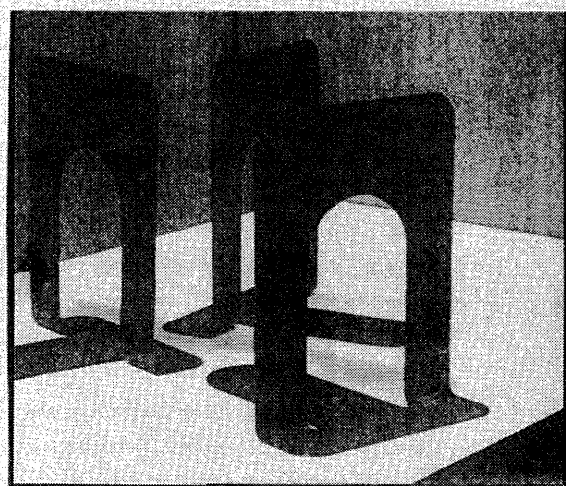


図11 情景3

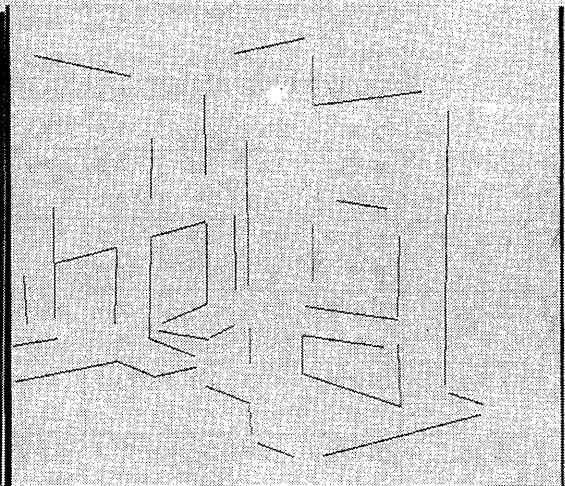


図12 エッジ画3

中心投影された単眼からの、幾何モデルをもつ物体の4自由度決定・認識手法を述べ実験を行なった。9個の復元精度は、回転角では1例(三角錐)を除いて2度以下、平行移動では3軸とも20mm以下の誤差である。平行移動に関しては、Y位置が既知の場合にはおおむねよりよい結果が得られている。回転角の誤差は、物体稜と画像エッジが急峻な場合少しの回転角のちがいで殆ど同じ画像が得られてしまい、画像処理誤差の影響を大きく受けるためである。復元誤差は避けえないエッジ抽出誤差にもよっているが、カメラパラメータは実験値を使用しており⁽⁹⁾、必ずしも正しい値ではないことに起因していると思われる。誤解は、物体単独でなく他のエッジの解釈をも考慮した総合的な情景理解の時点で解消されるであろう。

今後はより複雑な情景へ適用する予定である。その際多くの画像エッジが存在し、それらを全て対等に扱うと計算コストが大きくなり実用上問題がある。それ故、本論文の手法を適用するに先だってエッジを群化⁽¹³⁾するなどの方策が必要となろう。

表1 4自由度復元結果

対象物体		4 自由度			
		θ	T_x	T_y	T_z
三角錐	算出解	-44.7	67.3	-72.6	77.8
	正解	-50.0	80.0	-70.0	60.0
正三角錐台	算出解	-148.6	-89.2	-5.6	178.6
	正解	-150.0	-80.0	-4.0	160.0
	算出解	-28.5	-150.9	-5.5	78.4
	正解	-30.0	-140.0	-4.0	56.0
	算出解	91.5	-207.3	-5.5	182.2
	正解	90.0	-200.0	-4.0	160.0
左パンチ	算出解	12.9	-74.7	-65.9	-3.7
	正解	13.3	-80.0	-70.0	0.0
右パンチ	算出解	-61.7	89.7	-65.9	61.5
	正解	-60.8	80.0	-70.0	60.0
左本立	算出解	105.1	-120.1	-68.7	150.8
	正解	105.2	-120.0	-70.0	140.0
右本立	算出解	-165.6	105.8	-64.9	82.8
	正解	-164.8	100.0	-70.0	80.0
奥本立	算出解	-8.0	-136.8	-66.8	226.0
	正解	-7.5	-140.0	-70.0	220.0

- (1) Poggio T., Torre V. and Koch C. : "Computational vision and regularization theory", Nature, 317, pp.314-319(1985).
- (2) Marr D. : "Vision", Freeman(1982).
- (3) フリスビー J. P. 著/村山久美子訳: "SEEING シーイング 錯視-脳と心のメカニズム", 誠信書房(1982).
- (4) Ikeuchi K. and Horn B.K.P. : "Numerical shape from shading and occluding boundaries", Artificial Intelligence, 17, pp. 141-184(1981).
- (5) Shakunaga T. and Kaneko H. : "Perspective angle transform: Principle of shape from angles", Int. J. Computer Vision, 3, pp. 239-254(1989).
- (6) Fischler M.A. and Bolles R.C. : "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", CACH, 24, 6, pp.381-395(1981).
- (7) Silberberg T.M., Harwood D.A. and Davis L.S. : "Object recognition using oriented model points", CGVIP, 35, pp.47-71(1986).
- (8) 佐藤嘉伸, 田村進一: "パラメータ化モデルを用いた3次元物体認識: Hopfieldモデルによる並列探索アプローチ", 情報論, 31, 1, pp.56-67(1990-01).
- (9) 深田陽司: "回転方式によるカメラパラメータの算出", 情報研報, CV79-1, pp. 1-8(1992-09).
- (10) Ballard D.H. and Brown C.M. : "Computer Vision", Prentice Hall(1982).
- (11) 深田陽司: "L角対を用いた6自由度復元と物体認識", 情報研報, CV75-6, pp. 1-8(1991-11).
- (12) 深田陽司: "単眼画像における線特徴を用いた物体の平行移動の算出", 情報学第41回全国大会, 4M-9, pp. 2.192-2.193(1990-09).
- (13) Lowe D.G. : "Perceptual Organization and Visual Recognition", Kluwer Academic Publishers(1985).