

スパースな距離データを利用した多面体の姿勢決定の一手法

山本 裕之[†] 田村 秀行[†]

対象物体の CAD データ, スパースな距離情報と濃淡画像を利用した, 多面体物体の姿勢決定の一手法を報告する. 対象物体は単一種類であり, 水平な台上で重なりなく, 安定な姿勢にあると仮定する. 疎な距離データには, 密な距離画像と異なりエッジや領域などの特徴を抽出するための情報が不足している. 本手法では, (1) ドロネー網を利用してスパースな距離データを結び付け, (2) 濃淡画像から抽出されるエッジを融合し, (3) 対象物体の CAD モデルを利用することで, 物体に含まれる平面領域の抽出を行う. 対象物体が安定な姿勢にあるというトップダウン情報を加味することで, 効率的に平面に基づいた物体の記述を作成することができる. 次に, この記述とモデルとのマッチングを行い, 得られたマッチング結果に基づいて姿勢を決定する. 安定姿勢にある物体の姿勢の決定には, 3つの自由度を決定すればよい. 本論文では手法の説明と共に, 実データを用いた実験結果を通して本手法の有効性を確認する.

A Model-Based Approach for Localizing a Stable Polyhedron with Sparse 3-D Data

HIROYUKI YAMAMOTO[†] and HIDEYUKI TAMURA[†]

This paper describes a model-based approach for localizing a polyhedral object with the CAD data of the target, sparse range data and a gray image of the scene. We assume that the object is in a stable attitude, and is not occluded by other objects. Sparse range data do not contain enough information to detect edges and regions from the data as the dense range image does. To detect planar regions, we utilize the Delaunay diagram that connects sparse data, and merge it with the edge information detected from the gray image of the scene. The local geometric constraints and the global view constraints, which are derived from the CAD data, make the scene description efficiently as well as consistent matches between the scene description and the object model. All the system configuration, methods and experimental results are shown in this paper.

1. はじめに

生産ラインの自動化のための視覚システムでは, 処理対象となる部品の CAD モデルがあらかじめ得られていることが多い. 視覚システム自身がこれらの知識を積極的に利用すること (Model-Based Vision) で, 物体認識のためのプログラム開発時間が短縮され, 効率的な視覚処理が可能となると期待される^{1), 2)}. この点を踏まえて, われわれは多面体部品の CAD モデルと, 各画素に 3次元情報を持った密な距離画像を利用した物体の姿勢決定手法を報告した³⁾. 3次元情報の入力に関しては, スパースな (距離値が得られる点の分布が空間的に疎な) データを利用することで, 密な距離画像を利用する場合に比べてセンサのコストダウン, 入力時間の短縮が期待できる. 本稿では, シーンの

入力として CCD カメラで入力される濃淡画像と, スポット光をシーンにランダムに照射する⁴⁾等して入力される空間的にスパースな点の 3次元データを利用した手法を述べる. ここで, 対象とする部品は, 台上で重ならず安定姿勢の状態にある単一の多面体とする.

安定姿勢の状態にある物体の姿勢を決定するためには, 台上で平行移動の自由度 2 と台に垂直な軸周りの回転の自由度 1, 合計 3 自由度を決定しなければならない. 3 自由度の姿勢決定を扱った Model-based Vision 手法に Silberberg らの手法⁵⁾がある. 彼らの手法では濃淡画像のみを利用し入力装置が簡便である. しかし, そのためにモデルと画像中の特徴の照合に 3次元的な幾何拘束を利用できない. そこで, 画像から抽出される頂点とモデルに登録されている頂点のすべての組み合わせについて 3つの自由度を計算し, 頻度高く算出される自由度の組み合わせを姿勢の候補とし, 照合を求めている. しかし, 3次元情報を直接

[†] キヤノン株式会社情報メディア研究所
Media Technology Laboratory, Canon Inc.

用いることで、効率的に照合が行えるようになる。

スパースな計測点の3次元データを利用した物体認識・姿勢計算に関する研究には、Grimson らの手法⁶⁾がある。この手法では、スパースな計測点が3次元の位置情報とその点の法線ベクトルの情報を含んでいることを仮定し、これらの情報に基づいた幾何拘束を利用して、計測点が物体モデルのどの面上にあるかを効率的に決定している。しかし、3次元の位置情報と法線ベクトルを同時に入力する手法に関して何ら述べられておらず、レーザスポット光を用いた3次元計測データをこの手法に適應するためには、法線ベクトルを求める処理が必要となる。

吉武ら⁷⁾は、法線ベクトルとその始点の画像上での位置の情報を含んだスパースな計測点を利用した手法を発表している。ドロネー網を利用してスパースなデータからボトムアップ的に平面領域を形成し、平面領域と物体を構成する面との対応を求めることで多面体物体の姿勢を決定している。この手法を拡張して、ドロネー網を利用して離散的な3次元位置データから法線ベクトルを求めることができる。

こうした従来の研究成果を踏まえ、本稿で述べる手法では、

- ドロネー網⁸⁾を利用することで隣接するスパースな3次元データを相互に結び付け、
- 濃淡画像から抽出されるエッジを融合し、
- 物体が安定な姿勢にあるという仮定とCADモデルを利用したトップダウン的な情報を加味する

ことで、スパースなデータを平面領域に効率的に統合する。次に、得られた平面領域とモデルとのマッチングをCADモデルから求まる幾何拘束を用いて行い、得られたマッチング結果に基づいて姿勢を決定する。以下、本論文では問題の設定から始め、本手法の詳細、および実データに対する実験結果について述べる。

2. 問題設定と手法の概略

本稿では、単一種類の多面体物体について、

- 対象物体が可能な安定姿勢のうち、どの状態にあるかを判定し、
- その姿勢（3次元空間での位置と方向）を決定する

問題を扱う。これは、生産ラインの部品組立工程における自動組立ロボットの視覚系にとって、現実的かつ重要な課題である^{5),9)}。シーンの入力環境は、

- 濃淡画像とスポット光をランダムに照射するなどして入力される空間的にスパースな点の画像上での位置と3次元座標を入力する
- 対象物体は水平な台上に重なり合わず安定な姿勢に置かれている
- カメラや3次元入力装置は台の真上からシーンを観察する

の条件を満たすと仮定する。

入力されるスパースな3次元データと物体を構成する面との対応を求めたり、データから平面領域を抽出するためには、計測点またはその近傍での法線方向を求める必要がある^{6),7)}。本手法では法線方向を求めるために、計算幾何学の分野の概念であるドロネー網⁸⁾を利用して、スパースな3次元データを母点とする三角形（ドロネー三角形）を作成する。しかし、このようにして構成されるドロネー三角形は、図1に図示するように必ずしも1つの平面上にあるとは限らない。このような領域は法線ベクトルの信頼性が低く、モデルとの対応を求めると誤った対応結果を発生すると共に、計算時間を著しく増加させる。そこで、本手法では濃淡画像のエッジやCADモデルからのトップダウン情報を利用してこのような領域を削除すると共に、ドロネー網の持つ隣接性に関する情報をもとに計測点の平面領域への統合を行う。

このような手法を実現するため、以下の主要な3つの構成要素から成るシステムを構成した（図2）。

(1) 3次元モデル作成部

対象部品のCAD（幾何）データから、特徴記述作成・照合および姿勢決定の際に利用される幾何学的な拘束（3次元モデルと呼ぶ）を作成する。

(2) 特徴記述作成部

入力3次元データと3次元モデルから物体の安定姿勢候補を推測し、それと3次元データ・濃淡画像から

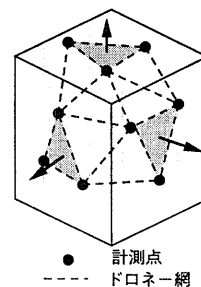


図1 ドロネー網による平面領域抽出

Fig. 1 Region detection with Delaunay diagram.

物体平面に属する計測点を母点とするドロネー三角形を抽出して、物体の記述（特徴記述）を作成する。

(3) 照合・姿勢決定部

3次元モデルと特徴記述を比較し、姿勢を決定する。

3. 3次元モデル作成部

通常、部品設計に用いる幾何形状のモデリングシステム（幾何モデラ）では、物体の内部表現として Winged-edge 表現や CSG 表現などが利用されている。しかし、これらの表現は、そのままでは画像・3次元データから得られる物体の記述と直接照合するのに、必ずしも適した表現ではない。そこで、これらの表現を変換して、物体認識に適した表現（3次元モデル）で物体を表現しておく必要がある。

本手法では、まず CAD モデルから可能な安定姿勢を計算する¹⁰⁾。そのために、物体モデルの凸包を求める。凸包に含まれる平面が床面に接していると仮定したとき、物体の重心を床面へ垂直に射影した点を計算する。射影された点とその平面領域内にあるならば、その面を床面に接した安定姿勢が可能であるとする。

このようにして求めた各安定姿勢 ($A_i: i=1, \dots, N_{ai}$, N_{ai} = 物体のもつ安定姿勢の数) についての以下の属性を計算し、3次元モデルとして登録する。

- (a) 代表安定姿勢の基準物体モデルからの回転角・平行移動量 G_i ;
- (b) 物体を構成する平面に関する拘束 C_i ;
安定姿勢の状態で、カメラから観測可能な各物体平面間に対する下記の属性である。
 - (b-1) 1つの面 F_j に関する属性
 - 面の識別子 j ($1 \leq j \leq N_f$, N_f は物体モデルに登録されている面の数)

- 面の表面積 R_j
- 面の法線ベクトル V_j
- 面の形状 $S_j T_j$
- (b-2) 面と面との相互拘束
 - 面 F_j の法線ベクトルの θ 成分と他の面 F_k の法線ベクトルの θ 成分との間の角度 Q_{jk}
 - 面上の点に対する各面上の点の射影距離がとりうる最大値 L_{jk} と最小値 L'_{jk}
- (c) 安定姿勢時の物体の台上からの最高点の高さ z_i

射影距離とは2つの面上にある2点間の距離で、基準となる面の法線ベクトルを a 、その面上にある点から対象となる点へのベクトルを b としたとき、

$$a \cdot b \quad (\cdot \text{ は内積を表す})$$

で定義されるスカラー量である。また、法線ベクトル c の θ, ϕ 成分 (それぞれ $\theta(c), \phi(c)$) は、台上に Z 軸を台に垂直になるように設定した XY Z 座標系で、それぞれ法線ベクトルを XY 平面へ射影したベクトルと X 軸との間の角度、法線ベクトルと Z 軸との間の角度を表す。

面の形状は以下の2つの行列の積 ST で記述され、物体の姿勢検定・決定時に利用される。

- 代表安定姿勢時の各面を、その重心を原点に、面を XY 平面に移動するための行列 T (4×4 : 同次座標形で記述される)。
- 上記の移動を行った後の形状を表す行列 S

例えば、図3に示す形状の場合、3次元座標の計測誤差を e_a (本稿では 5 mm) とすると

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1+e_a \\ 0 & 1 & 0 & 1+e_a \\ -1 & -1 & 0 & 2+e_a \\ 0 & 0 & 1 & e_a \\ 0 & 0 & -1 & e_a \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

と表せる。 $S(X Y Z 1)^T \geq (0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ で図3の面の内部領域を示している。

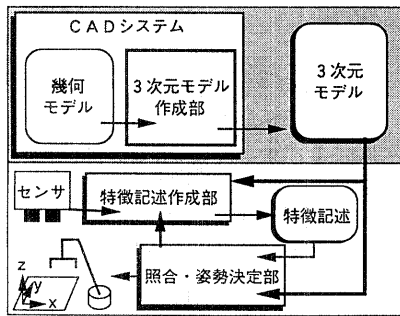


図2 システムの構成
Fig. 2 System configuration.

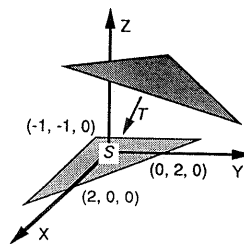


図3 面の形状表現
Fig. 3 Description of planar surface.

4. 特徴記述作成部

本システムで入力とするデータは、濃淡画像とそれと同一視点からのスパースな距離データ（画像上での位置とその点の3次元座標）である。特徴記述作成部はこれらのデータを入力とし、ドロネー網を利用して計測点を母点とする物体平面上にあるドロネー三角形の抽出を行い、特徴記述を作成する。各ドロネー三角形は、3次元の位置情報と法線ベクトル情報を有しているので、Grimson ら⁶⁾の手法を直接適用できる。しかし、ドロネー三角形は表面積や他のドロネー三角形との隣接情報も有している。そこで、本手法ではトップダウン情報を利用した法線方向のクラスタリングにより領域の統合・分割を効率的に行う。

4.1 ドロネー三角形の抽出

以下に特徴記述作成部の処理の流れを示す。

(1) エッジとドロネー網の抽出

濃淡画像のエッジを抽出し、細線化、直線近似することでエッジセグメントを抽出する。同時に、母点逐次添加法⁹⁾を利用して、計測3次元データの画像上での位置を母点とするポロノイ図を作成し、これをもとにドロネー網を作成する。各ドロネー三角形を D_i ($1 \leq i \leq N_d$, N_d はドロネー三角形の数) とする。各 D_i は素領域として領域識別子 i をラベル付けする。

(2) エッジとドロネー網の交差の検出

一般におおのドロネー三角形が、シーンの対象物体の1つの平面上にあるとは限らない。そこで、ドロネー三角形 D_i の辺が濃淡画像から得られたエッジセグメントと交わる場合や、ドロネー三角形 D_i の辺の長さがあらかじめ決められた値 t_1 (20 画素) 以上の場合には、そのドロネー三角形は2つ以上の物体平面にまたがっていると判断し、以後の処理の対象外とするため D_i の領域識別子を0にする。

(3) 安定姿勢候補の決定

計測3次元データのZ座標（床面からの高さを示す）の最大値 z_{\max} を求める。3次元データのスパースさの度合いと対象物体の形状から定まる、計測3次元座標の許容範囲を z_w (30 mm) とする。3次元モデルから、

$$[z_{\max} - e_d - z_w, z_{\max} + e_d + z_w] \quad (4.1)$$

の範囲に台上からの最高点の高さあがる安定姿勢 A_j ($1 \leq j \leq N_{st}$) を、 z_{\max} に値の近いものから順に選出する。条件に合う安定姿勢が存在しない場合には、照合・姿勢決定が行えないと判断し、処理を終える。

(4) 法線方向に基づくドロネー網の分割

各ドロネー三角形 D_i から計算される法線ベクトル c_i の ϕ 成分 $\Phi(c_i)$ が、選ばれた安定姿勢 A_j の3次元モデルに登録されているどの面 F_k の法線ベクトルの ϕ 成分 $\Phi(V_k)$ と

$$|\Phi(c_i) - \Phi(V_k)| \leq t_{a1} \quad (4.2)$$

を満たさない場合は、 D_i の領域識別子を0にする。同時に、

$$|\Phi(c_i) - \Phi(c_m)| \leq t_{a1} \quad (4.3)$$

$$|\theta(c_i) - \theta(c_m)| \leq t_{a2} \quad (4.4)$$

を満たす1つの辺を共有するドロネー三角形 D_i , D_m の領域統合を行い、 D_m の領域識別子を l で置換する ($l \leq m$)。 t_{a1} (10°), t_{a2} (10°) は、あらかじめ定められた許容範囲である。

(5) 2つ以上の領域に含まれる計測点の処理

エッジセグメントの抽出が不十分な場合など、図4に示すように1つの計測点が2つ以上の領域に共有される場合がある。このような計測点は、それが真にエッジ上にある場合や頂点に対応する場合を除いてどちらかの領域に属するべきである。そこで、本手法では以下に述べる処理で、平面への近似度が最も近い領域、または画像上での面積が大きな領域にこの計測点を統合する。

- 1) 複数の領域に共有される計測点を含む、0以外の識別子をもつドロネー三角形の領域識別子を-1に設定する。
- 2) この計測点を共有するおおの領域が、この点を含むドロネー三角形集合（識別子 -1: 集合 D_a ）以外に正の値の識別子をもつドロネー三角形

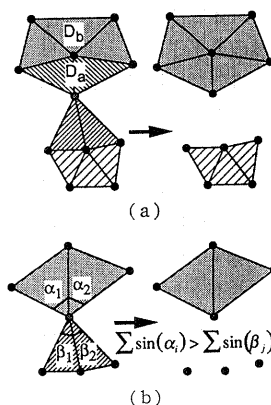


図4 共有点の統合: (a) 平面性による統合, (b) 角度による統合

Fig. 4 Merging of a shared point: (a) Planarity-based, (b) Angle-based.

集合 (集合 D_b) と隣接する場合 (図 4 (a)) がある。この場合は、 D_a 内のドロネー三角形の法線ベクトルの面積による重み付け平均と、 D_b 内の法線ベクトルの面積による重み付け平均との差が最小となる領域にこの点を統合する。

- 3) 上記以外の場合 (図 4 (b)), 共有される計測点を含むドロネー三角形集合内で、各三角形がその点の周りに広げる角度の余弦の和が、最も大きい領域にこの点を統合する。スパースな計測点の間隔がほぼ一定と仮定すると、この計測点は面積の大きな領域に統合される。
- 4) 領域識別子 -1 のドロネー三角形の領域識別子を、統合された領域の領域識別子に設定する。

(6) 特徴記述の作成

領域識別子 0 を持つドロネー三角形にのみ含まれる計測点、すなわちどの領域にも含まれない計測点の数の全計測点数に対する割合が、あらかじめ定められた値 $t_{r1}(0.3)$ 以上の場合には、(3)へ戻り新たな安定姿勢を仮定して処理を繰り返す。そうでなければ、次に示す特徴記述を作成する。

4.2 特徴記述の形態

特徴記述は、次の 3 つの部分で構成される。

- (a) 全計測点の 3 次元データ
 - 計測点の識別子
 - 計測点の画像上での位置
 - 計測点の 3 次元位置
- (b) 領域に関する属性

各領域識別子に対応する領域 $P_n (1 \leq n \leq N_p, N_p$ は領域の数) に関する以下の属性を、表面積の大きな順に登録する。

 - 領域の識別子: n
 - 計測点の識別子の集合: d_n

この集合は、2 つのグループに分けて格納されている。1 つのグループは、領域の境界に当たる計測点の識別子の集合で、他のグループには、この領域内にある他の計測点の識別子の集合である。

 - 法線ベクトル: v_n

領域内の各ドロネー三角形の法線ベクトルを、表面積で重み平均化した方向の単位ベクトルである。

 - 表面積: r_n

領域に含まれる各ドロネー三角形の表面積の和である。

- 対応する物体モデルの面の候補の識別子の集合: f_n

法線ベクトルの ϕ 成分と選ばれた安定姿勢 A_j の 3 次元モデルに登録されている面の法線方向の ϕ 成分の差があらかじめ定められた t_{a1} より小さく、上記の表面積がモデルに登録されている表面積より小さい場合、この面の識別子をこの集合に登録する。

- (c) 領域識別子 0 を持つドロネー三角形にのみ含まれる、すなわちどの領域にも属さない計測点の識別子の集合

5. 照合・姿勢決定部

照合・姿勢決定部は、特徴記述と 3 次元モデルを入力とし、両者の対応を求める「モデル・記述照合部」と、対応が実現可能な姿勢かどうかを確かめ (検定)、姿勢を決定する「姿勢検定・決定部」から構成される。

5.1 モデル・記述照合部

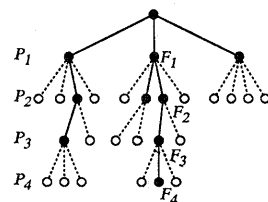
特徴記述の領域に関する属性の第 i 番目 ($1 \leq i \leq N_p$) に記されている領域を P_i 、今仮定されている安定姿勢 A_j の 3 次元モデルの第 k 番目に登録されている面を F_k 、 $l(P_1, P_2)$ を領域 P_1 の重心に対する領域 P_2 の重心の射影距離とする。特徴記述に登録されている領域と、3 次元モデルとの照合は、Grimson らの手法¹¹⁾と同様、図 5 に示すような状態探索木として実現される。以下に、処理の流れを示す。

(1) P_1 の照合候補

特徴記述に登録されている P_1 の「対応する物体モデルの面の候補の識別子の集合」 f_1 の要素を P_1 の照合候補とする。 f_1 の要素をラベルとするノードを探索木のルートノードの下に作成する。

(2) 最下位のノードの処理

現在の状態探索木の最下位 (レベル i) のノードに



Match $((P_1, F_1), (P_2, F_2), (P_3, F_3), (P_4, F_4))$

図 5 照合のための状態探索木
Fig. 5 Interpretation tree for matching.

対して、以下の条件を満たす領域 P_{i+1} の照合候補 F_k の集合を求める。

●特徴記述による拘束：

F_k は P_{i+1} の特徴記述に記述されている照合候補 f_{i+1} の要素でなければならない。

$$F_k \in f_{i+1} \tag{5.1}$$

●表面積に関する拘束：

P_{i+1} の表面積 r_{i+1} と上位のレベルのノードで F_k を対応候補とする領域 $P_i (l \leq i)$ の表面積 r_i との和が F_k の表面積 R_k 以下でなければならない。

$$r_{i+1} + \sum P_i \leq R_k \tag{5.2}$$

●法線間角度に関する相互拘束：

P_{i+1} の法線の θ 成分 $\theta(v_{i+1})$ と $P_i (l \leq i)$ の法線 θ 成分 $\theta(v_i)$ の差が、 F_k の法線の θ 成分と P_i の対応候補 F_j の法線 θ 成分の差 Q_{kj} とほぼ等しくなければならない。

$$\|\theta(v_{i+1}) - \theta(v_i)\| - Q_{kj} \leq \epsilon_{\theta 2} \tag{5.3}$$

●射影距離に関する相互拘束：

P_{i+1} と $P (l \leq i)$ の射影距離 $l(P_{i+1}, P_i)$ が、 F_k と P_i の対応候補 F_j の射影距離の範囲 $[L_{ij}, L_{kj}]$ になければならない。

$$L_{ij} < l(P_{i+1}, P_i) < L_{kj} \tag{5.4}$$

探索木の最下位ノードの下に、新たな照合候補要素 F_k をラベルとするノードを作成する。照合候補が存在しない場合には、4.1 節(3)へ戻って新たな安定姿勢候補を選び出し、再度処理を繰り返す。

(3) 終了条件

状態探索木の深さが、特徴記述に登録されている領域の数 N_p と等しい場合、ルートノードから第 N_p レベルの枝までのパスのラベルのリストを照合結果とし処理を終了する。それ以外の場合は、(2)へ戻り処理を繰り返す。

(2)の処理において、面と面の幾何学的な拘束に加え、特徴記述の対応候補に記述された安定姿勢情報を用いた可視面の拘束、表面積に関する拘束を用いることで、効率的に照合候補を決定することができる。

5.2 姿勢検定・決定部

本手法の問題設定では、物体の姿勢を決定するために台上の平行移動の2自由度 ($\Delta x, \Delta y$) と、台に垂直はZ軸周りの回転角 $\Delta \theta$ の1自由度を決定すればよい。図6に示す処理で姿勢の決定と検定を行う。ここで、 $X_o(P)$ および $Y_o(P)$ を領域または面 P の重心位置のX座標およびY座標とする。

(1) ステップ1： $\Delta \theta$ の範囲の計算

特徴記述に記述されている領域 P_i とモデルに登録されている面 F_k の対応から、 $\Delta \theta_i$ を

$$\Delta \theta_i = \theta(v_i) - \theta(V_k) \tag{5.5}$$

で計算する。すべての対応から求めた $\Delta \theta_i$ の平均値を中心にあらかじめ定められた値 $\epsilon_{\theta 3}$ (10°) の幅で

$$\Delta \theta_{\min} = \Delta \theta - \epsilon_{\theta 3}, \Delta \theta_{\max} = \Delta \theta + \epsilon_{\theta 3} \tag{5.6}$$

とする。

(2) ステップ2： $\Delta x, \Delta y$ の範囲の計算

ステップ(1)と同様に対応関係から

$$\Delta x_i = X_o(P_i) - X_o(F_k) \tag{5.7}$$

$$\Delta y_i = Y_o(P_i) - Y_o(F_k) \tag{5.8}$$

を計算し、それぞれの最大値 ($\Delta x_{\max}, \Delta y_{\max}$) と最小値 ($\Delta x_{\min}, \Delta y_{\min}$) を求める。

(3) ステップ3：姿勢の計算

$\Delta \theta$ を $[\Delta \theta_{\min}, \Delta \theta_{\max}]$, Δx を $[\Delta x_{\min}, \Delta x_{\max}]$, Δy を $[\Delta y_{\min}, \Delta y_{\max}]$ の範囲で、 $1 \leq i \leq N_p$ のすべての領

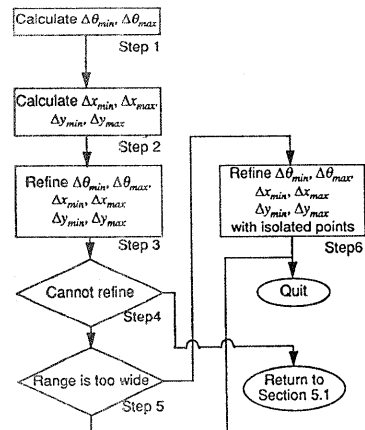


図6 姿勢決定処理の流れ
Fig. 6 Flow of attitude calculation.

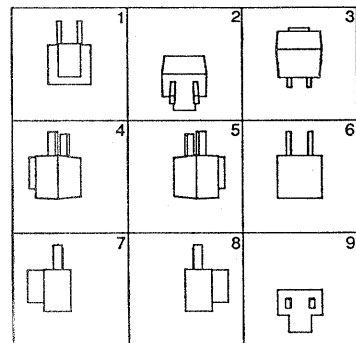


図7 対象物体の安定姿勢
Fig. 7 Nine stable attitudes of the target.

域 P_i の境界上の計測点 (X_j, Y_j, Z_j) が、対応するモデル F_k の形状を示す行列 S_k, T_k に対して以下の条件を満たす $\Delta\theta, \Delta x, \Delta y$ の範囲および平均値を求める。

$$S_k T_k \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) & \sin(\Delta\theta) & 0 & 0 \\ -\sin(\Delta\theta) & \cos(\Delta\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\Delta x \\ 0 & 1 & 0 & -\Delta y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \\ 1 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

(4) 解の検証 1

$\Delta\theta, \Delta x, \Delta y$ の範囲が空集合である場合、この対応は実現不可能であるのでモデル・記述照合部で新たな対応を求める。

(5) 解の検証 2

$\Delta\theta, \Delta x, \Delta y$ の範囲があらかじめ定められた範囲より小さい場合には、それらの平均値を姿勢とする。

大きい場合にはモデル・記述照合部で新たな対応を求める。

6. 実験結果

図 7 は、本稿で対象とする物体（コンセント）の 9 つの安定姿勢を、ワイヤーフレーム表示したものである。この物体は、20 の平面で構成されている。この物体のある姿勢での濃淡画像・距離画像を図 8 (a), (b) に示す。画像の大きさはいずれも 256×256 で、距離データは文献 12) の手法により入力され、その精度は $\pm 1 \text{ mm}$ 以下である。この距離画像をランダムにサンプリングすることにより (同図 (c)), 本手法で仮定しているスパースな距離データを得ることができる。

この濃淡画像から Marr-Hildreth のゼロクロッシングによるエッジ抽出を行い、直線セグメントにセグメント化した結果を図 9 (a) に示す。同図 (b) はサンプリングされた距離データの画像上での位置から計算

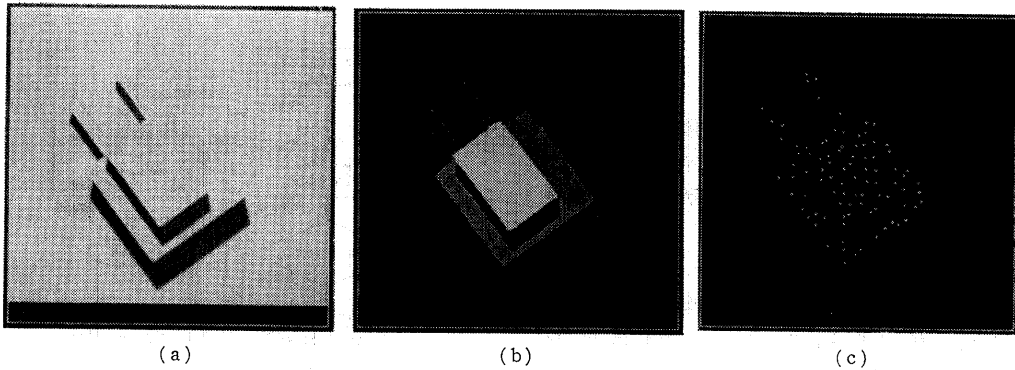


図 8 入力データ: (a) 濃淡画像, (b) 距離画像, (c) スパースな計測点
Fig. 8 Input data: (a) Intensity image, (b) Range image, (c) Sparse range data.

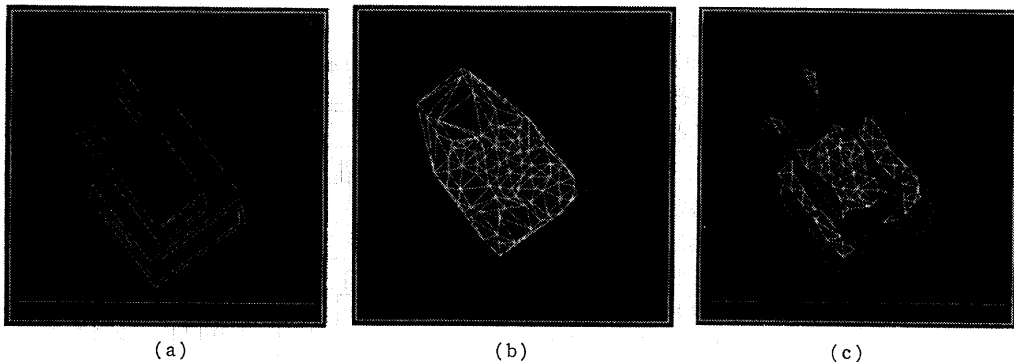


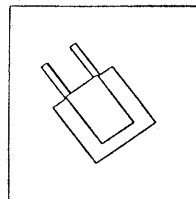
図 9 実験結果: (a) エッジセグメント, (b) ドロネー網, (c) 平面領域
Fig. 9 Experimental results: (a) Edge segments, (b) Delaunay diagram, (c) Planar patches.

されたドロネー網である。4.1節で述べた手法により図7の{1, 6, 7, 8, 4, 5}の順で安定姿勢が選ばれる。安定姿勢1の3次元モデルとエッジセグメントを利用してドロネー網の平面領域分割を行った結果、図9(c)に示すように94個のドロネー三角形、6つの領域に分割される。(b)で2つ以上の平面にまたがっていたドロネー三角形が、効率的に除去されていることがわかる。

図9(c)の特徴記述をもとに姿勢を求めた結果が図10である。照合の際、6レベルの状態探索木において8つのノードが作成された。対応の可能性は全部で206通りあるので、本手法で効率的に木の刈り込みが行えている。図7の安定姿勢6, 7, 8の可視面は安定姿勢1と同じ法線方向を持つので、これらの安定姿勢を仮定した場合には特徴記述作成部では安定姿勢1を仮定した場合と同じ特徴記述を出力する。しかし、照合・姿勢決定部が求まらなかったり、可動範囲が空集合になって姿勢が決定できない。また、安定姿勢4, 5の3次元モデルを利用した場合には、特徴記述作成

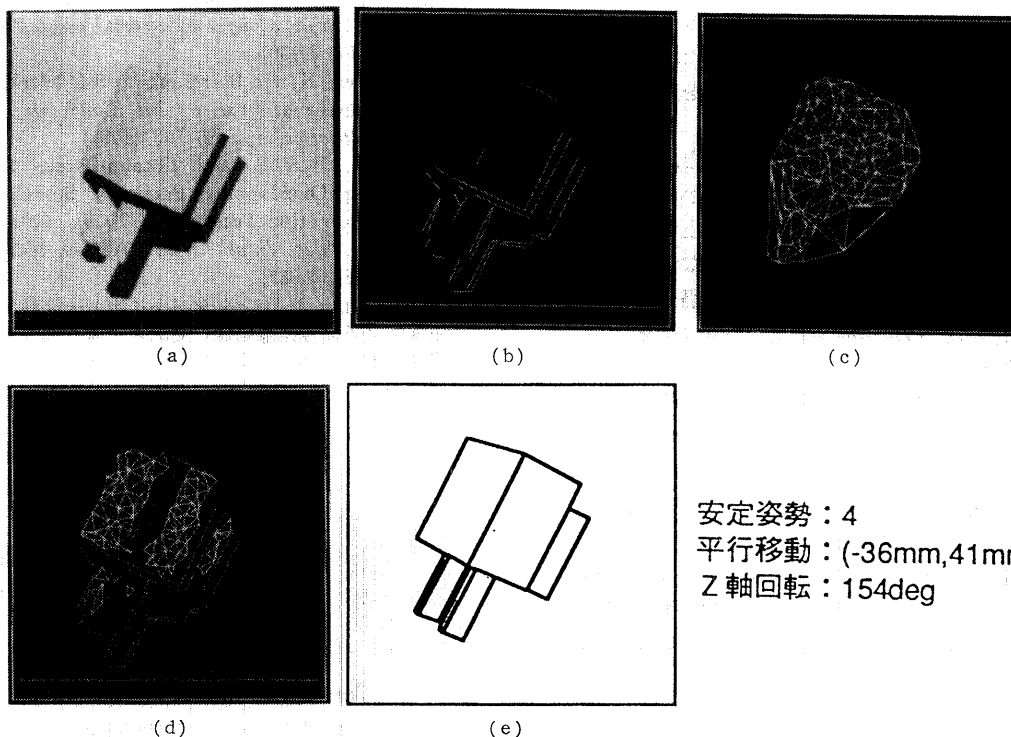
部で平面領域が形成されない。そこで、安定姿勢1を仮定した図10のみが結果となる。同一対象物体の他の姿勢での実験結果を図11に示す。

システムは、ワークステーション(SparcStation 330)上に構築させ、アルゴリズムの主要な部分はC言語で記述している。図8のシーンに対して処理に要する時間は、エッジセグメントの抽出に約50秒、ドロネー三角形の作成に約100ミリ秒、その他特徴抽出に約



安定姿勢：1
平行移動：(-2mm, -14mm)
Z軸回転：36 deg

図10 姿勢計算結果
Fig. 10 Target attitude.



安定姿勢：4
平行移動：(-36mm, 41mm)
Z軸回転：154deg

図11 実験結果2：(a) 濃淡画像，(b) エッジセグメント，(c) ドロネー網，(d) 平面領域，(e) 姿勢計算結果

Fig. 11 Experimental results with another scene: (a) Intensity image, (b) Edge segments, (c) Delaunay diagram, (d) Planar patches, (e) Target attitude.

300 ミリ秒, 照合と姿勢決定(この部分のみ LISP 言語使用)に約5秒となっている。

7. ま と め

水平な台上で重なりがなく, 安定な姿勢にある多面体部品の姿勢を, 部品の CAD モデルとスパースな距離データ・濃淡画像を利用して決定する手法を述べた。入力とするスパースなデータには特徴を抽出するための情報が不足しているため, 本手法では

- 計測点を母点とするドロネー網を作成し
- 濃淡画像から抽出されるエッジセグメントと融合し
- モデルからのトップダウンの情報を利用する

ことで, 計測点の平面領域への分割を行った。対象部品が安定な姿勢にあるというトップダウン情報を加味することで, 効率的に平面に基づいた物体の記述を作成することができた。次に, モデルから求まる幾何拘束を利用して, この記述とモデルとのマッチングを行い, 得られたマッチング結果に基づいて姿勢を決定した。こうした方法により, スパースな距離データからでも, 実験結果に示した程度に複雑な多面体物体に対してその姿勢を決定できることを示した。

本手法では, 特徴記述において領域を形成する測定点のみを利用して姿勢を決定している。しかし, どの領域にも属さない計測点を利用すること, 本手法で求まる可動範囲内でデータとの誤差を最小にする姿勢を計算することで, さらに姿勢精度の向上が図れると考えられる。また, 今回の実験では示さなかったが, 対象物体の真の姿勢を求める手段がある場合には, 計算された姿勢と真の姿勢の定量的な誤差検討を行うことも可能である。

以上のように, 本論文で提案した手法は, (1)姿勢決定部の改良, (2)実用化に向けた高速化(特に画像処理部), (3)本手法に有効な物体形状やスパースさと姿勢精度, 誤差評価の検討により, さらに発展させていくことが可能である。

謝辞 距離データの入力をご快諾下さった大阪大学基礎工学部井口征士教授, ドロネー網に関してご指導を賜った東京大学工学部杉原厚吉教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

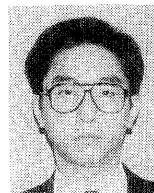
- 1) Bhanu, B.: CAD-based Robot Vision, *Computer*, Vol. 20, No. 8, pp. 12-16 (1987).
- 2) Chin, R. T. and Dyer, C. R.: Model-based

Recognition in Robotic Vision, *ACM Computing Surveys*, Vol. 18, No. 1, pp. 67-108 (1986).

- 3) 山本, 田村: 幾何拘束に基づいた3次元多面体の姿勢決定の一手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J73-D-II, No. 2, pp. 200-206 (1990).
- 4) 反町誠宏: アクティブ距離センサ, 第5回産業における画像センシング技術シンポジウム, 2-5 (1990).
- 5) Silberberg, T. M., Harwood, D. A. and Davis, L. S.: Object Recognition Using Oriented Model Points, *CVGIP*, Vol. 35, No. 1, pp. 47-71 (1986).
- 6) Grimson, W. E. L. and Lozano-Perez, T.: Model-based Recognition and Localization from Sparse Range or Tactile Data, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 3-35 (1984).
- 7) 吉武, 大西, 杉原, 杉江: 規則的パターンの投影を利用した幾何モデルに基づく物体認識, 信学技報, PRU87-117 (1988).
- 8) 杉原厚吉: 計算幾何学的手法と画像解析—ボロノイ図の応用を中心として, 情報処理, Vol. 30, No. 9, pp. 1067-1075 (1989).
- 9) Kitamura, Y., Sato, H. and Tamura, H.: An Expert System for Industrial Machine Vision, *Proc. of 10th Int. Conf. on Pattern Recognition*, pp. 771-774 (1990).
- 10) Koshikawa, K. and Shirai, Y.: A 3-D Modeler Vision Research, *Proc. of Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 185-190 (1985).
- 11) Grimson, W. E. L. and Lozano-Perez, T.: Localizing Overlapping Parts by Searching the Interpretation Tree, *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, Vol. PAMI-9, No. 4, pp. 469-482 (1987).
- 12) 佐藤, 井口: 液晶レンジファインダー液晶シャッタによる高速距離画像計測システム, 電子通信学会論文誌, Vol. J71-D, No. 7, pp. 1249-1257 (1988).

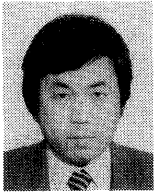
(平成5年4月26日受付)

(平成6年2月17日採録)



山本 裕之 (正会員)

1962年生。1984年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1986年同大学院修士課程修了。同年キャノン(株)入社。1990～1992年マクギル大学知能機械研究所客員研究員。現在, キャノン(株)情報メディア研究所画像メディア研究部にて, 三次元画像計測・認識, アクティブビジョン, 画像メディアの研究に従事。電子情報通信学会会員。

**田村 秀行 (正会員)**

1947年生. 1970年京都大学工学部電気工学科卒業. 工業技術院電子技術総合研究所を経て, 1986年キャノン(株)入社. 現在, 同社情報メディア研究所副所長兼画像メディア研究部部長. 1989年より東京工業大学非常勤講師. 工学博士. パターン認識・画像処理・画像データベース等の研究に従事. 最近は, 3次元画像メディア, CSCW等に興味を持っている. 昭和60年度論文賞受賞. 著書「コンピュータ画像処理入門」「電腦映像世界の探検」など. IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 人工知能学会各会員.
