

ステレオビジョンによる3次元物体の認識

角 保志 富田 文明

電子技術総合研究所

つくば市梅園 1-1-4

シーン中の3次元物体を認識する手法について述べる。ステレオビジョンによって復元したシーンの3次元情報と、システムに予め登録しておいた物体の幾何モデルとを照合することにより、モデルに対応する物体を検出し、その位置姿勢を決定する。物体の幾何モデルおよび入力データは、共に境界表現に基づいて記述される。本手法は、真の輪郭線を含む任意形状の物体に対して有効である。認識アルゴリズムは、“初期照合”と“微調整”の2つのステップからなる。初期照合では、局所的な幾何特徴の照合により、モデルからデータへの対応の候補を生成する。微調整では、全体的な形状を用い、対応候補の真偽を検証すると同時に対応の精度を向上させる。実画像を用いた実験結果から、本手法の有効性を示す。

Three Dimensional Object Recognition Using Stereo Vision

Yasushi SUMI and Fumiaki TOMITA

Electrotechnical Laboratory

Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

We propose a new algorithm for model-based three dimensional object recognition. An object is detected from a scene and the pose is estimated. A geometric model of an object is compared with a three dimensional description of the scene which is generated with stereo vision. The model and the scene description are based on a boundary representation. The algorithm is applicable to any shape object having true boundaries. The recognition algorithm consists of two phases, “initial matching” and “fine adjustment”. In the initial matching phase, by use of local geometric structures, candidates of the correspondence from the model to the scene are generated. In the fine adjustment phase, the candidates are verified and the accuracy of the pose estimation is improved using a global geometric shape. The effectiveness of the algorithm is demonstrated by the experimental results using real stereo images.

1 はじめに

本報告では、我々の研究グループで開発を進めている3次元ビジョンシステム [1] における3次元物体の認識手法について述べる。ひとくちに物体認識といっても、定量的なものから定性的なものまでさまざまな定義があるが、本研究では、システムが保持する物体の3次元な幾何モデル（以下単に物体モデル）に対応する物体をシーン中より検出し、その位置姿勢を決定する、いわゆる model-based recognition の問題を扱う。

3次元物体認識は、コンピュータビジョンの重要な研究テーマの一つである。これまでに提案されてきた物体認識手法は、2種類に大別することができる。

ひとつは、センサとして受動的な撮像装置を使用し、入力画像から抽出した2次元特徴と物体モデルとを照合することにより、物体の位置姿勢を決定するものである [2]-[11]。2次元の入力画像によって3次元物体の位置姿勢を拘束するには、例えば、画像中の少なくとも3つの点といったように、複数の特徴点を物体モデルと対応付ける必要がある。このため、複雑なシーンを扱う場合、照合のための探索空間が膨大になる可能性がある。

もうひとつは、シーンの3次元記述を入力とするものである。物体モデルとシーンの照合に、3次元幾何特徴を用いることができるため、探索空間の問題は軽減される。シーンの3次元記述を獲得するには、能動的手法と受動的手法がある。能動的手法では、レーザレンジファインダなどの能動的センサを用いた計測により、シーンを距離画像として記述する。距離画像を入力とする物体認識については、多くの手法が提案されている [12]-[24]。

一方、受動的な撮像装置を用いてシーンの3次元情報を得る手法としては、ステレオビジョンが代表的である。我々の研究グループでは、知的ロボットシステムの視覚として、ステレオビジョンが有効であると考え、ステレオ画像の入力から、物体認識や移動物体の追跡までを行うトータルな3次元ビジョンシステムの開発を進めている。

本研究は、segment-based のステレオビジョンによって復元されたシーンの3次元記述を入力として使い、シーン中の物体の位置姿勢（6自由度）を決定することを目的としている。今回の報告では、“真の輪郭線”を部分構造として含む任意形状の物体を認識するアルゴリズムを紹介する。ここで、真の輪郭線とは、図1に示したような、物体表面形状、または、物体表面の輝度変化の不連続性を反映した輪郭線を言う。

図2に本システムの構成を示す。ステレオ画像の入力

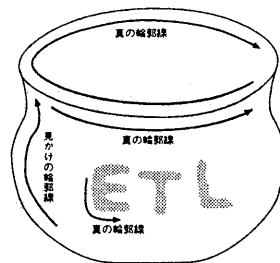


図1: 曲面物体の輪郭線

には、ステレオカメラシステムの2台のカメラを用いる。ステレオビジョンシステムで自動復元されるシーンの3次元データ（以下単に認識データ）が、認識システムへの入力となる。物体モデルは、幾何モデルまたは対話型モデルによって off-line で構築する。各システムは、GUI (Graphical User Interface) システムによって操作できる。

認識アルゴリズムは、“初期照合”と“微調整”の2つのステップからなる。初期照合では、局所的な幾何特徴の照合により、物体モデルと認識データとの対応の候補を生成する。微調整では、全体的な形状を用い、初期照合によって生成された対応候補の真偽を検証すると同時に、対応の精度を向上させる。

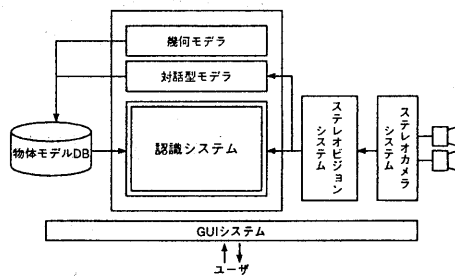


図2: システム構成

2 3次元記述の生成

本章では、ステレオビジョンによるシーンの3次元記述の生成について述べる。本稿では、データ構造を中心に述べ、ステレオ対応探索の問題については別稿に譲る。

図3にデータの流れを示す。2枚のステレオ画像は、それぞれ中間表現として“画像の境界表現” [25] によって記述される。本システムでは、画像の境界表現（以下画像 B-REP）が処理の基本となる。

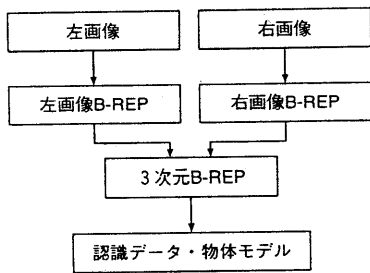


図3: データの流れ

2.1 ステレオ画像の入力

ステレオ画像の入力には、我々のグループで開発中のステレオカメラシステム PATAPATA[26] を用いた。PATAPATA は水平配置 3 眼ステレオカメラシステムであるが、本手法では、そのうち 2 台のカメラを用いる。入力ステレオ画像の例を図 4 に示す。

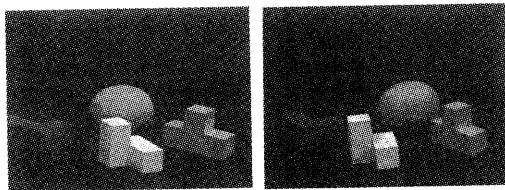


図4: ステレオ画像の例 (640×480 pixels, 256 gray-levels)

2.2 画像の境界表現

ステレオ画像の左右それぞれの画像を画像 B-REP として記述する。画像 B-REP は、図 5 に示すように、“領域 (R)”、“境界線 (B)”、“セグメント (S)”、“点 (P)” の 4 階層からなるデータ構造であり、各データ構造が、それぞれ物体認識に有用な情報を保持する。画像 B-REP は、図

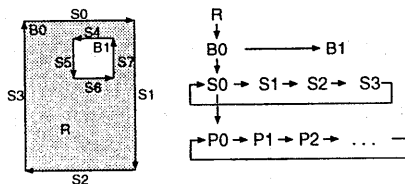


図5: B-REP のデータ構造 [25]

6 に示すように、いわゆる winged-edge (half-edge) 構造で表現され、領域相互の関係をトポロジ的に表現できる。ステレオ画像より生成された左右の画像 B-REP の組を本稿ではステレオ B-REP と呼ぶ。

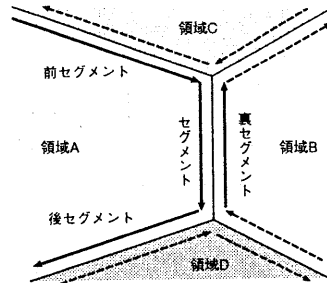


図6: B-REP の winged-edge 構造

画像 B-REP は、画像の領域分割 [27]、特徴点による境界線の分割 [28] の二つの処理過程を経て生成される。図 7 は、図 4 のステレオ画像から生成されたステレオ B-REP の点の画像座標位置をプロットしたものである。

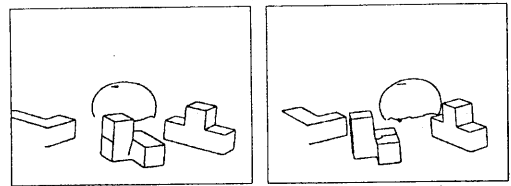


図7: ステレオ B-REP

2.3 認識データの生成

シーンの 3 次元情報は、ステレオ B-REP のセグメントを対応の単位としたステレオ対応探索によって復元する。3 次元情報は、左画像 B-REP の点に保存される。本稿では、3 次元情報を含む画像 B-REP を 3 次元 B-REP と呼ぶ。図 8 は、図 7 のステレオ B-REP から生成した 3 次元 B-REP を表示した三面図である。

3 次元 B-REP に、照合のための幾何特徴である“頂点”を付加し、認識データを生成する。頂点は、一つの 3 次元座標と二つの 3 次元方向ベクトルからなり、3 次元空間における物体モデルの位置姿勢を拘束できる。頂点は以下の手順で生成される。

1. 図 9 に示すように、セグメントの 3 次元データ点列に、直線または円をあてはめる。

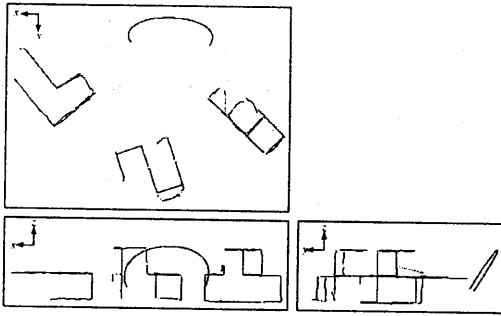


図 8: 3次元 B-REP

2. 直線・円ともにあてはめ誤差が大きい場合は、セグメントを2分割し、再帰的にあてはめを行う。各セグメントは、線分、円弧あるいは両者の組み合わせによって近似的に記述されることになる。
3. 画像 B-REP の同じ境界線に属し、隣り合う二つのセグメントにあてはめられた直線または円弧の端点における接線を求める。
4. 2 接線の最短距離となる線分の midpoint と、各接線のベクトルから、頂点を生成する。

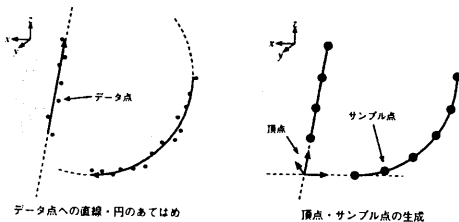


図 9: 物体モデル・認識データ生成

図 10は、図 8の 3次元 B-REP から生成した認識データの一部を拡大して表示したものである。3次元 B-REP の 3次元データ点列と、その点列にあてはめられた直線、および隣り合う直線によって形成された頂点が表示されている。

2.4 物体モデル

物体モデルは、基本的に認識データと同じデータ構造からなるが、認識アルゴリズムの微調整のための幾何特徴として、図 9に示したように、各セグメント上に等間隔に“サンプル点”を持つ。サンプル点は 3次元座標と法

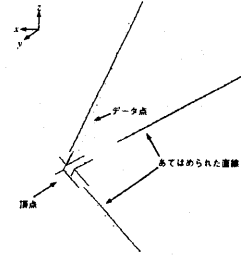


図 10: 認識データの例

線ベクトルからなる。ここで、サンプル点の法線は、セグメントにあてはめられた円、または、そのセグメントが構成している頂点によって決まる法線に等しいと仮定している。

物体モデルを構築するために、二つのシステムを用意している。

ひとつは幾何モデラである。EusLisp[29]の物体モデリング機能によって生成した 3次元物体の幾何モデルを、本システムにおける物体モデルのデータ構造に変換する。図 11に、幾何モデラによって構築した物体モデルの例を示す。

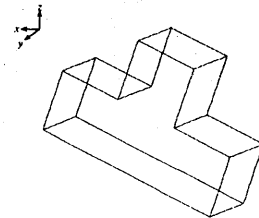


図 11: 物体モデルの例

もうひとつは対話型モデラである。ステレオ画像の実例より生成した 3次元 B-REP から、前節で述べた認識データと同様の手順で物体モデルを生成する。ただし、3次元 B-REP は、背景やノイズなど物体以外の余分なセグメントを含んでいる可能性があるため、GUIシステムを用いることにより、ユーザが必要なセグメントを pick できる。

一組のステレオ画像から生成された物体モデルは、左右のカメラより観測可能な面の 3次元情報しか含まない。また、画像の領域分割の段階に必要なセグメントが欠落することも考えられる。このため、異なる観測方向からのステレオ画像データより生成された複数の 3次元 B-REP

を統合することにより、物体モデルを構築することも可能である。

3 認識データと物体モデルの照合

本章では、3次元物体の認識アルゴリズムについて述べる。

3次元座標 $\mathbf{x} = [x \ y \ z]^t$ は、 3×3 回転行列 \mathbf{R} 、 3×1 平行移動ベクトル \mathbf{t} によって、

$$\mathbf{x}' = \mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{t}$$

に変換される。ここで、

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

とすると、シーン中の物体の3次元的な位置姿勢は、物体モデルが認識データ中の対応する3次元構造に一致するように移動させる 4×4 座標変換行列 \mathbf{T} で記述できる。すなわち、認識アルゴリズムは、物体モデルと認識データを照合し、 \mathbf{T} を算出する処理過程である。

認識アルゴリズムは、局所的な幾何特徴を用いる“初期照合”と、全体的な形状を用いる“微調整”からなる。

3.1 初期照合

初期照合では、図12に示すように、物体モデルと認識データの頂点を照合することにより、座標変換行列 \mathbf{T} を算出する。ただし、物体モデルの頂点と認識データの頂点との正しい対応を前もって知ることはできないため、基本的には、可能性のある全ての頂点の組み合わせを対応候補とする。

モデル頂点 V_M を、データ頂点 V_D に一致するように移動させることを考える。 V_M と V_D の3次元座標から平行移動成分 \mathbf{t} が決まる。各頂点を構成している2ベクトルの方向から回転移動成分 \mathbf{R} が決まる。

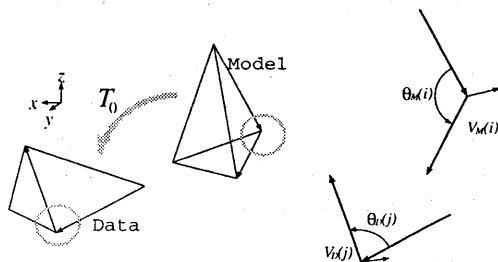


図12: 頂点を用いた初期照合

頂点を構成する2ベクトルのなす角 θ が大きく異なる組み合わせについては、正しい対応である可能性が低いと考えられるので、候補から外す。すなわち、 $V_M(i)$ ($i = 1, \dots, m$) と $V_D(j)$ ($j = 1, \dots, n$) について、

$$|\theta_M(i) - \theta_D(j)| < \Theta$$

を満足する全ての組み合わせ $\mathcal{P}(i, j)$ を対応の候補とし、 \mathbf{T}_{ij} を算出する。ここで、 m, n はそれぞれ、物体モデル、認識データ中に存在する頂点数である。 Θ は経験的に決定した閾値である。

3.2 微調整

微調整は、初期照合の結果得られた対応候補 $\mathcal{P}(i, j)$ の妥当性を判別すると同時に、座標変換行列 $\mathbf{T}_{ij}(0)$ に含まれる誤差を小さくする処理である。

物体モデルのサンプル点 $\tilde{S}(k)$ ($k = 1, \dots, \bar{p}$) について、

- 認識データの3次元B-REP点列から対応点探索
- 最小自乗法による座標変換行列の更新

を繰り返す。ここで、 \bar{p} は物体モデルのサンプル点数である。その処理過程を以下に述べる。

1. 対応点探索用の画像平面として、認識データの3次元B-REP点列の画像座標をプロットした画像(図7左側に相当)を用意する。
2. サンプル点 $\tilde{S}(k)$ を $\mathbf{T}_{ij}(0)$ によって \tilde{S}' に移動させる。 $\tilde{S}(k)$ の3次元座標 $\tilde{\mathbf{S}}(k)$ と、その法線方向単位ベクトル $\tilde{\mathbf{N}}(k)$ は、それぞれ、

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{S}}'(k) &= \mathbf{R}_{ij}(0)\tilde{\mathbf{S}}(k) + \mathbf{t}_{ij}(0), \\ \tilde{\mathbf{N}}'(k) &= \mathbf{R}_{ij}(0)\tilde{\mathbf{N}}(k) \end{aligned}$$

に移動する。ここで、 $\tilde{\mathbf{S}}(k)$ と $\tilde{\mathbf{N}}(k)$ は、それぞれ 1×3 ベクトルである。

3. $\tilde{\mathbf{S}}(k)$ のうち、

$$\cos^{-1} \left(\frac{\tilde{\mathbf{P}}'(k) \cdot \tilde{\mathbf{N}}'(k)}{|\tilde{\mathbf{P}}'(k)|} \right) > \frac{\pi}{2}$$

を満足するものを $S(k)$ ($k = 1, \dots, p; p \leq \bar{p}$) とする。ここで、 $\tilde{\mathbf{P}}'(k)$ は、 $\tilde{\mathbf{S}}'(k)$ に対する観測方向ベクトルであり、 \mathbf{C} をステレオカメラシステムの観測位置を表す 1×3 ベクトルとすると、

$$\tilde{\mathbf{P}}'(k) = \tilde{\mathbf{S}}'(k) + \mathbf{t}_{ij}'(0) - \mathbf{C}$$

である。すなわち、 $S(k)$ は、 $\mathbf{T}_{ij}(0)$ によって物体モデルを移動した後に観測可能なサンプル点を表している。

4. $S'(k)$ を画像座標 $[col_k \ row_k]$ に投影し、図 13 に示すように、サンプル点 $S'(k)$ に対応する認識データの点を探索する。図中矢印で示したように、 $S'(k)$ の接線と垂直方向に画像上をトレースし、一定の距離範囲内にデータ点 $D(l)$ ($l = 1, \dots, q$) が存在すれば、それを $S(k)$ の対応点とする。ここで q は認識データの 3 次元 B-REP 点数である。

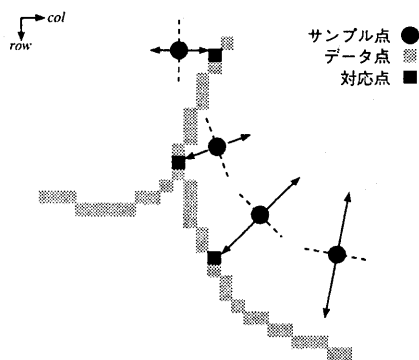


図 13: 画像座標での対応点探索

5. $S'(k)$ と $D(l)$ の組み合わせ $Q(k, l)$ について、 $S'(k)$ の 3 次元座標 $S^t(k)$ を、対応点 $D(l)$ の 3 次元座標 $D^t(l)$ に移動させるのに最適な変換行列 $T'_{ij}(l)$ を、

$$\sum_Q |R'_{ij}(l)S^t(k) + t'_{ij}(l) - D^t(l)|^2$$

を最小にする最小自乗法によって算出する。

6. 4. における対応点探索の平均自乗距離、すなわち

$$e^2 = \frac{\sum_Q \{(col_k - col_l)^2 + (row_k - row_l)^2\}}{M}$$

が閾値以下になるまで、

$$T(r) = T'(r)T(r-1)$$

として 2. ~ 5. の処理を繰り返す。ここで M は、 $Q(k, l)$ の総数、すなわち、4. における探索処理によって見つけられた対応点の数であり、 $M \leq p$ である。観測可能なサンプル点数に対する対応点数の割合 M/p が小さい、あるいは、一定回数上記の処理を繰り返しても e^2 が収束しないならば、対応候補 $P(i, j)$ は誤りであったとみなして棄却する。

7. 全ての対応候補 $P(i, j)$ について上記の処理を行い、 M が最大で、対応の誤差、すなわち、

$$E^2 = \frac{\sum_Q |R_{ij}(r)S^t(k) + t_{ij}(r) - D^t(l)|^2}{M}$$

が最小である $T_{ij}(r)$ を認識結果として選ぶ。

初期照合は、局所構造である頂点を用いた照合であるため、頂点近傍のサンプル点を除き、図 13 の対応点探索が有効であるほどの認識精度を得られないことがある。このため、上記の処理を、以下に示すように 2 段階に適用している。

初期微調整: $V_M(i)$ を構成する二つの隣接するセグメント上のサンプル点のみを使って対応誤差を大まかに調整する

主微調整: 全てのサンプル点を使ってさらに精度を向上させる

微調整の効果を、以下の実験例から示す。図 14 は、一つの面のみから構成されている平面物体 (厚紙) の物体モデルと入力ステレオ画像である。(a) の物体モデルは、(b) とは別の角度から撮影したステレオ画像より、対話型モデルによって構築した。

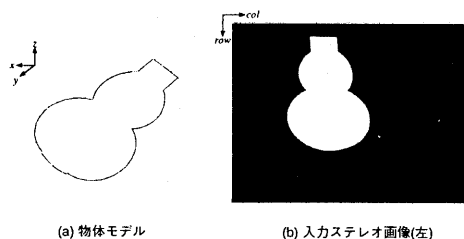


図 14: 平面物体の物体モデルと入力ステレオ画像

図 14(b) のステレオ画像から構築した認識データに対する初期微調整、主微調整の結果を図 15 に示す。図中、 \cdot は認識データの点、 \square は対応探索によって対応点が得られたサンプル点、 $+$ は対応点が得られなかったサンプル点をそれぞれ示している。初期微調整、主微調整がそれぞれ 3 回ずつ繰り返され、頂点近傍のサンプル点でしか得られていなかった対応が、モデル全体のサンプル点について得られていることがわかる。

4 実験

本システムは、SPARC Station 10 ワークステーション上に実装されている。認識システム・モデルの本体は C

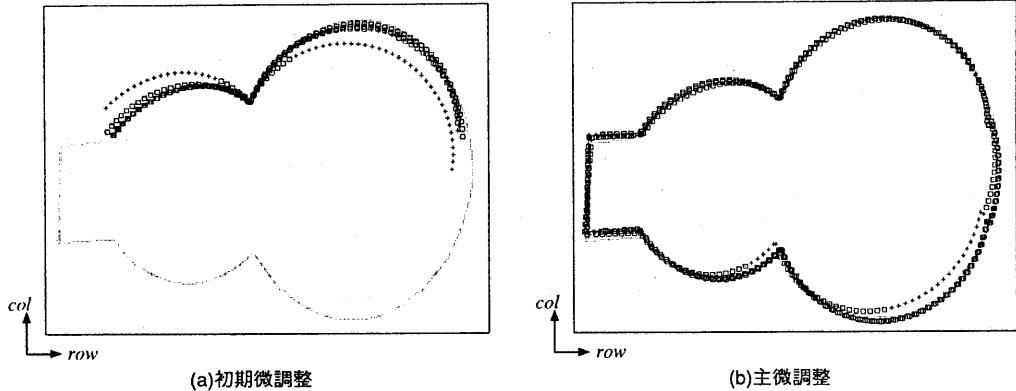


図 15: 2 段階の微調整処理

言語、GUI システムは Tcl/Tk、幾何モデラの物体モデリング部分は EusLisp でそれぞれ記述した。

図 16 には、図 8 の 3 次元 B-REP より生成した認識データから、図 11 の物体モデルに相当する積み木を認識した実験結果を示した。認識アルゴリズムによって得られた変換行列によって物体モデルを移動させ、図 4 の原画像(左)上に投影した。認識には約 6 秒を要した。

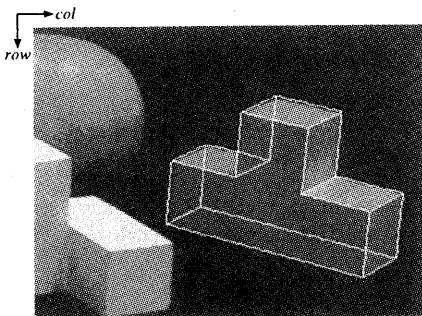


図 16: 実験結果

5 まとめ

segment-based のステレオビジョンシステムにおいて、シーン中の 3 次元物体の位置姿勢を決定するための手法について述べた。

本稿で述べた認識アルゴリズムは、真の輪郭線にのみ有効であり、図 1 に示したような、見かけの輪郭線である遮蔽輪郭には対応できない。従って、例えば無地の白

曲曲面体のように、表面形状、輝度変化とも滑らかに変化する物体は認識できない。

現在、物体モデルのデータ構造と認識アルゴリズムを遮蔽輪郭線に対応できるように拡張し、任意形状の物体を認識できるシステムを開発中である。

謝辞

日頃有益な助言と討論を頂く、電総研視覚情報研究室、PGV 研究会の各位に感謝致します。

参考文献

- [1] 富田: 3 次元ビジョンの実用化に向けて, 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 8, pp. 1124-1127 (1994).
- [2] 佐藤, 田村: 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, 情処学論, Vol. 31, No. 1, pp. 56-67 (1990).
- [3] 土肥, 石塚: ソリッドモデラと幾何学的推論を組み込んだ 3 D ビジョンシステム, 信学論 (D-II), Vol. J73-D-II, No. 10, pp. 1677-1686 (1990).
- [4] Shakunaga, T.: Pose Estimation of Jointed Structures, *Proc. CVPR'91*, pp. 566-572 (1991).
- [5] Kuno, Y., Okamoto, Y. and Okada, S.: Robot Vision Using a Feature Search Strategy Generated from a 3-D Object Model, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 13, No. 10, pp. 1085-1097 (1991).
- [6] Dickinson, S. J., Pentland, A. P. and Rosenfeld, A.: From Volumes to Views: An Approach to 3-D Object Recognition, *CVGIP: Image Understanding*, Vol. 55, No. 2, pp. 130-154 (1992).

- [7] Zhang, S., Sullivan, G. D. and Baker, K. D.: Relational Model Construction and 3D Object Recognition from Single 2D Monochromatic Image, *Image and Vision Computing*, Vol. 10, No. 5, pp. 313–318 (1992).
- [8] Wong, K. C. and Kittler, J.: Recognizing Polyhedral Objects from a Single Perspective View, *Image and Vision Computing*, Vol. 11, No. 4, pp. 211–220 (1993).
- [9] 深田: 部分エッジを用いた物体の構造復元と認識, 信学論 (D-II), Vol. J76-D-II, No. 6, pp. 1097–1105 (1993).
- [10] Alter, T. D.: 3-D Pose from 3 Points Using Weak-Perspective, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 16, No. 8, pp. 802–808 (1994).
- [11] Tan, T. N., Sullivan, G. D. and Baker, K. D.: Recognizing Objects on the Ground Plane, *Image and Vision Computing*, Vol. 12, No. 3, pp. 164–172 (1994).
- [12] 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, 信学論 (D-II), Vol. J73-D-II, No. 2, pp. 200–206 (1990).
- [13] 長田, 查: 曲面パッチに基づく画像記述を利用した三次元曲面物体の認識, 情処学論, Vol. 31, No. 4, pp. 581–590 (1990).
- [14] Vayda, A. J. and Kak, A. C.: A Robot Vision System for Recognition of Generic Shaped Objects, *CVGIP: Image Understanding*, Vol. 54, No. 1, pp. 1–46 (1991).
- [15] Kim, W.-Y. and Kak, A. C.: 3-D Object Recognition Using Bipartite Matching Embedded in Discrete Relaxation, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 13, No. 3, pp. 224–251 (1991).
- [16] Flynn, P. J. and Jain, A. K.: 3D Object Recognition Using Invariant Feature Indexing of Interpretation Tables, *CVGIP: Image Understanding*, Vol. 55, No. 2, pp. 119–129 (1992).
- [17] Stein, F. and Medioni, G.: Structural Indexing: Efficient 3-D Object Recognition, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 14, No. 2, pp. 125–145 (1992).
- [18] Li, S. Z.: Toward 3D Vision from Range Images: An Optimization Framework and Parallel Networks, *CVGIP: Image Understanding*, Vol. 55, No. 3, pp. 231–260 (1992).
- [19] Reid, I. and Brady, M.: Model-Based Recognition and Range Imaging for a Guided Vehicle, *Image and Vision Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 197–207 (1992).
- [20] Hanmandlu, M., Rangaiah, C. and Biswas, K. K.: Quadrics-Based Matching Technique for 3D Object Recognition, *Image and Vision Computing*, Vol. 10, No. 9, pp. 578–588 (1992).
- [21] 岡田, 金子, 佐野: 球面相関による3次元物体認識, 信学論 (D-II), Vol. J75-D-II, No. 12, pp. 2027–2037 (1992).
- [22] Arman, F. and Aggarwal, J. K.: CAD-Based Vision: Object Recognition in Cluttered Range Images Using Recognition Strategies, *CVGIP: Image Understanding*, Vol. 58, No. 1, pp. 33–48 (1993).
- [23] Quek, F., Jain, R. and Weymouth, T. E.: An Abstraction-Based Approach to 3-D Pose Determination from Range Images, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 15, No. 7, pp. 722–736 (1993).
- [24] 脇迫, 鎌田, 河川: 距離画像処理による3次元物体検出システム, 信学論 (D-II), Vol. J77-D-II, No. 7, pp. 1282–1292 (1994).
- [25] 角ほか: 画像の境界表現のデータ構造とインタフェース, 第49回情処学全大講演論文集, No. 2, pp. 123–124 (1994).
- [26] 河井ほか: ステレオカメラシステム — バタバタ —, 情処学シンポジウム (MIRU'94) 論文集, No. II, pp. 127–134 (1994).
- [27] 富田, 高橋: 画像のB-REPのためのアルゴリズム, 信学技報, No. PRU86–87 (1986).
- [28] 杉本, 富田: 輪郭線の屈曲点、変曲点、遷移点の検出, 情処学シンポジウム (MIRU'94) 論文集, No. I, pp. 83–90 (1994).
- [29] Matsui, T. and Hara, I.: *EusLisp Reference Manual version 8.00*, Electrotechnical Laboratory (1995).