

二次元モデルを利用したビンピッキングシステム

A Vision System for Bin Picking Problems using Two Dimensional Models

長田典子, 谷口博康, 深田陽司, 稲荷隆彦

Noriko Nagata, Hiroyasu Taniguchi, Youji Fukada and Takahiko Inari

三菱電機(株)

Mitsubishi Electric Corp.

This paper describes a method which constructs 2-D models of industrial parts and a bin picking vision system using these models. Parts are approximated as sets of simple structural components and their models are automatically constructed from their silhouettes that are divided into 2-D simple shapes. Models are represented as graphs whose nodes correspond to components and links reveal adjacency of those components. Although parts are piled up randomly in a bin, our vision system deals with binary images by limiting cylindrical parts. It can efficiently recognize parts by utilizing models.

1. はじめに

計算機による物体認識において、モデルベースの方式は処理の汎用性やシステムとしての柔軟性を高める上で非常に有効である。現在、形状モデリングの手法は数多く提案されており様々な表現方式や生成方式を取っているが、これらの方式はモデルの利用法によって異なってくる。

生産ラインでの視覚システムにおいても、重なりあった物体や任意の姿勢を取る物体の認識など高度な機能が求められるが、実時間性を考慮しなければならず、汎用的な三次元物体認識処理のように三次元モデルとのマッチングを取るため濃淡画像や複眼視を用いて膨大な計算を行なうことはできない。筆者らはシステムとして比較的実現しやすい単眼視、二値画像による産業部品の認識方法の検討を進めているが、すでに二次元モデルの考え方を利用したクランクシャフトの認識など^[1]で二次元形状のモデルマッチング手法の有効性を確かめている。本稿では、この二次元認識処理に利用する産業部品の二次元モデリングの手法について報告し、次いで実際にこの手法を用いたビンピッキングビジョンシステムの紹介を行なう。

2. 基本的な考え方

汎用の三次元物体認識のためのモデル表現法には、円筒表現や^[2]拡張ガウス像表現^[3]などがある。これらは任意の形状を正確に表現でき、任意の三次元姿勢の認識に対応できる。一方モデルの生成方法にも、CADシステムを用いる方法や^[4]実物を見せる方法^[5]がある。ここで産業部品の認識に限って考えてみると、部品は一般に単純な形状部分の組み合わせである場合が多いこと、また任意の三次元姿勢を取るわけではなく、ある程度起こり得る姿勢を予測できることなどから、モデルの持つべき表現能力や情報量を制限することができる。また実用システムとしては、物体の教示作業が容易であり処理時間が短い必要がある。これらを考

慮して、我々は以下のようなモデリングの方式を検討した。

- 1) カメラからの入力二値画像の特徴がそのまま対象物体の特徴であると解釈し画像についての二次元モデルを作成する。
- 2) 物体のたまかな形状の記述や各部分の相対的位置関係の表現ができるように、モデルはプリミティブと呼ぶ数種類の基本図形（円、平行四辺形、三角形など）の連結として記述する。
- 3) システムは入力画像を適当と判断されるいくつかのプリミティブに近似することで自動的にモデルを生成し、認識の際にはこのモデルとシーンとのマッチングを取る。
- 4) ただし一般に物体は認識時に固定の三次元姿勢を取らないので、モデルは一つの対象物体に対して複数の二次元形状（代表的な起こり得る姿勢）を記憶するデータ構造（いわゆるOR tree）を構成する。

この方法は、汎用性には欠けるが生産ラインにおける適用範囲が広く、実用の可能性も高いものと思われる。

3. モデル作成

3.1 前処理

対象物体をカメラ入力し二値化した画像はランレングスデータ（変化点データ）に変換されるが、このデータに対し連結性解析を行ない画像を連結図形（領域）群に分割する。そしてこれら領域ごとに反時計まわりの外周点列を求めてそれぞれを直線近似^[6]すると、各領域は多角形に近似され多角形の頂点の座標列が得られる。例えばFig.1及びFig.2はそれぞれクランクシャフトの外観及び上記処理を施し多角形データに変換した結果であるが、表面の粗い部分は十分な光を返さないため画像上には現れず、実物の輪郭と画像上の形状が異なることを示している。

3.2 データ構造

前処理の結果はグラフ構造及び巡回リスト構造を用いて表現される（Fig.4）。巡回リストはある多角形の頂点座標列を表現する構造であり、リストのノードには各頂点のデータに加えて頂点とその隣点との関係（多角形の辺に相当する）についても記述される（以下この頂点と辺とを併せてエッジと呼ぶ。Fig.3）。即ち頂点の座標値、エッジの長さ、角度及び隣りのエッジへの

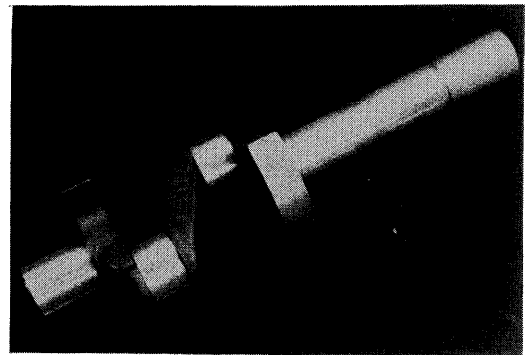


Fig. 1 Crankshaft

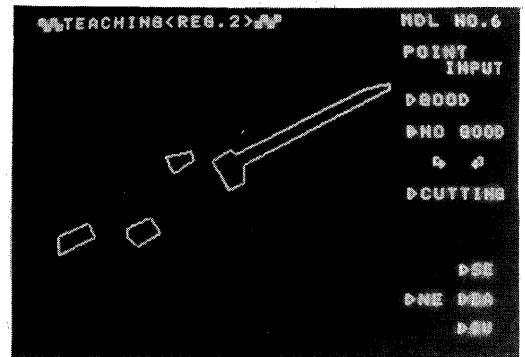


Fig. 2 Result of line fitting procedure

ポインタなどから構成される。さらに画像全体を表現するのにグラフ構造を用いている。グラフのノードは巡回リストあるいは後述するプリミティブ抽出処理において巡回リストから切り出されるプリミティブであり、グラフのリンクはこれからノードの隣接関係を表すもので、実際には隣接マトリックスを用いて表現している (Fig.5)。例えば Fig.4 の Step 1 において左端の4つの箱がグラフのノードを表わし、ノードのポインタの指示する先が巡回リストを表わしている。Step 1 はプリミティブ抽出処理前であるので、グラフのノード数は領域数に等しく隣接関係は生じていない。

また全領域のエッジについて長いものから順に並べた順序リストを作成しておき、この順序リストを用いて処理の流れを制御する。

以下にモデル生成の手順について述べるが、この処理は巡回リストの分割とそれに伴うデータ修正に相当する。

3.3 プリミティブ抽出処理

多角形データからモデルを生成する処理は主として、多角形からプリミティブと成り得る形状を持つ部分を探し一個のプリミティブを決定する手続きと、これを多角形から切り出してモデルの一要素として登録し、残りの部分を新たな多角形とするためデータを修正する手続きから成る。順序リストに従って長いエッジから順にその長さに応じた精度で手続きを施していき、処理の対象となるエッジが存在しなくなったところで処理を終了する。

以下に2つの手続きについて各々説明する。

3.3.1 プリミティブ探索

プリミティブ探索の手続きは、注目すべきエッジを決定した後エッジの周囲の形状を調べて切り出すプリミティブの形状を決定する。

まず順序リストより基準長以上であってその時点における最長のエッジを求めて、それをカレントエッジと定める (Fig.3a)。カレントエッジを基点として、プリミティブとして抽出し得る形状部分が存在するかどうかをこのエッジが属する巡回リストに関して調べる。平行四辺形を例に取れば、カレントエッジを平行四辺形の一辺の一部としたとき、その対辺の一部を成すエッジを探索する。即ちカレントエッジの左側 (領域側) に存在し方向がこれとほぼ 180° 異なるようなエッジのうち、カレントエッジに近く長さが適当であると判断されるエッジが存在すればそれを選択する (Fig.3b)。

注目すべきエッジが決定すれば、これらの周囲のエッジの形状を調べて小さいエッジの吸収や必要であればエッジの接続や切断を行ない、プリミティブの各頂点を決定する。

3.3.2 プリミティブ切り出しとデータ修正

プリミティブとして切り出された図形部分は、近似プリミティブの形状に相当するデータ、例えば平行四辺形であれば2本のベクトルの大きさ、方向及び中心位置の値に変換され、プリミティブの種類の情報などと共に1つのノードとしてグラフに付加される。

一方多角形からプリミティブを切り出した残りの部分を新たな多角形と見なす。即ち概当する巡回リストを分割し、切り口部分を新しいエッジとしてそれぞれ付け加えて新たに2つの巡回リストを形成する (Fig.3c)。そしてこのリストが基準以上のエッジ数及び総エッジ長を持つなら、グラフ構造の新たなノードとして

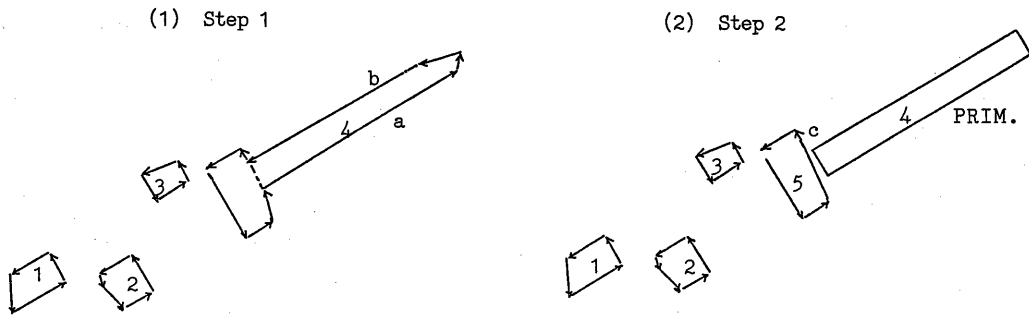


Fig. 3 Primitive extraction

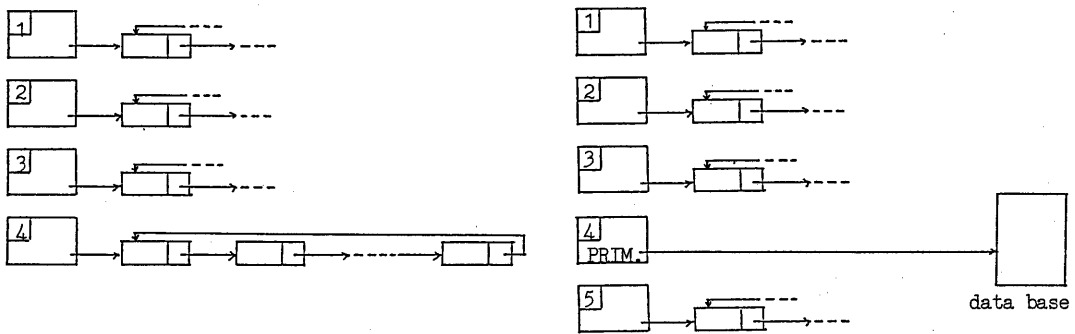


Fig. 4 Graphs and Curcular lists



Fig. 5 Adjacency matrix

付加する。基準に満たない巡回リストは抹消する。

次に隣接情報の修正を行なう。プリミティブとこのプリミティブの切り出し時に新たに形成された巡回リストとは隣接しているとする。プリミティブ切り出し時に切り口から生成されるエッジに対して、このプリミティブに相当するノードへのポインタを与える。ゆえに、プリミティブあるいは巡回リストについてもエッジをたどると、隣接しているプリミティブの情報を得ることが出来る。これより隣接マトリックスの修正を行なう (Fig.5)。

3.4 モデルのデータ構造

上記処理の結果、対象図形はグラフ構造を用いてプリミティブあるいは近似で

きなかつた部分は多角形(巡回リスト)のままとして、隣接関係を保ちながら表現されている。これをさらにモデルのデータ構造に変換する。

モデルは要素の連結によって表現する。要素は近似プリミティブである。連結しているとはグラフ構造において隣接関係があるか、もしくは巡回リストを介して隣接しているかであって、グラフのノードのうち巡回リストに相当するノードを削除し、隣接マトリックスを修正して新たに連結マトリックスを作成する。モデルは主として以下の4種類の情報を持っている。

- 1) 各要素の情報
- 2) 要素間の連結情報
- 3) 異なる姿勢を取るときの複数個の形状(それぞれが1), 2)の情報を持つ)
- 4) 認識時に用いる特徴パラメータ値(4節参照)

Fig.6にクランクシャフトのモデルの形状を示す。

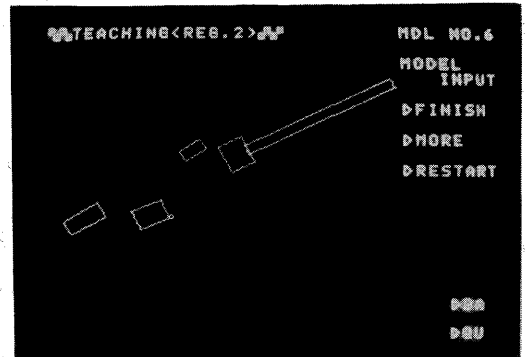


Fig. 6 Model of a crankshaft

4. ピンピッキングビジョンシステム

ここでは前節までに述べてきたモデリングの手法の実例として、我々が開発したビジョンシステムの紹介を行なう。

生産ラインにおける視覚システムに対して望まれる機能に重なりあった物体の認識がある。これが可能であれば、一般にピンピッキング問題と呼ばれる部品の山から一つをつかむ作業を視覚により実現でき対象範囲が大きく広がると思われるが、実用化には処理速度など様々な問題がある。

今回、対象物を棒状物体に限定することによって、二値画像に対する比較的簡単な処理で部品を認識することが可能となり実用化に対する見通しも得られた¹⁾。

本システムはモデルの教示部と物体の認識部から構成される。認識の基本原理、教示部及び認識部について順に説明する。

4.1 基本原理

対象とする棒状物体とは、径に対して軸長が比較的長い円筒部を基本部分(主要素)とし、それに他の要素が附属している物体をいう。棒状物体の重なり状態を画像入力し二値化すると、円筒のサイド部分が十分な反射光を返さないため互いに分断される(Fig.12)。この性質を利用して二値画像で重なり物体の認識を行なっている。また、棒状という特徴から、図形の midpoint 列を直線近似して得られる直線データを用い処理時間の短縮をはかっている。

4.2 モデル教示部

認識を行なう対象物体の形状を登録する。前節で画像からモデルを自動的に生成する処理について述べたが、本システムはこのモデル生成過程を対話的に進める機能を備えている。これはシステムが自動的に生成したモデルの各要素の中には、認識時に物体の特徴として調べる必要のない部分が含まれている場合や、反対に物体認識のカギとなる部分でありながらシステムがプリミティブとして切り

出すことのできなか、た部分が存在するような場合などに対処可能とするためである。具体的には、システムが画像から自動的に生成したモデルに対して修正を加えたい場合に対話モードを選択すると、対話モード上で、システムのサポートを利用しながら要素ごとの登録を行なう機能やポイント指示でプリミティブを抽出する機能が利用できる。

なお、本システムのモデル表現機能はプリミティブとして長方形のみを認めている。また、認識時の特徴パラメータには要素ごとの面積、周囲長や、回転対称図形であるかどうかの判定などがある。

4.3 認識部

認識処理はモデルとの一致度を見るモデルマッチング方式を用いている。入力二値画像はランレングステータに変換されており、連結性解析、直線近似、主要素探索及び他要素探索の順に処理を施されて1つの物体が認識される。以下各々の処理について述べる。

- 1) 連結性解析----ランレングステータから画像を領域群に分割し、さらに単純な図形であるセグメントに分割する。Fig.7では水平走査された画像が3個の領域と11個のセグメントに分割されている。
- 2) 直線近似----セグメントごとに中心点列を求め、その中心点列に対して直線近似を施し直線データを作成する (Fig.8)。
- 3) 主要素探索----直線データの中からモデルの主要素の長さに近い長さを持つ直線を抽出する (Fig.9 (a))。存在しなければまず同一領域内において、次には異なる領域間において連結してモデルの長さに達する直線群を抽出する (Fig.9 (b)(c))。
- 4) 他要素探索----抽出した直線を主要素と仮定し、モデルから得られる位置関係及び長さの値から処理領域を設定してその領域内に他要素が存在するかを調べる。そして最後に主要素、他要素それぞれのモデルとの一致度を総合し、一定基準以上であれば物体が存在していると判断する。なお、上記処理は物体が乱雑に格納されていることを考慮して水平走査と垂直走査について交互に行なわれる。

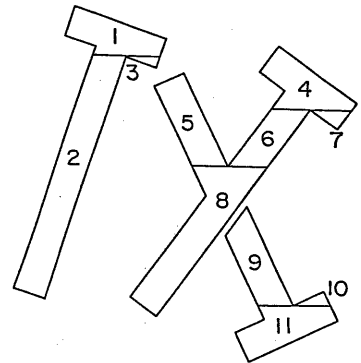


Fig. 7 Regions and segments

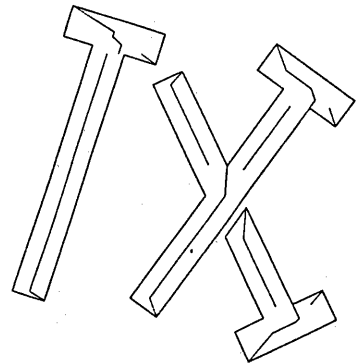


Fig. 8 Lines of segments

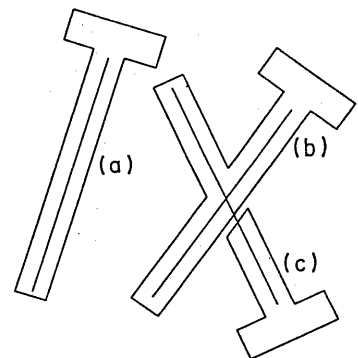


Fig. 9 Lines of axes

4.4 三次元位置情報

視覚システムはピンピッキング作業を行なうロボットに対して、二次元平面上の位置だけでなく三次元位置のデータを与える必要がある。しかし単眼視及び二値画像データから三次元位置の情報を得ることはできない。

三次元位置情報は、ロボットが物体を把持する時のみでなく、認識時においても必要とされる。認識時に物体が存在する高さモデル教示時の高さか異なれば画像上の対象物体とモデルの大きさが異なるためである。

モデルの教示作業を行なう位置を通る水平面を基準面と呼ぶ。認識を行なう前にカメラから基準面までの距離をシステムに入力しておく。入力画像に認識処理が施され1本の物体が認識されたとき、認識物体の見かけの位置は基準面上における二次元位置であり、実際に物体が存在する位置は、カメラと基準面上での認識位置（見かけの位置）とを結んだ直線上のある一点であると考えられる（Fig.10）。

そこで、認識処理を実行して得られた基準面上の認識位置と先に入力したカメラまでの距離からその直線を算出し、この直線に沿ってロボットのハンドを移動させる。ロボットの爪の間にはリミットスイッチを装備し、物体がハンドの間にはいったことをこのリミットスイッチによって検知した時点でハンドを閉じれば、物体を把持することができる。また、ピンピッキング作業の性質から三次元位置が急激に変化することは少ないとの仮定の元に、物体を把持した時点の三次元位置を視覚システムにフィードバックし、次の認識時におけるモデルと画像上の物体との相対比算出に用いる。

4.5 結果

本ピンピッキングシステムは当社の汎用視覚装置 MELFA IS-211 及び水平関節型ロボット MELFA RH-211 より構成されている。IS-211 は CPU に i8086 及び i8087 (8MHz) を用いている。アルゴリズムは主としてモデリング及び認識部は PASCAL、画像処理部は FORTRAN、対話機能部分は PL/M にて実現されている。Fig.11 はボルトのモデル、Fig.12 及び Fig.13 はボルトの認識結果を示している。8本認識されており、処理時間は約10秒であった。

5. まとめ

本稿は、産業部品の認識に利用する二次元モデルの表現法とモデルの自動生成

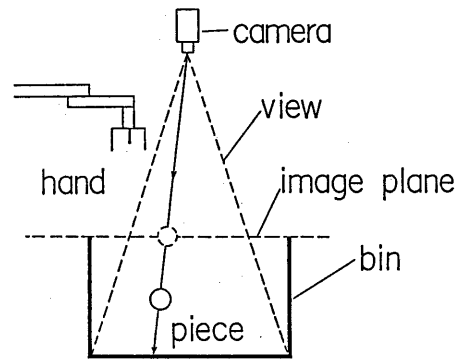


Fig.10 Acquisition of a part

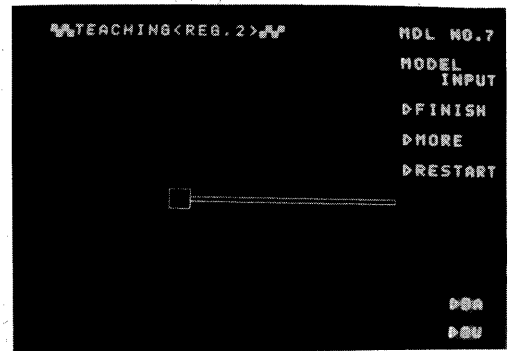


Fig.11 Model of a bolt

法の提案、及び、実際にこの手法を用いたビンピッキングシステムについての報告を行なった。この手法は簡単ではあるが、今回扱ったボルトやクランクシャフトなど比較的単純な形状を有する物体については、自動的に適切なモデルを生成できることを確認した。また、視覚システムとして、対象物体の制限はあるが実用レベルの処理能力を実現できることを示した。

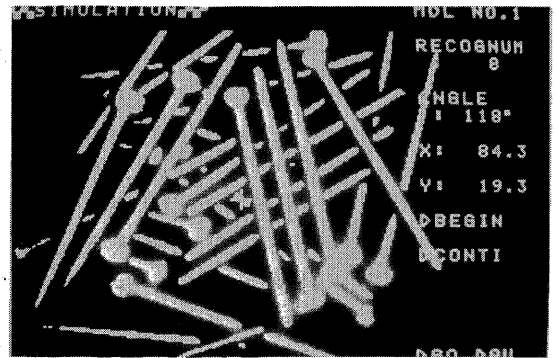


Fig.12 Binary image

参考文献

- [1] Y. Fukada, et al., "Relationships-based recognition of structural industrial parts stacked in a bin", *Robotica*, vol. 2, pp. 147-154, 1984.
- [2] R.A. Brooks, "Symbolic reasoning among 3-D models and 2-D images", *Artificial Intelligence*, vol. 17, pp. 285-348, 1981.
- [3] 池内, 長田, ホーン, ニシハラ, "照度差ステレオとプリズムステレオによるビンピッキングタスク中のグリッパの姿勢決定", *信学論*, vol. J68-D, no. 4, pp. 546-553, 1985.
- [4] 越川, 白井, "境界による見える部分の記述を持つ投影体の生成", *情報会研資*, 7"ラフィックスとCAD, 17-3, 1985.
- [5] R. C. Bollès and R. A. Cain, "Recognizing and locating partially visible objects: the local-feature-focus method", *Robotics Research*, vol. 1, no. 3, pp. 57-82, 1982.
- [6] T. Pavlidis and S. L. Horowitz, "Segmentation of plane curves", *IEEE Trans. Computers*, vol. C-23, no. 8, pp. 860-870, 1974.
- [7] 谷口他, "重なりあつた棒状物体の認識", 第24回SICE学術講演会, pp. 871-872, 1985.

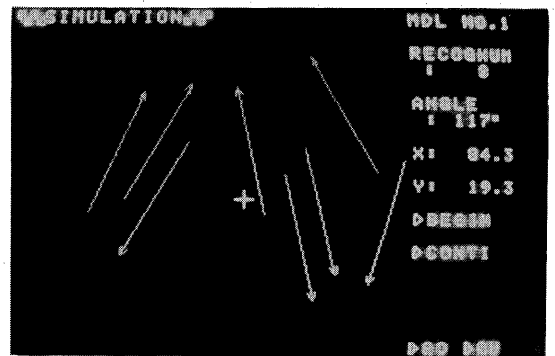


Fig.13 Recognition result