

粗い距離画像を用いた高速ビンピッキング 視覚システムの構築*

梅田 和昇** 新井 民夫***

Fast Vision System for Bin-Picking Using Sparse Range Image

Kazunori UMEMA and Tamio ARAI

Visual functions for bin picking are realized fast by utilizing a sparse range image. The functions are composed of (1) detection of a necessary part from a lot of parts piled on each other, and (2) measurement of its three dimensional position and orientation. Framework of the vision system is discussed on the assumption that a shape model of the necessary part is given. Method of fast segmentation of a sparse range image is presented for the part's detection. Four kinds of shapes: polyhedra, cylinder, cone and sphere are chosen as important shapes for industrial bin-picking, and for each shape, examination if a segment of a sparse range image is the shape, and measurement of its three dimensional position and orientation are shown. Experiments with a real fast range sensor and a personal computer show that the presented vision system is fast: total process time is less than 1.5 s for multiple piled cylinders.

Key words: bin-picking, range image, sparse image, model based vision, extended Gaussian Image, segmentation

1. 序 論

自動組立において重要なビンピッキングの実用化には、ビンの中の多数の部品から必要な部品を検出し、その3次元位置・姿勢を計測する視覚機能が不可欠である。ビンピッキングでは、部品が重なり合っているために、(1)見え方が変化する、(2)オクルージョンが頻繁に起こるといった問題が生じる。このような条件下で汎用性のある視覚機能を実現するためには、3次元情報を直接持つ距離画像の利用が有効である¹⁾。これまでに距離画像を用いたビンピッキング用の視覚システムの研究がいくつか行われてきた^{2)~4)}。しかしながら、これらの研究は距離画像の入力ならびに処理に時間を要し、実用的な視覚システムを構築するには至っていない。高速化のための手段として、測定点数の少ない“粗い距離画像”を用いることが考えられる。実際、粗い距離画像ならば、高速に輸入可能な距離センサが開発されている⁵⁾⁶⁾。また、粗い距離画像を前提とした処理手法の確立は、処理の安定性の向上、センサの低コスト化にもつながる。

そこで本論文では、ビンピッキング視覚システムにおいて“粗い距離画像”を用いて、高速に部品の検出、位置・姿勢の計測を行う手法を構築する⁷⁾⁸⁾。2章でモデルベーストビジョンの立場からビンピッキング視覚システムの処理の枠組みを示したのち、3,4章で具体的な手法を提案する。3章では複数の部品を含む粗い距離画像を個々の部品領域に高速に分割する手法を提案し、4章では具体的な形状として、産業応用上重要な多面体・円筒・円すい・球の4つの形状を対象とし、各々の判別・計測手法を提案する。そして5章で実験を行い、本論文の粗い距離画像を用いた視覚システムの有効性を示す。

2. 処理の枠組み

ビンピッキングでは、部品の形状・寸法が既知であるため、形状モデルを利用したモデルベースでの処理が可能である。以下、モデルベーストビジョンの立場から、粗い距離画像を用いたビンピッキング視覚システムの処理の枠組みを示す。

2.1 視覚システムの全体構成

ビンピッキングの手法は、一般的な認識処理手順とは逆に、まず必要な部品の形状モデルが与えられ、次にそのモデルに適合する対象物を探すという手順をとる。そのため、汎用的な手法の必然性は低く、部品ごとに各々適したモデルの表現法や検出・計測手法を構築すればよい。そこで、視覚システムは、図1に示すように、必要な部品に応じて各々の処理ルーチン呼び出すという構成をとる。

2.2 各部品の検出・計測処理の流れ

各部品に対する処理は、モデルベースで、図2に示す手順で構築する。まず、距離画像を分割して候補領域を抽出し、測定点数の多さなどで優先順位をつける。次に、候補領域が対象とする部品であるかどうかを形状モデルと比較して判別する。そして、対象とする部品であれば、形状モデルとのマッチングに

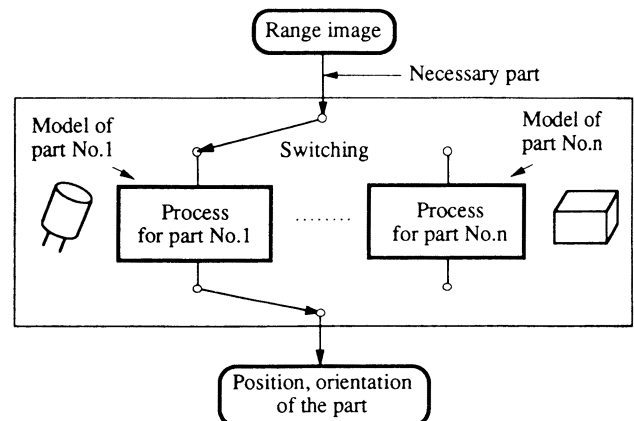


Fig. 1 Frame of model based vision for bin-picking

* 原稿受付 平成5年6月30日

** 学生会員 東京大学工学部 (現, 中央大学理工学部; 東京都文京区春日1-13-27)

*** 正 会 員 東京大学工学部 (東京都文京区本郷7-3-1)

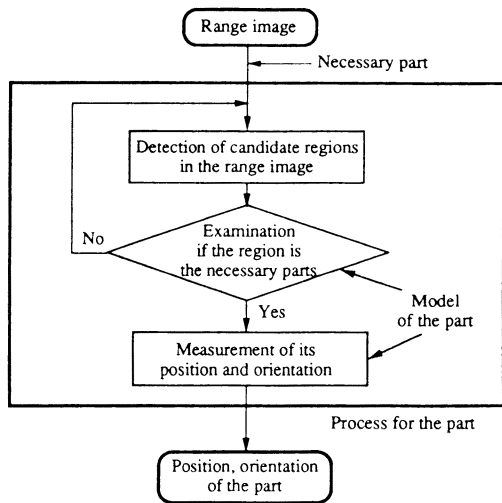


Fig. 2 Process for each part

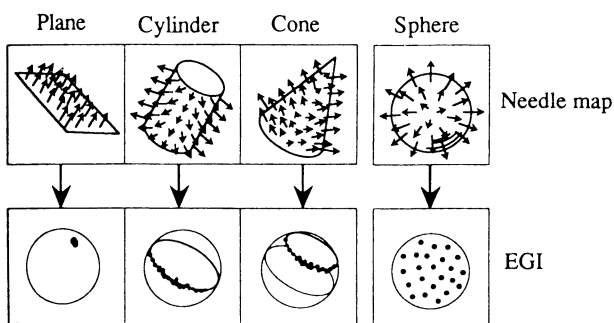


Fig. 3 Extended Gaussian image of primitive surfaces

より、その領域の位置・姿勢を計測する。

2.3 粗い距離画像における形状の記述

粗い距離画像では、一般の画像処理でしばしば用いられるエッジ・頂点の抽出が困難であり、これらに基づいた形状の記述は適さない。一方、粗い画像からでも、距離画像の各計測点における法線ベクトルは、各点の近傍に微小平面パッチを当てはめることによって計測できる。一般に、各計測点で法線ベクトルを求めたものを Needle Map と呼ぶ。法線ベクトルの分布のみにより形状を記述する方法として、半径1のガウス球上への法線ベクトルの射影である拡張ガウス像が知られている⁹⁾。拡張ガウス像は、平面、円筒面、円すい面を図3に示すように

- 平面 : 点
- 円筒面 : 中心を通る円周
- 円すい面 : 中心を通らない円周

と簡単に表すので、これらの面形状を含む物体の検出・計測処理のために適した形状の記述であるといえる。

3. 粗い距離画像の高速領域分割法

ピンピッキングでは、多数の部品をすべて正確に検出するよりも、その中からいくつかを高速に検出することが望まれる。そこで本論文では、ハフ変換のような強力ではあるが処理時間を要する手法¹⁰⁾は用いず、粗い距離画像に適用可能で、かつ高速な領域分割手法を提案する。以下、処理の手順を図4に従って示す。

(1) 距離の有無による分割

距離が計測されたかどうかにより、通常の2値画像の場合

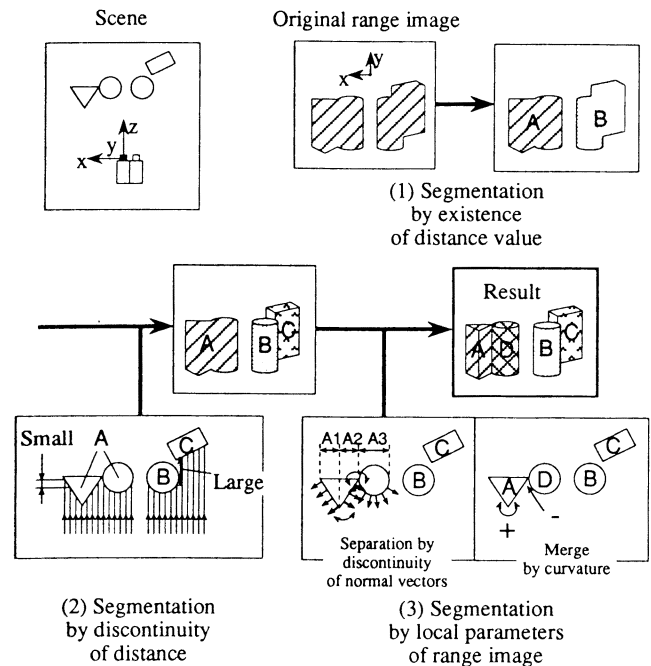


Fig. 4 Fast segmentation of range image

と同様にして領域を分割する。

(2) 距離の不連続性による分割

距離の差が大きい隣接点間を分割する。

(3) 微小領域の特微量による分割・併合

(1), (2) の処理で分割できない、同程度の距離にあって隣接している物体を分割するために、距離画像の微小領域で計測される特微量を用いる。物体間の境界では、法線ベクトルの角度変化が大きいと考えられる。そこでまず法線ベクトルが不連続な隣接点間を分割する。次に凸物体を仮定し、凸で隣接する領域間を併合する。

以上の手順に従えば、図4に示すように凸物体を分割することができる。

4. 部品の判別・計測

領域分割によって得られた候補領域が求める部品であるかどうか判別し、その位置・姿勢を計測する手法を具体的な形状に対して構築する。2章で主張したように、これらの処理は部品形状ごとに適した手法を構築すべきである。そこで産業応用上の重要性を考慮して、実際の部品中に多く含まれる多面体、円筒、円すい、球を対象とする。球以外の形状に関しては、2.3節で述べた拡張ガウス像を利用することにより、粗い距離画像における高速処理を実現する。

4.1 多面体部品

粗い距離画像の候補領域から得られる拡張ガウス像との対応づけを行いやすいように面に着目し、基準座標系から見た各面の重心位置、法線ベクトル、ならびに面積を形状モデルの属性として用いる。

(1) 判別

多面体であることの判別

図5(a)に示すように、候補領域の拡張ガウス像がクラスタリングによって幾つかの集中する領域に分離できれば、多面体であると判別する。この時、法線ベクトルの誤差分布をあらかじめ実験的に調べてクラスタリングのためのしきい値を定めておき、領域全体の点数に比して十分多くの点がしきい値内の領

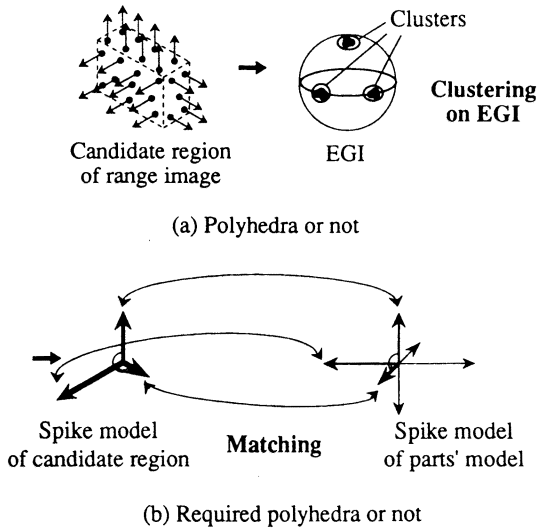


Fig. 5 Examination of polyhedra

域に含まれる時に、それを1つのクラスタとみなす。

求める多面体であることの判別

上記のクラスタリングによって分離された各面の法線ベクトル、重心位置、面積を求める。面の法線ベクトルは、面に含まれる各点での法線ベクトルの平均によって求められる。図5(b)に示すように、各面の面積、面間の角度をモデルと比較し、候補領域の面とモデルの面との対応づけを求めることによって、求める多面体部品であるかどうか判別する。なお、図中の Spike Model は、各面の面積を矢印の長さで、法線ベクトルを矢印の向きで表したものである⁹⁾。

(2) 位置・姿勢の計測

姿勢の計測

モデルの各面の法線ベクトルを、候補領域の対応する面の法線ベクトルと一致させる座標変換行列を最小2乗法で求め、このときの座標変換行列を多面体の姿勢とする。なお、距離画像から多面体の1面しか計測されなかった場合には、その面の法線ベクトル回りの自由度が残る。

位置の計測

以上で求めた座標変換行列によって回転させたモデルの各面と候補領域の対応する面との距離を最小にする並進ベクトルを、多面体の位置ベクトルとする。

4.2 円筒部品

円筒の半径、高さを形状モデルの属性として用いる。

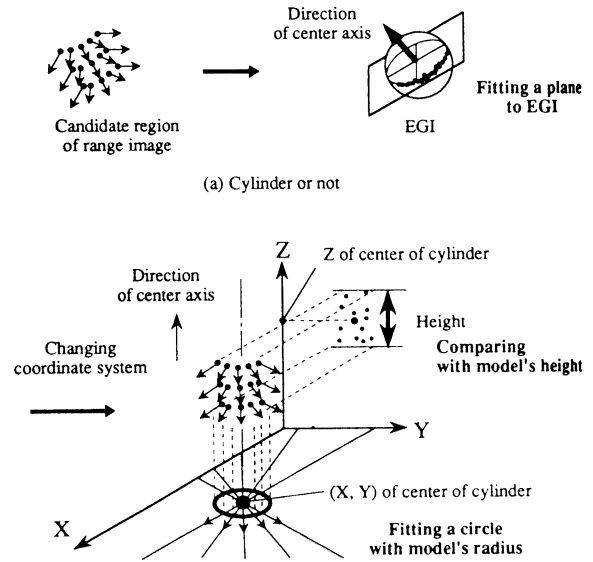
(1) 判別

円筒であることの判別

候補領域の拡張ガウス像を求める。多面体の場合と同様にクラスタリングによって平面領域を求め、それを円筒の底面とみなして候補領域から除く。そして図6(a)に示すように、残りの領域の拡張ガウス像に対してガウス球の中心を通る平面を当てはめ、誤差が小さければ、領域は円筒面である、よって候補領域全体は円筒であると判別する。

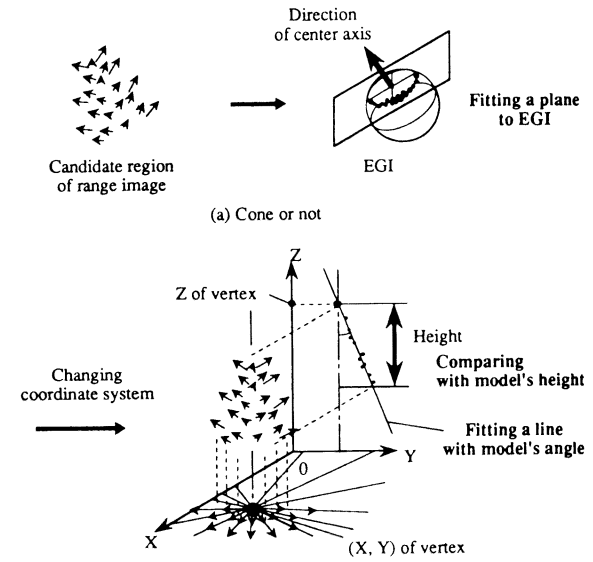
求める円筒であることの判別

拡張ガウス像に当てはめられた平面の法線ベクトルが、中心軸の方向ベクトルである。次に図6(b)に示すように、中心軸の方向ベクトルがZ軸と平行になるように座標変換し、XY平面において円を当てはめる。当てはめ円の半径は、モデル円筒の半径とする。このとき円の当てはめ誤差が小さく、さらにZ軸方向の点の分布の範囲がモデルの高さとほぼ等しい場合、



(b) Required cylinder or not

Fig. 6 Examination of cylinder



(b) Required cone or not

Fig. 7 Examination of cone

求める円筒部品であると判別する。

(2) 位置、姿勢の計測

判別の過程で、姿勢として中心軸の方向ベクトルが求められる。また、位置として、図6(b)の $[X, Y, Z]^T$ を元の座標系に戻すことにより、中心位置が計測される。さらに底面が検出された場合には、平面の方程式を求め、円筒面の計測結果とあわせることで、計測精度を高くできる。

4.3 円すい部品

円すいの頂角、高さを形状モデルの属性として用いる。円筒部品の場合と同様にして、判別ならびに頂点の位置・中心軸の方向ベクトルの計測を行う。図7に判別手順を図示する。拡張ガウス像に当てはめられた平面としては、モデルの円すいの頂角を ϕ として、 $\sin \phi$ だけ中心からはなれた平面を用いる。

4.4 球部品

形状モデルの属性としては、半径のみを持たせればよい。モ

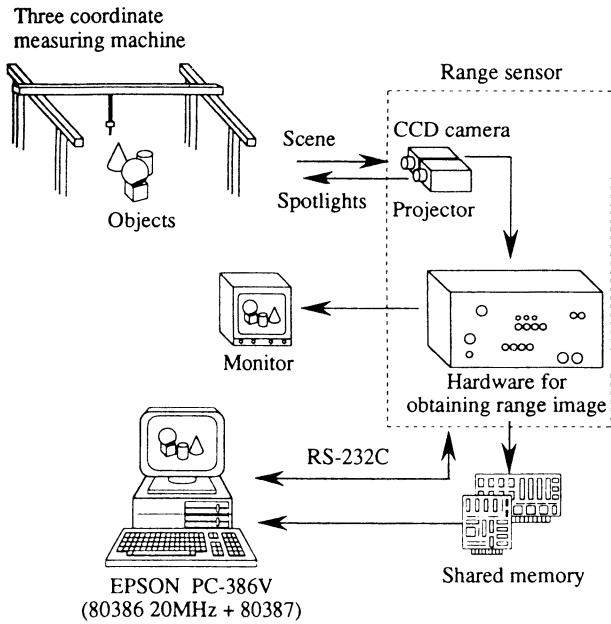


Fig. 8 Experimental system

デルの半径の球面を候補領域に直接当てはめ、当てはめ誤差が小さければ、求める球であると判別する。そしてこの時当てはめられた球面の中心位置が、球部品の位置を表す。

以上、4つの部品の判別・計測手法を示した。

5. 実験

以上の視覚システムの有効性を検証するため、実際の距離画像センサで得られた“粗い”距離画像を用いて実験を行った。

5.1 実験システムの構成

実験システムの構成を図8に示す。距離画像入力用センサはキャノンの反町により開発されたものを用いた⁶⁾。多点のスポット光を投影し、各スポット像までの距離を三角測量の原理で計測する。ハードウェア処理により1/30秒で距離画像(8ビット値)を計測できる。画素数は1056点と、粗い画像である。また計測距離1000mmにおいて、奥行き方向の距離計測誤差は約1.3mm、計測対象物上の測定点の間隔は約11mmである。演算用のコンピュータには、EPSONのPC386V(CPU 80386 20MHz+80387)を用いた。

5.2 基礎実験：4種の形状の判別・計測

領域分割ならびに4種の形状の判別・計測手法の有効性を検証するための実験を行った。(1)1辺が60mmの立方体、(2)半径24mm、高さ75mmの円筒、(3)頂角30°、高さ80mmの円錐、(4)半径37mmの球を図9(a)に示すようにセンサから約1000mmの所に置き、距離画像を計測した。図9(b)に計測された距離画像(各点で計測した法線ベクトルを重ねたNeedle Map)を示す。網の目の交点が、距離が計測された点であり、網の目は隣接する距離計測点を結んだものである。また法線ベクトルは、各点の近傍の7点に平面パッチを当てはめて計測した。まず3章に従って領域分割した。この時、傾きが60°以上の面の距離が計測されないと仮定し、距離計測点の間隔が11mmであることから、(2)の距離の不連続性のしきい値を20mm(11mm×tan60°)とした。また、(3)に関しては、法線ベクトルの角度の差が10°以上の隣接点を分割

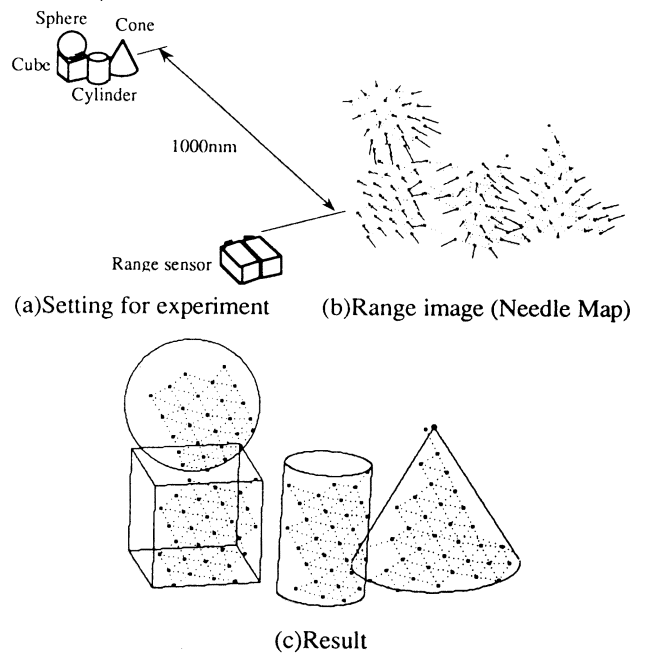


Fig. 9 Segmentation, examination and measurement of four objects

Table 1 Measurement of four objects

		Position mm	Orientation
Polyhedra (30 points)	Result	[30.3, -64.9, 1019.3]	[0.001, 0.999, -0.046] (Normal vector)
	Error	[-3.1, 1.2, 0.4]	2.6°
Cylinder (31 points)	Result	[-26.3, -58.3, 962.6]	[0.037, 0.999, -0.046]
	Error	[-1.3, 1.9, -1.6]	2.1°
Cone (34 points)	Result	[-96.2, -14.4, 993.0]	[0.039, 0.999, -0.037]
	Error	[-2.0, 1.0, -2.6]	3.1°
Sphere (27 points)	Result	[33.7, 0.1, 1017.4]	—
	Error	[-2.3, 0.2, -0.4]	—

し、凸で隣接する領域の併合手法として、隣接点へのベクトルと法線ベクトルの間のなす角が90°以上の場合に、隣接点を併合した。これらの角度のしきい値は、実験的に定めた。以上の処理で図9(a)の距離画像は、4つの形状に対応する領域に分割された。そして各領域に対して形状の判別処理を行った結果、各領域が正しい部品形状と判別された。なお、この実験では、判別として4つの形状のいずれかの区別のみを行っている。さらに計測処理を行った結果を図9(c)および表1に示す。図9(c)は距離画像にモデルを重ね書きした結果であり、両者の一致度が高いことより、計測手法の妥当性が主張される。さらに表1に示す計測誤差は、ピンピッキングにおいて実用可能な程度に小さいと考えられる。また、処理時間は、

法線ベクトルの計測：0.20秒

領域分割：0.14秒

判別・計測：各領域に対し0.1秒以下

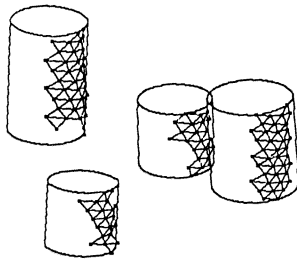
と、一般的なパーソナルコンピュータを用いているにもかかわらず、他の研究例(例えば文献11)では同等の対象に対し、6分以上を要している)に比べ非常に高速であり、本論で提案した領域分割手法ならびに各形状に対する判別・計測手法の、高速性における有効性が主張される。また、上記の4つの形状に関し、別個に、図9と同等の配置で5回の計測を行った結果を表2に示す。総じて、ピンピッキングに適用可能な程度の誤差

Table 2 Error of measurement for four objects

Experiment No.		1	2	3	4	5
Polyhedra	Position mm	14.5	2.4	2.3	2.5	19.4
	Orientation °	8.0	0.0	2.1	0.0	4.6
Cylinder	Position mm	1.6	2.0	2.1	4.9	2.3
	Orientation °	3.5	1.3	0.8	8.3	2.6
Cone	Position mm	11.0	6.5	13.6	10.7	12.2
	Orientation °	2.1	3.5	5.8	4.7	2.5
Sphere	Position mm	4.4	3.8	5.8	3.4	5.0



(a) Object scene



(b) Result

Fig. 10 Detection and measurement of multiple cylinders

での計測が実現できたと主張される。多面体の No. 1, 5 などでは他より大きな誤差を生じているが、このような計測失敗は、距離画像と形状モデルとの当てはめ誤差から検出することができ、ビンピッキングではそれほど大きな問題ではないと考えられる。

5.3 応用実験：多数の円筒の検出・計測

現実のビンピッキングを模擬した複雑な対象への適用例として、多数の円筒からの円筒の検出・計測実験を行った。実験対象を図 10 (a) に示す。円筒は半径 20 mm 前後のものを用いた。スポット光が当たっている点の距離が計測される。距離画像から検出できる限りの円筒を検出し、その位置・姿勢を計測した結果が図 10 (b) である。なお、本実験では分割された領域をすべて円筒と仮定、また半径未知として計測した。円筒が重なり合っている複雑な対象の粗い距離画像であるにもかかわらず、いくつかの円筒が検出、計測されている。また処理時間

の総計は 1.5 秒以下であり、コンデンサなどの対象を扱うビンピッキングにおけるサイクルタイムが数秒程度であることを考えると、ほぼ実用的な高速性を達成していると言える。

以上の実験により、実際に粗い距離画像に適用可能であること、高速であること、誤差の大きさが現実的であることから、ビンピッキングにおける本論文の手法の有効性が示されたと言える。

6. 結 論

本論文では、ビンピッキングのための実用的な視覚システムとして、粗い距離画像を用いた高速なビンピッキング視覚システムを構築することを目的とし、

- ・処理の枠組みを示した。
- ・粗い距離画像の高速な領域分割手法を提案した。
- ・産業応用上重要な多面体、円筒、円すい、球の 4 つの部品形状に関し、粗い距離画像に適した拡張ガウス像を用いた判別手法、ならびに計測手法を提案した。

本論文では、提案した手法が、粗い距離画像に適用できること、高速であることの実証に主眼が置かれている。今後は、定量的な誤差をより詳細に実験ならびに理論で評価することが必要である。また、より複雑な形状の部品の判別・計測手法の確立も目標である。

謝 辞

距離画像入力用センサの利用に関してご教示頂いたキャノンの反町誠宏氏、具体的な手法に関して有益なご助言をして下さった元新井研究室の長尾武司氏、小田賢治氏に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 藤田武洋, 佐藤宏介, 井口征士: 局所曲面形状解析に基づくビンピッキングのためのビジョンシステム, 信学論, J 73-DII, 1 (1990) 46.
- 2) 池内克史, 長田茂美, B. ホーン, K. 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プ姿勢決定, 信学論, J 68-D, 4 (1985) 546.
- 3) J. Bach, J. P. Hermann, G. Michard and P. Pardo: Bin-picking Using a 3-D Sensor and a Special Gripper, Proc. RoViSec, (1985) 529.
- 4) A. Distant et al.: A Model-Based 3-D Vision System for Bin-Picking, IEEE Trans. CS, 35, 5, (1988) 545.
- 5) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂, (1990).
- 6) 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) 67.
- 7) 梅田和昇, 新井民夫, 小田賢治, 長尾武司: 距離画像を用いた複数物体の認識と計測, 1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 787.
- 9) 新井民夫, 梅田和昇, 小田賢治: 粗い距離画像を用いたビンピッキングシステムの構築・第 3 報, 多面体, 簡単な曲面の検出と計測, 1991 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1991) 679.
- 10) B. K. P. Horn: Extended Gaussian Images, IEEE Proc., 72, 12, (1984) 1671.
- 11) 中澤和夫, 清水雅芳, 油田信一, 中島真人: ファイバークレイティングを用いたロボット視覚システムの開発——Hough 変換による平面, 円筒面, 円錐面の検出, 日本ロボット学会第 8 回学術講演会予稿集, (1990) 783.