学術・技術論文

三次元円検出による部品位置決めと事前のハンド干渉チェック
により実現した視覚ベースビンピッキングシステム

恩 田 寿 和* 藤 原 伸 行* 阿 部 清 秀* 森 宣 仁*

Vision Based Bin-Picking System Supported by Three Dimensional Circle Detection
and Previously Collision Avoidance

Toshikazu Onda*, Nobuyuki Fujiwara*, Kiyohide Abe* and Nobuhito Mori*

We have developed a complete automated vision based bin-picking system including vision system, planning system and manipulator system. The vision system detects and locates 3D circle on the object using stereo ranging technique. The planning system checks collisions between the manipulator and a bin with respect to each detected parts to select most suitable one for picking. Then, the manipulator successfully picks up parts one after another. This paper describes our unique approach to detect parts, picking strategy and experimental results to show its advantages.

Key Words: Bin-Picking, Factory Automation, Castings, Planning, 3D-Vision

1. は じ め に

ファクトリーオートメーションの分野では、視覚センサを使用したハンドリングシステムが多く導入されている。我々はこれまでに、特にモータのケーシングに代表される鋳造部品の製造工程において、モデルベースマッチング法を適用してベルトコンベア上や作業台上に置かれた部品を把持する視覚ベースのハンドリングシステム [1]、ステレオ計測を使用して対象部品の基準面を検出することによりランダムに置かれた部品の位置決めを行う方式 [2]、部品箱にランダムに入れられたパイプ部品の円形の開口部を三次元円として検出する方法 [3] [4]、をそれぞれ提案してきた。我々は、カメラ画像中に三次元円を検出するために、まず入力画像のエッジ検出を行い、得られるエッジ画像中の閉曲線を抽出し、抽出した閉曲線上の点のステレオ計測を行い、閉曲線がのる三次元平面を最小二乗法により求め、その平面上で閉曲線を円に近似する、という手順で処理を行った。こうして検出される円は三次元位置と傾きの情報を持つ「三次元円」であり、これにより文献 [3] では三次元円を開口部とするパイプ部品の位置を検出した。

Fig. 1 のように、カゴ型のボックスパレットの中にランダムに入れられた部品をマニプレータが拾い上げる作業は一般にビンピッキングと呼ばれ画像処理応用の立場で多くの研究報告がある。Bolles らは、対象物の CAD モデルをもとにこれを構成

する「面」とレーザレンジファインダで計測した距離画像とのマッチングをとることで、カゴの中にランダムに入れられた鋳造部品の位置と姿勢を計測するシステムとして 3DPO を提案した [5]。また、対象物のモデルを楕円で構成して画像中の楕円を検出する Porrill らの TINA [6] や、複雑な形状をしている鋳造部品の特徴的な形状を使用する Raharadja らの simple visual cue を使用する方法 [7]、などの報告がある。

しかしながら、画像処理のアプローチに比べてハンドリング作業自体に関する報告は多くない。ビンピッキングは本来、Fig. 1 のように箱の中にランダムに入れられた対象物を取り上げる動作であり、視覚システムで検出してもハンドが箱に干渉して対

Fig. 1 Pulley parts and its box pallet

原稿受付 1999 年 8 月 12 日

*株式会社明電舎

*MEIDENSHA CORPORATION

象物に到達できないなどハンドリングできない場合が多く存在する。このような場合実際の製造現場では、システムは動作を停止して警報ブザーなどでオペレータを呼び、オペレータは手でマニプレータを箱から退避させてから箱の中の部品を整理し、再スタートさせる操作を行うことになる。この動作は、製造工程の能率を下げる原因になるため、製造工程の自動化の大きな阻害要因になっている。

そこで我々は、視覚センサが検出した部品を把持する前に、その部品を把持する動作とマニプレータの姿勢を計算し、マニプレータと部品の入ったボックスパレットとの干渉チェックを行うことを考えた。これにより、マニプレータは部品を把持する際にボックスパレットとの干渉が起こらない部品を選択してハンドリングすることが可能となる。さらに、干渉を含む異常が発生したときに作業が中断することを回避するために、ハンド部に力覚センサを設置し、マニプレータの異常な状態や動作を検知したときに自動で復帰するシーケンスを組んだ。センサが異常を検知したときには、マニプレータの動作をそこで中断してカゴからマニプレータを退避させ、再度視覚センサによる部品検出を行う動作を自動で行うものである。

本稿では、我々のピンピッキングシステムの基本的な考え方について述べた後に、視覚システムによる部品の三次元的な位置姿勢の検出方法、事前の干渉チェック、自己復帰動作、について記述し、箱の中のすべての部品を次々に最後の一つまで取り出す一連の作業の完全自動化を達成した実験結果を報告する。

2. ピンピッキングシステムの基本的な考え方

我々は、ピンピッキング作業をオペレータの補助なしで完全自動で実現するために、ピンピッキングシステムをビジョンシステム、プランニングシステム、マニプレータシステムの三つのシステムで構成した。ビジョンシステムは対象物の三次元的な位置と姿勢を決定するために、画像処理による二次元の閉曲線抽出技術と2台のカメラを使用するステレオ計測技術を使用して、対象物表面に視認できる三次元円を入力画像中に複数個検出する。プランニングシステムは、ビジョンシステムが検出した複数の対象物候補の中からそのひとつひとつについて、それをハンドリングするときのマニプレータの姿勢を計算し、単純化したマニプレータモデルを使用してマニプレータ各部とボックスパレットとの干渉チェックを行うことにより、干渉が起こらない部品を選択する。マニプレータシステムはこれを受け、選択された部品をハンドリングし、加工機にセットするなどの作業を行う。このときマニプレータが部品のハンドリングに失敗した場合も、マニプレータに設置されたセンサにて異常を検知し、製造工程を停止させることなく自動的にハンドリング作業を中止し、マニプレータをボックスパレットから退避させ、再度ビジョンシステムによる部品検出から始まる作業を再開する。これらにより、我々のピンピッキングシステムはボックスパレットの中の部品を最後の一つまで、システムを止めることなく拾い出すことが可能になった。

これらの工夫により我々のピンピッキングシステムは、実用面で大きな効果を発揮する三つのユニークな機能を持つことになった。第一はモータの構成部品など円盤形状の鋳造部品をター

ゲットとして対象部品の位置と姿勢を決定するために視覚センサを使用して画像中の三次元円を検出する機能、第二はマニプレータがボックスパレットと干渉せずに部品をハンドリングするために事前に干渉チェックを行い視覚システムで検出した複数の部品候補の中から干渉のない部品を選択してハンドリングする機能、第三はハンドリングに失敗したときにもこれを検知して自己復帰する機能である。

2.1 部品検出方法と対象部品の制約条件

我々の工場におけるピンピッキング作業対象の部品はモータとその駆動系、伝達系の部品で、これらは多くの場合円盤型の形状で中心部分にモータシャフトや伝達軸または軸受けが通る大きな穴があいている。そこで我々はこの大きな穴に着目し、画像中に視認できる円形の穴を部品の位置決めに使用することにした[3]。つまり、部品を三次元空間に存在する円として考え、その中心点で位置を、円がのる平面の法線ベクトルで方向を表すことにした。Fig. 2は伝達系の鋳造部品の一つでプーリと呼ばれる対象部品とその三次元円モデルを示したものである。

部品の三次元視覚位置決めに関してはこれまでに、部品表面に視認できる線分や楕円に代表される edge segment を使う方法や三次元の曲線を conic 関数にあてはめる方法など多くの研究報告がある。しかしながら従来方法では計算により決定するパラメータの数が多く、そのため一つの部品あたりの位置決め計算時間が膨大であることと、ステレオ計測により得られる計測点の精度が画像の量子化誤差の影響を受けるため部品が小さな場合は一定以上の位置決め精度が得られない問題があった。ピンピッキングにおいては、作業を一定の時間内で完了させる必要があることと、一画面中に十数個の部品が存在するので画面中の相対的な部品の大きさが小さいことの理由で従来方法が適用できなかった。例えば Fig. 8で検出する三次元円の半径は20画素程度である。これに対して我々が文献[3]で提案した三次元円検出による方法は、いったん三つのパラメータで平面を近似しておき次の三つのパラメータで円を計算するもので、一度に6個のパラメータを決定する conic あてはめなどの近似計算に比べて1/4以下の時間で計算可能で、コンピュータによるべき乗の計算中に発生するビット落ちの影響もない。これは特にピンピッキングのように一画面中に10個以上の部品を検出する場合に効果が顕著に現れる。また、パラメータ数に対する計測点の数は conic あてはめの場合の2倍以上が使用できるので、量子化誤差が平滑化されて位置決め精度が良い利点がある。

Fig. 2 3D circle model

ところで、今回のピンピッキングシステムの構築にあたっては現場の状況を分析し、以下の点を制約条件として設定した。これらは本システムの適用の限界を示すものである。ただしこれらの制約条件は我々の現場に固有の特別なものではなく、大多数の一般的な工場内のピンピッキング作業にあてはまる。

- 1) ハンドリング対象部品は既知であること。システムは対象部品に関する形状、大きさ、色、幾何学的な特徴、容量、表面状態、などの情報をあらかじめ与えられるものとする。通常の製造ラインにおける加工、組立の工程では指定された対象部品以外を扱わない。
- 2) ハンドリング対象部品は変形しないこと。铸造部品に限らずピンピッキングの対象となる部品は一般に一定の強度を持ち変形しないので、我々のシステムでは、ひも、紙袋、布地などのようにその形状や大きさが変化するものは扱わないこととする。
- 3) ハンドリング対象部品に軸受けや取り付けなど機械的な用途のための大きな穴があること。システムはこの部品表面に視認できる穴を手がかりに部品を見つけるものとする。また、この穴はマニピュレータの把持部としても使用する。もし対象部品の表面に大きな穴がない場合は、我々がこれまでに提案した他の方法を適用することができる。これは、低レベル画像処理により入力画像から抽出する三つの閉曲線または閉曲線と線分を使用して対象物表面に視認できる特徴とのマッチングを取ることで対象物の三次元位置と姿勢を検出するものである[8]。
- 4) ハンドリング対象部品は供給されるボックスパレットの中に存在し、外にはみ出すことがないものとする。ボックスパレットの外にはみ出した部品についてはビジョンシステムが画像の中から検出することができない。

3. 三次元円検出による部品位置決め

部品の位置決めは文献[3]で提案した三次元円検出手法で行う。Fig. 3に三次元円検出のフローチャートを示す。つまり、カメラの入力画像をエッジ検出処理しエッジ画像を取得し、エッジ画像から閉曲線を抽出し、閉曲線上の点のステレオ計測を行って各点の三次元位置を計測し、閉曲線がのる三次元平面を近似し、平面上に投影した閉曲線を円に近似することで、空間内の三次元円を検出するものである。

エッジ検出は、LOG (Laplacian Of Gaussian) フィルタ、

$$\nabla^2 G(r) = \frac{-1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{r^2}{2\sigma^2} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{2\sigma^2} \right) \quad (1)$$

により入力画像の二次微分を計算し、計算結果のゼロ交差点を連結してエッジ点列を抽出する。この方法はその後の特徴抽出処理がやりやすい細く鋭いエッジが得られる利点がある。

エッジ点列から円の候補となる閉曲線を抽出するときは、エッジ点列が完全に閉じない場合もそれが閉曲線の一部となりうる場合は閉曲線と同じ処理を行い円の候補とする処理を追加した。これにより照明条件の変化や影の影響でエッジ検出時に対象物の穴が閉曲線を形成しない場合にも対処した。

抽出した閉曲線上の点のステレオ計測は2台のカメラを使用

Fig. 3 Flowchart of our 3D circle detection

して行い、各点の三次元位置を計測する。さらに、計測した各点の三次元データ (x_i, y_i, z_i) を平面に近似する。これは、対象部品の穴が平面にのっていることによるもので、抽出した閉曲線が対象部品の三次元円ならばこれを平面に近似することができる。線形回帰法[9]によれば平面の方程式を

$$ax + by + cz = d \quad (2)$$

としたときの係数は、閉曲線上の計測点の各座標値の平均 $\bar{x} \bar{y} \bar{z}$ 、分散 $\sigma_x \sigma_y \sigma_z$ 、相関係数 $r_{xy} r_{yz} r_{zx}$ を用いて、

$$a = \frac{r_{zx} - r_{xy}r_{yz}}{\sigma_x}, b = \frac{r_{yz} - r_{xy}r_{zx}}{\sigma_y}, c = \frac{r_{zx}^2}{\sigma_z} \\ d = a\bar{x} + b\bar{y} + c\bar{z} \quad (3)$$

と表現できる。ここで、

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \\ \sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2, \\ \sigma_z^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2 \\ r_{xy} = \frac{1}{N\sigma_x\sigma_y} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \\ r_{yz} = \frac{1}{N\sigma_y\sigma_z} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z}) \\ r_{zx} = \frac{1}{N\sigma_z\sigma_x} \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})(x_i - \bar{x})$$

である。また、平面近似の結果閉曲線上の各点の近似平面からの誤差が大きい場合はその閉曲線を三次元円の候補から除外す

ることができる。

次に、閉曲線上の計測点を近似平面上に投影し、これらの投影点 (xi, yi) を近似平面上で円に近似する。最小二乗法 [10] によれば、円の方程式を

$$ax + by + c + x^2 + y^2 = 0 \quad (4)$$

とすると、

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = -\frac{1}{m_{00}} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum (xi^2 + yi^2) xi \\ \sum (xi^2 + yi^2) yi \\ \sum (xi^2 + yi^2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

で求められる。ここで、

$$m_{00} = M \left(\sum xi^2 \right) \left(\sum yi^2 \right) + 2 \left(\sum xiyi \right) \left(\sum xi \right) \left(\sum yi \right) - \left(\sum xi \right)^2 \left(\sum yi^2 \right) - \left(\sum yi \right)^2 \left(\sum xi^2 \right) - N \left(\sum xiyi \right)^2$$

$$m_{11} = N \sum yi^2 - \left(\sum yi \right)^2$$

$$m_{12} = \sum xi \sum yi - N \sum xiyi$$

$$m_{13} = \sum xiyi \sum yi - \sum yi^2 \sum xi$$

$$m_{21} = \sum xi \sum yi - N \sum xiyi$$

$$m_{22} = N \sum xi^2 - \left(\sum xi \right)^2$$

$$m_{23} = \sum xi \sum xiyi - \sum xi^2 \sum yi$$

$$m_{31} = \sum xiyi \sum xi - \sum xi^2 \sum yi$$

$$m_{32} = \sum xi \sum xiyi - \sum xi^2 \sum yi$$

$$m_{33} = \sum xi^2 \sum yi^2 - \left(\sum xiyi \right)^2$$

である。近似円の中心 (ox, oy) と半径 r は a, b, c を使用して、

$$ox = -\frac{a}{2}, oy = -\frac{b}{2}, r = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2 - 4c} \quad (6)$$

で求めることができる。

こうして閉曲線の計測データから平面上にある円、つまり三次元円が計算される。このとき、近似平面の法線ベクトルが三次元円の中心軸の方向と等しく、近似平面上の近似円の中心が三次元円の中心を表している。なお平面近似の場合と同様に、円近似の結果閉曲線から近似平面上に投影された各点の近似円からの誤差が大きい場合はその閉曲線を三次元円の候補から除外することができる。

Fig. 4 から **Fig. 8** は処理の過程を写真で示したものである。**Fig. 4** は原画像で、カゴ型のボックスパレットにランダムに放り込まれたプーリを、その上方に設置したカメラから撮影した画像である。ステレオ計測のために 2 台のカメラを使用するが **Fig. 4** はこれらのうちの一方のカメラの画像である。**Fig. 5** は、**Fig. 4** の原画像を画像処理して得られたエッジ点列の画像である。我々のエッジ検出処理では上述したように、LOG フィルタ

Fig. 4 Original image of the parts in a bin

Fig. 5 Edge image of **Fig. 4**

を使用して二次微分処理を行った後にゼロ交差点を連結してエッジ点列を抽出するが、この過程で孤立したエッジ点を削除してノイズ除去をしている。**Fig. 6** は、**Fig. 5** のエッジ画像から閉曲線を抽出した結果である。抽出された閉曲線は、三次元円を形成することが期待される閉じたエッジ点列であるが、完全に閉じていないがほぼ閉じているエッジ点列もそれらに加えて三次元円の候補として抽出することにした。これにより、**Fig. 6** ではこれら完全に閉じていない閉曲線を含む画像中のほとんどの三次元円の候補が抽出されている。**Fig. 7** は、**Fig. 6** の閉曲線の候補から、閉曲線上の各点のステレオ計測、閉曲線の平面近似、平面への計測点の投影、投影点の円近似を行って検出した 13 個の三次元円を、おのおのの円の中心からの矢印で示した法線ベクトルとともに表示したものである。平面近似と円近似の過程で多くの三次元円候補の閉曲線が、三次元円を形成しないと判断されて排除された。**Fig. 8** は **Fig. 7** の三次元円検出結果を **Fig. 4** の原画像にオーバーレイ表示したものである。我々のビジョンシステムが画像中に視認できるすべての対象物（プーリ）を正確に検出していることが分かる。

Fig. 6 Extracted closed curves from Fig. 5

Fig. 7 Detected 3D circles

Fig. 8 Detected 3D circles on the original image

4. 事前のハンド干渉チェック

ピンピッキング作業は、まずビジョンシステムがカメラの映像を入力してボックスパレット内に複数の対象部品（三次元円）

Fig. 9 Hand and its spatial model

Fig. 10 Collision between hand and the box

を検出し、プランニングシステムではこれらの部品を把持することを想定したマニプレータの姿勢をそれぞれ計算してマニプレータとボックスパレットとの干渉チェックを行い、干渉の起こらない部品を選択することにより、マニプレータシステムがこれを把持し、次工程の加工機へのローディングを行うという一連のシーケンスを順次進めていくものである。

プランニングシステムでは、ビジョンシステムが検出した部品をマニプレータシステムがハンドリングする前に、マニプレータとボックスパレットとの干渉なしにその部品を把持できるかどうかのチェックを行うことにした。つまり、対象部品の位置と姿勢が決まるとこれを把持するマニプレータの姿勢が決まるので、このときのマニプレータとボックスパレットの位置関係は計算することができる。そこで、我々は複雑な形状をしているハンドを、計算コスト削減のため、従来より行われているように複数の球とこれらを結ぶビームでモデル化した。Fig. 9はハンドを含むマニプレータとA、B、Cの三つの球を含むハンドモデルを示したものである。これらにより複雑な形状をしているハンドがカバーされる。Fig. 10は干渉チェックにおけるハンドモデルとボックスパレットの干渉チェック計算の模式図で、部品を把持する位置におけるハンドのすべての球とすべてのビームのおおのについてボックスパレット側面（平面）との干渉状態を計算し、いずれかが干渉する場合は干渉あり、すべてが干渉しない場合に干渉なしと判断することとした。干渉状態は、ハンドモデルの球の中心とボックスパレットの各面を構成する平面との距離 d を計算し、球の半径 r との関係が、 $d \leq r$ のときに干渉ありと判断した。まず、ボックスパレットを直方体でモデル化し、この直方体に座標軸（ x , y , z 軸）が平行になる直行座標系を定義する。 $x_{\min}$, $x_{\max}$, $y_{\min}$, $y_{\max}$, $z_{\min}$, $z_{\max}$

は直方体の頂点位置の最大値と最小値を示している．この座標系における球の中心位置 (x, y, z) と球の半径 r_c との関係が、

$$\begin{aligned} x_{\min} + r_c &\leq x \leq x_{\max} - r_c \\ y_{\min} + r_c &\leq y \leq y_{\max} - r_c \\ z_{\min} + r_c &\leq z \end{aligned} \quad (7)$$

または

$$\begin{aligned} x &< -r_c, x_{\max} + r_c < x \\ y &< -r_c, y_{\max} + r_c < y \\ z_{\max} + r_c &\leq z \end{aligned} \quad (8)$$

のときに干渉なし，そうでないときは干渉ありと判断した．

この干渉チェックにより，ハンドとマニプレータをボックスパレットに衝突させることなくハンドリングすることが可能になった．

5. マニプレータシステムの動作の改善

これまでの自動化された製造ラインで大きな課題となっていたのは，システムに何らかの異常が発生したときにはマニプレータが緊急停止し，この際オペレータによる復帰処理が必要で，結果としてラインの生産効率が上がらない点だった．我々はこの点を考慮し，マニプレータが動作中にハンドリングに失敗するなどの異常が発生したときにも，これを検知してマニプレータをボックスパレットの上から退避させる機能をマニプレータシステムに持たせた．これによりビンピッキングシステムは，異常発生時にもビジョンシステムによる部品検出から始まる一連の動作を自動的に再開する．

マニプレータの動作異常検知のためにはハンド部に力覚センサを設置し，ハンドリング動作中に力覚センサに一定以上の加重が検出された場合，または一定以上の加重の変化が検出された場合に動作異常と判断することにした．さらに，動作異常が検出されたときは，マニプレータシステムはマニプレータの動作をいったん停止し，部品を把持していればそれを開放し，カメラ視野からマニプレータを退避させ，その後検出とハンドリングの動作を自動的に再開するシーケンスを組んだ．Fig. 11はこの一連の流れを示すフローチャートである．これにより動作異常の発生時にもオペレータを呼ぶことなく，自動的に作業

Fig. 11 Flowchart of our system

を再開する完全自動のビンピッキングシステムが実現した．オペレータを呼ぶことなく作業を継続することは，実際の現場で最も重要なことである．

6. 実 験

Fig. 12は本システムのシステム構成図を示したものである．ビジョンシステムはマニプレータの上方に設置した2台のカメラとロボットコントローラ内に実装された画像処理装置で構成し，三次元円検出による部品の検出を行う．マニプレータシステムはマニプレータ本体とロボットコントローラで構成し，ロボットコントローラに干渉チェックとハンドリング対象部品の決定を行うプランニングシステムが実装されている．マニプレータのハンド部には動作異常検知のための力覚センサを設置した．Fig. 13は実験に使用したビンピッキングシステムの写真で，ロボットの前面に置かれた400 [mm]×400 [mm]×800 [mm]の金網ボックスパレット中に山積み状態で入れられたプーリ（直径170 [mm]×厚み40 [mm]）を，カメラ高さ2,300 [mm]，カメラ間隔600 [mm]，カメラ視野800 [mm]×600 [mm]で上方に設置した2台のカメラを使用したビジョンシステムで検出し，マニプレータがボックスパレットとの干渉を回避して一つ一つを把持して右側の加工機にローディングするものである．Fig. 14はビジョンシステムが検出した一つの部品をマニプレータが把持するところを撮影した写真，Fig. 15はマニプレータが把持した部品を右の模擬加工機のチャックにローディングするところ

Fig. 12 System configuration of our system

Fig. 13 Over view of our handling system in the work

Fig. 14 Handling scene of the manipulator system

Fig. 17 Handling scene of the part on the border of the box

Fig. 15 Loading to the simulated processing machine

Fig. 18 Handling scene of the part in the corner of the box

Fig. 16 Handling scene of the part in the box pallet

を撮影した写真である。

Fig. 16～18はハンドが部品を把持する動作を撮影した写真である。Fig. 16は部品がマニプレータの前面に置かれた初期の段階の写真で、100個程度が比較的整然と入れられている部品を把持している。これらの部品を画像処理で検出してハンドリングすることは難しくない。Fig. 17はボックスパレットに部品がランダムに投入された場合の写真で、部品の位置と姿勢がラ

Table 1 Average time costs of the system

Waiting for vision	6.0 sec
Communication	0.5 sec
Calculation of collision	1.7 sec
Approach motion	9.2 sec
Picking up motion	5.8 sec
Total	23.3 sec

ンダムになっている。このような状況でも我々のビジョンシステムは部品を検出し、三次元の位置と姿勢を正確に計測し、ハンドもこれを正しく把持している。また、ハンドの形状に工夫がされておりボックスパレットの縁付近の部品も把持することができている。Fig. 18は最終段階のハンドリングの様子で、ボックスパレットの角付近の部品を把持している。

Table 1はビンピッキングシステムの一つの部品を検出し把持して搬出するまでの平均の動作時間をまとめた表である。ビジョンシステムの処理時間が複数の部品候補の検出と位置決めで6.0秒、干渉チェックの時間が1.7秒、システム全体の動作時間が23.3秒だった。なお、ビジョンシステムは文献[11]で提案した専用のハードウェアを使用した。重量物の取り扱いのためマニプレータの動作に時間がかかっているが、我々の当初の

Table 2 Numbers of collision avoidance

Calculation	1st	2nd	3rd	4th
Total	201	95	33	4
No collision	106	62	29	0
Collision	95	33	4	4
Ratio	47.3%	34.7%	12.1%	100%

ターゲットである鋳造部品の加工工程（タクトタイム 30 秒から 90 秒）に十分に適用できる時間である。従来の視覚位置決め方法では数十秒かかっておりタクトタイムに間に合わなかった。

Table 2 は干渉チェックの効果を示す表で、ビジョンシステムが検出した 201 個のハンドリングの部品候補のうち 47.3% にあたる 95 個がハンドの干渉ありと判断され、次の候補の干渉チェックに移行した。二番目の部品候補の干渉チェックでは 95 個のうち 34.7% にあたる 33 個が干渉ありと判断された。このようにして、実験システムではボックスパレットに投入されたすべての部品を排出することができた。干渉チェックがなければ約半数の動作で干渉が発生しシステムを停止させていたことになる。

実験の結果、三次元円検出とハンド干渉チェックが有効に機能して、実験では最大四つの部品候補の中からハンドの干渉が起らないものを選択してハンドリングした。また、視覚システムの計測ミスなどによりハンドが部品を把持できなかったときも、マニプレータをいったん退避させて次には部品を把持し、最終的にすべての部品を加工機にローディングすることができた。

7. お わ り に

ボックスパレットにランダムに投入された鋳造部品を加工機にローディングする視覚ベースのビンピッキングシステムを実現した。本システムは、ビジョンシステムで三次元円検出により部品を検出し、事前にハンドとボックスパレットとの干渉チェッ

クを行うことで、マニプレータを停止させることなく、一つずつ正確に部品をハンドリングした。さらに、ハンドリングに失敗したときにもこれを検知して自己復帰する機能を搭載し、ビンピッキング作業の完全自動化を達成した。

参 考 文 献

- [1] T. Onda, H. Igura, M. Niwakawa and N. Fujiwara: "A Handling System for Casting Parts with Feature-Based Matching," Proc. of JIASC '94, pp.71-74, 1994.
- [2] T. Onda, H. Igura and M. Niwakawa: "A Handling System for Randomly Placed Casting Parts Using Plane Fitting Technique," Proc. of IEEE/RSJ IROS 1995, vol.3, pp.435-440, 1995.
- [3] N. Fujiwara, T. Onda and M. Niwakawa: "Three Dimensional Circle Detection and Location of Pipe Joints for Bin-Picking Tasks," Proc. of IEEE/RSJ IROS 1998, vol.2, pp.1216-1221, 1998.
- [4] 藤原, 恩田, 庭川: "ビンピッキングのためのパイプ部品の位置検出", 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.127-128, 1997.
- [5] R.C. Bolles and P. Horaud: "3DPO: A three-dimensional part orientation system," International Journal of Robotics Research, vol.5, no.3, pp.3-26, 1986.
- [6] J. Porrill, S.B. Pollard, T.P. Pridmore, J.B. Bowen, J.E.W. Mayhew and J.P. Frisby: "TINA: A 3D Vision System for Pick and place," Image and Vision Computing, vol.6, pp.91-99, 1988.
- [7] K. Raharadja and A. Kosaka: "Vision-Based Bin-picking: Recognition and Localization of Multiple Complex Objects Using Simple Vision Cues," Proc. of IEEE/RSJ IROS1996, vol.3, pp.1448-1457, 1996.
- [8] 恩田, 庭川: "閉曲線のマッチングによる視覚ベースハンドリングシステム", 電学論 (D), vol.118-D, No.3, pp.371-376, 1998.
- [9] 阿部齊著: 応用数理統計学入門, 培風館, 1985.
- [10] 恩田, 庭川, 藤原, 清家: "モデルベースマッチング法を用いた鋳造部品の視覚位置決め", 電学論 (D), vol.119-D, No.1, pp.14-20, 1999.
- [11] M. Niwakawa, A. Okamoto, T. Onda and N. Fujiwara: "Object Recognition for Casting Parts with Model-Based Matching," Proc. of JIASC '96, vol.2, pp.E24-E27, 1996.

恩田寿和 (Toshikazu Onda)

1954 年 2 月 10 日生。1977 年 3 月東京工業大学電子物理工学科卒業。1979 年 3 月東京工業大学大学院修士課程電子システム専攻修了。同年 (株) 明電舎入社, 以来電子回路応用, マニプレータ制御の研究開発を経て, 画像処理およびコンピュータビジョンの実用化開発に従事。現在, 同社総合研究所副技師長。1997 年電気科学技術奨励賞オーム技術賞受賞。電気学会正員。(日本ロボット学会正会員)

阿部清秀 (Kiyohide Abe)

1961 年 6 月 26 日生。1984 年 3 月東京電機大学精密機械工学科卒業。1986 年 3 月東京電機大学大学院修士課程機械工学専攻修了。同年 (株) 明電舎入社, 画像検査装置と画像処理装置および画像処理周辺技術の開発に従事。現在, 同社ロジスティクス工場主任。1999 年日本電機工業会電機工業技術功績者表彰進歩賞受賞。(日本ロボット学会正会員)

藤原伸行 (Nobuyuki Fujiwara)

1967 年 5 月 24 日生。1991 年 3 月山形大学機械工学科卒業。1993 年 3 月東北大学大学院修士課程機械工学専攻修了。同年 (株) 明電舎入社, 以来画像処理およびコンピュータビジョンの実用化開発に従事。現在, 同社総合研究所主任。1999 年日本ロボット学会研究奨励賞受賞。計測自動制御学会 (日本ロボット学会正会員)

森 宣仁 (Nobuhito Mori)

1966 年 6 月 2 日生。1990 年 3 月名古屋工業大学電気情報工学科卒業。同年 (株) 明電舎入社, 以来物流システム, 産業用ロボットおよびロボットコントローラの開発を経て, マニプレータシステムの動作計画の研究開発に従事。現在, 同社ロジスティクス工場主任。