

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	画像処理による工業部品の3次元位置同定に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	恩田寿和
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第3568号, 授与年月日:2001年12月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第3568号, Conferred date:2001/12/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

画像処理による工業部品の 3 次元位置同定 に関する研究

平成 13 年 12 月

恩 田 寿 和

論 文 要 旨

本論文は、「画像処理による工業部品の3次元位置同定に関する研究」と題し、
鋳造部品などを扱う機械加工工場内で工程自動化のために使用されるハンドリン
グロボットの目に相当する機能としての画像処理について述べる。本研究の目的は、
ハンドリングロボットの前面に供給される対象部品が部品箱の中で整列されてい
ない状態であっても、部品箱の中を俯瞰するカメラの画像中に対象部品を検出して
その3次元的位置と姿勢を計測する方法を、実際の現場に適用できる技術として
実現することである。そのために本研究では、まず要素技術となる画像前処理とス
テレオ計測について現場への導入の障害要因の分析を行い、これらを解決する方策
を講ずることにより、現場に適用可能な技術として確立した。そしてこれらの要素
技術を統合し、形状が多様な対象部品に対応する3つの方法で部品の3次元位置同
定を行った。さらにハンドリングロボットと結合してビンピッキングシステムを構
成して実際の現場で作業を行い、提案した3次元位置同定方法の有用性を示した。
本論文は全6章から構成され、概要は以下の通りである。

第1章「序論」では、本研究の背景、目的、工業部品のハンドリング作業の自動
化に求められる画像処理への要求仕様と制約条件について概説するとともにこれ
らの要求仕様の分析を行い、さらに分析結果にもとづく研究課題の設定を行い、本
研究の位置付けを述べる。

第2章「モデルベーストマッチングによる部品検出」では、カメラ画像中に既知
の部品を検出する方法として特徴ベースのモデルベーストマッチング法を導入し、
画像前処理として再現性良く精細な独自のエッジ検出方法および安定で高速な独
自の特徴抽出方法を述べた後に、シードフィーチャを手がかりにして特徴マッチン
グにより部品検出を行う独自のアルゴリズムを提案し、照明条件の変動、背景の変
化、対象物自体の状態変化の条件下における部品検出実験を行い、提案した方法が
計測条件の変動の影響を受けないことを示した。

第3章「両眼ステレオ法による3次元計測」では、対象部品の3次元計測の方法
として三角測量法にもとづく両眼ステレオ法を導入し、特に領域相関法による対応

点探索に関して、画像前処理で得られる幾何学的特徴の上への計測点の設定、正規化相関式の導入、再帰的平面近似と独自の２段階ステレオマッチングによる計測ミスの排除、を含む高精度ステレオ計測のための工夫について述べる。

第４章「画像処理による独自の部品３次元位置同定」では、画像処理による工業部品の３次元位置同定の具体的な方法について、対象部品をその形状により３つに分類し、各分類の部品形状の分析を行い、それぞれに対応する３つの新しい方式を提案した。第１の方法は３次元円検出による部品位置同定方法で、部品表面に大きな円形の穴があいている部品の検出が可能である。この方法は、後述する２つの方法と比べて計算処理が単純なので、短時間に複数の部品検出が可能である。第２の方法は基準平面検出による部品位置同定方法で、部品表面に大きな穴はなくても基準平面があり、この基準平面上に視認できる特徴が存在する部品に適用できる。第３の方法は特徴組のマッチングによる部品位置同定方法で、部品表面に取り付け穴やキー溝などの特徴的な箇所が見える一般的な工業部品に広く適用できる。いずれの方法も、特徴モデルを使用してカメラ画像中に対象部品を検出し、部品を構成する特徴の３次元計測を行うことにより部品の位置と姿勢を計算した。さらに、３つの方法を個別に適用した部品位置同定の実験を行い、その結果位置検出精度が 1-2mm 以内、部品傾き検出精度が 1-5deg 以内であり、提案した方法により検出した部品をハンドリングロボットで把持可能であることを示した。

第５章「ビンピッキング作業の実現」では、提案した部品三次元位置同定方法を使用する画像処理装置とハンドリングロボットと結合して構成したビンピッキング作業のシステムについて、システム構成と動作、３次元円検出による部品検出のプロセス、およびシステムが使用される製造ラインを停止させないためのロボット側の工夫を述べて、ビンピッキング作業の実験結果によりその有用性を示した。

第６章「結論」では、本論文で得られた新たな知見等を整理した。また、今後の展開とそのために解決しなければならない課題についても総括した。

目 次

第1章	序 論	1
1.1	生産自動化におけるビンピッキング作業	1
1.2	ビンピッキングのための画像処理	5
1.3	関連する研究	8
1.4	要求仕様の分析と研究課題の設定	10
1.5	本研究の内容	14
第2章	モデルベーストマッチングによる部品検出	16
2.1	緒 論	16
2.2	再現性良く精細な独自のエッジ検出	21
2.2.1	一般的なエッジ検出手法の分析と独自の工夫	21
2.2.2	二階微分を使った細いエッジ点列の獲得	22
2.2.3	整数化LOGフィルタによる高速な二階微分処理	24
2.2.4	不感帯式ゼロクロス点検出によるエッジ点検出の時間短縮	26
2.3	安定で高速な独自の特徴抽出	28
2.3.1	画像処理で使用される幾何学的特徴と独自のアプローチ	28
2.3.2	最小二乗法による線分と円弧の抽出	29
2.3.3	線分あてはめと円弧あてはめによる高速な線分と円弧の抽出	31
2.3.4	細いエッジにもとづく閉曲線抽出	35
2.4	部分的特徴マッチングによる独自の部品検出アルゴリズム	38
2.5	様々な形状の部品検出実験	44
2.5.1	照明条件の変動	46
2.5.2	背景の変化	47
2.5.3	対象物自体の状態変化	48
2.5.4	薄板部品の位置同定と重なり状態検出	49

2.5.5	微生物の認識と計数.....	51
2.6	結 論.....	52
第3章	両眼ステレオ法による3次元計測.....	53
3.1	緒 論.....	53
3.2	三角測量法による3次元計測の原理.....	54
3.3	領域相関法をベースにした高精度ステレオ対応点探索.....	56
3.3.1	領域相関法を導入する時の課題.....	56
3.3.2	対応点の決定を確実に行う特徴上への計測点設定.....	57
3.3.3	計測条件変動の影響を受けない正規化相関式の導入.....	59
3.3.4	原理的に発生する対応間違い点を排除する再帰的平面近似.....	61
3.3.5	誤対応を回避する独自の2段階ステレオマッチング.....	62
3.4	ステレオ計測実験.....	67
3.5	結 論.....	68
第4章	画像処理による独自の部品3次元位置同定.....	69
4.1	緒 論.....	69
4.2	対象部品の分析と部品位置同定の新しいアイデア.....	72
4.3	3次元円検出による部品位置同定.....	78
4.3.1	3次元円検出と部品位置同定の手順.....	78
4.3.2	パイプ継ぎ手部品の3次元位置同定への展開.....	86
4.3.3	3次元円検出による部品位置同定実験.....	94
4.4	基準平面計算による部品位置同定.....	99
4.4.1	基準平面計算による部品位置同定の手順.....	99
4.4.2	基準平面計算による部品位置同定実験.....	106
4.5	特徴組のマッチングによる部品位置同定.....	112
4.5.1	閉曲線のマッチングによる対象物検出.....	112
4.5.2	そのほかの特徴組を使用した部品検出への拡張.....	118
4.5.3	特徴組のマッチングによる部品位置同定実験.....	121

4.6	部品3次元位置同定の現場への適用.....	124
4.6.1	部品3次元位置同定方式の選択.....	124
4.6.2	作業現場への適用プロセス.....	126
4.6.3	ハンドリングシステムの構成.....	128
4.7	結 論.....	133
第5章	ビンピッキング作業の実現.....	134
5.1	緒 論.....	134
5.2	ロボットシステムとビンピッキング動作.....	135
5.3	3次元円検出による部品位置同定.....	137
5.4	ラインを停止させないロボット側の工夫.....	139
5.5	ビンピッキング作業実験.....	143
5.6	結 論.....	149
第6章	結 論.....	150
	謝 辞.....	155
	参考文献.....	157
付 録	整数化LOGフィルタ処理プログラム.....	159
	研究業績.....	163
1	発表論文.....	163
2	国際会議発表論文.....	163
3	研究会、シンポジウム等.....	165
4	全国大会講演論文.....	165
5	解説.....	168
6	公開特許等.....	168

第1章 序 論

1.1 生産自動化におけるビンピッキング作業

本研究は、工場現場において産業用ロボットの目に相当する機能の実現に関するものである。つまり、産業用ロボットに供給される部品が特定の場所に置かれるのではなく、部品箱にランダム入れられた状態であるときに、I T Vカメラでこの現場を撮影して、カメラ画像を画像処理することにより対象部品を検出してその3次元的位置と姿勢を同定する、部品3次元位置同定に関するものである。このように部品箱にランダムに入れられた状態の部品を産業用ロボットを使用して拾い出す作業は、大箱を英語でビン(bin)と呼ぶことから「ビンピッキング(bin-picking)」と呼ばれ、これまで特に画像処理応用の立場で多くの研究事例が報告されている。

筆者らはこれまでに、バリ取り作業を含む鋳造部品の製造工程に多くの産業ロボットを導入してきた。しかしながら、鋳造直後の部品を砂型から取り出して次のバリ取り工程の機械にセットする作業に関しては自動化の対象から除外されていた。理由は多くあげられるが、鋳造直後の部品はそれ自体が高温であるためその位置を同定するためには非接触のセンサ、つまり電子部品やプリント基板で行われているようにカメラを使用して画像処理により部品位置を同定する方法を使用しなければならないが、従来方式の画像処理ではこれに対応できなかった。つまり、このような部品は同じ部品であってもバリなどの存在によって形状が必ずしも同一ではなく、その表面状態も一定ではないため、サンプルの画像をそのままモデルとして使用するパターンマッチング法や、強力な光を当ててシルエットで部品を検出する画像二値化+形状計測の手法が使用できない。また、鋳造部品は鋳型から出されて砂まみれの状態で床やベルトコンベア上に投げられるので位置も姿勢も一定ではなくランダムであるため、3次元計測の必要がある。これらの理由により、このような工程はいまだに人間の作業員が直接作業を行っている。図1-1と図1-2は工場内の現場の写真である。彼らの作業は、ベルトコンベア上を流れるものを見て、対

象部品を見つけてその位置を確認し、これを拾い上げて、次の工程である加工機械にセットするまでの一連の作業である。ところがこのような現場は、作業員にとっては劣悪な作業環境である。つまり、作業現場の環境の温度が高いこと、塵埃が多く空気環境も悪いこと、重量部品を取り扱う作業で体力的にもつらい作業であることなどの理由で、特に最近になって自動化の要求が高くなっている。

また、ベルトコンベアから直接加工機械に部品をローディングする以外にも、カゴ型パレットに部品を入れて加工または組み立てが行われるまでの間、一時保管することも行われている。図 1-3 は、モータ部品の倉庫の写真で、部品の入ったかご型パレットが並んでいる。図 1-4 は、このパレットの中の様子である。このような部品箱の中の部品は整列されてはおらず、ランダムに放り込まれた状態になっているのが一般的である。このようなケースではビンピッキング作業が必要である。

部品箱に入れられて供給される部品を産業用ロボットがビンピッキング動作により一つずつ把持して拾い上げ、加工機械にローディングする作業は、まず画像処理装置がカメラ画像中に部品を検出してその位置を同定し、産業用ロボットがその情報を使用して検出した部品を把持する、という動作を繰り返して行うことで実現される。本研究の目的は、画像処理を使用してカメラ画像中に部品を検出してその 3 次元位置と姿勢を同定することに関するもので、特にこれを実際の工場現場で使用することを前提にした制約条件の中で実現することにある。



図1-1 鋳造部品の仕分け工程の作業現場



図1-2 鋳造部品の作業員によるハンドリング作業



図1-3 モータ部品のカゴ型パレットの倉庫



図1-4 カゴ型パレット内のモータ部品

1.2 ビンピッキングのための画像処理

ビンピッキングのために部品の位置と姿勢を同定するのに使用される画像処理には、アプリケーションに固有の制約条件が多く存在する。これらは、技術的な面からの要求とあわせて、工場で実際の現場で使用することを目的とした実用面からの要求がある。本節では、これらの要求仕様や制約条件を明確にする。

1) まず、ビンピッキングで使用する画像処理の目的はカメラ画像中の対象部品の検出とその位置と姿勢の同定である。ビンピッキング作業は部品箱に入っている部品を一つずつ拾い出す作業と定義した。そのためには、拾い出す部品が部品箱の中のどこにあって、どのような向きで、どのような状態で存在するのかを同定しなければならない。

2) そして、このときの対象部品の位置と姿勢は3次元的に未知である。製造工程を整備することにより部品箱の中に対象部品を整列してからロボットに供給することも可能であるが、そのために人手がかかるのでは自動化の効果がないことと、部品箱の搬送中に部品が荷崩れを起こしてロボットに供給されるときには部品の位置が変わっていることも想定される。このような状況にも対応して確実に部品を把持するのがビンピッキング作業の使命である。

3) ただし、対象部品は既知で変形しないものとすることができる。カメラ画像中の物体が何かを考える物体認識と呼ばれる研究も盛んに行われているが、工場内では部品箱の中に何があるのかを認識することは現実的でない。特に、鋳造部品の加工工程では加工機械のプログラミングの問題もあり、各種の部品がランダムに供給されるような作業が難しいため、一定時間内には一つの部品のみを対象部品とする加工が行われる。従って、ここに供給される部品箱の中には一種類の部品のみが存在することは特殊なケースではなく、一般的である。同様の理由で、不明な部品は供給されることはなく、加工機械で加工をプログラムされた既知の部品だけが部品箱で供給されることが普通である。さらに、鋳造部品はひもや袋ものとは異なり変形することはないものとする。従って、部品箱の中には既知の、形状の同一な部品だけが存在することを本研究の条件とする。

4) しかしながら、部品箱の中には同一形状の部品が複数で多数存在する。これまでの画像処理応用で、工場内で電子部品の実装検査や画像計測などに画像処理を使用する場合は、カメラと照明などの計測環境を整備したうえで、通常はカメラ画像内に単色の背景の中に対象部品が一つだけ存在するように設置する。このような条件整備を施せば、画像処理としては、サンプルの部分画像と同一の部分画像をカメラ画像中に検索するパターンマッチング法を使用して部品を検出することが可能である。しかし、ビンピッキングのように部品箱の中に多数の部品が存在する場合には、一つの部品が他の部品の上にあるなどして、カメラ画像中では部品周辺の背景の画像が各部品ごとに同一でなく、サンプル画像を使用するパターンマッチング法は適用できない。また、鋳造部品は電子部品と比べて部品自体の大きさの問題もあって照明条件を均一にしにくい点も、通常の画像処理で部品検出ができない理由の一つである。

5) さらに、これらの部品は部品箱の中では山積み状態で存在する。そのため、カメラ画像中に対象部品を検出できたとしても、カメラを1台しか使用しないときは部品の高さや傾き角度を計測することができない。従って、何らかの方法で部品の3次元的な高さと傾き状態を計測する手段が必要である。

6) ただし、計測上の制約条件として対象部品は部品箱の中にのみ存在するものとする。カメラの視野を外れた部品は検出することができないが、部品を箱から外に出ないようにすることは、部品箱の中の部品の数を少なくするなどして容易に対処できる。

また、工場でこれを使用するためには、以下に述べる実用上の制約条件も考慮に入れなければならない。

7) まず、導入のためのコストと運用コストが一定以下でなければならない。工場で生産設備の自動化を考える時には、自動化のために削減される作業員の人件費が費用対効果の対価として考慮される。一般的には、ハンドリング作業は部品搬送の一部を担当するものなので、ロボットシステム全体として1000-2000万円以下であり、この中で画像処理装置はカメラとあわせて500万円程度が導入の目安となる。このような現場では装置本体の価格が1500万円を超えるレーザレンジセンサの導入は考えにくい。

8)次に、ハンドリング作業の時間的な条件としてタクトタイムが設定される。タクトタイムは、一つの部品を加工機械にセットしてから次の部品をセットするまでの時間間隔として定義されるもので加工時間に相当し、鑄造部品の一次加工のばあいには 30-90 秒以下である。ハンドリングシステムはこのタクトタイムの時間内に部品検出からハンドリングを行い加工機械に部品をセットするまでの一連の作業を終わらせなければならないため、画像処理は数秒で計測を完了しなければならない。

9)さらに、部品検出の正確さと一定の精度を確保することが必要である。ロボットの手先には部品を把持するためのハンドが取り付けられ、ハンドに実装された爪先で部品を把持するのが一般的である。把持時の部品と爪先との機械的な余裕を 5mm 以下とする場合は画像処理の計測精度は $\pm 2.5\text{mm}$ 以下でなければならない。

10)工場内で画像処理を使用する場合には照明を含む計測条件を整備することは一般的に行われている。しかしながら、鑄造部品の加工工程では完全に同一条件になるように環境を整備することは難しく、計測条件が変動することは想定されるので、画像処理に対しては計測条件が多少変動しても安定した計測ができることが要求される。この点は、画像二値化をベースにした画像計測や同一の画像を検索するパターンマッチングなどの一般的な画像処理手法の導入の障害となっている。

11)また、システムの据付調整時の容易さと部品変更時や新規部品のための設定が容易でなければならない。画像計測を使用する一般的な画像処理では部品が変わるごとに、部品を特定する部位を選択してその幾何学的な寸法を計測してプログラムする必要がある、調整に多くの手間がかかっている。

上述したように、ビンピッキングで使用する画像処理には通常の画像処理では対応できない特別な制約条件があるので、特別な方法を考えなければならない。

1.3 関連する研究

鋳造部品のビンピッキングに関しては、これまでも画像処理を使用して部品の位置と姿勢を同定するために多くの方法が提案されている。Bollesら[1]は、レーザレンジファインダを使った鋳造部品の3次元位置同定システム3DPO (Three Dimensional Parts Orientation system) を提案した。これは対象物のCADモデルを使用するもので、レーザレンジファインダで計測した精密な距離画像から平面と曲面を抽出して、対象部品のCADモデルを構成する面の組み合わせと照合することにより、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ものである。Ikeuchiら[2]は、やはり対象部品のCADモデルを使用して、様々な方向からこれを見たときの画像をアスペクトモデルとして多数準備しておき、カメラ画像中の部品にあてはめて部品の3次元位置と姿勢を求める方法を提案した[2]。しかしながら、筆者が実際の工場で行き交う鋳造部品に関しては、正確なCADモデルを持たないものもあり、CADモデルがあってもこれから生成する表面状態や見え方と画像中の見え方が必ずしも同一でないため、これらのCADモデルを使用する方法は適用が難しい場合が多い。

また、従来より工場内における部品の3次元計測には、Bollesらの3DPOのようにレーザレンジセンサが使われる場合が多い。例えば、太さの異なるスリット光を部品に照射して3次元計測を行う空間コード化法も実用段階になっている。佐藤ら[3]は、レーザ光を制御してスリット光を生成するCubicscopeを提案した。これは、半導体レーザのON/OFFと回転ミラーの工夫により高速に精度の良い3次元計測ができる装置である。ただし、これらの方法は部品に光を照射して反射光を利用するので、計測範囲が光の届く範囲に限定され、周囲の照明の影響を受けるので遮蔽措置が必要、などの弱点があり、工場内での連続的な使用には限界がある。これに対して、計測範囲が広く照明条件を整備できない現場では、2台のカメラで対象物を撮影してこれらの視差を利用するステレオ計測が使用される。この方法は、左右のカメラに映る同一の計測点の座標とカメラの間隔などから三角測量法で計測点の3次元位置を計算するものである。ただし、ステレ

オ計測では対応点探索が大きな課題で、対応探索間違えによる計測ミスや、オクルージョンにより対応点が見つけれないなどの問題が存在する。これに対処するために、複数のカメラを使用する対応点探索方法として、Multiple-Baseline Stereo[24]がOkutomiらにより提案され、これをベースにして3台のカメラを使用する富田らのVVV[4]、6台のカメラをL字型に配置するKanadeらのCMU Video-Rate Stereo Machine[5]、9台のカメラを正方形に配置する三輪らの9眼ステレオ[6]などが提案されている。しかしながら、コストとカメラ間のキャリブレーションの複雑さなどの課題があり、工場で汎用的な部品位置同定に使用するには至っていない。

鋳造部品の物体認識にlocal-feature-focus methodを適用した研究はFukudaらによるクランクシャフトのビンピッキング[7]が報告されている。これはクランクシャフトに強い光を当てたハイライトの画像が長方形の組み合わせで構成されることに着目したものであるが、照明条件に依存する点と対象物が長方形の組み合わせで記述できるものに限定される点で一般的な部品への適用には課題が多い。

また照明変動にロバストなロボット視覚システムとしては山田らによる報告[8]がある。これはこれまでの研究のようにアルゴリズムで対処するのではなく、シャッタースピードの異なる2枚の画像を結合してダイナミックレンジの広い撮像系を構成して対処するものであり興味深い。

さらに鋳造部品の視覚ベースハンドリングシステムに関してはRahardjaとKosakaの研究グループによる報告[9]がある。これは、CADモデルを使用せずカメラ画像を色で複数のウインドウに分割し、これらウインドウの組み合わせで部品を同定する方法で、多くのウインドウの中から部品を特定するために、Simple Visual Cues なる概念を提案し、実用的な視覚位置決めとハンドリングを実現している。ただし、筆者の関係するような一般的な工場内の照明条件のもとではカメラ画像中の対象物の見え方が変動するため、正確な位置の同定に使用可能な部分がないのでキューとすべき特徴を決定するのが難しく、実際の現場で使用するには課題が残る。

1.4 要求仕様の分析と研究課題の設定

本節では、1.2 節で述べたビンピッキングのための画像処理に対する要求仕様を分析し、その実現のための課題を整理した上で、本研究における研究課題について述べる。

まず、1.2 節で述べたビンピッキングのための画像処理に求められる要求仕様を以下に列挙する。番号は 1.2 節の項目番号に対応する。

- 1) 画像処理の目的はカメラ画像中の対象部品の検出とその位置と姿勢の計測
- 2) 対象部品の位置と姿勢は 3 次元的に未知
- 3) 対象部品は形状が既知で変形しない
- 4) カメラ画像中に同一形状の部品が複数存在する
- 5) 対象部品は部品箱の中で山積み状態で存在する
- 6) 対象部品は部品箱の中にのみ存在する
- 7) 導入コストと運用コストが一定以下でなければならない
- 8) タクトタイムの時間内に画像処理を完了する
- 9) 部品検出の正確さと一定の精度の確保
- 10) 計測環境を整備するがある程度の計測条件変動が避けられない
- 11) 新規部品や部品変更時の設定変更が容易でなければならない

本研究の最終的な目標は、ビンピッキング作業を実際の工場の現場で使用することであるので、その実現のためには 7)-11) の実用上の制約条件を優先して検討しなければならない。まず、7) を考慮して高価な周辺装置を使用せずに、基本的に画像処理で対応することを考える。ただし、一般的な画像処理をそのまま使用すると 9) 10) に対処できないので、この部分を解決する新しい方法を検討する。このときに 8) には十分に配慮する。11) は何らかのモデルを導入することで対処する。1)-6) は部品 3 次元位置同定の技術的な条件であるが、1.3 節で示した関連する研究を吟味すると、筆者はカメラ画像中に部品を検出するプロセスと、検出した部品の 3 次元位置と姿勢を計測するプロセス

を独立して検討し、これらを結合して部品位置同定を行うのが良いと考える。3)により何らかの部品モデルを導入することが可能で、6)により対象部品が必ずカメラ画像中に存在することが保証されるので計測範囲が限定でき、4)5)によりカメラ画像中から一つの対象部品を切り出すことがポイントとなる点を考慮した。

画像処理によりカメラ画像中の部品検出を行う方法として一般的に使用される方法は、画像二値化による方法とパターンマッチングによる方法である。画像二値化による方法は、対象部品と背景の色を区別できるように整備して、例えば黒色の作業台上に白色の部品を置いて、カメラ画像の画像二値化を行い部品領域の切り出しを行う方法である。部品領域を切り出した後に切り出した領域が部品に対応するかどうかの検査を行って部品位置を決定するものである。部品領域の検査については、領域の面積や周囲長、外接四角形の辺の長さなどが使用されるが、画像二値化の段階でカメラ画像が照明条件変動で輝度に変化することの影響を受けやすい欠点があり、この方法を使用する時には計測場所の周辺の遮蔽措置や均一な照明条件を確保するための対処が必要である。パターンマッチングによる方法は、予め部品のサンプルの画像を取得しておき、部品検出時にはカメラ画像中にサンプルの画像と同一の画像部分を検索して、対応する部分を部品の位置とする方法である。画像部分の検索には相関マッチングが使用されるが、計算される相関値はカメラ画像の輝度の変化や部品の回転と傾きや部品背景の変化により大きく変動することが欠点で、こちらも計測条件の整備が必要である。パターンマッチングに関しては最近研究が進んでおり、回転相関やロバストマッチングなどの手法が提案されているが、多数の部品が混在する画像では背景が一定でないなどの理由で誤対応が多く発生する問題がある。カメラ画像中の部品検出を行うそのほかの方法としては、モデルベーストマッチング法がある。これはパターンマッチングのように画像そのものを使用するのではなく、対象部品の局所的な特徴を組み合わせで部品モデルを作り、部品検出時にはカメラ画像から特徴抽出を行い、特徴のマッチングで部品を検出する方法である。この方法は、カメラ画像を直接操作する他の方法と比べて特徴抽出のための画像前処理に計算時間がかかるのが難点で、実用化に至っていない。また、特徴マッチングは特徴抽出の再現性に課題があるのも欠点だが、同一部品が多数存在する画像中に特定の対象物を検出するのに最適である。

画像処理と組み合わせて使用する 3 次元計測の方法としては、超音波距離計測、レーザ距離計測、レーザレンジファインダ（レーザレーダ）、光照射式形状計測、両眼ステレオ法がある。いずれも対象物に直接センサを接触させない非接触式の 3 次元計測方法である。超音波方式の距離計測は対象物に超音波を照射してその反射を受けて距離を計測するもので、比較的安価である利点がある。ただし、計測範囲を狭くできないため精密な 3 次元計測には利用できない。レーザを使った距離計測は、レーザ光線を対象物に照射して反射してくる光との位相差で距離を計算するもので 1mm 以下の精度が確保できる点が最大の利点である。しかしながら工場内で使用するには作業員の眼にレーザ光がはいるように配慮する必要があるため、狭い場所での使用に限定される。レーザレンジファインダはレーザ光を計測領域内でスキャンすることにより計測領域内の距離マップを作成できるもので、レーザ距離計と同様に高い精度の計測結果を得られる利点がある。ただし装置本体の価格が高価で、精度を確保するためには使用前の調整に手間がかかる面があり、工場では安易に導入できない。また、計測結果は距離マップでしか得られないので、部品の位置と姿勢を計算するためにはさらに計算処理が必要である。光照射式の形状計測は、対象物にスリット光や特定のしま模様の光を強制的に照射してこれをカメラで撮影し、照射光の画像をもとにしてカメラ画像中の各点の奥行きを計算するもので、光照射のためのプロジェクタとカメラのみでシステムを構成できるため安価で、精密な照射光をスキャンすることで画像処理並の精度が得られる点が利点である。ただし光照射式の形状計測を行うときには、照射光以外の外部からの光を遮断する必要があり、計測範囲は照射光が届く範囲に限定されるなどの制約があり、工場内でも適用場所が限定される。両眼ステレオ法は 2 台のカメラで対象部品を撮影した 2 つのカメラ画像を使用して、両方のカメラから見る対象物の位置関係から部品の 3 次元計測を行うものである。この方法は計測精度と計算時間および対応点探索方法に課題はあるものの、他の方法と比べて安価で、画像処理と組み合わせて使用するのに最適な方法である。

そこで筆者は、部品検出には特徴マッチングを使い、3 次元計測には両眼ステレオ法を使い、これらを組み合わせて部品の 3 次元位置を同定することを提案する。これにより、2 台のカメラと制御装置の安価な構成で、画像中に多数が存在する部品を検出し、これらの 3 次元位置姿勢を計算することができる。

ただし、実現のためには以下に示す課題が存在する。

- 1) 再現性の良い特徴抽出手法の確立
- 2) 特徴マッチングの具体的な方法
- 3) 計測精度の確保
- 4) 特徴抽出とステレオ計測の計算時間の短縮
- 5) 確実なステレオ対応点探索方法の確立
- 6) 部品 3 次元位置同定の具体的な方法
- 7) ビンピッキングの実現

上述した課題を解決するために筆者は本研究の研究課題として以下の 4 つのテーマを設定した。つまり①モデルベーストマッチング法を使用した安定した部品検出の実現、②両眼ステレオ法を使用した高精度ステレオ計測の実現、③改善されたモデルベーストマッチング法と両眼ステレオ法を結合した新しい部品 3 次元位置同定方法の実現、④提案する画像処理による部品 3 次元位置同定方法を使用したビンピッキング作業の実現、の 4 つである。

モデルベーストマッチング法による部品検出に関しては、カメラ画像中に写っている既知の対象物の検出が目的である。その実現のためには、再現性の良い特徴抽出手法の確立、特徴マッチングの具体的な方法、計測精度の確保、計算時間の短縮、という課題の解決が必要である。

2 台のカメラを使用する両眼ステレオ法によるステレオ計測に関しては、カメラ画像中の計測点の 3 次元位置計測が目的であり、計測精度の確保、計算時間の短縮とあわせて、確実なステレオ対応点探索方法の確立が大きな課題である。

部品の 3 次元位置同定に関しては、対象部品の 3 次元的位置と姿勢の計測が目的であり、計測精度の確保、計算時間の短縮とあわせて、部品 3 次元位置同定の具体的な方法の確立が課題である。

ビンピッキング作業の実現に関しては、提案する方法を使用して作業が実現可能であることを確認するとともに、ロボット側でもラインを停止させない工夫を施して、ビンピッキングシステムを構成し、作業を実際に行うことを目的とする。

1.5 本研究の内容

本研究では、工場で実際に使用することを想定したビンピッキング作業に必要な部品位置同定の実用化のための工夫を研究の対象とする。

本論文の前半では、ビンピッキングのための画像処理の要素技術として、部品検出のためのモデルベーストマッチング法と3次元計測のための両眼ステレオ法を使用することを提案する。その中で、まず再現性良く部品を検出するための画像前処理の工夫について述べる。つまり、二階微分処理とゼロ交差点検出による再現性良く精細でかつ高速処理の工夫を施したエッジ検出手法と、部品モデルに幾何学的な特徴として使用する線分と円弧と閉曲線について安定で高速な独自の特徴抽出方法を説明する。両眼ステレオ法についても、高精度ステレオ計測の実現のための工夫として、安定なステレオ対応点探索を実現する計測点の決定、左右カメラの機器の違いを吸収する正規化相関式の導入、計測ミスの点を統計的に排除する再帰的平面近似、ビンピッキングに特有な複数の候補点から正しい対応点を決定する2段階ステレオマッチングについて述べる。

本論文の後半では、モデルベーストマッチング法と両眼ステレオ法を組み合わせで構成した独自の部品3次元位置同定に関する3つの方法を提案し、これらを使用して実現したビンピッキングシステムについて述べる。3次元円検出による方法は、パイプ開口部に代表される部品表面に存在する大きな穴に注目し、これを直接カメラ画像中に検出し3次元計測をして部品の位置と姿勢を求めるものである。基準平面検出による方法は、対象部品の表面上に設定される部品基準平面上に視認できる幾何学的な特徴を3次元計測することで部品の位置と姿勢を求める方法である。特徴組のマッチングによる方法は、取り付け穴等をカメラ画像中で閉曲線として抽出して3次元計測し、これらの組合せで表現した部品モデルをもとに部品の位置と姿勢を求めるものである。さらに、ビンピッキングの実現にあたって考慮した、画像処理が検出した部品を衝突することなく把持するための事前の干渉チェック、動作異常検出のためにハンドに設置したセンサ、異常発生時の自己復帰のシーケンスを含むロボット側の工夫についても述べる。

以下に本論文の構成を述べる。

第2章では、カメラ画像中の部品検出のためのモデルベーストマッチングについて、筆者が独自に工夫した再現性良く精細なエッジ検出方法と安定で高速な特徴抽出方法を述べた後に、特徴モデルと部分的特徴マッチングを使った新しい部品検出の方法を提案し、照明条件の変動、背景の変化、対象物自体の状態変化を含むいくつかの計測条件における部品検出実験でその有用性を示す。

第3章では、3次元計測に使用した両眼ステレオ法について、三角測量法による3次元計測の原理を説明し、領域相関法をベースにして特徴上への計測点の設定、正規化相関式の導入、再帰的平面近似による誤対応点の排除、2段階ステレオマッチングを含む独自の高精度ステレオ対応点探索の方法を述べ、ステレオ計測実験の結果によりその有効性を示す。

第4章では、画像処理による独自の部品3次元位置同定方法について、3次元円検出による部品位置同定方法、基準平面検出による部品位置同定方法、特徴組のマッチングによる部品位置同定方法、の3つのいずれも独自な方法を実験結果とともに述べる。

第5章では、部品3次元位置同定方法を使用して実現したビンピッキングシステムについて、ロボットシステムの構成と動作、3次元円検出による部品検出のプロセス、ラインを停止させないロボット側の工夫を述べて、ビンピッキング作業の実験結果を示す。

第6章で、以上の研究成果のまとめを行い、本論文の結論を述べる。

第2章 モデルベーストマッチングによる部品検出

2.1 緒 論

ファクトリーオートメーション分野においては画像処理技術の利用が盛んで、検査工程や加工組立工程への適用事例が多く報告されている[10]。画像処理は主として画像二値化による特徴量抽出と相関法によるパターンマッチングの2つの方法が利用されているが、いずれも工場の現場に使用する場合には計測条件に制約があり、適用分野は限定されている。例えば画像二値化による特徴量の計測を使用する検査工程においては、照明条件を一定に保つことが必要で、検査場所では外乱光を遮蔽するなどの整備が必要である。図 2-1 は、照明条件の変動により画像二値化処理の結果が同一ではない例で、(a)では部品の外形を良く表現しているのに対して、(b)では光量不足のために部分的に影が出ており部品形状を再現できない。相関法によるパターンマッチングを用いる場合も同様に照明に関する配慮が必要で、さらに検査対象物の背景と回転の影響を排除する工夫が必要である。図 2-2 は、対象部品の局所パターンを使用した部品検出のイメージを示したものである。部品の穴部分のパターンを切り出して相関マッチングに使用するのだが、部品の背景や照明条件が変化すると部品の同一部分であってもパターンが変わってしまい、部品を同定することができない。

筆者が関係する自動化のターゲットの一つに鋳造部品の加工ラインの自動化がある。例えば、鋳造工場で製造された鋳造部品に対してバリ取りを含む一次加工を行う工程において供給される部品を加工機械にセットする作業で、現状は多くの作業員の手作業で行われている。これらの現場を自動化する場合には、作業台やベルトコンベアに供給される材料部品の検出と正確な位置計測を行う必要がある。このような技術は「物体認識」と呼ばれ、1970 年代から江尻[11]、石井[12]、らにより多くの研究事例が報告されている。ただし実際の工場に適用した報告としては山田らによる部品位置決め用視覚システム[8]などがあるが多くない。

機械部品など変形しない既知の部品の物体認識にはモデルベーストマッチング法が

有用である。特にベルトコンベア上に対象物が存在する場合など、高さ方向が既知の場合に供給される部品の位置同定は、上方に設置した1台のCCDカメラを使用した画像処理を使用して二次元平面内の位置を決定することで対応可能である。モデルベーストマッチング法は対象部品の幾何学的特徴量の情報の組み合わせを「モデル」として登録しておき、入力画像から得られる幾何学的特徴のリストとのマッチングを行って対象物の検出を行う方法である。これまでに、局所的特徴の位置関係を利用するBollesらの提唱したLFF (Local-Feature-Focus) 法[13]や、これを拡張してモデルの自動生成を考慮したChenらのPRS matcher[14]、およびアウトライン情報を利用した西川ら[15]の研究が報告されている。図2-3はLFF法の図で、(a)は対象部品の蝶番の写真、(b)はその二値画像から抽出した穴とコーナーのモデルで、(c)では穴と周辺のコーナーとの関係を手がかりにして部品検出を行っている。図2-4はPRS-matcherの図で、(a)のトレイ上の部品群の中から(b)の特徴モデルを使用して部品(c)を検出するものである。(b)の部品モデルは線分とコーナーで構成されている。

筆者の目標は、計測場所の照明条件や周囲の光の影響など計測環境が整備しにくく、従来の画像処理手法が適用できなかった作業現場で利用できる対象物位置同定である。工場内は一般に時間的な明るさの変化が存在するため、画像処理を利用する場合は、必要な箇所に遮光措置を施した上で特別な照明を使用するのが普通である。しかしながら、鋳造工程などの大きな部品を扱う現場では遮光措置が難しく、周囲の光の状態が変化することによる影響を避けられない。そこで筆者は入力画像の情報として、光量の変化に影響されないエッジを使用することとし、エッジをもとに特徴抽出を行ってモデルマッチングを行い対象部品の位置決めをする方式を提案する。このような手法はPorriららのTINA[16]などの研究報告があるが、処理時間や精度などの追求はされておらず実用レベルにまでは至っていなかった。筆者は、特に特徴抽出処理時間短縮と必要精度の確保など実用化に向けての工夫を行い、周辺技術を整備して実用技術として完成させた。

本章では、まずモデルマッチングを実用化するために筆者が独自に工夫したエッジ検出と特徴抽出の工夫について述べ、提案する部品検出の手順を説明し、概略の性能を報告するとともに、この方式を適用した事例を報告する。

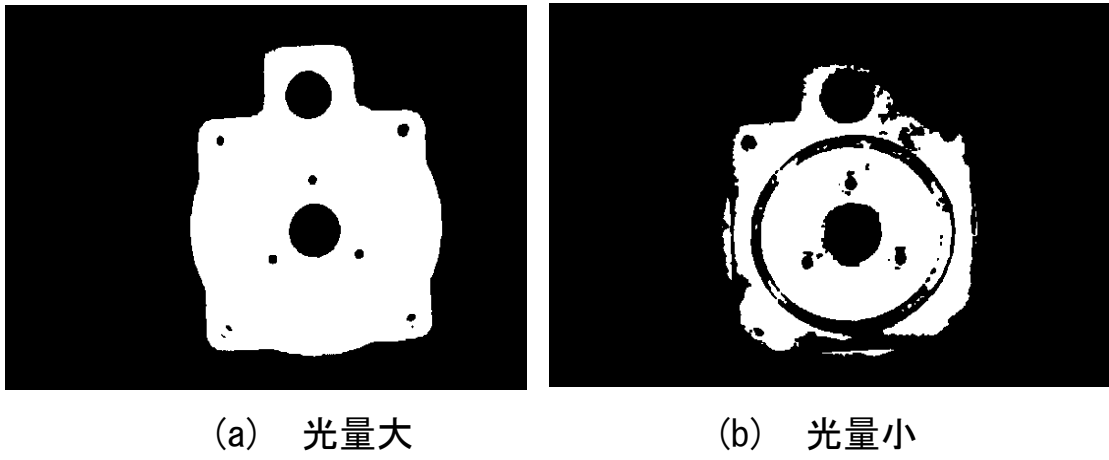


図 2-1 光量の変化による二値画像の変化

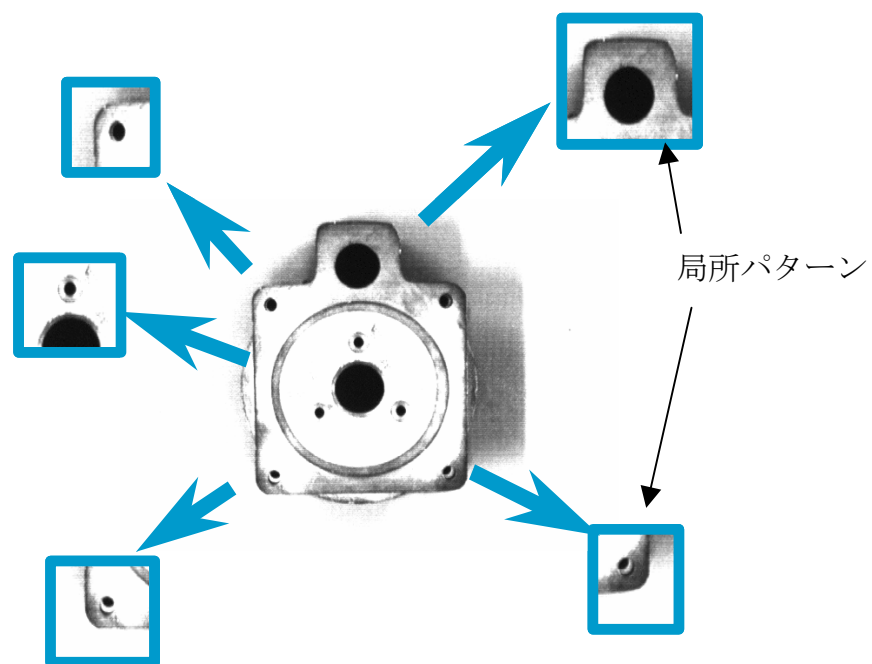
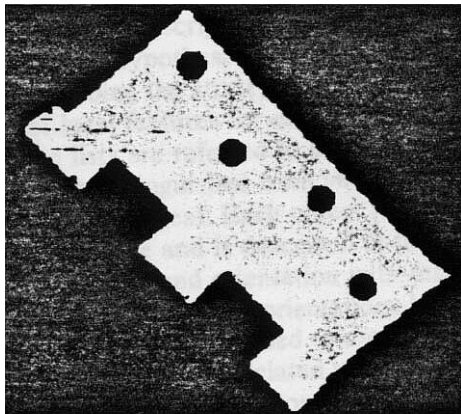
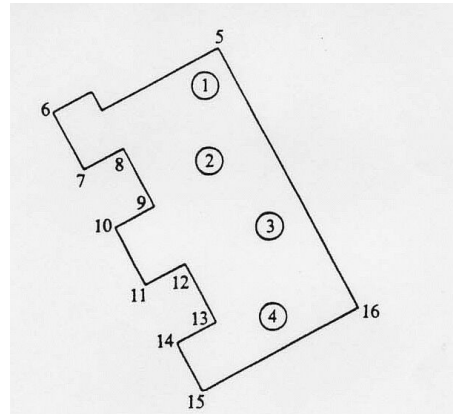


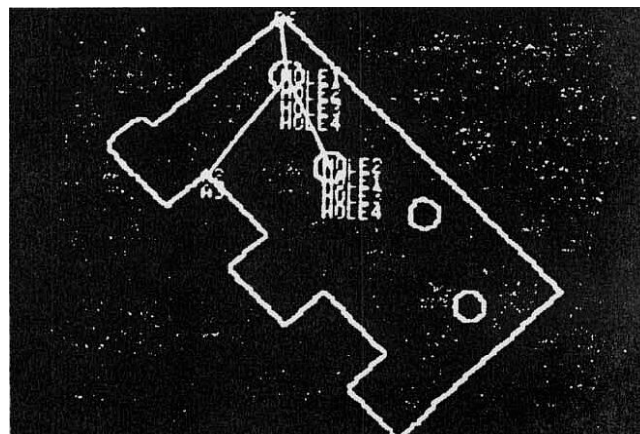
図 2-2 局所パターンによる部品検出の模式図



(a) 蝶番の外観図

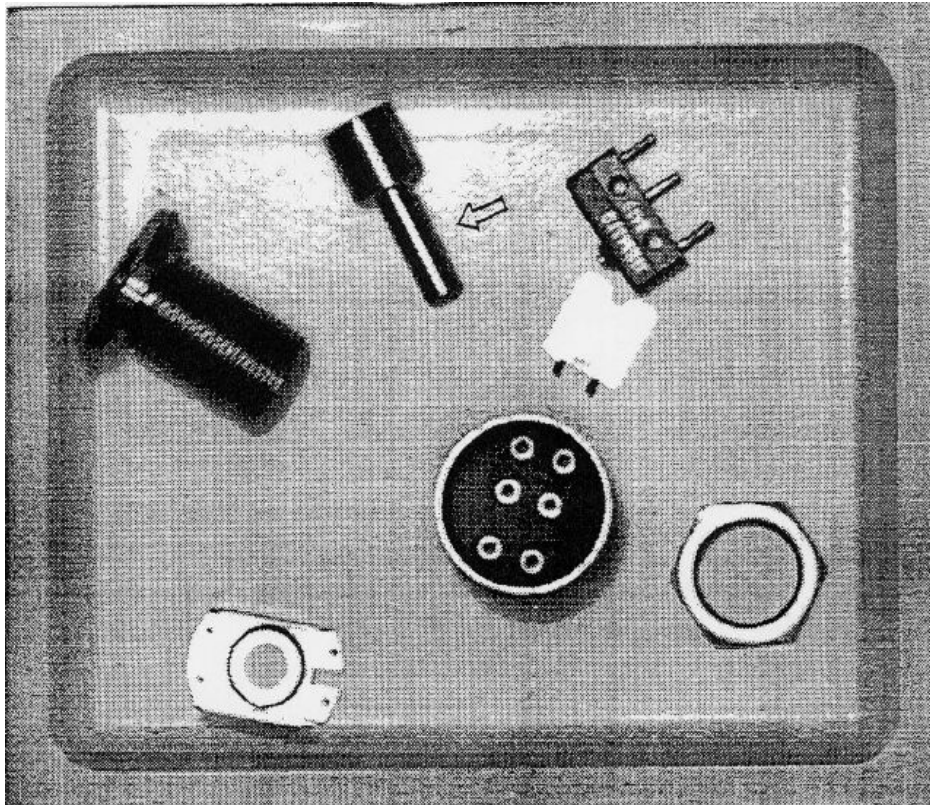


(b) 蝶番のアウトラインと穴

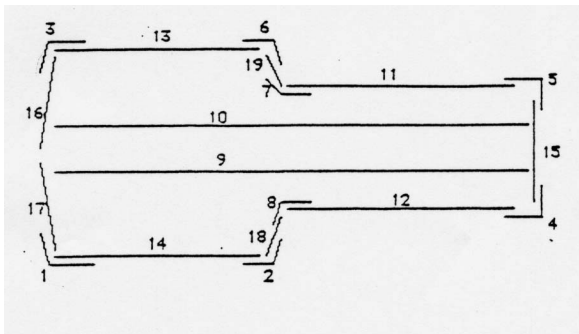


(c) 穴の周辺に検出された角部の検査

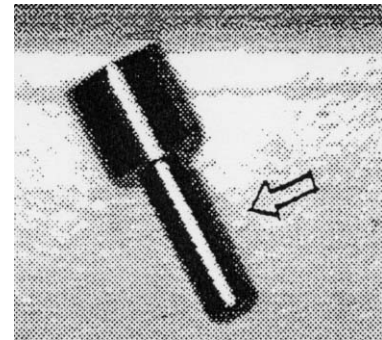
図 2-3 LFF 法の原理説明図



(a) 部品トレイ上の各種部品（リミットスイッチのパーツ）



(b) 部品モデル（線分とコーナーで構成）



(c) 検出した部品

図 2-4 PRS-matcher の例

2.2 再現性良く精細な独自のエッジ検出

2.2.1 一般的なエッジ検出手法の分析と独自の工夫

上述した特徴ベースのモデルマッチングを実現するためには、再現性の良い特徴抽出を実現しなければならない。カメラ画像中の幾何学的な特徴は、直線成分を抽出することが良く行われているが、工業部品を対象とする場合は直線または線分とあわせて円または円弧が多く存在する。これらは、カメラ画像を画像処理して輝度の大きく変化する部分であるエッジを抽出してエッジ画像を取得した上で、これらのエッジ点の情報をもとにして直線成分や円を形成する成分を抽出する処理が行われる。エッジ抽出は Sobel や Canny らの提案している多くのオペレータが利用されているが、これらの方法は比較的カメラ画像の状態の変化の影響を受けやすい欠点がある。つまり、筆者が適用しようとする鋳造部品の加工工程など、照明条件を均一に整備することが難しくカメラ画像の明るさが一定でない現場ではエッジ検出結果にノイズが多く適用しにくい。また、Sobel や Prewitt などの一般的なエッジ検出オペレータを使用するエッジ検出処理の結果得られるエッジ画像においては、例えば部品のアウトラインを示す線分を抽出する場合に、線分抽出処理に使用するエッジ点の数が多く一定の幅があるため、精密な線分抽出ができない恐れが残る。これに対して Canny オペレータは、幅が 1 画素の精細なエッジ情報が得られる利点があるが、繰り返し計算が含まれるためエッジ検出に計算時間がかかる欠点がある。

そこで筆者は、Marr[17]が提案して人間の目の特性に近いとされる DOG (Difference Of Gaussian) に最も近い特性とされる LOG (Laplacian Of Gaussian) フィルタを使用してカメラ画像の二階微分を行い、得られた結果のゼロ交差点 (Zero Crossing) を検出してこれをエッジ点とする方法を導入した。

2.2.2 二階微分を使った細いエッジ点列の獲得

筆者は、二階微分フィルタとしてノイズに強く再現性の高いエッジが抽出できると、畳み込み積分を実行する専用のコマンドを持つDSPで高速な処理が実現できるとなどから $\nabla^2 G$ フィルタ[17]を使用した。 ∇^2 はラプラス演算子であり、 G は二次元ガウス分布を表す。一般にはこのフィルタは、LOG (Laplacian Of Gaussian) フィルタとも呼ばれる。 $\nabla^2 G$ フィルタは(2.1)式で計算する。

$$\nabla^2 G(r) = \frac{-1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{r^2}{2\sigma^2} \right) \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで r は注目する画素からの距離、 σ はガウス分布の標準偏差を示す。

入力画像の全画素に対して(2.1)式の畳み込み積分を行った結果は入力画像の二次微分画像であり、そのゼロ交差点をエッジとして検出する。この時に、二階微分の勾配が一定以上の点のみをエッジ点として検出し、さらに孤立点を除去するなどしてノイズの少ないエッジを取得する工夫をした。この方法のもう一つのメリットは一回の計算で幅が1画素の細いエッジが得られることである。このことは次の特徴抽出の過程での計算量を少なくし、再現性のよい特徴抽出に効果がある。

図2-5はLOGフィルタの形状で、図2-6はエッジ検出の模式図を示したものである。

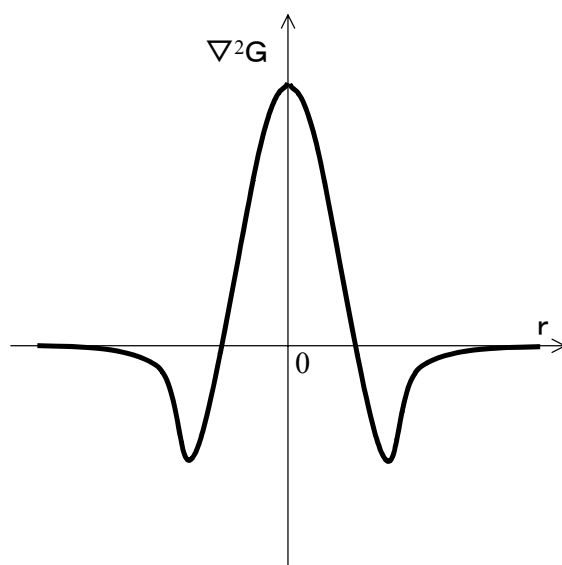


図 2-5 LOG フィルタの形状

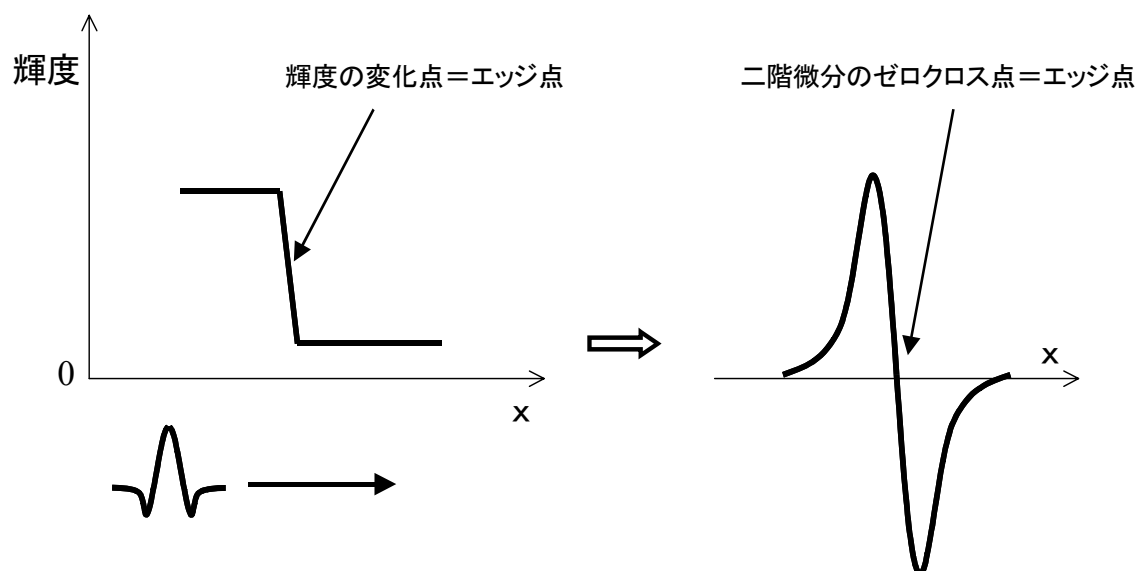


図 2-6 LOG フィルタ処理によるエッジ検出の模式図

2.2.3 整数化LOGフィルタによる高速な二階微分処理

かつての CPU および DSP では、数値計算に一定の実行時間がかかっていた。計算処理の実行時間は四則演算の種類と取り扱う数の種類によって大きく異なっていた。一般に、実数の計算は整数の計算の 4-32 倍の実行時間を必要とし、乗除算は加減算の 2-8 倍の実行時間を必要としていた。LOG フィルタの計算処理は畳み込み積分計算をカメラ画像の全画面の画素に対して行うものなので、1 画素ごとの計算時間の短縮は画像全体の画素に対する計算処理の短縮に大きな効果がある。専用の DSP を使用すれば計算処理を高速に実行することが可能であるが、整数の計算が短時間で行える点は一般の CPU と同様である。そこで筆者は、LOG フィルタの計算処理を整数で行うことを考えた。ただし、処理の結果得られる二階微分画像から再現性良くエッジ検出を行うためには配慮が必要である。

まず、フィルタの大きさは 7×7 画素とした。つまり、注目する画素を中心に ± 3 画素の範囲のデータに対して畳み込み積分の処理を行う。フィルタの大きさは注目画素を中心に整数の大きさでなければならないので、最小は 3×3 である。フィルタの大きさが小さいほど計算にかかる時間が少ない利点があるが、筆者の経験では 3×3 と 5×5 のフィルタでは二階微分処理の場合ノイズの影響を受けやすい。また、フィルタの大きさが大きいほど実数に近いフィルタ効果が得られるが計算にかかる時間が指数関数的に増大してしまう。そこで、筆者のそれまでの DOG フィルタでの実績では 7×7 で有効なことがわかっているので、LOG フィルタについても 7×7 を使用する。

次に、整数で実数計算に近い処理を実現するために以下の条件を考慮した。

- 1) 7×7 フィルタの場合、 $-4 < r < +4$
- 2) $|r| > 3$ のときに、 $\nabla^2 = 0$ となる σ を選択する
- 3) 係数を整数とするために、 $\nabla^2 G(\pm 3) = -1$ となるように係数を正規化する
- 4) このときに係数が 2 の倍数になるように配慮する
- 5) 整数の係数と負数の係数の総和が 0 になるよう係数を調整する
- 6) フィルタ処理の結果が整数の範囲 (± 32767) を超えないように、整数の絶対値の総和が 256 以下になるようにする

以上の 1)-7) の条件を満足する係数を (2.2) 式のように決定した。図 2-7 は、この整数型 LOG フィルタと実数で計算した LOG フィルタを示したものである。

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -4 & -4 & -4 & -2 & 0 \\ -1 & -4 & 0 & 9 & 0 & -4 & -1 \\ -1 & -4 & 9 & 32 & 9 & -4 & -1 \\ -1 & -4 & 0 & 9 & 0 & -4 & -1 \\ 0 & -2 & -4 & -4 & -4 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.2)$$

なお、プログラムでは積和計算の掛け算については乗算を使用せず、ビットシフト処理と加減算で展開した。これは、CPU の実行時間が整数の場合でも乗算は加減算の 4-8 倍の実行時間を必要とするのに対してビットシフト処理が加減算より速い 1 クロックで実行することによる。(2.2) 式で、9 の要素は 1+8 で表現した。0 の要素の画素は計算自体を省略した。(LOG フィルタのプログラムを付録に添付した。)

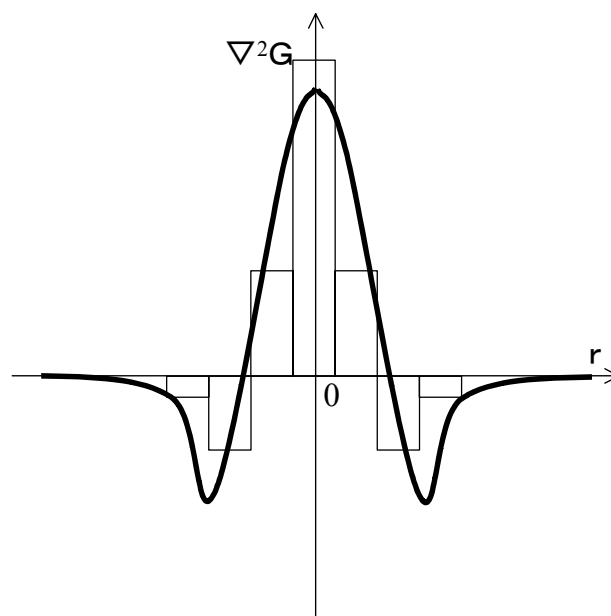


図 2-7 整数化 LOG フィルタの図

2.2.4 不感帯式ゼロクロス点検出によるエッジ点検出の時間短縮

カメラ画像中の輝度が大きく変化する点、つまりエッジ点では二階微分値がゼロを交差する。つまり、エッジ点の前後で二階微分値の符号が反転する。そして、二階微分値がゼロを交差するときの傾きは輝度の変化の大きさ、つまりはエッジの強さに相当する。従来は、二階微分画像の全ての点に対してエッジ点ごとの傾きを一つ一つ計算し、その後エッジ点列を生成する段階で傾きが一定値以下の点をノイズ点として排除し、傾きが一定値以上の点をエッジ点として決定する処理を行っていた。エッジ点は入力画像中では一般に1割以下であるのに、全画素に対してゼロクロス点検出と二階微分値の傾きを計算するのはいかにも無駄である。

そこで、エッジ点検出の新しい方法を提案する。つまり、カメラ画像の二階微分処理の後に二階微分値が一定値以下である点をゼロとする不感帯処理を行い、不感帯をはさんで符号が異なる点を直接エッジ点とする方法を提案する。この方法によれば、エッジ点かどうかの判断をする画素の数が従来のように全画素ではなく不感帯処理後のゼロ点のみに限定されることと、二階微分値の傾きを計算することが不要であるため、エッジ検出のための計算コストが大幅に削減されることが期待できる。

図 2-8 のカメラ画像に対して、3.3.3 項で示した LOG フィルタ処理を行い、上述のエッジ点検出処理を行った結果得られたエッジ画像が図 2-9 である。図 2-9 では、図 2-8 の部品のアウトラインやテクスチャ、つまりエッジ点をよく抽出している。なお、この実験では、組み込み用の CPU、i80960-40MHz を使用し、512×512 画素のカメラ画像の入力からエッジ画像の生成までの処理時間が従来の 3.1 秒から 1.7 秒に短縮できた。

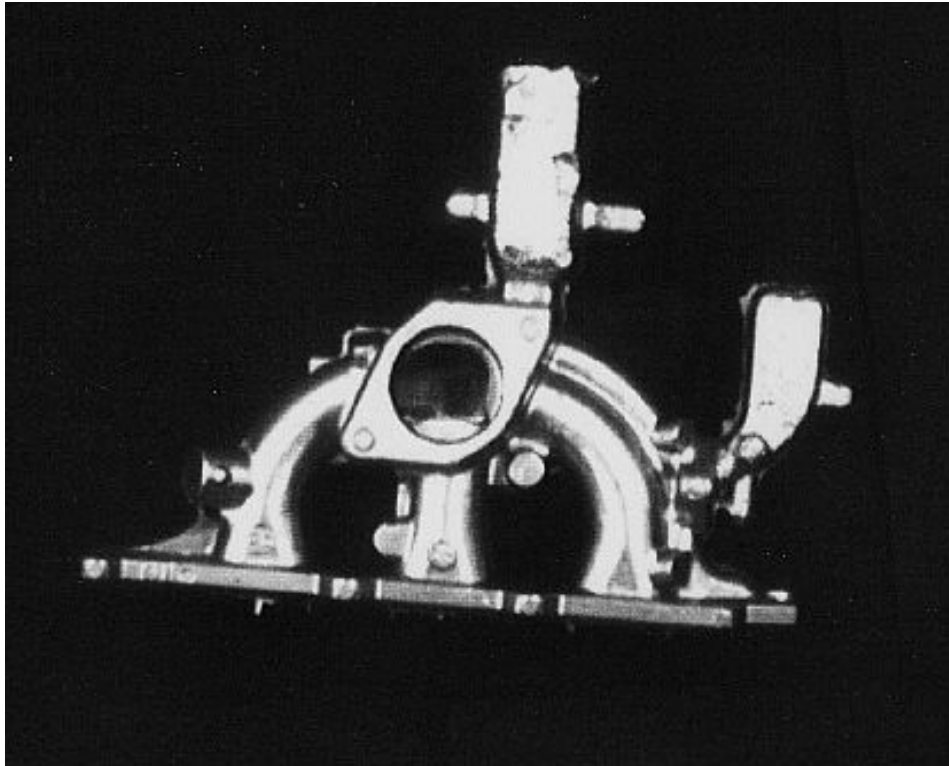


図 2-8 LOG フィルタ処理前のカメラ画像 (マニホールド)

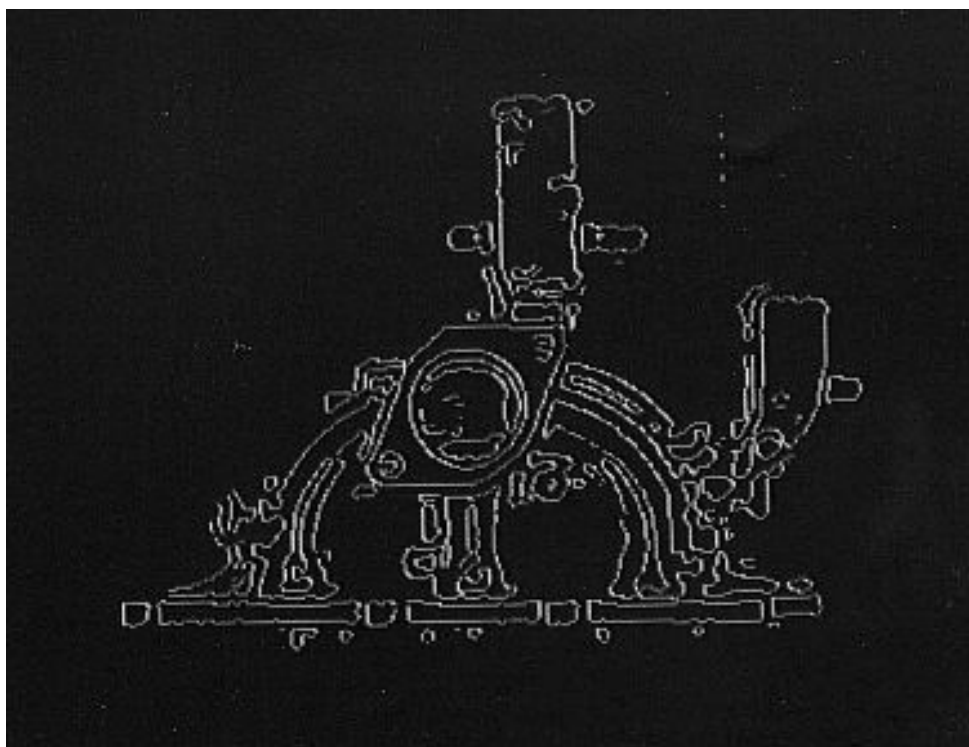


図 2-9 LOG フィルタ処理後のエッジ画像

2.3 安定で高速な独自の特徴抽出

2.3.1 画像処理で使用する幾何学的特徴と独自のアプローチ

特徴抽出処理に関してもエッジ検出処理と同様の配慮が必要である。つまり、再現性良いこと、安定して抽出できること、部品の形状や特徴をよく表現できること、高速に計算できること、などである。部品の形状を表現するための幾何学的な特徴には、直線、線分、線分素、円、楕円、円弧、色領域、角、T結合、平行線など様々なものを使用されているが、特徴抽出処理の単純化、高速化のためには、全てを使用することは考えられず、2-3 の特徴を組み合わせて部品モデルを構成するのが現実的である。そこで筆者は、まず線分と円弧で部品を表現することを考えた。

画像中の直線成分の抽出に関しては Hough 変換が有名だが、計算時間がかかるので現場への導入は難しい。エッジの細かなつながりを線分素として抽出して特徴抽出に使用する方法もあるが、線分素をもとにして直線や楕円を抽出する後処理が必要で計算時間も短くない。そこで筆者はエッジ画像から直接線分を抽出することにする。そのほかの特徴のうち角、T結合、平行線は線分の組合せで表現されるので、部品モデルを線分の組合せで表現すればこれらの特徴が包含される。

工業部品の部品表面には円形の穴や凹凸が多く存在し、カメラ画像中ではこれらが楕円に見える。そこで円または楕円を抽出することを検討したが、部品表面の穴や凹凸の画像はエッジ検出処理の結果得られるエッジ画像では切れた状態になることが多く、円や楕円を構成しない場合があった。そこで筆者は、円または楕円の要素として円弧を使用することとする。また、線分と円弧の抽出処理についてはこれを短時間で実行する方法を新しく提案する。

さらに新しく、閉曲線という考え方を導入し、部品を構成する重要な幾何学的な特徴の一つとして使用することにした。本節では、これらの特徴抽出の具体的な手順を説明する。

2.3.2 最小二乗法による線分と円弧の抽出

特徴抽出はエッジ検出処理の結果得られるエッジ画像を基にして計算する。エッジ検出処理の結果得られるエッジ画像中で連結しているエッジ点の集合を $\mathbf{E}_k$ としたときに $\mathbf{E}_k$ の要素データをもとに最小二乗法による近似計算を施すことにより抽出する。連結するエッジ点の集合 $\mathbf{E}_k$ はまずエッジ画像の1点から8近傍で隣接する点を探索して連結することにより求めた。また、ある $\mathbf{E}_k$ が線分にも円弧にも近似できない場合は $\mathbf{E}_k$ を後述する方法により2分割し、その各々について再度近似計算を行う再帰的手法を導入し、エッジ画像を線分と円弧の集合で表現する特徴抽出を行った。

線分の含まれる直線の方程式を

$$y = ax + b \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

としたときに、直線とエッジ点 (x_i, y_i) との誤差 d_i は、

$$d_i = y_i - (ax_i + b) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

なので、これを最小にするためには

$$\frac{\delta}{\delta a} \sum d_i^2 = \frac{\delta}{\delta b} \sum d_i^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

となる a 、 b を求める。このとき、

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \\ \sum x_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sum x_i y_i \\ \sum y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

となるので、近似直線の a 、 b はこれを展開して、

$$a = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

で求めることができる。 $\mathbf{E}_k$ が線分の場合は $\mathbf{E}_k$ の端点を(2.7)式で求めた線分上に投影

した点を線分の端点として以下の処理で使用する。

円弧の場合も同様に、円の方程式を

$$ax + by + c + x^2 + y^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

とすると、エッジ点 (x_i, y_i) との誤差 d_i は、

$$d_i = ax_i + by_i + c + (x_i^2 + y_i^2) \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

なので、これを最小にするためには

$$\frac{\delta}{\delta a} \sum d_i^2 = \frac{\delta}{\delta b} \sum d_i^2 = \frac{\delta}{\delta c} \sum d_i^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

であるから、

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum (x_i^2 + y_i^2) x_i \\ \sum (x_i^2 + y_i^2) y_i \\ \sum (x_i^2 + y_i^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

となり、これを展開して近似円の方程式の各項が、

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = -\frac{1}{m_{00}} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sum (x_i^2 + y_i^2) x_i \\ \sum (x_i^2 + y_i^2) y_i \\ \sum (x_i^2 + y_i^2) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

で求められる。ここで、

$$\begin{aligned} m_{00} &= N(\sum x_i^2)(\sum y_i^2) + 2(\sum x_i y_i)(\sum x_i)(\sum y_i) \\ &\quad - (\sum x_i)^2(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2(\sum x_i^2) - N(\sum x_i y_i)^2 \\ m_{11} &= N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 \\ m_{12} &= \sum x_i \sum y_i - N \sum x_i y_i \\ m_{13} &= \sum x_i y_i \sum y_i - \sum y_i^2 \sum x_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_{21} &= \sum x_i \sum y_i - N \sum x_i y_i \\
m_{22} &= N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \\
m_{23} &= \sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i \\
m_{31} &= \sum x_i y_i \sum y_i - \sum x_i \sum y_i^2 \\
m_{32} &= \sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i \\
m_{33} &= \sum x_i^2 \sum y_i^2 - (\sum x_i y_i)^2
\end{aligned}$$

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

$$o_x = -\frac{a}{2}, \quad o_y = -\frac{b}{2}, \quad r = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2 - 4c} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

で求めることができる。

ところで、あるエッジ点の集合 $\mathbf{E}_k$ を直線と円弧に近似しても誤差の積算 $\sum di^2$ が大きく適当な近似ができない場合がある。このときは $\mathbf{E}_k$ を誤差の最大になる点で2分割し、それらの各々を再度直線と円弧に近似することにした。抽出された直線と円弧は特徴データ $\mathbf{F} \mathbf{I}_j$ ($j=1$ to m) として一時保存して以降の処理に使用する。

2.3.3 線分あてはめと円弧あてはめによる高速な線分と円弧の抽出

特徴抽出処理においては、繰り返して行われる直線と円弧の近似計算が全体の計算時間の中で大きな比重を占めている。我々の特徴抽出の過程ではエッジ検出処理後のエッジ点の集合 $\mathbf{E}_k$ を最小二乗法で直線と円弧に近似するが、適当な近似ができない場合は $\mathbf{E}_k$ を分割し再度近似計算を行うため、特に $\mathbf{E}_k$ が大きい場合には近似計算の回数が多くなる。ところで、我々の認識ターゲットとする対象物は一般的な工業的部品でありそのエッジは直線と円弧に集約できる。つまり $\mathbf{E}_k$ が対象物に関するエッジの場合、 $\mathbf{E}_k$ は直線か円弧かあるいはそれらの集合である。従って、特徴抽出時に $\mathbf{E}_k$ が直線か、円弧か、そのいずれでもないかをまず判断できれば、直線または円弧の近似計算の回数を減らすことができ、特徴抽出処理にかかる時間を短縮することができる。この判断のた

めに我々は以下のアルゴリズムを考えた。

$\mathbf{E}_k$ の 2 つの端点 A、B の座標を (u_1, v_1) (u_2, v_2) 、中間点 M を (u_3, v_3) とする。
今 $\mathbf{E}_k$ が直線であるとする と 3 点 A、B、M はこの直線上に存在する。この場合は線分 AM と線分 BM の傾きが等しいことから、

$$\frac{(v_3 - v_1)}{(u_3 - u_1)} = \frac{(v_3 - v_2)}{(u_3 - u_2)} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

であり、これを展開して、

$$(u_3 - u_1)(v_3 - v_2) - (u_3 - u_2)(v_3 - v_1) = 0 \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

が成立するときは 3 点 A、B、M が直線上にあり $\mathbf{E}_k$ が直線である可能性がある と判断できる。ただし、実際には画像上の座標値には画像入力時の量子化誤差等が含まれるので誤差を考慮したパラメータ ε を使用して、

$$(u_3 - u_1)(v_3 - v_2) - (u_3 - u_2)(v_3 - v_1) \leq \varepsilon \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

が成立するときに $\mathbf{E}_k$ が直線の可能性ありと判断する。

次に $\mathbf{E}_k$ が円弧である とすると、3 点 A、B、M はこの円弧を含む円の円周上に存在する。円の中心 O を (o_x, o_y) とすると、O は線分 AM の垂直二等分線 l_{am} と線分 BM の垂直二等分線 l_{bm} の交点である。 l_{am} 、 l_{bm} の式はそれぞれ、

$$\left(y - \frac{v_3 + v_1}{2}\right) = -\frac{u_3 - u_1}{v_3 - v_1} \left(x - \frac{u_3 + u_1}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

$$\left(y - \frac{v_3 + v_2}{2}\right) = -\frac{u_3 - u_2}{v_3 - v_2} \left(x - \frac{u_3 + u_2}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

であるから、これらの交点が (o_x, o_y) ならば、

$$\left(o_y - \frac{v_3 + v_1}{2}\right) = -\frac{u_3 - u_1}{v_3 - v_1} \left(o_x - \frac{u_3 + u_1}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

$$\left(o_y - \frac{v_3 + v_2}{2}\right) = -\frac{u_3 - u_2}{v_3 - v_2} \left(o_x - \frac{u_3 + u_2}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

なので、以下の2式から o_x 、 o_y を導くことができる。

$$o_x = \frac{1}{2} \times \frac{m_x}{(u_3 - u_2)(v_3 - v_1) - (u_3 - u_1)(v_3 - v_2)} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

$$o_y = \frac{1}{2} \times \frac{m_y}{(u_3 - u_2)(v_3 - v_1) - (u_3 - u_1)(v_3 - v_2)} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

ここで、

$$\begin{aligned} m_x &= (v_3 - v_1)(v_3 - v_2)(v_2 - v_1) + (v_3 - v_1)(u_3 + u_2)(u_3 - u_2) \\ &\quad - (u_3 + u_1)(u_3 - u_1)(v_3 - v_2) \\ m_y &= (u_3 - u_1)(u_3 - u_2)(u_2 - u_1) + (u_3 - u_1)(v_3 + v_2)(v_3 - v_2) \\ &\quad - (v_3 + v_1)(v_3 - v_1)(u_3 - u_2) \end{aligned}$$

また円の半径 r は円の中心点 O と M との距離であるから、

$$r = \sqrt{(u_3 - o_x)^2 + (v_3 - o_y)^2} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

で求めることができる。 $\mathbf{E}_k$ が円弧である場合は $\mathbf{E}_k$ の全ての点が O から r の距離に存在する。従って、 $\mathbf{E}_k$ の構成要素を (u_i, v_i) ($i=1$ to n) としたときに全ての i に対して、

$$r^2 = (u_i - o_x)^2 + (v_i - o_y)^2 \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

が成立するときに $\mathbf{E}_k$ を円弧と判断することができる。ただし、この場合も (u_i, v_i) には量子化誤差等が含まれるので誤差を考慮したパラメータ Δr を使用して、

$$(r - \Delta r)^2 \leq (u_i - o_x)^2 + (v_i - o_y)^2 \leq (r + \Delta r)^2 \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

が全ての i に対して成立するときに $\mathbf{E}_k$ を円弧と判断することにする。

そして、以上の2つの判断がいずれも成立しない場合 $\mathbf{E}_k$ は直線にも円弧にも近似できないと判断する。これにより最小二乗法の近似計算をせずに $\mathbf{E}_k$ の分割ができ、特徴抽出の計算時間を短縮することができる。ところで、(2.21)式、(2.22)式の分母は(2.15)式の左辺であるので、(2.15)式がゼロでない場合すなわち3点A、B、Cが直線上にならない場合は3点を通る円の中心 (o_x, o_y) を求めることができる。

図 2-10 はモータ軸受のサンプルのエッジ画像で、合計 35 のエッジ点列が表示されて

いる。図 2-11 は、図 2-10 のエッジ点列から特徴抽出処理により得られた線分と円弧を表示したもので、合計 93 本の線分と 27 個の円弧が抽出されている。

この特徴抽出の改良とあわせて単純なプログラム製作テクニックの工夫によるソフトウェアの最適化を行い、計算時間を最大で 20% にまで短縮することができた。



図 2-10 LOG フィルタ処理後のエッジ画像

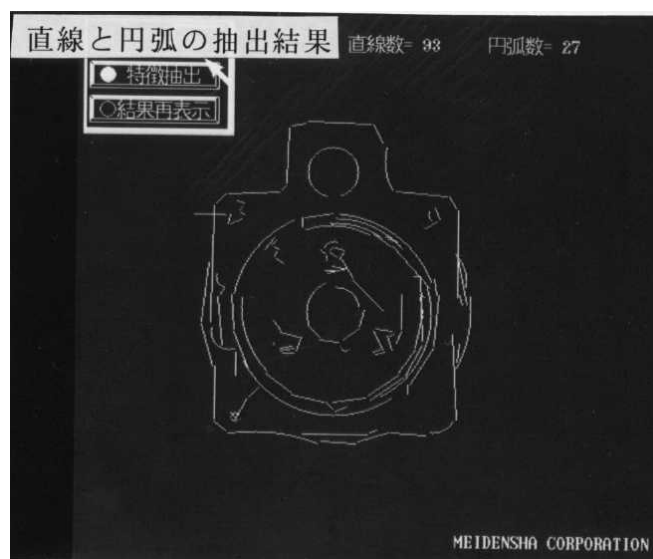


図 2-11 線分と円弧の抽出結果

2.3.4 細いエッジにもとづく閉曲線抽出

一般的な画像処理では入力画像を何らかの方法で複数の領域に分割しその領域同士の境界線として閉曲線が抽出される。領域分割に関しては画像二値化処理後の二値画像の白黒部分で分割する方法やカラー画像の色情報などを元に領域分割する方法などがある。しかしながら前者は二値化の再現性確保のための計測条件の整備が必要な点で適用に制限があり、後者はRGBの3倍の画像処理が必要な点と精度が損なわれる点で現実的でない。また、我々が使用するのは部品を特定するための孤立した閉曲線なので必ずしも全画面を領域分割する必要がなく、領域分割のプロセスは我々にとっては冗長な処理である。

そこで筆者は、エッジ検出処理を行った後のエッジ画像から閉曲線を抽出する方法を提案する。すなわち、入力画像のエッジ検出を行い、エッジ点列をトレースして閉曲線を形成するエッジ点列を抽出した。エッジ検出処理は画像全体の明るさの変化やシェーディングの影響を受けにくいため、計測条件の変化にロバストな閉曲線抽出が期待できる。エッジ検出は2.2節で示したLOGフィルタ処理を施した後のゼロクロス点検出により行った。この方法は細く再現性の良いエッジ画像が得られる利点がある。

エッジ点の連結状態のトレースに関して、筆者の使用する閉曲線は対象物に固有な部分であり、幾何学的な特徴としては穴や凸部などに見られる孤立した閉曲線である。従ってエッジ点のトレースの過程で分岐および端点に遭遇した場合はこれが孤立した閉曲線にはならないのでこれらのエッジ点は排除できる。これにより多くのエッジ点の中から閉曲線を構成するエッジ点列とこれらにより構成される閉曲線のみを抽出することができる。ただしエッジ検出の過程でエッジ点列が分断される場合を想定して、完全に閉曲線にならない場合でも端点同士が近接しているエッジ点列は閉曲線として抽出するよう考慮した。この一連の処理で加工穴、取り付け穴、鏡面反射部分、アウトライン、キー溝などが閉曲線として抽出される。

図2-12から図2-14はこれらの処理の過程を示したものである。図2-12は複数のモータフランジ部品が部品箱の中に置かれている映像で、カメラからの入力画像である。図

2-13は図2-12の画像のエッジ検出処理後の画像で多くのエッジ点が検出されている。この中から閉曲線を抽出した結果が図2-14である。こうして得られた閉曲線は閉じた領域を形成するので通常の二値画像処理の手法による周囲長、面積、縦横比などの幾何学的特徴量を計算することができる。

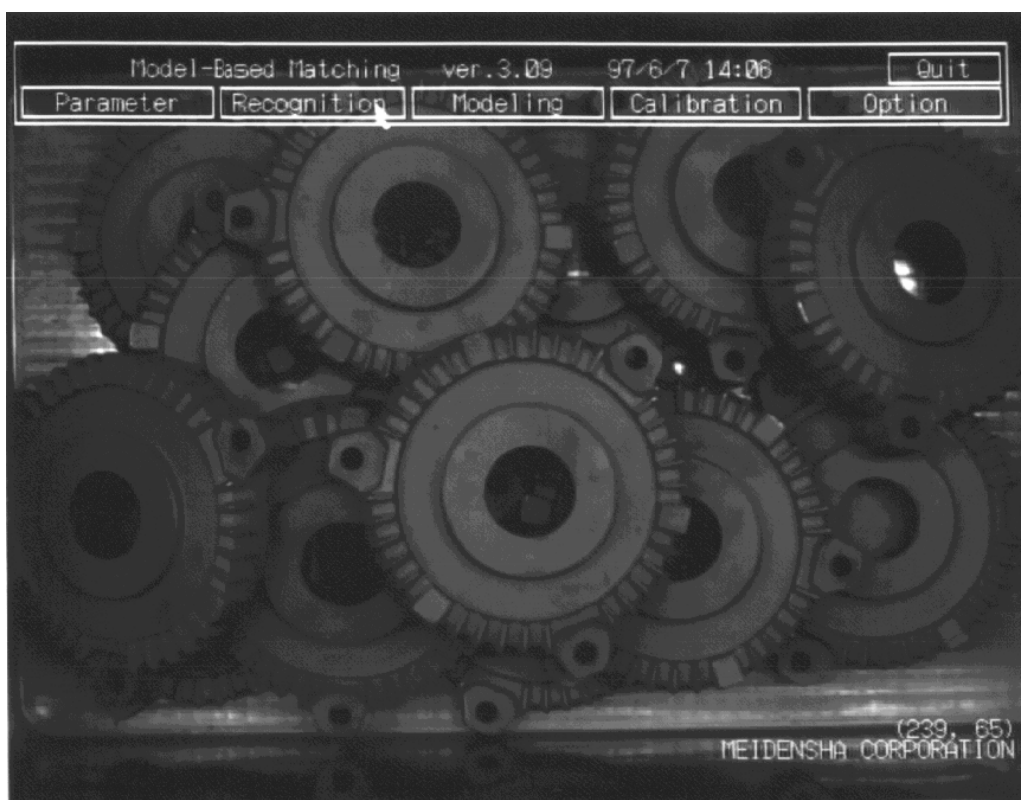


図2-12 カゴ型パレット内のモータ部品のカメラ画像

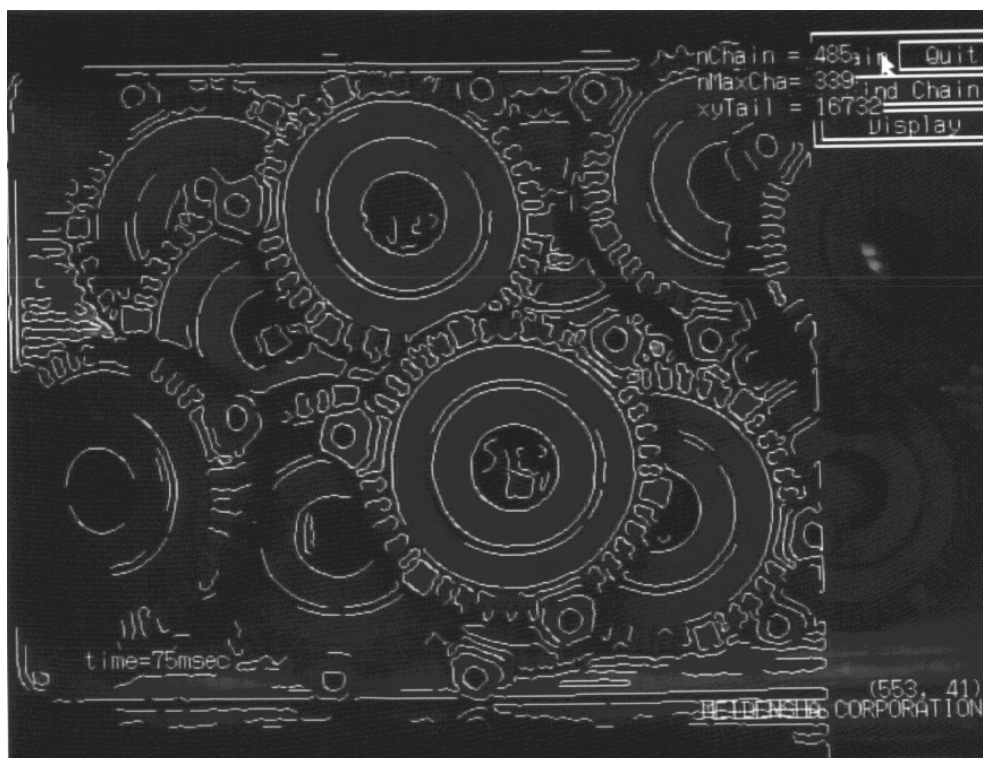


図2-13 カゴ型パレット内のモータ部品のエッジ画像

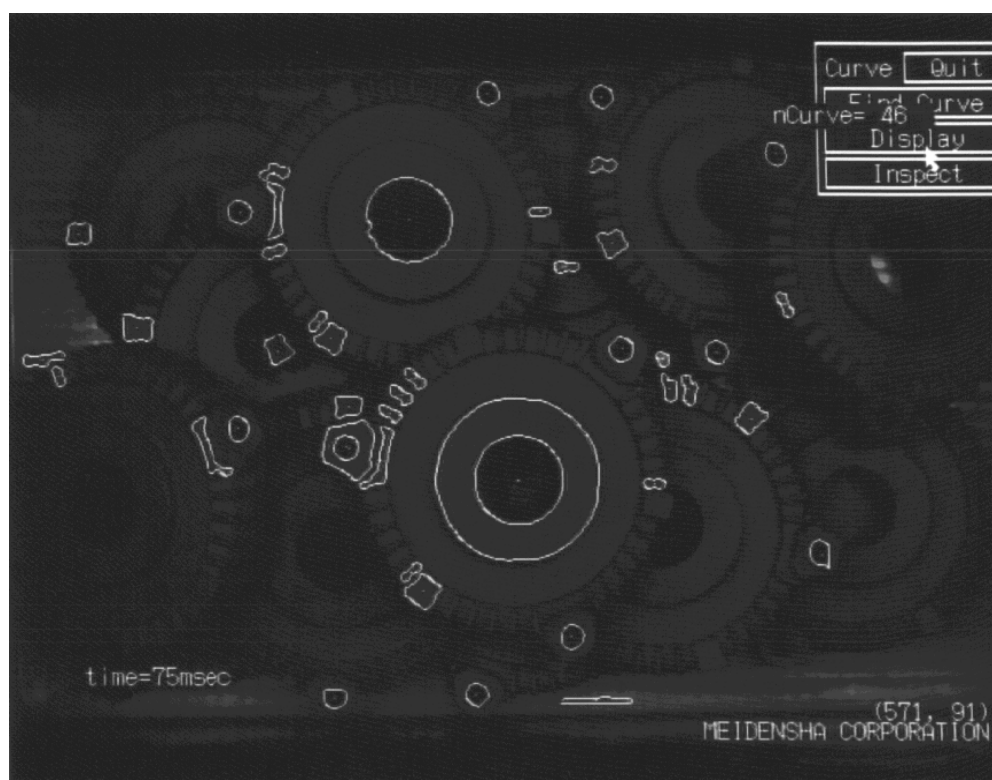


図2-14 エッジ画像から特徴抽出した閉曲線

2.4 部分的特徴マッチングによる独自の部品検出アルゴリズム

図 2-15 は、提案するモデルベーストマッチングによる部品検出方法のモデル作製の流れをフローチャートで示したものである。検出対象物の部品モデルを作製するプロセスは、CADデータなどの情報を元に行うのではなく、対象物のサンプルを使用して、その画像をもとにしてモデルを作製して登録するまでの処理を、オペレータの介在で行うものとする。オペレータがあらかじめ画像前処理のパラメータを設定しておき、システムはサンプルの画像を入力し、設定されたパラメータに基づくエッジ抽出と特徴抽出の処理を行い、結果として得られる線分と円弧のリストを作成する。特徴抽出の結果は同時にモニタに表示されるので、表示された特徴の中からオペレータが、モデルを構成するのに必要と判断する特徴を選択することでモデルが作製される。このときに、マッチングの手がかりとなるシードフィーチャもあわせてオペレータが指定する。本システムでは、こうして選択された複数の特徴の種類とそれらの相対的な位置関係を表現したデータ群とこの時のパラメータデータをあわせて「モデル」と呼び、部品検出のプロセスで使用する。

これに対応する部品検出のプロセスは、図 2-16 のフローチャートに沿って自動で行われる。つまり、カメラから画像を入力してから画像中に対象物を検出し位置を計算して出力するまでの一連の処理を自動的に行うものである。部品検出時にはまず画像入力を行い、モデル作製時に設定されたパラメータでエッジ抽出と特徴抽出を行い線分と円弧のリストを作成する。その抽出された特徴群の中からモデルの特徴と照合するものを検索して（特徴マッチング）、対象物を検出する。そしてこのときの特徴群が入力画像中に存在する位置の座標を、検出した対象物の位置として出力するものである。

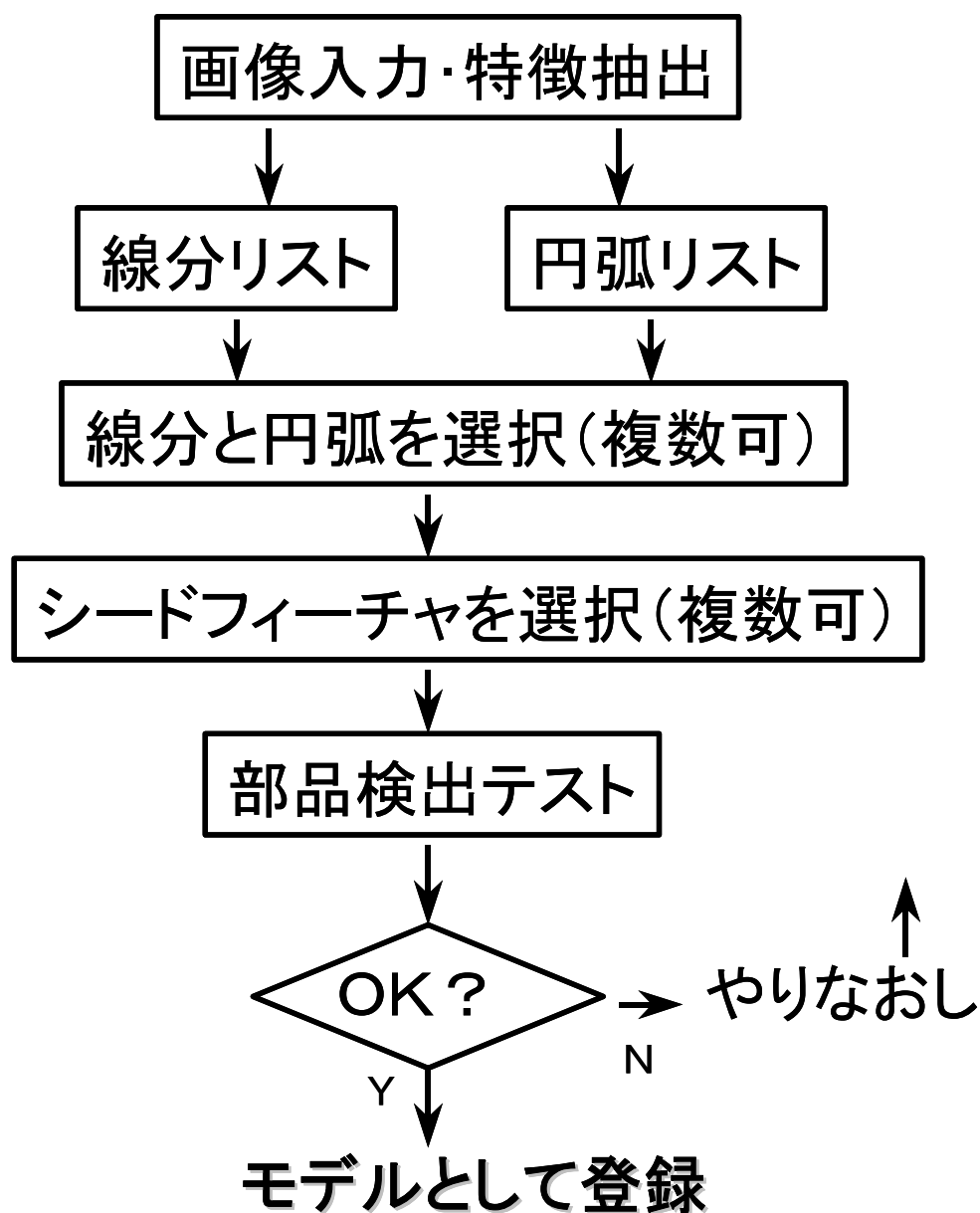


図2-15 モデル作製のフローチャート

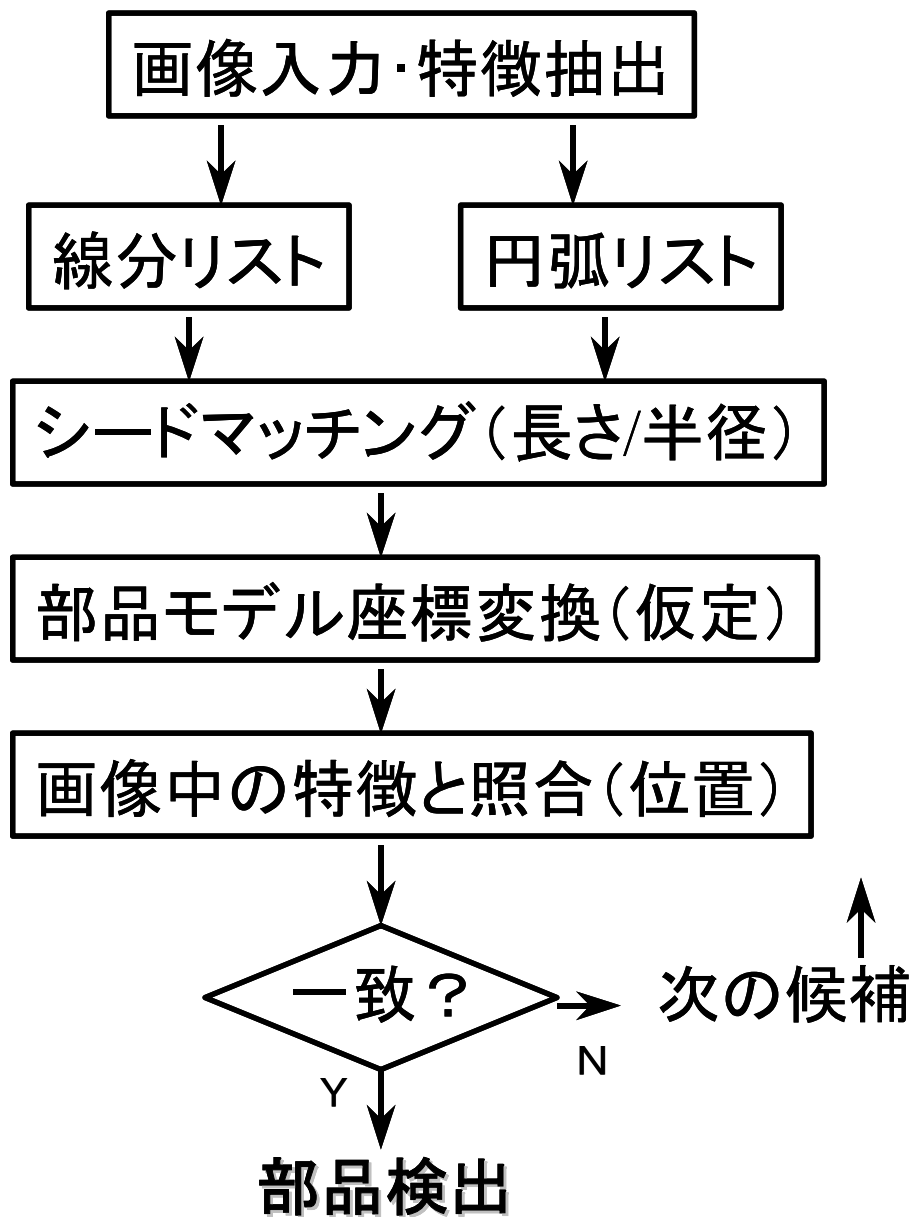


図2-16 部品検出時のフローチャート

図 2-17 は、鑄造部品の一つであるモータ軸受け部品を真上に設置したカメラで見下ろした画像である。図 2-18 は、オペレータが設定した図 2-17 の部品の特徴モデルの例で、図 2-19 は、このモデルを使用して部品を検出した例を示したものである。この処理の結果、部品の位置として、カメラの光軸に対して垂直な平面上の位置と回転方向を知ることができる。

このアルゴリズムで特に工夫した点は、まず画像前処理としてエッジベースの特徴抽出を行うこと、次にモデルを特徴で表現してマッチングは入力画像から抽出した特徴との間で行うこと、そしてマッチングプロセスでは一定の許容範囲を設定すること、の3点である。これらは部品検出の安定性、つまり計測条件の変化に対するロバスト性を確保する上で重要なポイントである。

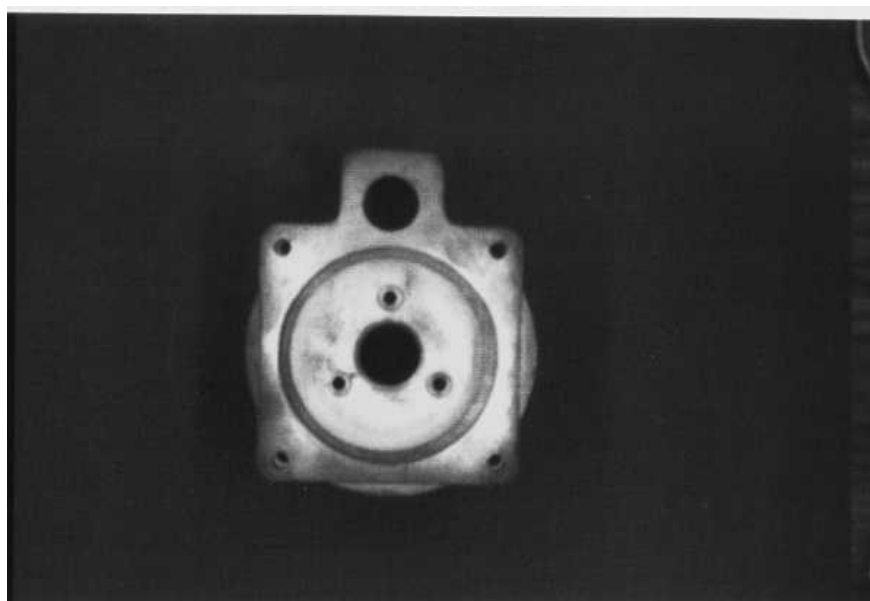


図2-17 対象部品のサンプル画像

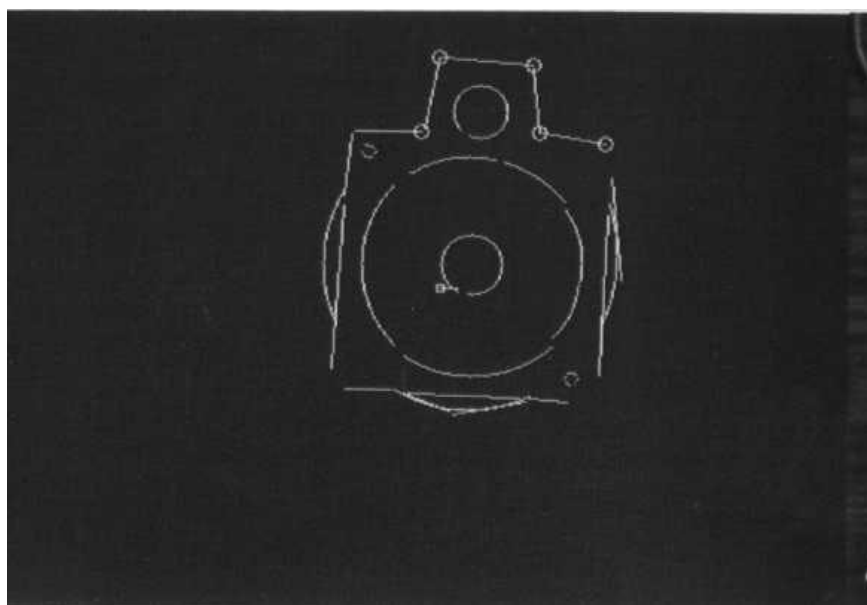


図2-18 対象部品の特徴モデル

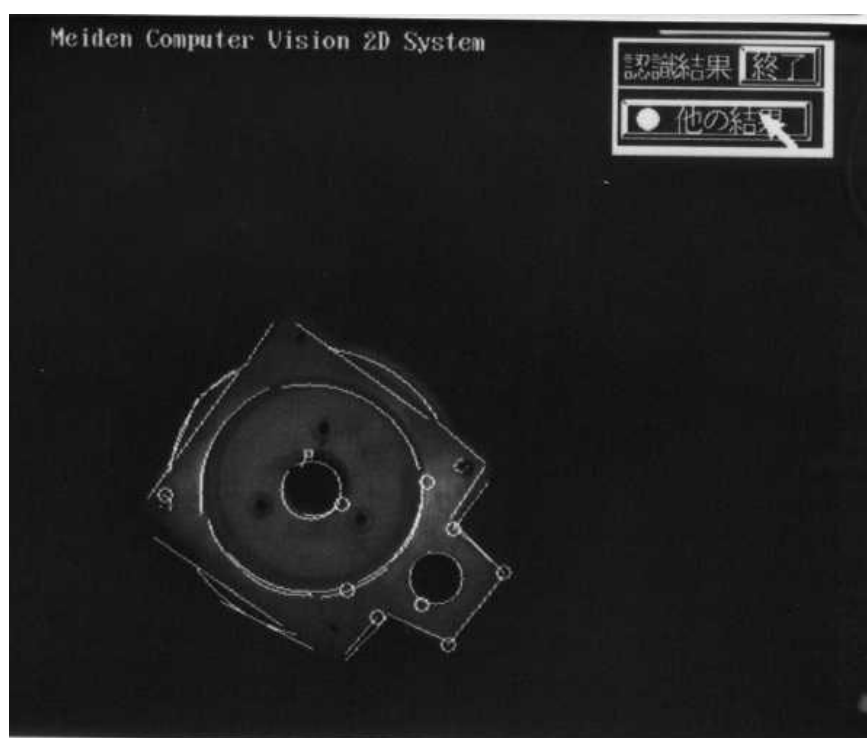


図2-19 部品検出結果の表示例

モデルの作製はオペレータがサンプルの画像から抽出された特徴 $\mathbf{F I j}$ の中から対象物の形状を表現する n 個の特徴を選択することで行われる。選択された特徴 $\mathbf{F M i}$ ($i=1$ to n) は、モデル作製時の座標系で記述する。

特徴マッチングのプロセスではモデルベースの局所的特徴マッチング手法である L F F 法[13]をもとにした手順でモデルの特徴組 $\mathbf{F M i}$ と入力画像の特徴組 $\mathbf{F I j}$ との照合を行う。すなわち、まず $\mathbf{F M i}$ の中からシードフィーチャと呼ぶ代表的な特徴 $\mathbf{F M s}$ に注目し $\mathbf{F I j}$ から対応する特徴を検索する。例えば、 $\mathbf{F M s}$ として一本の線分を使用する場合は線分の長さに注目し $\mathbf{F I j}$ の中から $\mathbf{F M s}$ と長さが所定の許容誤差範囲内で同一の線分を選択する。対応する特徴が見つかったときはこれを $\mathbf{F I c}$ として、 $\mathbf{F M s}$ と $\mathbf{F I c}$ の中点の変位 (x' , y') と回転変位 α を計算し変換行列(2.26)式を求める。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & x' \\ \sin \alpha & \cos \alpha & y' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.26)$$

ここで $\mathbf{T}$ は二次元の並進 (x' , y') と回転 α の座標変換を表現する二次元の座標変換行列である。次に $\mathbf{T}$ を使用して(2.27)式により全ての $\mathbf{F M i}$ の特徴の座標変換を行い対象物の存在を仮定 (hypothesis) する特徴組 $\mathbf{F H i}$ を生成する。

$$\mathbf{F H i} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{F M i} \quad (i=1 \text{ to } n) \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

$\mathbf{F H i}$ は、 $\mathbf{F M s}$ と $\mathbf{F I c}$ が対応するならば $\mathbf{F M i}$ が移動して画像中に存在すると仮定できる特徴組を意味する。そこで $\mathbf{F H i}$ を構成する特徴のひとつひとつについて $\mathbf{F I j}$ の中から対応するものを検索して照合を行い、 $\mathbf{F H i}$ の内の一定数以上の特徴が $\mathbf{F I j}$ の中に存在するときに $\mathbf{F H i}$ の位置に対象物が存在すると判断する。このときの座標変換行列 $\mathbf{T}$ は、対象物のモデル $\mathbf{F M i}$ を作製した位置を基準にした対象物の位置および回転角度を示している。検索照合の結果 $\mathbf{F H i}$ の一定数以上の特徴が $\mathbf{F I j}$ の中に存在しない場合は $\mathbf{F H i}$ の仮定が成立しない、つまりここに対象物が存在しないと判断し次の仮定を検索する。

提案する方法では、モデル作製は部品検出時と同一の計測条件でサンプルの画像を入力して行うので現場の計測条件に合致した再現性良いモデルを作ることができる利点がある。

2.5 様々な形状の部品検出実験

本節では、筆者が提案したモデルベースの特徴マッチングを使用して計測条件を変えて鋳造部品の位置同定を行った実験の結果を示す。実験に用いた画像処理のハードウェアは、ロボットコントローラに実装することを考慮したVMEボードで構成し、画像入力からエッジ抽出までを実行するDSPと特徴抽出やマッチングのデータ処理を実行するCPUとで構成して負荷の分担と処理の高速化を図った[18]。画像入力から位置同定までの一連の処理にかかる時間は、画像の複雑さに依存するが最大1秒以下である。ハードウェア構成を図2-20に示す。

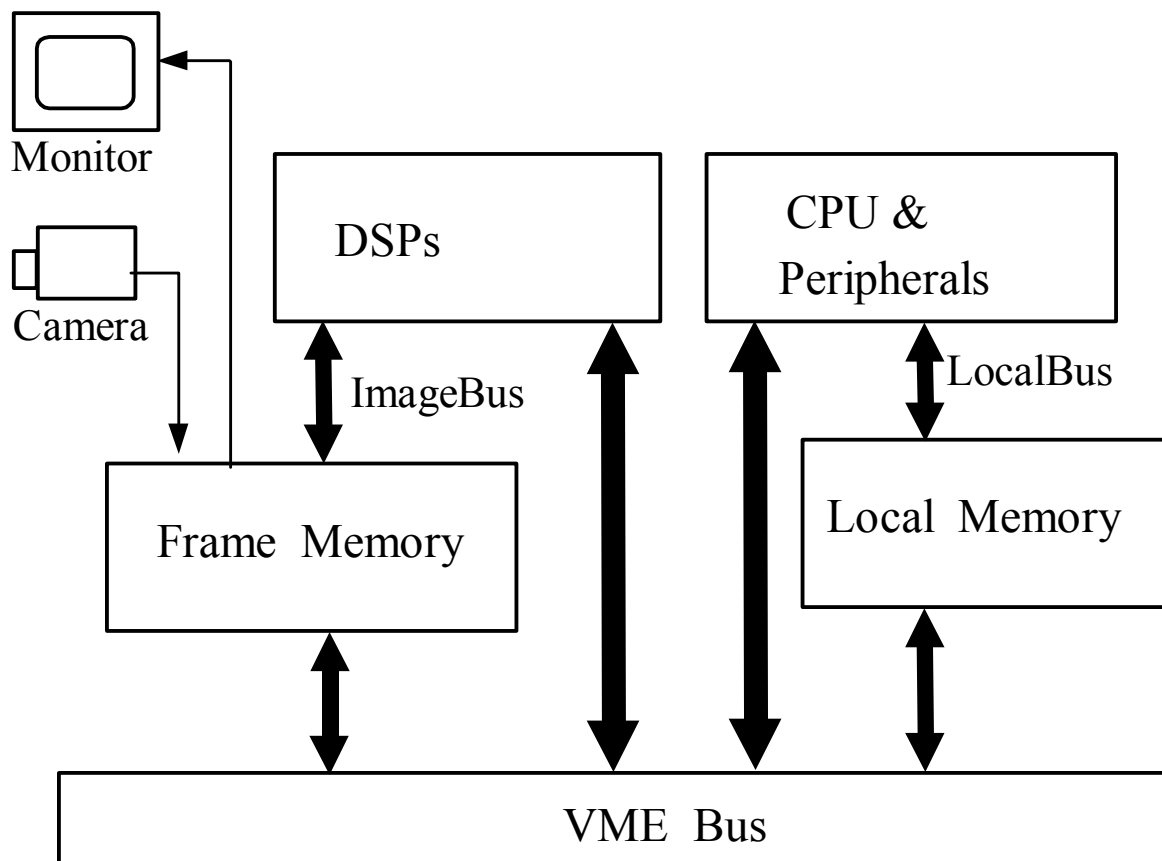


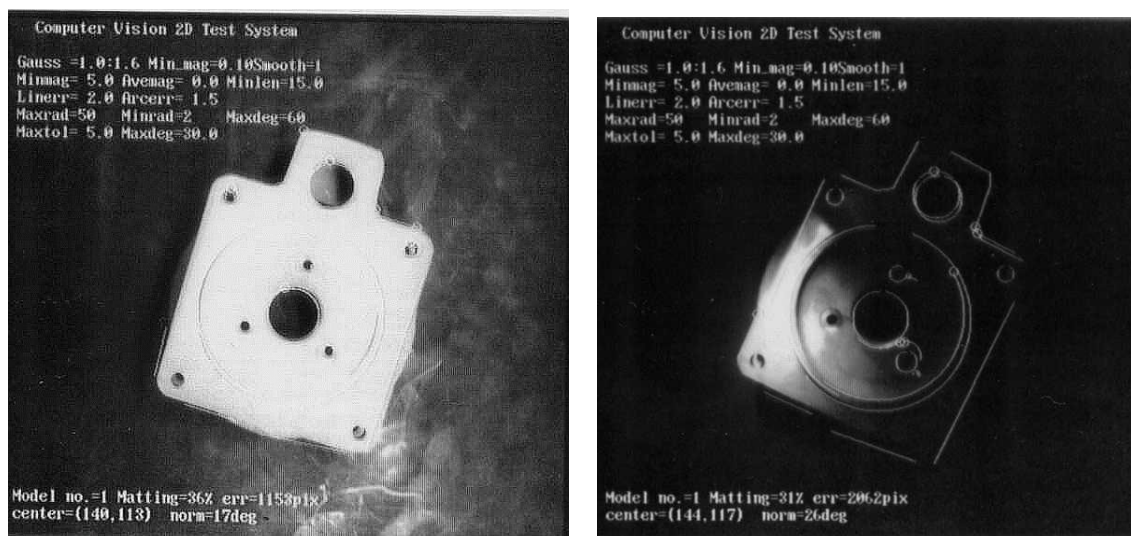
図2-20 画像処理装置のハードウェア構成

提案した方法は、特に計測条件の変動の影響を受けない部品の検出と位置同定が可能である。以下にモータ軸受部の鋳造部品を対象物として照明条件の変動、背景の変化、対象物自体の状態変化の条件を実験的につくり対象物の検出を行った結果を写真で示す。いずれの場合も検出に使用した対象物のモデルは同一で、1つである。さらに、実験システムでは特徴マッチングの許容範囲を設定可能にしたので、計測条件の変化が予測される場合にこれにあわせた許容範囲を設定することができ、計測条件の変化に対してロバストなシステムを構築することができた。例えば、図 2-23 の実験ではマッチングの許容値を低く設定したために部分的な特徴の一致で認識をしたものである。実験では 100%の認識率で鋳造部品の検出ができた。この時の位置精度は 1mm 以下でありロボットによるハンドリング作業に十分に適用可能である。逆に許容範囲を狭くすれば厳しい条件での位置決めにも対応する。

また、筆者はこれまでに電気学会の全国大会、産業応用部門全国大会および研究会などにおいて、ロボットと結合した鋳造部品のハンドリングシステムなど、モデルベーストマッチング法を使用した部品検出と位置同定の適用事例を報告してきた。この節ではこれらの中で特に、従来法の画像処理では実現できずモデルベーストマッチング法で初めて実現した事例として、薄板部品の重なり状態検出と顕微鏡写真中の特定の微生物検出の事例を紹介する。

2.5.1 照明条件の変動

従来法では入力画像をそのまま使用するので画像の明るさが一定になるよう遮光措置や照明の管理が必要で図 2-21 のように照明条件が変わると対象物の検出ができなかった。提案する方法はエッジベースの処理なので、照明条件の変化や周囲の光の変化の影響を受けにくい。図 2-21 は光量過大で部品表面が反射光によるハレーションを起こしている場合と、スポット照明により照明が一様でない場合の部品検出結果を示したものである。いずれの場合もエッジ検出と特徴抽出により対象物の検出ができた。

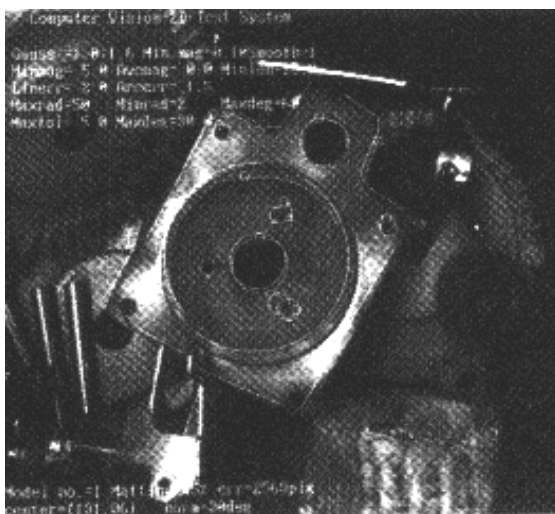


(a) 光量過大でハレーション (b) スポット光による光むら

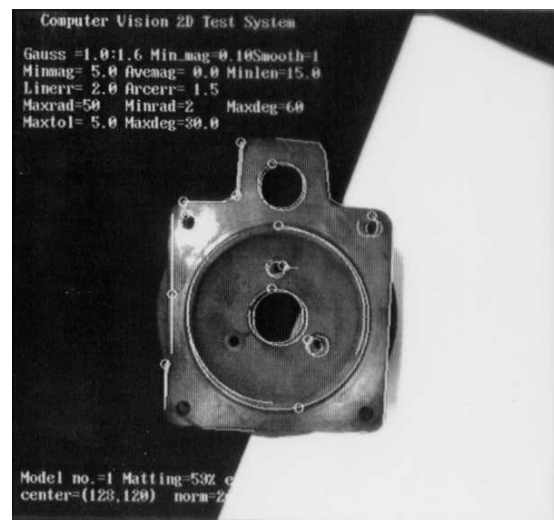
図2-21 照明条件の変動時の部品検出結果

2.5.2 背景の変化

従来法では対象物を検出するのに検出対象物の背景を単色にして孤立させるなどの物理的な設定が必要だったため図 2-22 のように背景が一様でない場合は検出ができなかった。提案する方法は特徴ベースなので背景の変化や対象物自体の汚れや変色の影響を受けにくい。図 2-22 は部品ケース内で複数の部品の中から特定の部品を認識した結果および色の異なる背景にまたがる部品を認識した結果である。



(a) 他の部品と混在する状態

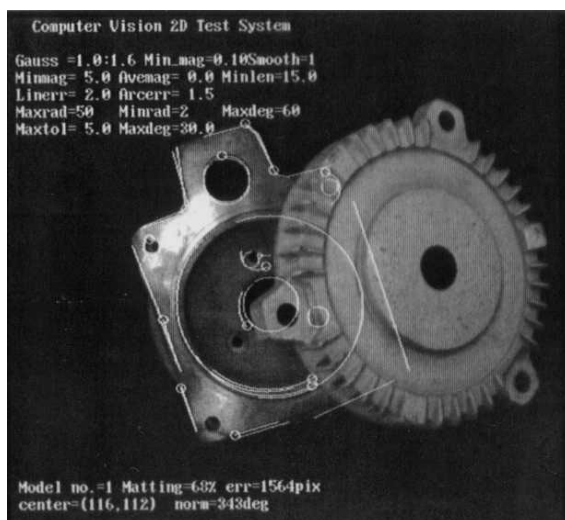


(b) 白黒に塗り分けた背景

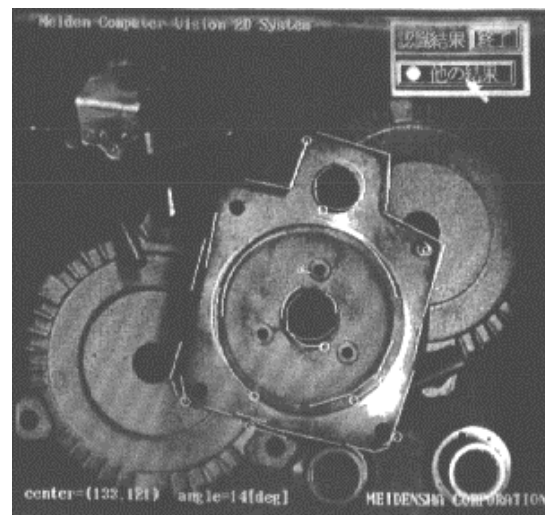
図2-22 部品の背景の変化時の部品検出結果

2.5.3 対象物自体の状態変化

提案する方法では局所的特徴マッチングで物体認識を行うので、エッジ抽出や特徴抽出の過程で一部の特徴が抽出されない場合にも部分的な特徴を使用して対象物の検出と位置決めをすることが可能である。このことは対象物の一部の隠れや変形、表面状態の変化がある場合にも部品を認識可能なことを意味する。図 2-23 (a)は極端な例だが他の部品で一部が隠れた部品を認識した結果で、図 2-23 (b)は特徴抽出の過程でモデルで使用した線分が抽出されなかった場合の認識結果である。いずれの場合も部品の一部の特徴がないが残る特徴の一致により対象物を仮定している。



(a) 他の部品で一部が隠れた状態



(b) 他の部品との混在

図2-23 部品自体の状態変化時の部品検出結果

2.5.4 薄板部品の位置同定と重なり状態検出

プレス加工前の打ち抜き板材など薄板部品の重なり状態を認識して最上部の部品を検出した例を報告した[19]。部品は図 2-24 に示すように素材供給パレット内に平積み状態でカメラ下部に供給される。上部に設置したカメラの画像を使用し、まず 2.4 節で提案した手法で他の部品が重なって一部しか視認できないものを含む複数の部品を検出し、検出結果で 2 枚以上の部品が重なった箇所を外接四角形で抽出し、この箇所が検出結果のいずれの部品に属するかを評価し、重なり部分が属する部品が属さない部品の上にあると判断することで部品の重なり状態を調べ、最終的には最上部の部品を検出するものである。

図2-25(a)は7枚のフロッピーディスク（FD）を重ねて実験した画像で、従来法ではこれらを分離できないなどの理由で検出ができなかった。これに対して提案した手法では局所的特徴マッチングにより見えている箇所を検出して複数のFDの候補を抽出し重なる部分を見つけることができる。図2-25(b)が検出結果で、検出した7枚のFDの線分モデルとその上下関係が画面左上に結果として表示されている。

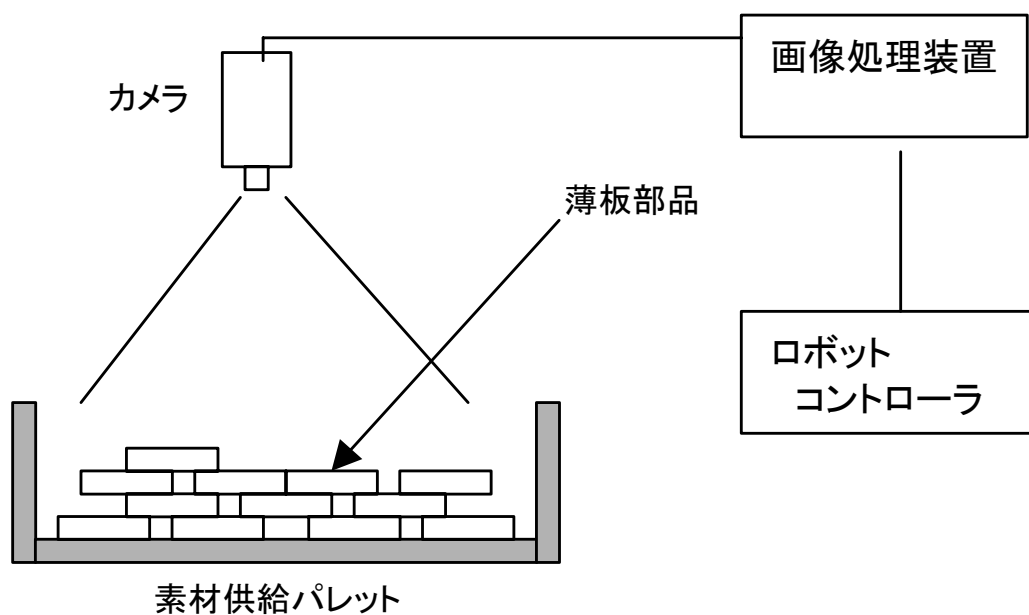
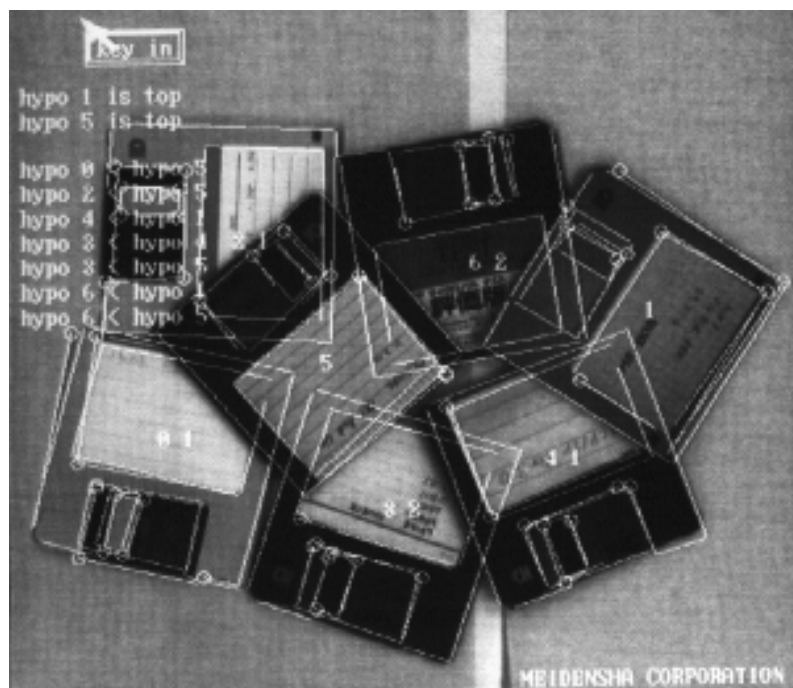


図2-24 薄板部品の重なり状態判定の模式図



(a) 7枚のフロッピーディスクのカメラ画像



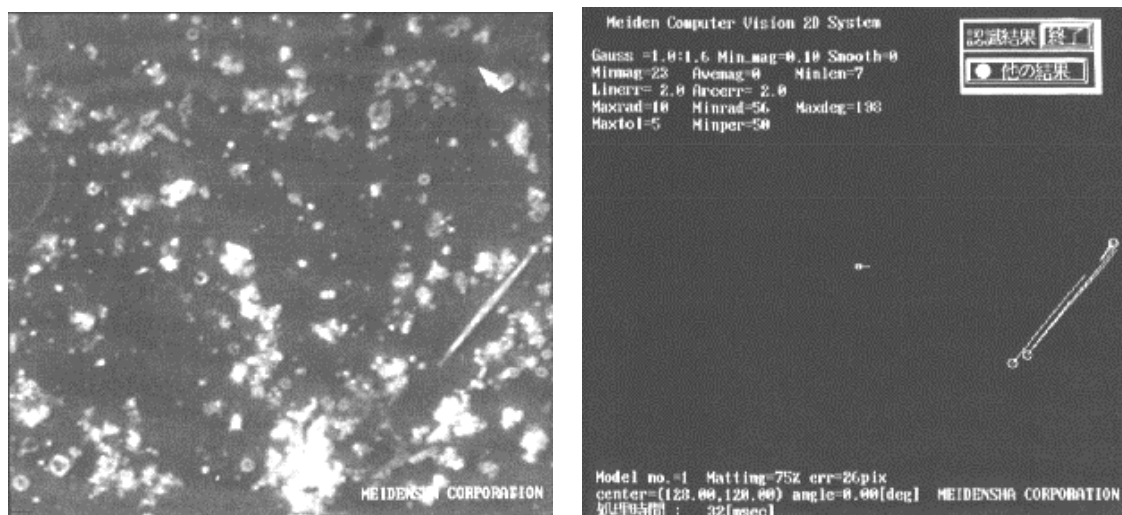
(b) 重なり状態の検出結果

図2-25 フロッピーディスクの重なり状態検出結果

2.5.5 微生物の認識と計数

顕微鏡カメラに映る特定の微生物の同定に提案した手法を適用した例を報告した[20]。顕微鏡カメラの画像は光量を一定に保つことが難しく、また微生物が重なり合っていて存在するときにこれらを従来法では分離できないため、これまで画像処理の適用は球形の細菌などに限定されていた。これに対して提案した手法では、微生物の周囲のゴミの存在や画像の明るさ変化の影響を受けずに、特定の形状の微生物（針状微生物＝シネドラアクス）を検出することができた。シネドラアクスは主に浄水場において原水中に存在し、時により増殖してろ過障害の原因となる微生物であり現在は人が顕微鏡観察により計数する以外に観察の手段がないため計数の自動化が期待されている。

図 2-26(a)は右下部に針状のシネドラアクスが存在する水源水の顕微鏡画像で、図 2-26(b)は検出結果である。顕微鏡画像中にはゴミや他の微生物などが混在しており照明も一様でないなど計測条件は厳しいが、正しく微生物を検出した。



(a) 原水中のシネドラアクス (b) シネドラアクス検出結果

図2-26 顕微鏡写真中の微生物検出結果

2.6 結 論

本章では、工場内で鑄造部品のハンドリング作業に使用するために、上部に設置したカメラの画像中に対象物を検出してその2次元的な位置と姿勢を計算する新しい方法を提案した。

これは、画像処理の手法としてモデルベーストマッチング法を基本とした方法で、具体的には、筆者が独自に改良したエッジベースの特徴抽出と特徴マッチングによる部品検出と位置姿勢の計算を行うものである。その実現のために、つまり特徴マッチングで使用する幾何学的な特徴を再現性良くカメラ画像から抽出するために、独自の工夫によるLOGフィルタによる二階微分処理とゼロ交差点検出処理を含む再現性良く精細な独自のエッジ検出手法を確立し、ここで得られるエッジ画像から線分と円弧と閉曲線を効率よく抽出する独自の安定で高速な特徴抽出の方式を確立した。

さらにハードウェアの負荷分散と特徴抽出処理時間短縮を含むアルゴリズムの最適化を行い、計測条件変化の影響を受けにくいなどの実用的な利点を持つ部品位置同定を実現した。また、提案した方式の有用性を示すために、照明条件の変動、背景の変化、対象物自体の状態変化を含む条件下で部品検出の実験を行った結果を示した。さらに、提案したモデルベーストマッチング法をもとにして展開した応用例として、プレス加工前の薄板状の部品を検出して複数の部品の重なり状態を評価するシステムと、顕微鏡画像中に特定の形状の微生物を検出して計数する装置を紹介した。

今後も、計測精度、処理速度、検出安定性をさらに向上させて多くの工場現場で汎用的に使用できる技術として確立させたい。

第3章 両眼ステレオ法による3次元計測

3.1 緒 論

工場内では、産業用ロボットにより部品をハンドリングし、加工機械などにローディングする作業が多く存在する。特にモータのケーシングや周辺の部品に代表される鋳造部品の加工工程においては、高温や粉塵など劣悪な環境下における重量物の取り扱いから作業員を解放する目的で多く使用されている。このとき、対象部品が山積み状態や部品箱にバラバラに投入された状態のときは、部品の位置同定のために3次元計測が必要である。

第2章で、工業部品の位置同定に有効な特徴ベースのモデルベーストマッチング法を提案したが、これは再現性の良いエッジ検出と特徴抽出を利用し、部品の特徴モデルとのマッチングにより、1つのカメラ画像中に部品の位置同定を行うもので、作業台上やベルトコンベア上に置かれた部品を対象とした2次元の視覚センサである。1つのカメラ画像中に対象部品を検出することができるのであれば、その部品の3次元計測をするには部品検出に使用した画像をそのまま利用する方法が効率的である。カメラ画像中の対象物の3次元計測を行う方法については、ステレオ計測以外にも対象物にスリット光を照射して反射光を利用するストラクチャードライト法や、特定のパターン光を対象物に照射して計測を行う空間コード化法など多くの手法が提案されている。筆者の3次元計測の目的は、モデルベーストマッチングで部品検出に使用した部品表面の幾何学的な特徴の3次元計測であるので、最も単純な2台のカメラを使用するステレオ計測を行うことにした。この方法は、レーザやスリット光などを使用する方法に比べて遮蔽措置が不要などの理由で工場への適用が容易であり、比較的安価に実現可能で、3台以上のカメラを使用する他のステレオ計測方式と比較してシステム構成が簡単でカメラパラメータの調整も手間がかからない利点がある。

本章では、画像処理を使用した部品3次元位置同定で使用することを前提とした筆者のステレオ計測の具体的な手順を説明し、ビンピッキング作業に適用する時の問題とな

るカメラ画像中に類似のテクスチャが多く存在する場合のステレオ計測ミスの排除に有効な２段階のステレオ対応点探索の方法を提案し、実験結果でその有効性を示す。

3.2 三角測量法による３次元計測の原理

図3-1は、ステレオ計測の模式図で、３次元空間内の計測点 (x_i, y_i, z_i) が右カメラの (x_r, y_r) と左カメラの (x_l, y_l) にそれぞれ投影された時に、点の座標 x_i, y_i, z_i は三角測量法の原理により(3.1)式で計算される[21]。

$$x_i = \frac{x_l \times d}{x_l - x_r}, y_i = \frac{y_l \times d}{x_l - x_r}, z_i = \frac{f \times d}{x_l - x_r}, \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、 d は左右カメラ間隔、 f はレンズ焦点距離である。

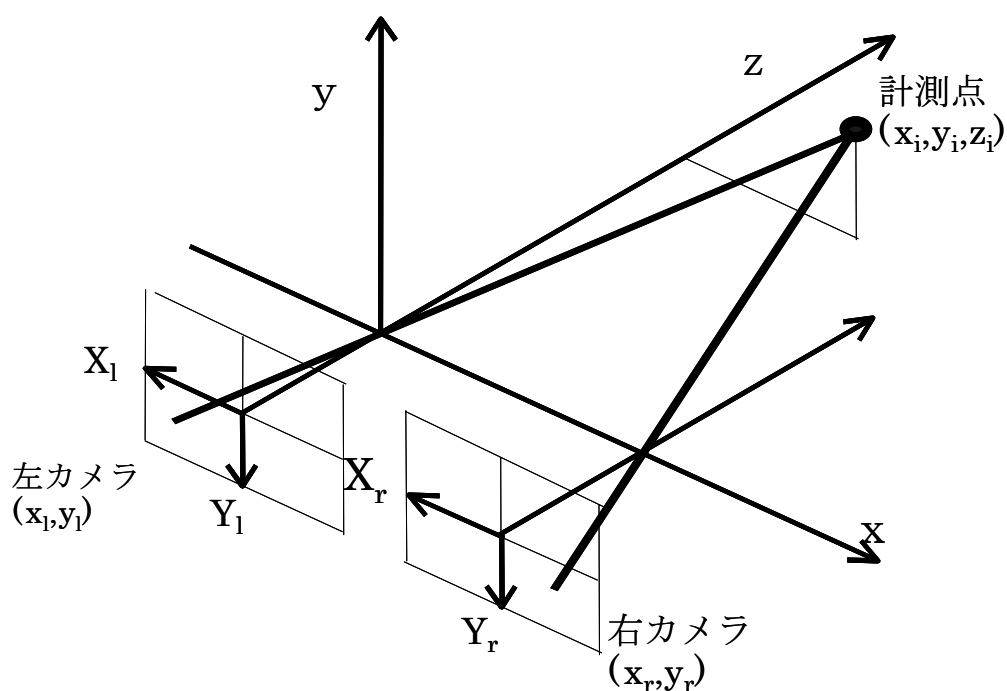


図3-1 両眼ステレオ法による３次元計測の模式図

左右カメラの画像中に同一の計測点を探すプロセスは対応点探索と呼ばれ、古くから研究の対象となっており多くの方法が提案されている[26]。河井らは左右画像のエッジ情報をもとに対応関係を探索するセグメントベースステレオを提案した[22]。Hannahらは左右画像で計測点を含むウインドウを設定して相関計算により類似な領域を探索する領域相関法に関する報告をした[23]。セグメントベースやエッジベースの対応点探索方法はエッジ検出などの画像前処理が必要なものに対して、領域相関法ではカメラ画像をそのまま使用するので画像前処理が不要で適用が容易である。対応点探索だけの計算コストを考えるとセグメントベースの探索が速いが、領域相関法では相関計算のハードウェアを利用することが可能で、これにより高速な計算が可能である。これらを考慮して筆者は、対応点探索の方法として領域相関法を用いることにした。図3-2は、領域相関法によるステレオ対応点探索の模式図で、左画像中に設定した計測点を含むウインドウとテクスチャの似ているウインドウを右画像中から探索する。このとき、左右カメラの位置関係が既知であれば、対応点探索の計算時間を節約するために参照画像全体の中から一定の探索範囲を設定することができる。

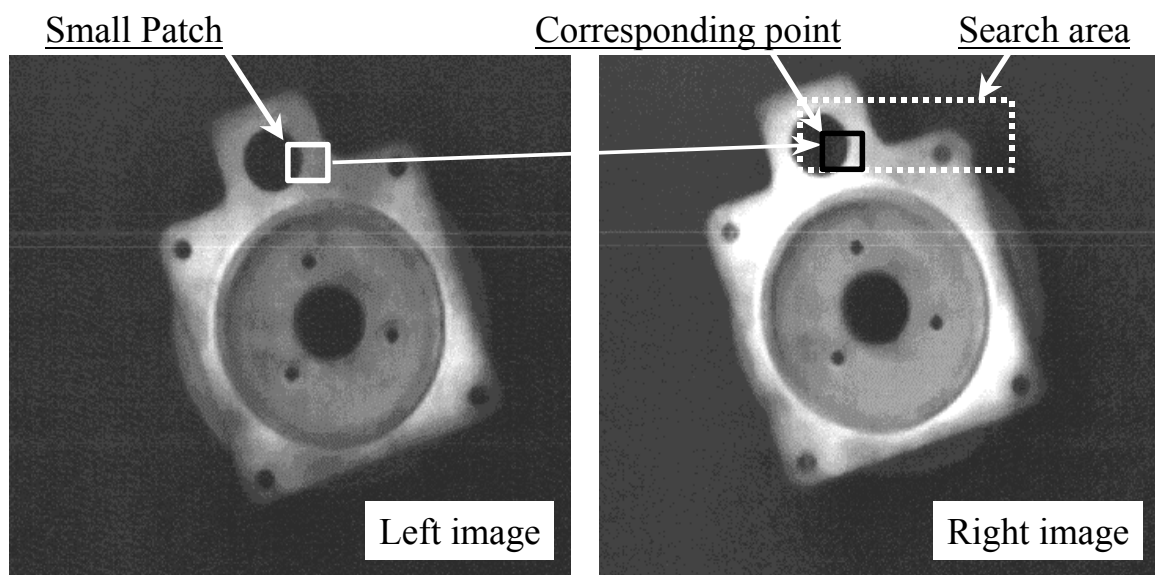


図3-2 領域相関法によるステレオ対応点検出の模式図

3.3 領域相関法をベースにした高精度ステレオ対応点探索

3.3.1 領域相関法を導入する時の課題

領域相関法を導入する場合には適用上の課題が存在する。つまり、①ウインドウに適当なテクスチャがないと対応点を決められない、②左右カメラの光学系の違いが相関計算に影響する、③画像中に類似のテクスチャが多い時に対応間違えが多く発生する、などである。従って、左右カメラ画像中の対応点探索に領域相関法を使用する時には、以下の点で注意が必要である。

1) カメラ画像中のどの点を計測するのか（計測点の設定）

左カメラの全画素を計測点としてステレオ計測を行うといわゆる距離画像を得ることができるが、計算時間が膨大になるので計測が必要な点のみを設定してステレオ計測を行うのが現実的である。そのときに、カメラ画像中のどの点を計測点として設定するのが問題である。相関計算により対応点を決定する場合は対応点の周辺で相関計算値の変化が大きくなる必要があり、そのためには計測点のウインドウ内に適当なテクスチャが存在することが望ましい。

2) 相関計算にはどの計算式を使用するのか（相関計算式の選択）

ステレオ計測の対応点探索に使用する相関計算式についてはこれまでに多くの計算式が提案されており、選択の幅が広い。計算コストが小さいのは計算式が最も単純な差分絶対値総和と差分二乗和であり、連続する画像における対応点の追跡などに利用されているが、ステレオ計測で使用する左右画像の光量の違いがあると対応点を求めにくい。ステレオ計測では一般に正規化相関式が使用されるが、カメラ画像の光量の平均値で正規化する計算式や輝度の変化幅で正規化する計算式などが提案されている。計算コストは大きいですが、左右カメラの性質の違いを吸収することが期待できる。

3) 対応間違えの点をどう対処するのか（計測ミスの排除）

領域相関法によるステレオ対応点探索は、左右カメラ間でテクスチャが同一のウインドウを検索する処理であるので、類似のウインドウが存在する時には正しくない対応点を選択することが原理的に避けられない。この理由で発生する対応間違えの点は正しい対応点から大きく離れた点となるので、部品検出や位置計算の過程でこの点の計測値を使用すると大きな誤差の要因となる。相関計算の結果だけではそれが正しい対応点なのか否かを判断することはできないので、何らかの対策が必要である。

そこで筆者は、課題に対処するために、①モデルマッチングに使用する特徴点上に計測点を設定することでウインドウ内に一定のテクスチャを確保し、②相関計算に正規化相関式を導入して左右カメラ画像の違いを吸収し、③ステレオ計測の結果が近傍のステレオ計測点から大きく離れた点を部品の3次元位置計算から除外することで対応間違えを排除し、精度の良く信頼性の高いステレオ計測を実現した。

以下の節でこれらの手順を説明する。

3.3.2 対応点の決定を確実に行う特徴上への計測点設定

一般的な3次元計測では画像の全画素の3次元計測を行って距離画像を取得し、これをもとに部品検出などを行うので、計算量が膨大で、前述したテクスチャのないウインドウの対応点探索の問題が存在する。これに対して筆者のターゲットは、部品表面の特徴点の3次元計測であるので、計測点を特徴抽出処理の結果得られる特徴の位置に限定して設定することができる。これにより、距離画像を計算する場合に比べて計測点の数が極端に少なく、良いため高速な3次元計測が可能で、計測点を含むウインドウには必ずエッジが存在し、画像中ではこれが一定のテクスチャとなるので、相関値の計算によって相関値の最大点、つまり対応点を決定することが可能である。また、特徴抽出処理は前段のモデルマッチングのプロセスで実行済みであるため、ステレオ計測の計測点を

設定するために特殊なオペレータを操作するなどの画像前処理を行う必要がない。

図 3-3 は、図 3-2 でも示したモータ軸受部品のステレオ計測点を示す図である。図中の赤線は、部品検出のために特徴抽出を行いマッチングにより検出した部品の特徴（線分と円弧）を示しており、緑の丸は赤線の特徴上に設定したステレオ計測点である。

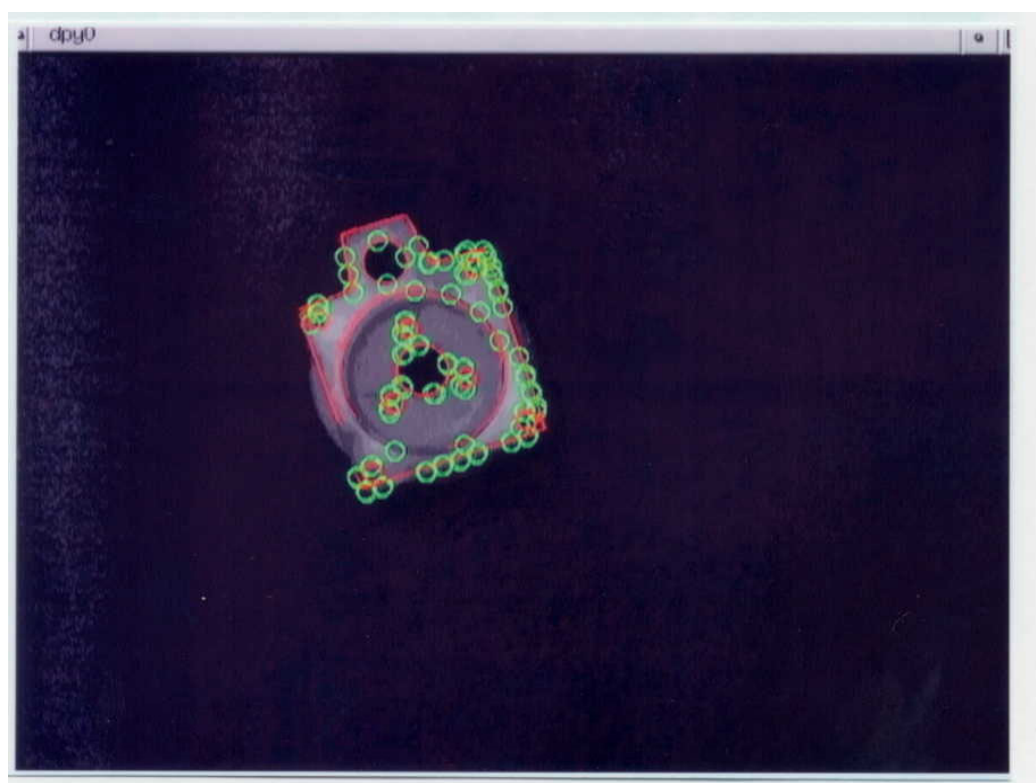


図3-3 特徴上（赤線上）に設定したステレオ計測点（緑丸）

3.3.3 計測条件変動の影響を受けない正規化相関式の導入

計測点に対応する左右カメラの対応点探索の相関計算式について述べる。(3.2)式は、左右画像の差分絶対値の総和を求める式である。

$$Corr(x_r, y_r) = \sum |L(x, y) - R(x_r, y_r)| \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで $L(x, y)$ および $R(x_r, y_r)$ は、それぞれ左カメラ画像と右カメラ画像の点の輝度で、 $Corr(x_r, y_r)$ が最小となる点が計測点の対応点であり、ウインドウの画像が同一の場合はゼロになる。(3.2)式は本項で説明する相関計算式の中で最も計算コストが小さい。

(3.3)式は、左右画像の差分の二乗和を求める式である。

$$Corr(x_r, y_r) = \sum (L(x, y) - R(x_r, y_r))^2 \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

これも対応点において計算値が最も小さくなる式で、ウインドウの画像が同一の場合はゼロになる。(3.3)式は(3.2)式に次いで計算コストが小さい。

(3.4)式は、左右画像の相互相関を求める式である。

$$Corr(x_r, y_r) = \sum L(x, y) \times R(x_r, y_r) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

これは対応点において計算値が最も大きくなる式で、ウインドウの画像が同一の場合は1になる。(3.3)式や(3.2)式に比べて乗算を使用するのでやや計算コストが大きい。また、(3.2)式、(3.3)式、(3.4)式はいずれも左右画像の光量が同じ場合には有効だが、左右画像の光量の違いがあるとその分のオフセットを積算することになるので、対応点を求めにくい。

(3.5)式は、左右画像の相互相関を求める式であるが、左右画像の輝度の平均値により正規化を行う正規化相関式である。

$$Corr(x_r, y_r) = \sum (L(x, y) - \bar{L}) \times (R(x_r, y_r) - \bar{R}) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

これも対応点において計算値が最も大きくなる式で、ウインドウの画像が同一の場合は1になる。(3.4)式に比べて左右画像の輝度の平均値を計算するので計算コストが大

きい。輝度の平均値で正規化されるため左右カメラ画像の明るさの違いを吸収する効果がある。

(3.6)式は、左右画像の相互相関を求める式であるが、左右画像の輝度の最大値と最小値の差により正規化を行う正規化相関式である。

$$Corr(x_r, y_r) = \frac{\sum L(x, y) \times R(x_r, y_r)}{\sqrt{\sum L(x, y)^2 \times \sum R(x_r, y_r)^2}} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

これも対応点において計算値が最も大きくなる式で、ウインドウの画像が同一の場合は1になる。(3.4)式に比べて左右画像の輝度の二乗平均を計算するので計算コストが大きい。輝度の変化幅で正規化されるため左右カメラのゲインの違いを吸収する効果がある。

(3.7)式は、(3.6)式と(3.5)式を結合した正規化相関式である。

$$Corr(x_r, y_r) = \frac{\sum (L(x, y) - \bar{L}) \times (R(x_r, y_r) - \bar{R})}{\sqrt{\sum (L(x, y) - \bar{L})^2 \times \sum (R(x_r, y_r) - \bar{R})^2}} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

これもやはり対応点において計算値が最も大きくなる式で、ウインドウの画像が同一の場合は1になる。本項で説明した相関計算式の中で最も計算コストが大きい。輝度の平均値と輝度の変化幅の両方で正規化されるため左右カメラ画像の明るさとゲインの両方の違いを吸収する効果がある。(3.7)式は一般に相関係数とも呼ばれる。

これらの相関計算式の中で、筆者は(3.6)式の正規化相関式を使用することにした。まずは安定した対応点探索を実現することが目標であるので、(3.7)式の正規化相関式を使用するべきではあるが、これをそのままプログラムで計算すると計算コストが大きいのので、左右カメラの明るさはレンズの絞り機構で機械的に調整することとし、プログラムではカメラのゲインのみを(3.6)式で吸収することで対応した。(3.6)式を使用することにより、探索領域内の輝度の変化幅が正規化されるので、左右カメラの性質の違いによる画像の違いが吸収され、安定した対応点探索が期待できる。

3.3.4 原理的に発生する対応間違い点を排除する再帰的平面近似

領域相関法によるステレオ対応点探索においては、探索範囲内に計測点のウィンドウと類似したテクスチャがあるときに、正しい対応点でない部分で相関値が最も高くなり対応間違いになることがある。この場合は、間違えた対応点をもとに計算される奥行きは真値から大きくずれた値になり、部品の計測結果が大きくずれることになる。筆者の3次元計測のターゲットは部品表面に見える特徴上の点を計測することだが、部品表面の特徴は線分や閉曲線であり、一つの特徴は同一平面上に存在し位置が大きく変化することはない。そこで我々は、一つの特徴上設定した複数の点に対してステレオ計測を行い、その後に計測点を平面に回帰し、回帰平面から大きく離れた計測点を誤対応と判断して排除し、残りの計測点を再度平面に回帰する処理を、全ての計測点が平面上にのるまで行う再帰的平面回帰法を導入した。図3-4は、これをグラフで示したもので、この場合、太線で示した回帰平面から大きく離れた3点を排除する。

これにより、ステレオ対応点探索の過程で対応間違いが発生してもこの点を排除し、正しい計測点だけを使用して特徴の3次元位置を計算することが可能になった。

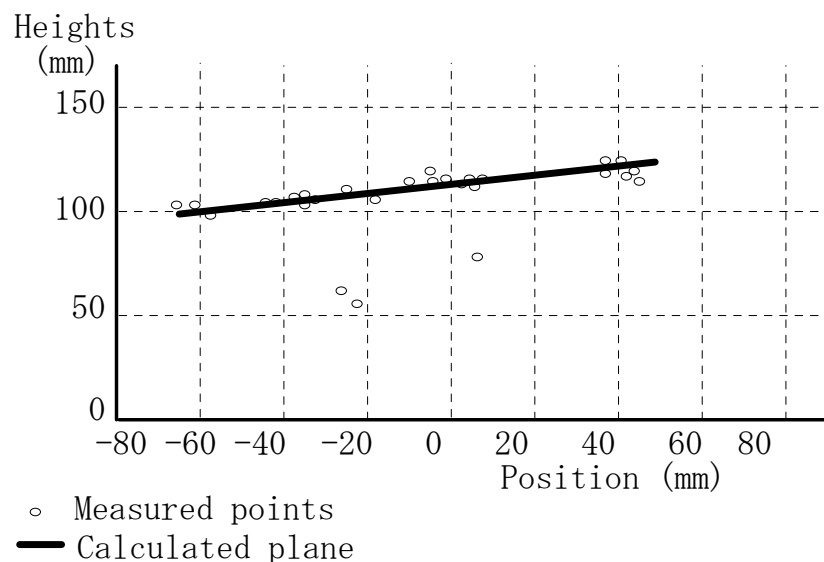


図3-4 ステレオ計測間違い点の排除

3.3.5 誤対応を回避する独自の２段階ステレオマッチング

ところで、領域相関法によるステレオ対応点探索を行うときに、特に画像中に類似のテクスチャが多い場合しばしば対応間違えが発生する。図3-5は、2300mmの上方から600mmの間隔で設置した左右２台のカメラで撮影した箱の画像の例で、それぞれ箱の全景を捕らえているが画像は異なる。箱の中にはプーリと呼ばれる円盤形状の鋳造部品が山積み状態で投入されている。この箱から産業用ロボットが部品を取り出すピンピッキング作業の場合は、同一形状の部品が箱の中に多く存在する図3-5のような画像を使用するので、この傾向が顕著である。図3-6は、図3-5におけるある計測点に対応する相関値の変化をX方向のエピポーラ線を含む３画素の幅で計算した結果の例である。グラフには３つの極大点が存在し、従来の相関計算処理ではこれらの中から最大値をとる１点を機械的に対応点として決定するので、３分の２の確率で対応間違え、つまり計測ミスが発生することが予想される。そこで、領域相関で使用するウインドウの大きさに注目し、ウインドウの大きさの違いによる相関値の変化を調べたところ、その結果が図3-7のようになった。大きさAのウインドウを使用した場合は、８点の極大点があられ、しかも正しい対応点が右端の極大点であるにもかかわらず間違った点で最大値になった。これに対して大きさ4Aおよび9Aのウインドウを使用した場合は、相関値の変化は大きくないが極大点は一つで、正しい対応点で相関値が最大になっている。ただし、ウインドウの大きさが大きいほど相関値の変化がなだらかで、相関計算にかかる時間的なコストは増大する。

これらを考慮して、領域相関法において階層的に異なる大小２つの大きさのウインドウを使用して相関計算を行い、左右カメラ間の正しい対応点を決定する方法を提案する。まず第１段階として、小さいウインドウを使用して相関計算を行い、極大値をとる複数の点を対応点の候補点としてリストアップする。次に第２段階として、大きなウインドウを使用してそれぞれの候補点における相関値を計算し、それが最大値となる点を正しい対応点として選択する。この手順を、「２段階ステレオ対応点探索」と呼ぶことにする。図3-8は筆者が提案する２段階ステレオ対応点探索の模式図である。図3-9は、フレンジと呼ばれるモータの部品を対象物として提案する対応点探索を行った結果である。

小さいウインドウで検出した5つの候補の中から、大きなウインドウを使用して正しい1点を対応点として選択している。

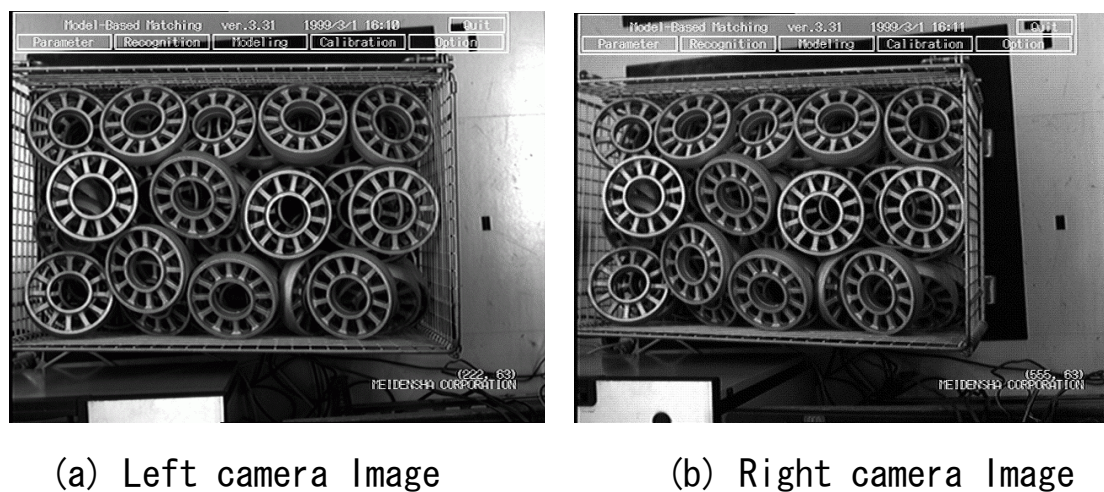


図3-5 部品箱の左右カメラ画像

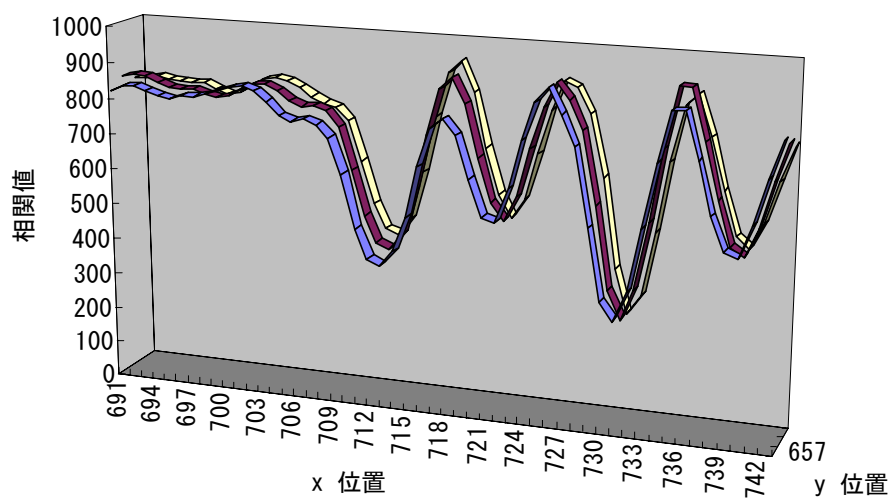


図3-6 参照画像の相関値の変化

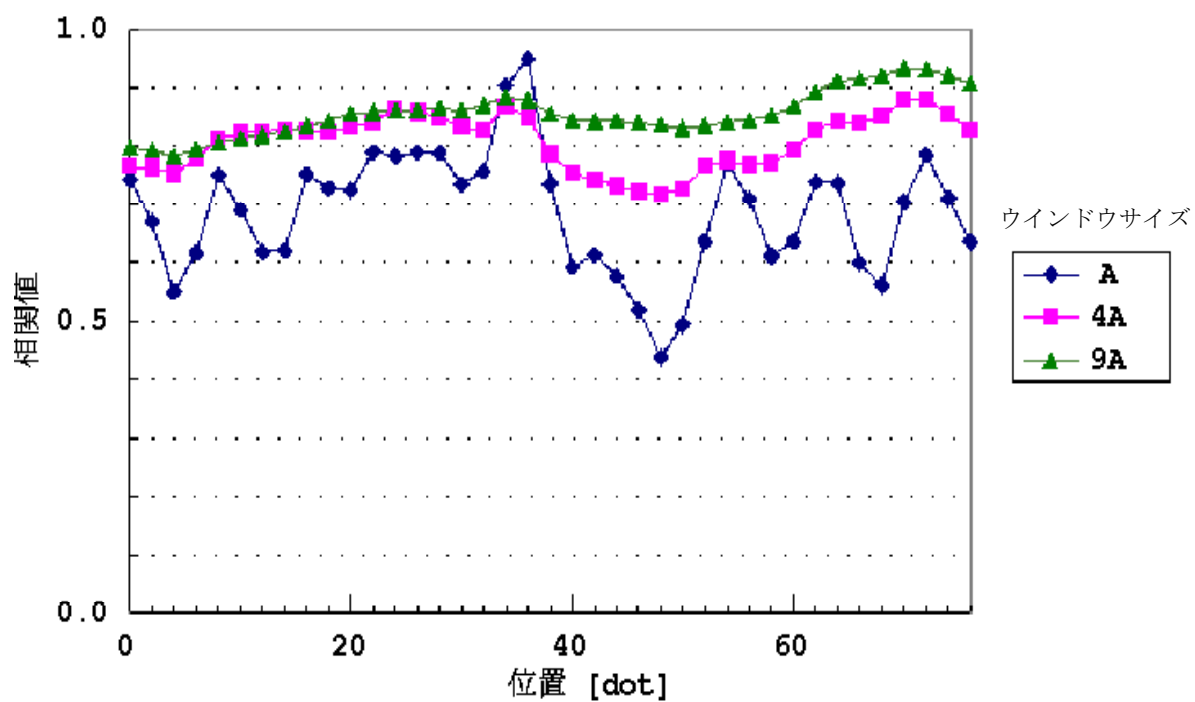


図3-7 ウィンドウの大きさによる相関値変化の違い

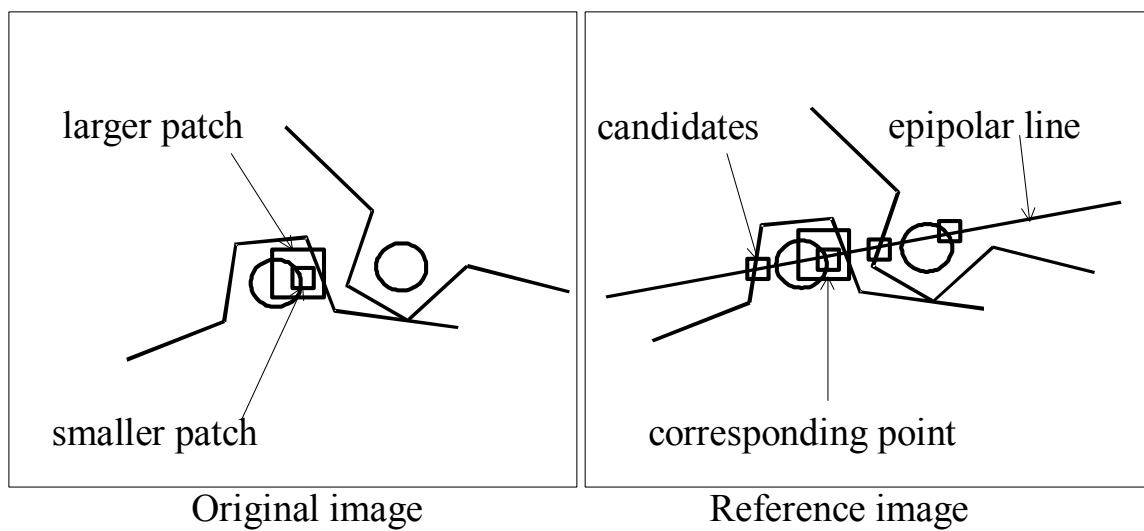


図3-8 2段階ステレオ対応点探索の模式図

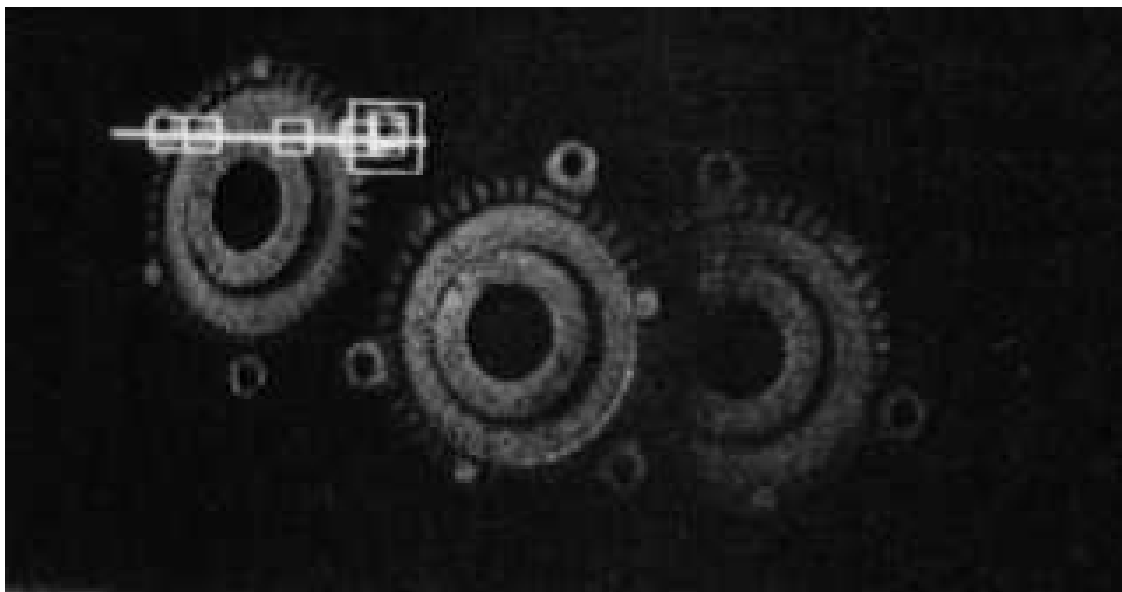


図3-9 複数の対応点候補と真の対応点の決定

領域相関法を使用したステレオ対応点探索において、計測点のウインドウの大きさを变化させる方法はKanadeらが提案した Adaptive Window[25] や、Hannahらが提案した Hierarchical Stereo Matching[23] などがある。Adaptive Window方式では、計測点の周辺の画像によって対応点探索に使用するウインドウのサイズと位置をアダプティブに変化させるもので、距離画像により対象物の形状を復元する時に有効であるが、図3-5のようにカメラ画像中に同一の部品が多数見えていて、類似のテクスチャが多く存在する場合の対応間違えに対する効果については検討されていない。Hierarchical Stereo Matchingは、左右カメラについて階層的に圧縮画像を準備してそれぞれの階層の画像で計測点に対応する点を順次絞り込んで行く方法である。図3-10は、筆者がHierarchical Stereo Matchingの実験した例を示したものである。左右画像とこれを階層的に圧縮した画像を準備しておき、左カメラの圧縮画像中に計測点を順次設定し、右カメラの圧縮画像中に対応点を探索するのだが、1階層前の画像で対応のとれた点の周辺のみを探索範囲とするので、対応点が大きく外れることが少なく、比較的短時間で対応点探索ができる利点がある。しかしながらこの方法は、もともと全画面または広い探索範囲の中から対応点探索を行う場合に使われる手法である。これに対して本研究では、ステレオ計

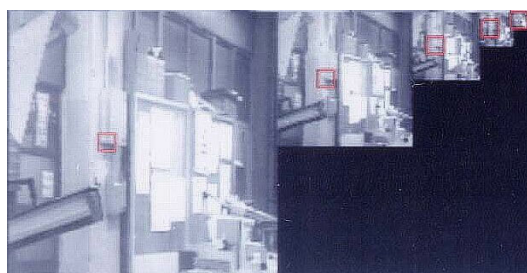
測を工場内で使用するために、カメラはあらかじめ正確に設置され、初期調整によってカメラパラメータを設定できるので、左右カメラの対応点の探索範囲をエピポーラライン上に限定することができるため、Hierarchical Stereo Matchingを適用するまでもなく、左右画像をそのまま使用して短時間で対応点探索が可能である。



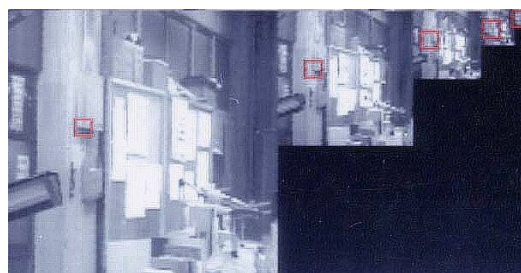
左カメラ画像



右カメラ画像



左カメラ画像の圧縮画像



右カメラ画像の圧縮画像

図3-10 Hierarchical Stereo Matching の例

3.4 ステレオ計測実験

ピンピッキングにおける 3 次元円検出のプロセスでは一つの閉曲線に対して十から数十点のステレオ計測を行い、これらの計測値を使用して近似計算などを行い、3 次元円の位置と姿勢を計算している。これまでは、ステレオ計測間違いに対する対策として近似計算の後に、近似平面から大きく離れた計測点を除いて残りの点群から再度近似計算を行う再帰的手法を用いていた。しかしながらこれにより近似計算に使用できる計測点の数が減少し、また残る計測点にも誤差が含まれることもあり、結果として 3 次元円の計算値にばらつきが出ていた。表3-1の上段は、従来方式のステレオ計測を使用したときの 3 次元円検出の位置検出誤差で、傾きで9.83度、xyzの位置で5.46mmから7.33mmのばらつきがあった。表3-1の下段は、今回提案した 2 段階ステレオ対応点探索によるステレオ計測を使用した 3 次元円検出の位置検出誤差である。結果は、傾きで2.04度、xyzの位置で0.98mmから2.47mmのばらつきであった。従来方式に比べて、位置姿勢の検出ばらつきが 5 分の 1 程度にまで改善され、提案した方式がステレオ計測間違いの減少と位置決め精度の向上に効果あることが確認できた。

表 3-1 Standard deviation of part location

	Standard deviation			
	rotation	x	y	z
	(deg)	(mm)		
Previous	9.83	7.33	5.46	5.98
Hierarchical	2.04	1.47	2.47	0.98

3.5 結 論

本章では、画像処理を用いて工業部品の3次元位置同定を行うときに使用することを目的とした3次元計測のアルゴリズムを提案した。提案した3次元計測の原理は2台のカメラを使用するステレオ計測で、領域相関法により計測点の左右カメラ画像中における対応点を探索し、左右カメラ画像中の位置をもとに三角測量法により計測点の位置を計算する。

まず、第2章で提案したモデルベーストマッチング法と組み合わせて使用することを前提に、対象物を構成する幾何学的な特徴の上に計測点を設定して対応点の探索を確実にできる工夫を行い、左右カメラの違いを含む計測条件の変動の影響を受けない正規化相関式を導入し、計測結果を平面回帰により評価をすることにより対応間違えの点を排除するなど、従来から提案されている要素技術をうまく組み合わせることで、工業部品の計測にマッチした効率良く高精度な3次元計測を可能にした。

さらに、ビンピッキングのステレオ計測ではカメラ画像中に類似のテクスチャが多く存在するためにステレオ対応間違えが多く発生する問題があったが、領域相関法により決定する対応点探索を大小2段階のウィンドウを使用したマッチングで行うことにより、安定して正しい対応点を決定することが可能となり、3次元位置計測精度を向上させることができた。

これらの工夫を施したステレオ計測を使用して、箱にランダムに入れられた部品の位置姿勢同定の実験を行い、計算結果のばらつきが改善され、提案したステレオ計測の方法の有用性を確認した。

第4章 画像処理による独自の部品3次元位置同定

4.1 緒 論

生産ラインの自動化を目的として視覚センサを使用したハンドリングシステムの導入が盛んになっている。最近では特にICの製造工程やプリント板への部品の実装などで多くの事例が報告されている。筆者は鋳造部品の加工工程の自動化に取り組んできたが、電子部品などの場合と異なり作業現場が視覚センサ向きに整備できないなどの理由で自動化が進んでない。加工工程の要求は、カゴ型パレットなどの中に山積み状態で供給される部品を拾い上げて整列、または加工機械へのセットを行うもので、大多数の現場で作業員が直接行っている。自動化の進んだ現場では専用のパレットを使用するか機械的な位置決め機構を使用して部品の位置を固定してロボットにハンドリングさせている。

このような現場では電子部品の製造ラインなどで使用している画像処理による位置計測が適用できない。その理由は、①バリなどの影響で対象物の形状や状態が必ずしも一定でないこと、②対象物が供給される位置や状態が同一でなく位置検出が必要なこと、③山積み状態の場合は高さ方向や傾きが想定されるので3次元的な位置計測が必要なこと、④対象物が単体では存在せず周囲の状態が同一でないこと、⑤遮光措置や照明条件の整備が難しいこと、など計測条件に関する課題が多いことに加えて、他品種少量生産が中心で対象物の変更が頻繁なために、⑥画像処理アルゴリズムの設定が難しい、⑦プログラム製作に時間がかかる、⑧システムの調整とメンテナンスに特殊な技能が必要、など実用的な課題も多い。

部品の3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3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[10]。しかしながら従来の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検出精度が得られない問題があった。ビ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。

工業部品の位置同定には第2章で示した特徴マッチングを利用したモデルベースマッチング法が有効である。モデルベースとマッチング法による部品位置同定の手順は、①画像入力を行い、②エッジ抽出と特徴抽出を行い特徴のリストを作製する。③抽出された特徴群の中から部品モデルの特徴と照合するものを検索して（特徴マッチング）、対象物を検出する。④このときの特徴群の入力画像中の座標を検出した対象物の位置として出力する。この方法はエッジベースの特徴抽出を行うので、①カメラの入力画像に映っている既知の対象物を検出する技術であること、②対象物の位置と姿勢を計測すること、③照明条件の変化の影響を受けずに検出可能なこと、④対象物の背景の状態変化の影響を受けないこと、⑤汚れや変色など対象物自体の状態変化に左右されない検出ができること、⑥新規対象物を検出する場合にもモデルを設定するだけで検出プログラムの製作が不要なこと、⑦そのモデル作製は容易なこと、など実用的な利点がある。ただし、この方法は1台のカメラを使用する二次元の部品位置同定であり、カメラの下に置かれた部品の水平面上での位置と回転方向を計測しているにすぎない。部品が床上やベルトコンベア上に水平に置かれる場合にはこの方法が有用であるが、鋳造部品を扱う多くのプロセスでは、部品は床やベルトコンベア上で相互に重なっていたり、他の部品に上になって傾いていたりにしている。図4-1は、机上で他の部品にのって傾いているモータの部品を横から見た例を示したものである。1台のカメラを使用したモデルマッチングでは、水平面上の位置は計測できるが、部品の高さや傾きの情報を得られない。

そこで3次元計測を使用するのであるが、部品の3次元計測は2台のカメラを使用する両眼ステレオ法が適用しやすい。両眼ステレオ法による3次元計測の手順は、①左カメラ画像中に計測点を設定し、②右カメラ画像中で計測点に対応する点を探索する。③決定された対応点の位置から計測点の3次元位置を計算する。この方法はカメラのみを使用し、レーザ等の外部装置を使用しないので、①周囲の環境に影響を及ぼすこ

とがなく、②画像処理とのマッチングが良く外部装置とのキャリブレーションが不要、③画像処理並の精度が得られる、④機器構成が単純で安価に構成可能など、実用的な利点がある。

本章では、部品の3次元位置同定の基本的な方法として、モデルベーストマッチング法と両眼ステレオ法を組み合わせる新しい方法を提案する。画像処理による独自の部品3次元位置同定方法について、対象部品の分析と部品位置同定の新しいアイデアについて述べた後に、3つに分類された部品に対応する3つの方法つまり、3次元円検出による部品位置同定方法、基準平面計算による部品位置同定方法、特徴組のマッチングによる部品位置同定方法を、節を分けて個別に提案し、それぞれ実験により有効性を示す。さらに、これらの方法の使い分けを含む現場への適用プロセスについて述べる。

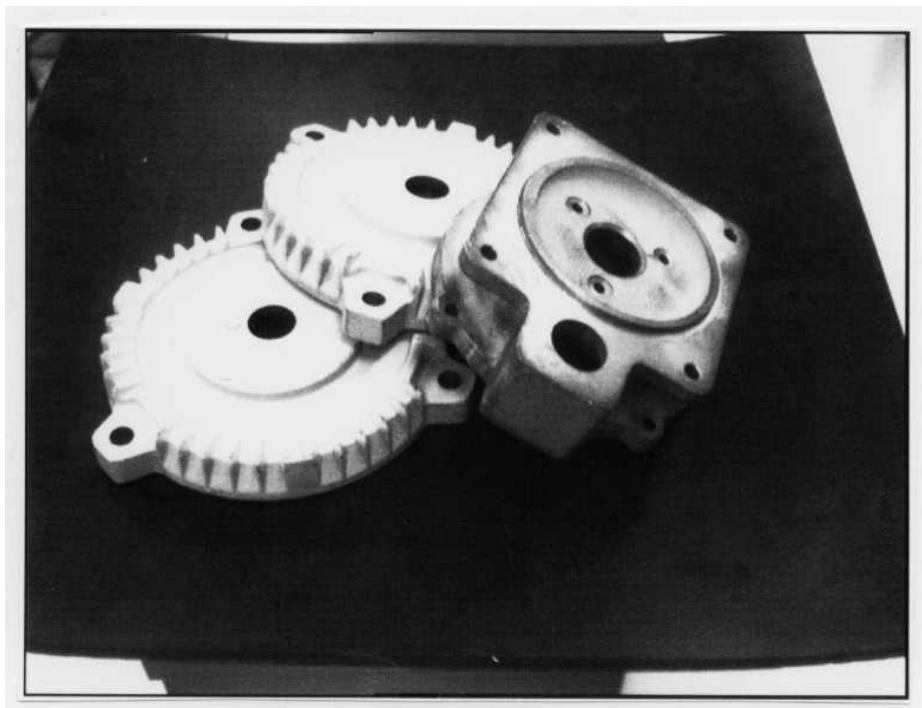


図4-1 他の部品の上に重なった鋳造部品

4.2 対象部品の分析と部品位置同定の新しいアイデア

筆者の関係する工場におけるビンピッキング作業の対象部品は、鑄造部品を中心とする機械部品であり、画像処理を使用した部品の検出と位置同定にいくつかの制約条件を設定できる。つまり、対象部品は既知で形状に特徴があり、その形状は大きくは変化しないこと、対象部品は部品箱に投入されるか床やベルトコンベアの水平面上に置かれ、その位置と姿勢はランダムだがおよそその場所は決まっていること。プロセスには通常1種類の部品だけが流れ、複数の部品が周辺に存在するが、部品の見え方はおよそ同一であること、などである。従って、これらの対象部品を画像中に検出する方法として、特徴ベースのモデルベーストマッチング法が適用可能である。そこで本節では、筆者の関係する工場で使用される部品について、モデルマッチングに使用する特徴についての分析を行い、その特徴を使用した部品位置同定のアイデアを述べる。

まず、ビンピッキング作業の現場からの要求が最も多い対象部品はモータとその駆動系、伝達系の部品が中心で、図4-2はその代表例の写真である。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が通る大きな穴があいている。そこで筆者はこれら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同定に使用することを考えた。つまり、部品を3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。

画像処理を使用して箱の中の部品を検出する方法に関してはいくつかのアイデアがある。第一は、部品箱の中の高さ計測を行い、距離画像を取得して部品を検出する方法である。ステレオ計測またはレーザレンジファインダなどを使用して部品箱の中の詳細な距離画像を取得してこの中の最も高い位置が計測された部分にハンドリングすべき部品があると仮定し、その周辺の一定形状の部分を抽出し、その部分の両端を把持位置として対象物のハンドリングを行うものである。この方法によれば、部品の位置と姿勢だけでなく距離画像の情報を元に部品を把持するときにハンドが他の部品と干渉しないかどうかにも同時に判断することができる利点がある。しかしながら現状では、部品箱中の全体の距離画像を取得するのには一定の時

間が必要で、距離画像を元に部品形状の部分を抽出するのにはさらに複雑な後処理が必要であるなど、実用的にはデメリットが多い。第二のアイデアとして、部品表面の鏡面反射を利用する方法がある。部品の一部に円筒形状の部分がある部品の場合には、カメラ用の照明として上方の天井光のみを使用するとこれが円筒面で反射してカメラ画像では部品の円筒部分の稜線だけが天井光を反射して円筒の軸方向の線分に見える。従って、画像処理によりこの部分を抽出すれば円筒部分の位置と軸の方向、マニプレータによる把持位置を比較的容易に求めることが可能である。しかしながら、この方法が適用できる部品は表面で鏡面反射が起こることが条件となるため材質が銅や塩ビなど一部のものに限定される。第三のアイデアは筆者の提案する方法で、部品の円形の開口部を検出するものである。円形の開口部はそのままマニプレータの把持部として使用可能で、この場合内側からクランプする方式のハンドを使用し、画像処理で検出した円形開口部にこれを挿入してハンドを開いて把持する。このような把持方法は、開口部が見えていれば部品を把持する時にハンドが他の部品と干渉することがなく、部品を加工機械にセットする動作も容易に実現できる利点がある。画像処理の観点から見ても、距離画像から円筒形状部分を抽出するより円や楕円に見える穴を検出の方が計算は容易である。部品の円形開口部は、部品の特徴を最もよく表現している部分であり、照明条件や背景状態や部品の表面状態などの計測条件が変わってもカメラ画像中に見えている場合が多い。従って、開口部は、対象物の状態や計測環境の条件が変化してもその影響を受けずにカメラ画像中に検出可能なことが期待できる。円形開口部は多くの場合、部品箱の最上部に上向きで存在し、部品箱の上方から下方を見下ろすように設置されるカメラの画像中に視認できる機会が多い。このように、カメラ画像中に部品の穴を検出する方法は複雑ではないので、ピンピッキング作業への導入が容易である。上述した理由から、筆者は第三の方法、つまり部品の円形開口部を検出する方法を使用した。



図4-2 鋳造部品の例（大きな円形の穴が存在）

また、部品の円形開口部は、これが3次元空間に存在するときにはカメラ画像中で楕円に見える。カメラ画像中で円形開口部に対応する楕円を検出すれば、楕円の中心位置で開口部の位置を、楕円の大きさで高さを、楕円の長軸と短軸の比で開口部の3次元的な傾きを計算することが理論的には可能である。しかしながら、カメラ画像の分解能を考えると長軸と短軸の比から計算される円の傾き計算結果の精度は期待出来ない。例えば後述するプーリのカメラ画像中に検出する3次元円の半径は20画素程度であるので、長軸と短軸の比から円の傾きを計算した場合の分解能は4-5度である。また、もし開口部を構成する平面を先に検出することができれば、カメラ画像中に楕円を検出する近似計算をするより、平面上にのる円を計算するほうが計算コストは小さい。楕円の方程式のパラメータは6個であるのに対して、円と平面のパラメータはそれぞれ個別に3個である。近似計算は、パラメータの数が計算の次数のべき乗できくため、パラメータの数が小さいほうが計算量は少ない。提案した3次元円検出による方法は、一旦3つのパラメータで平面を近似しておき次の3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楕円の近似計

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。これは特にビ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楕円近似の場合の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。同様な理由で、平面近似計算のほうが楕円近似計算よりも計測値の誤差の影響を受けにくいため、パイプ開口部の位置の正確さは、開口部がのる平面を直接計算するほうが楕円を計算して間接的に求めるより正確であることが期待できる。以上述べた理由により、筆者は円形開口部を検出するために開口部がのる平面上の円を計算して、3次元円としてこれを求めることにした。この方法を「3次元円検出による部品位置同定」と呼び、詳細な手順を第4.3節で述べる。

次に図4-3の部品について検討する。これらもやはり鋳造部品であり、部品表面には円形の穴が存在するが、その部品全体に対する大きさは、それ一つでは部品の位置同定に使用するには不十分である。つまり、カメラ画像中に穴の位置を決定することは可能だが、ステレオ計測により計算する穴部の傾きは、部品の精度を十分に確保できない。しかしながら、図4-3の部品群では各々その表面に基準平面が存在している。この基準平面は、次の加工工程における位置決めやバリ取り作業の位置の基準として使用される。図4-3の部品はいずれも小さな円形穴やキー溝が基準平面を構成している。そこで筆者はこの基準平面に着目し、まず基準平面を構成する特徴を使用したモデルマッチングでカメラ画像中に部品を検出し、これらの特徴の3次元位置を計測し、特徴が構成する基準平面の向きを計算して部品の傾きを同定することを考えた。モデルマッチングで使用する特徴は第2章で示した線分と円弧および閉曲線が使用できる。基準平面上のテクスチャは前段のモデルマッチングで使用される特徴として抽出されるので、基準平面を構成する特徴上の点を3次元計測の計測点として使用する。3次元計測の方法としては第3章で示した両眼ステレオ法を使用する。この方法を「基準平面計算による部品位置同定」と呼び、詳細な手順を第4.4節で述べる。



図4-3 鋳造部品の例（基準平面が存在）

次に、図4-4の部品は上述した2つの方法が適用できない「その他の形状」の部品である。つまり、部品位置と姿勢を決定する大きな円形の穴が存在せず、基準平面も存在しない一般的な部品である。しかしながら、これらの部品も部品表面には各部品に固有な特徴が存在しており、これらを使用して部品を特定することができるはずである。従って、これらの部品は第2章で提案したモデルベーストマッチングによる2次元の部品検出方法を3次元に拡張して部品3次元位置同定を行う方法を考える。ただし、第2章のモデルマッチングで部品モデルに使用した特徴のうち、

円弧については3次元のマッチングには使用せず、部品モデルは線分と閉曲線で構成するものとする。円弧や楕円に代表される曲線は3次元的には円すい曲線（コニック）であるため、ステレオ計測と組み合わせて位置を決定するための計算処理が複雑で、計算コストも膨大である。これに対して線分は3次元的にも線分であるため、近似計算も比較的単純である利点があり、閉曲線は部品表面の小さな穴を表現する特徴として点として表現すれば計算コストがかからない。そこで、これら一般的な形状の部品を構成する特徴として表面に視認できる3つの穴を閉曲線として抽出し、これに注目して対象部品の3次元位置と姿勢を直接計算することにする。この方法を「特徴組のマッチングによる部品位置同定」と呼び、詳細な手順を第4.5節で述べる。

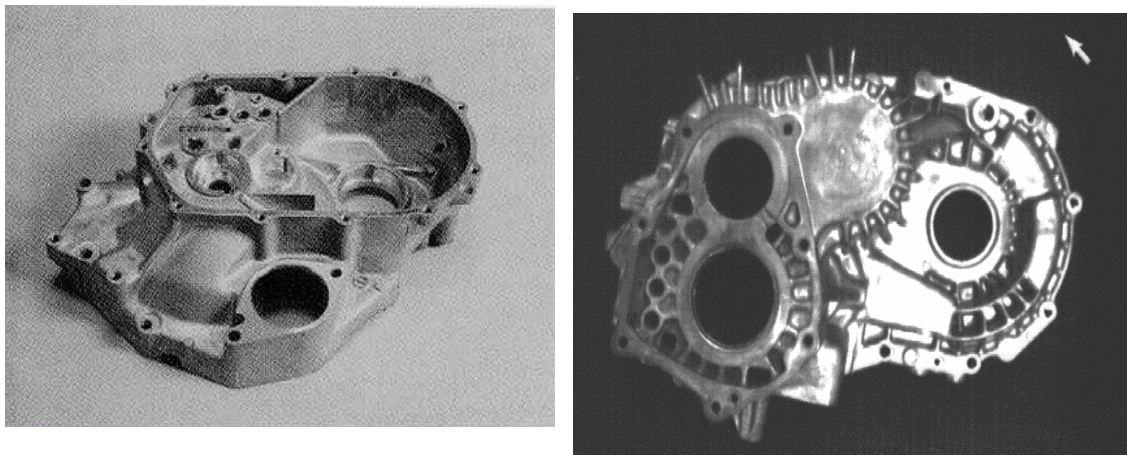


図4-4 鋳造部品の例（表面に穴や凹凸が存在）

4.3 3次元円検出による部品位置同定

4.3.1 3次元円検出と部品位置同定の手順

部品表面に円形の大きな穴があり、この穴を中心とした部品の回転方向を拘束しない場合は、この円形の穴をカメラ画像中に検出することにする。ただし、円形の穴は3次元的に存在するため、穴の3次元計測を行って傾きを計算するものとする。図4-5は、プーリと呼ばれる円盤状の鋳造部品の模式図で、中心部の穴を3次元円として設定する。

図4-6に3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3次元位置を計測し、閉曲線がのる3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3次元円を検出する。エッジ検出は2.2節で示したLOGフィルタ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とで行う。この方法はその後の特徴抽出処理がやり易い細く鋭いエッジが得られる利点がある。

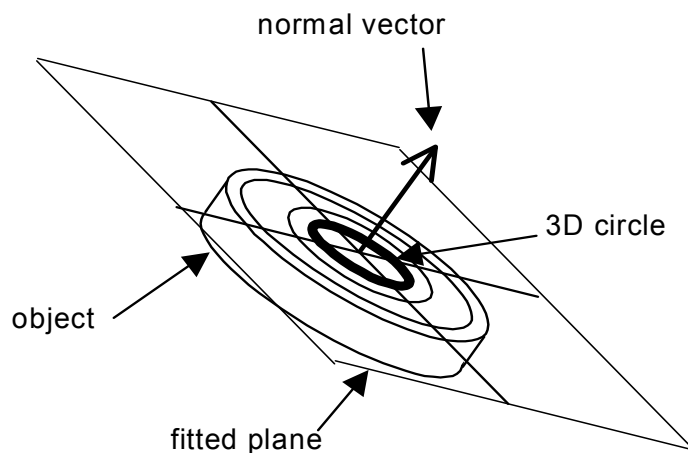


図4-5 プーリの幾何学モデル

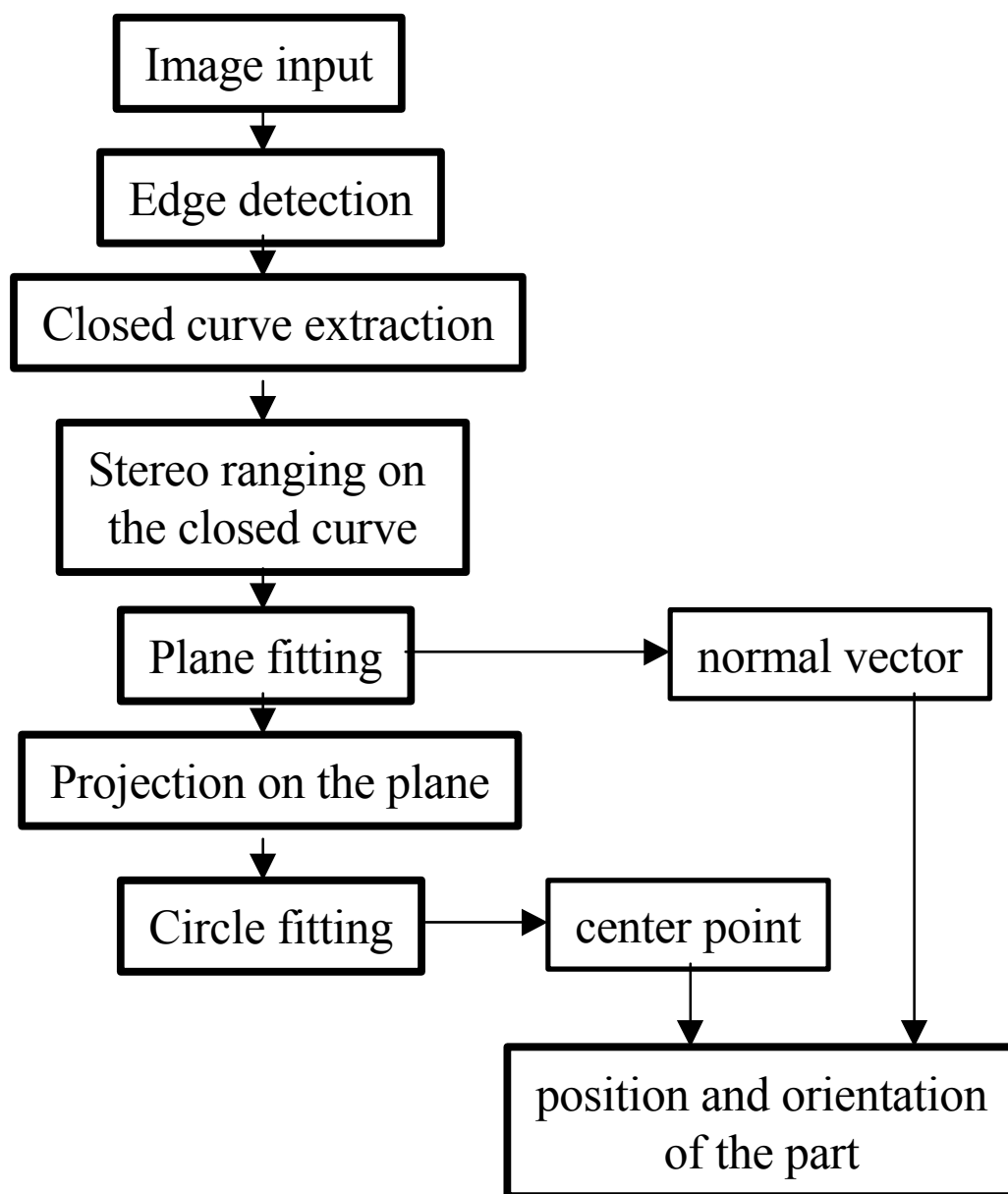


図4-6 3次元円検出のフローチャート

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台のカメラを使用して行い、各点の3次元位置を計測する。さらに、計測した各点の3次元データを平面に近似する。これは、対象部品の穴は平面にのっているとの仮定によるもので、抽出した閉曲線が対象部品の3次元円ならばこれを平面に近似することができる。図4-7は、計測データから近似した平面の模式図である。線形回帰法によれば平面の方程式を、

$$ax + by + cz = d \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

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 σ_x σ_y σ_z 、相関係数 r_{xy} r_{yz} r_{zx} を用いて、

$$a = \frac{r_{zx} - r_{xy}r_{yz}}{\sigma_x}, b = \frac{r_{yz} - r_{xy}r_{zx}}{\sigma_y}, c = \frac{r_{xy}^2}{\sigma_z}$$

$$d = a\bar{x} + b\bar{y} + c\bar{z} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

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3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、これらの投影点を近似平面上で円に近似する。図4-8は、平面上における円近似の模式図である。最小二乗法[10]によれば、円の方程式を

$$ax + by + c + x^2 + y^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

とすると、

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = -\frac{1}{m_{00}} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sum (x_i^2 + y_i^2) x_i \\ \sum (x_i^2 + y_i^2) y_i \\ \sum (x_i^2 + y_i^2) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

で求められる。ここで、

$$\begin{aligned} m_{00} &= N(\sum x_i^2)(\sum y_i^2) + 2(\sum x_i y_i)(\sum x_i)(\sum y_i) \\ &\quad - (\sum x_i)^2(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2(\sum x_i^2) - N(\sum x_i y_i)^2 \\ m_{11} &= N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 \\ m_{12} &= \sum x_i \sum y_i - N \sum x_i y_i \\ m_{13} &= \sum x_i y_i \sum y_i - \sum y_i^2 \sum x_i \\ m_{21} &= \sum x_i \sum y_i - N \sum x_i y_i \\ m_{22} &= N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \\ m_{23} &= \sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i \\ m_{31} &= \sum x_i y_i \sum y_i - \sum x_i \sum y_i^2 \\ m_{32} &= \sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i \\ m_{33} &= \sum x_i^2 \sum y_i^2 - (\sum x_i y_i)^2 \end{aligned}$$

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

$$o_x = -\frac{a}{2}, \quad o_y = -\frac{b}{2}, \quad r = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2 - 4c} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

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 3 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 3 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 3 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 3 次元円の候補から除外することができる。

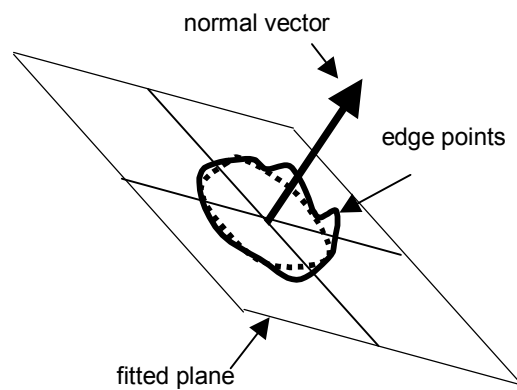


図4-7 計測点を 3 次元平面に近似

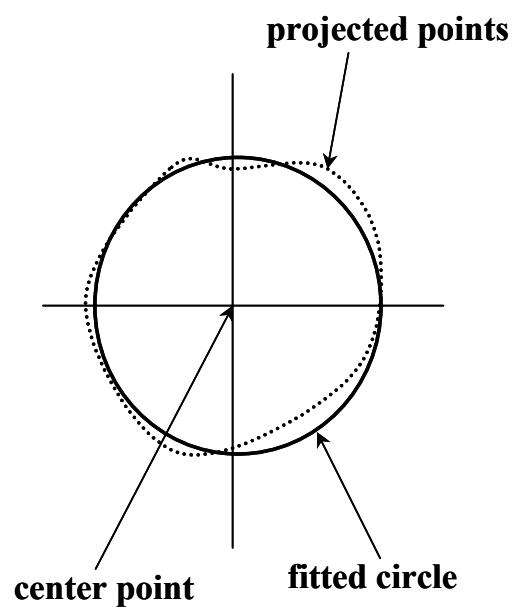


図4-8 近似平面上への投影点を円近似

図4-9から図4-13は処理の過程を写真で示したものである。図4-9はカメラ画像の原画像で、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図4-9はこれらのうちの一方のカメラの画像である。図4-10は、図4-9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。筆者のエッジ検出処理では上述したように、LOGフィルタ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。図4-11は、図4-10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、3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3次元円の候補として抽出することにした。これにより、図4-11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3次元円の候補が抽出されている。図4-12は、図4-11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3次元円を、各々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3次元円候補の閉曲線が、3次元円を形成しないと判断されて排除された。図4-13は図4-12の3次元円検出結果を図4-9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全ての対象物（プーリ）を正確に検出していることがわかる。

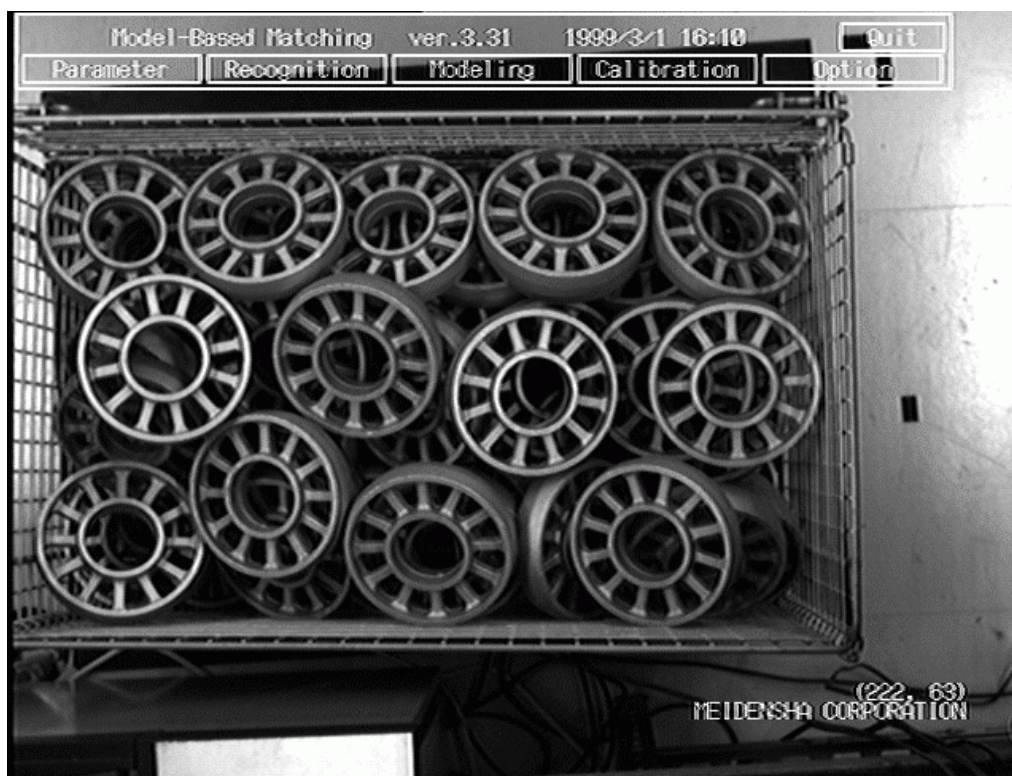


図4-9 カゴ型パレット内のプーリのカメラ画像

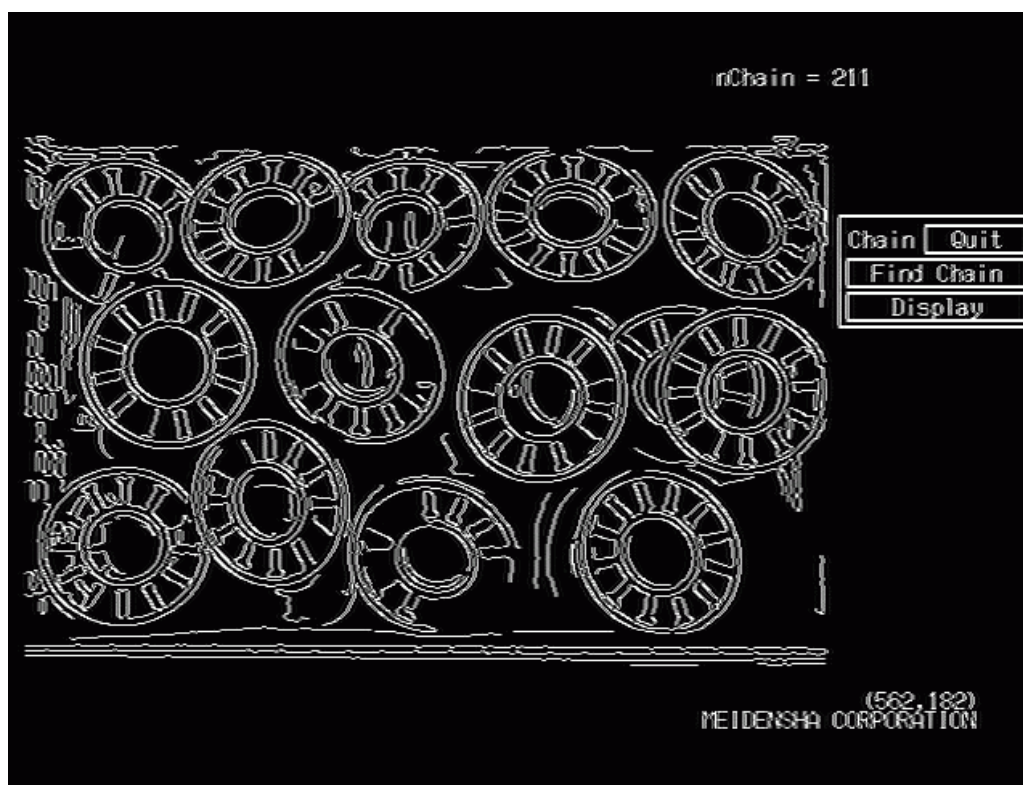


図4-10 カゴ型パレット内のエッジ画像

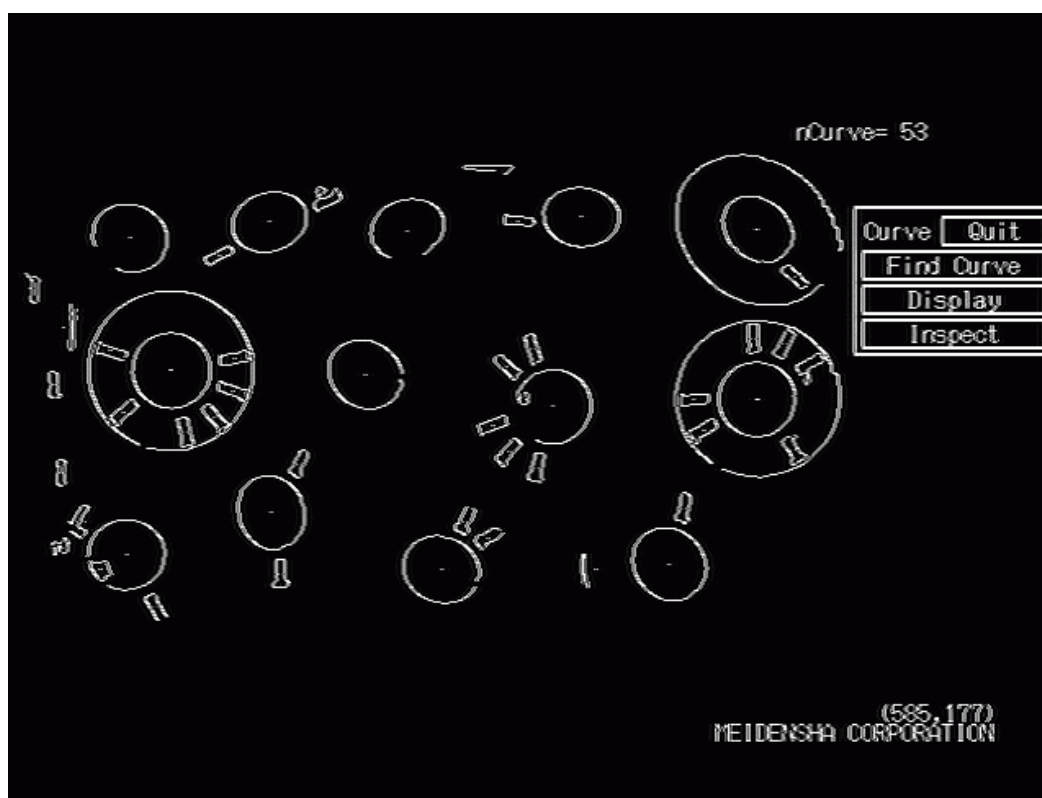


図4-11 カゴ型パレット内の画像の閉曲線抽出結果

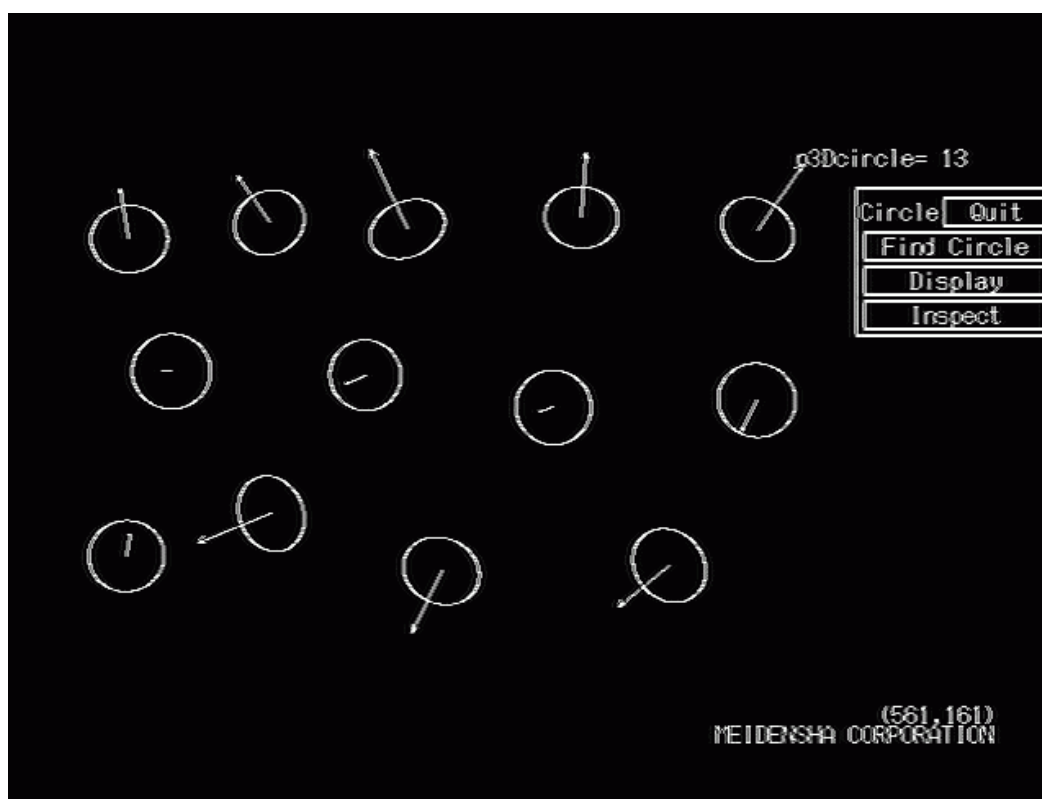


図4-12 カゴ型パレット内に検出した3次元円

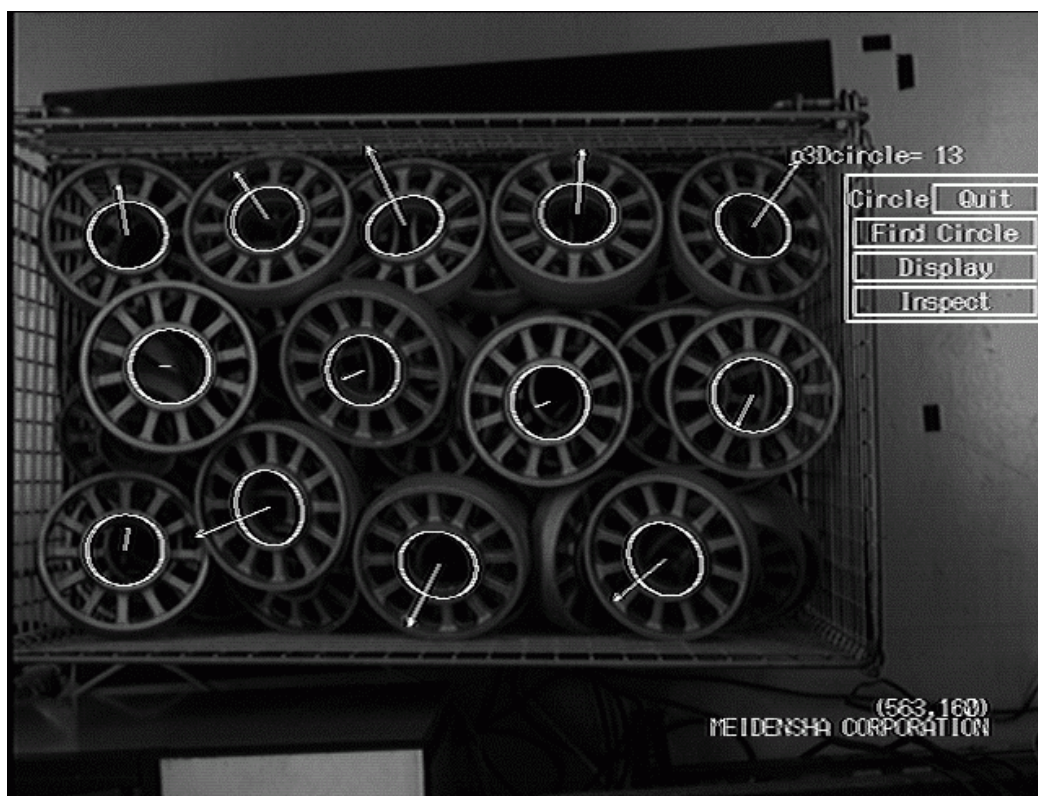


図4-13 カゴ型パレット内に検出した3次元円のオーバーレイ表示

4.3.2 パイプ継ぎ手部品の3次元位置同定への展開

前項では、部品の回転方向を決定しない3次元円検出の方法を述べた。本項では3次元円検出の方法を拡張して、部品の回転方向を含む姿勢を計算する方法を提案する。例えば図4-14はパイプ継ぎ手部品が部品箱の中に多量に投入されている。このようなパイプ継ぎ手部品が部品箱に入った画像で特徴的な部分は円形のパイプ開口部である。そこで筆者はこのパイプ開口部に注目し、これを画像中に検出して位置計測を行いパイプ継ぎ手部品の検出を行った。パイプ開口部はカメラ画像中では円または楕円に見えるのでこれを検出し、次にこの円または楕円の空間内における位置と姿勢を計測して部品の位置を決定した。本項では、パイプ継ぎ手部品をカメラ画像中に検出してその3次元位置計測を行う方法を説明し、部品検出実験の結果を示す。



図4-14 部品箱の中のT型パイプ継ぎ手部品の写真

パイプ継ぎ手部品の開口部の検出には第2章で示したモデルベーストマッチング法を使用し、その位置と姿勢を計算するための3次元計測には第3章で示した領域相関法によるステレオ計測を使用する。ステレオ計測は受動的な計測方法であり、特別な光源を必要とせず、レーザを使用する他の方法と異なり計測対象現場の周囲や他のセンサに影響を及ぼすことがないなど、実用上の利点ある。3次元円検出によるパイプ継ぎ手部品の位置姿勢同定は、まず3次元円をカメラ画像中に見つけ出すことから始める。検出する3次元円の位置と向きでパイプ継ぎ手部品の位置と開口部の方向を決定することができる。L型やT型のパイプ継ぎ手部品のように回転方向を決定する必要がある部品については、検出した3次元円を中心にもう一つの開口部の位置を見つけることにする。図4-15は、この部品検出のプロセスをフローチャートで示したものである。

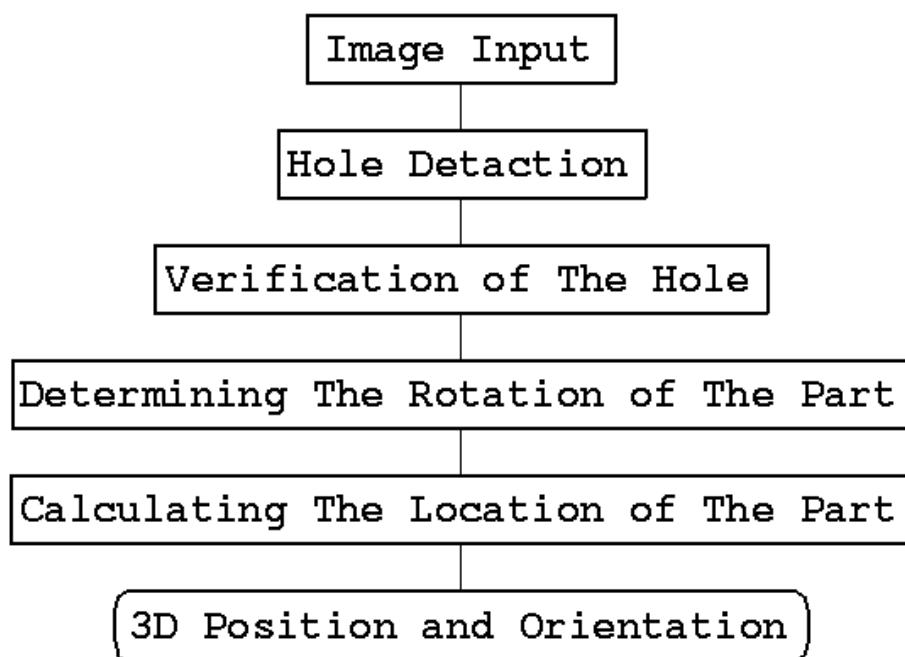


図4-15 パイプ継ぎ手検出のフローチャート

パイプ開口部検出の手順を以下に示す。まず、カメラ画像を入力してエッジ検出処理を施してエッジ点列を求め、その中から凸で閉じているエッジ点列を開口部の候補として選択する。次に、開口部の候補であるエッジ点列を構成する全ての点に対してステレオ計測で3次元位置を計測する。さらに、これらの点の3次元位置データを使用して平面近似の計算を行い、開口部がのる平面を求める。この平面の法線ベクトルはパイプ開口部の向きをそのまま示すものとなる。次に、計算に使用した点を近似した平面上に投影し、平面上の投影点を元に円の近似を行う。このときに、平面上から大きく離れている計測点とパイプ開口部の半径から大きく離れた位置に投影された計測点を計測間違いと判断し、排除して近似計算を行った。計算の結果得られる近似円の中心がパイプ開口部の中心点である。こうして、パイプ開口部の3次元円の位置と姿勢を計算して部品の位置と姿勢を求めた。

ところで、実際の現場や部品の検出を行うと、現場の環境条件や部品自体の表面状態の違いによる計測ミスが起こりがちである。特に3次元計測はこのような計測条件の変動の影響を受けやすい。このような3次元計測のミスがあるとパイプ開口

部の平面を求める計算に誤差を生じる原因となり、開口部の位置の計算にも狂いが生ずることになる。従って、3次元計測の結果が正しくパイプ開口部を示しているのかを確認することが必要である。そこで筆者は、パイプ開口部が内径と外径の二重円で形成されているため、パイプ開口部の内側または外側に同心円が存在することに注目し、検出した3次元円に対応する内径または外径の存在をカメラ画像中に確認することにした。つまり、パイプ開口部の内径に相当する3次元円が検出された場合は、外径に対応する位置に複数の計測点を設定して外径に対応するエッジが抽出されているかどうかを評価し、エッジ抽出されている場合にはその点のステレオ計測を行ってパイプ開口部の外径の存在を確認する。この確認の結果、外周に開口部外径が存在する3次元円はパイプ開口部とみなすことができる。

次に、T型継ぎ手のような部品の回転方向を求めるために、3次元円で検出した開口部とは別の開口部を見つけることでこれを決定する。しかしながら、一つの開口部がカメラ画像中に見えているときには、同一のカメラ画像中に他の開口部が円または楕円で見えることは少ない。そこで、検出した3次元円をもとにしてその周辺を探索してもう一つの開口部の肩口を検出することを考えた。図4-16はT型のパイプ継ぎ手の模式図で、この図では2つの開口部が見える。3次元円計測の結果上部の開口部とその外径のエッジを検出し、下部の開口部の肩口を探索する。この、パイプ開口部肩口の確認の手順を説明する。まず、前述の手順で検出した3次元を中心にして他の開口部が存在することが想定される円形の領域を設定する。次に、その円形領域に沿ってステレオ計測を行って肩口に対応する点を探索する。複数の肩口候補が検出されたらこれらをグルーピングして肩口候補とする。さらに、肩口候補からパイプ中心に向かって一定の領域に計測点を設定してステレオ計測を行い、肩口と同一の高さが計測されたときにこれを他の開口部肩口として認識する。この一定の領域を肩口領域と呼ぶことにする。図4-16に示すように、肩口領域はパイプ開口部の肩口点から3次元円の軸の中心方向に向かう線分である。図4-17は、パイプ開口部の座標系を示した図である。

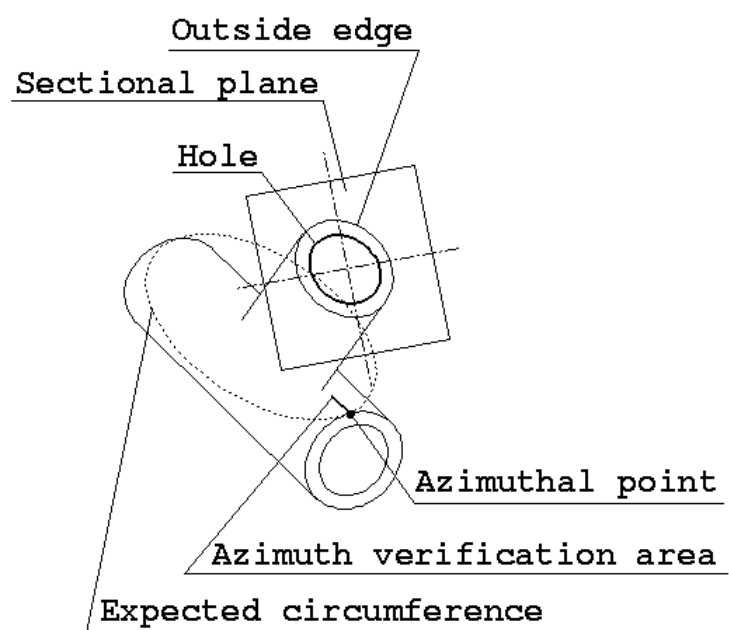


図4-16 パイプ継ぎ手部品の開口部と肩口

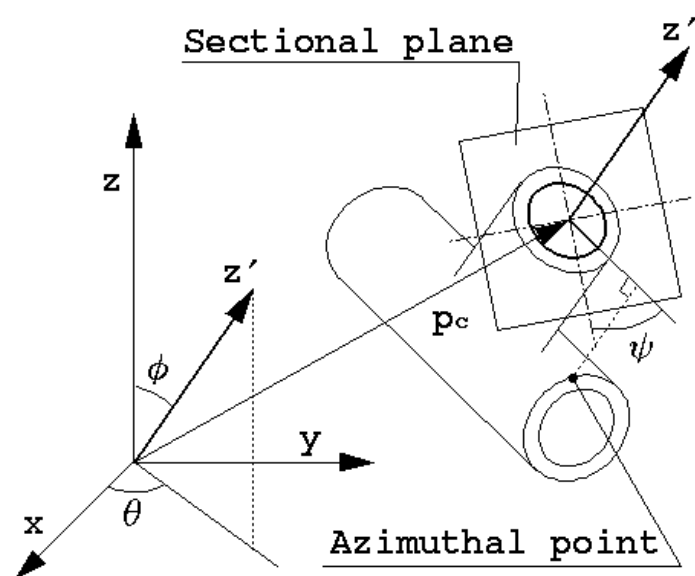


図4-17 パイプ開口部の座標系

3次元円検出による部品検出の方法の性能を評価する実験を行った。今回使用したハードウェアは、2.5節の実験でも使用したVMEボードのシステムである。対象物として使用したパイプ部品の材質は、鉄製、亜鉛めっき、塩ビである。パイプ開口部の内径はいずれも22mmである。実験ではカメラの視野がおよそ200mm×200mmになるようにカメラの位置とレンズを設定した。図4-18は、部品箱の中にランダムに入れられたT型のパイプ継ぎ手部品のカメラ画像である。図4-19は、図4-18の画像中に複数の3次元円を検出した結果を示した。図中に表示した楕円は検出したパイプ開口部の内径の位置を示し、楕円中心部から楕円の軸方向に出る長い矢印はパイプ開口部がのる平面の法線ベクトル、楕円中心から楕円の円周に向かう線はパイプ部品の方向をそれぞれ表わしている。図4-20では、3次元円の周辺部に存在すべき肩口部の存在可能範囲を大きな円で示した。図4-21は、肩口検査の結果パイプ開口部と肩口部を検出できた3つのパイプ継ぎ手部品をオーバーレイ表示したものである。図4-22は、図4-21の左上部の拡大図である。



図4-18 部品箱の中のパイプ継ぎ手のカメラ画像

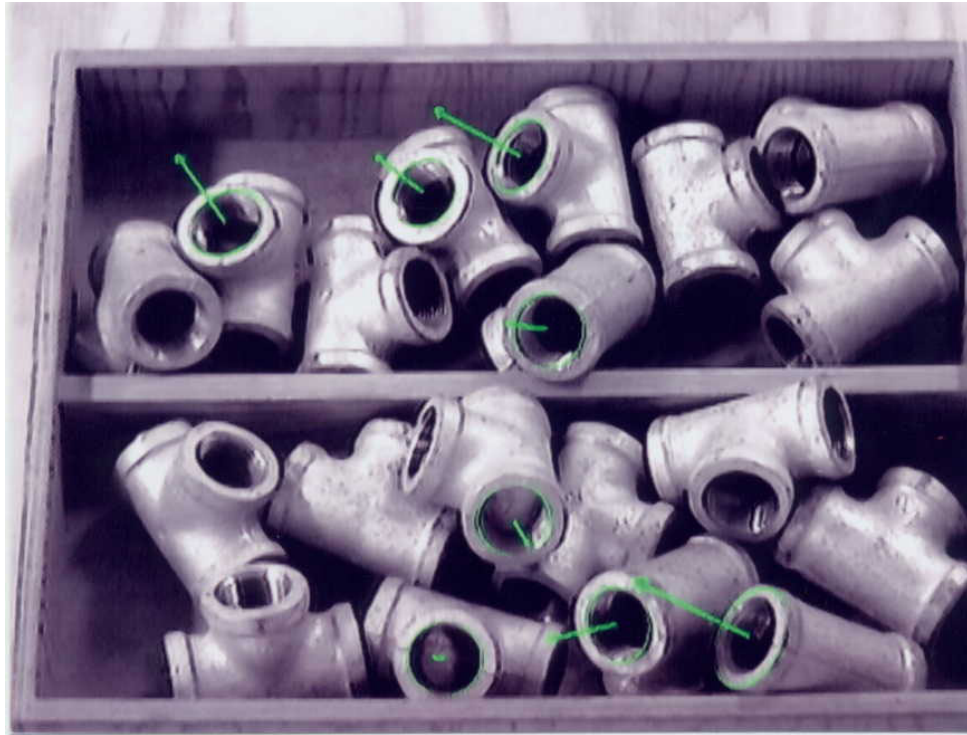


図4-19 部品箱の中のパイプ継ぎ手の3次元円検出結果



図4-20 部品箱の中のパイプ継ぎ手の肩口候補点

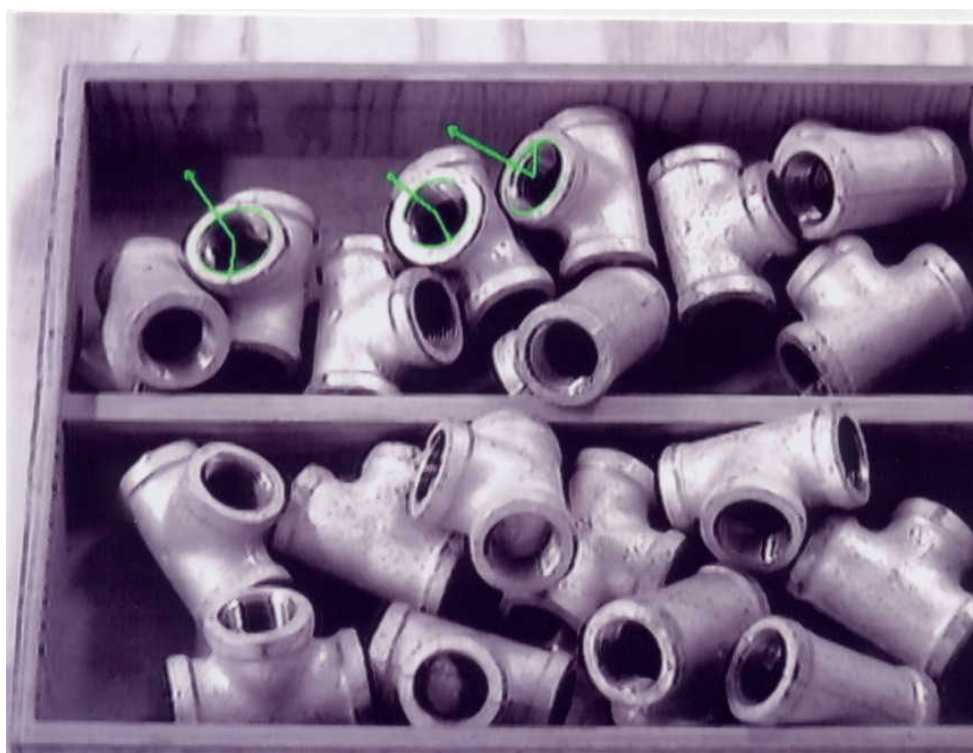


図4-21 部品箱の中のパイプ継ぎ手の検出結果



図4-22 図4-21の左上部の拡大図

4.3.3 3次元円検出による部品位置同定実験

図4-23は、部品位置検出の精度を検証するために構成した実験システムである。実験の対象となる部品を、X-Yテーブル上に設置した傾きテーブル上に固定する。X-Yテーブルと傾きテーブルはいずれも精密な位置決めが可能で、対象部品の正確な位置と傾きを設定することができる。実験はこれを用いて上方カメラで画像を取得し、提案した方法で部品位置の計算を行い、計算結果とX-Yテーブル等で設定した位置との比較をすることにより精度の確認を行った。

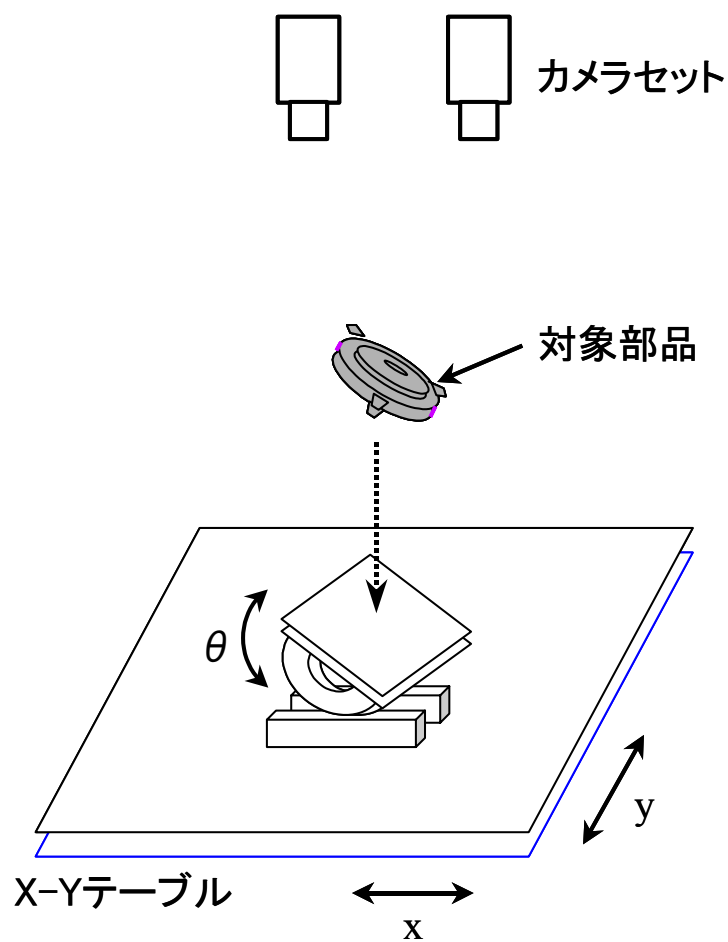


図 4-23 部品検出位置精度の実験装置

図4-24は、パイプ開口部の傾きを変化させた時に何度までパイプを検出できるかを実験した結果を示している。グラフの横軸はパイプ開口部の傾きで、カメラ光軸とパイプ開口部の平面の法線ベクトルがなす角度、縦軸は検出できたパイプの割合である。実験の結果は、パイプ開口部の傾きが60degまでは検出が可能なことを示している。

ビンピッキング作業における部品位置同定の性能として60degまでの部品傾きを検出できることは重要なポイントである。つまり、本方式を使用することによって部品箱中に存在する大多数の部品を検出できる。加えて、本方式ではパイプ部品の検出と位置同定に開口部の半径と肩口の位置の2つの情報しか使用しない。多くのデータで構成されるC A Dモデルを使用する他の方法と比べて、この点も本方式の利点である。

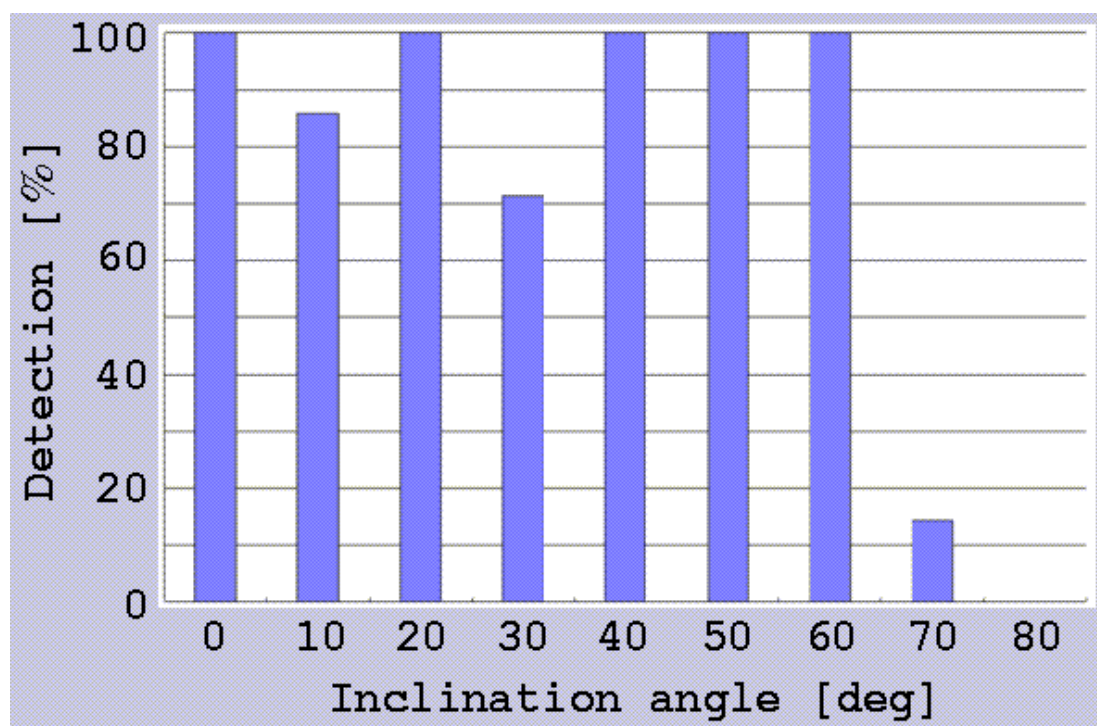


図4-24 パイプ開口部傾き角度と検出比

ところで、パイプ開口部が60deg以上傾いている場合はパイプ開口部がカメラで見ることができないので、本方式ではパイプを見つけることもその位置を同定することも難しく、このような場合はパイプ部品を見つけることができない。たとえば全てのパイプ部品が箱の中で横になっている場合は、全てのパイプ開口部がカメラで見えない。このような場合は、パイプ開口部は見えないとしても横になっているパイプ部品の形状が視認できるはずである。このような時はパイプ部品の検出を第2章で説明したモデルベーストマッチング法で検出可能である。つまり、カメラ画像中にパイプ開口部が発見されないときには、部品の検出方式を適当な方法に変更して検出することができると考える。

図4-25と図4-26は、3次元円検出によるパイプ部品位置同定の実験における位置検出精度の結果を示したものである。図4-25において、 x 、 y は水平方向の部品位置[mm]で、 z 方向がそのときの誤差[mm]を示している。図4-26は、横軸にパイプ開口部の傾きを、縦軸にはこれを計算した結果と実際の傾き角度との誤差を示した。これらの実験結果によれば、本方式の計算誤差は、位置で1mm以下、傾き角度で5deg以下であり、これは実用上許容できる範囲である。例えば、直径22mmのパイプ開口部に挿入してこれを把持するハンドのつま先が直径12mmの円筒形でこれをパイプ開口部に10mm挿入するように設計されているときに、傾き検出角度に5degの誤差があってもつま先は9.5mmの挿入深さと4.1mmの余裕を確保することができる。また、パイプ開口部の直径が22mmより大きい場合はより精度の良い傾き計測が必要だが、本方式の傾き計測の精度はパイプ開口部の直径とステレオ計測の精度に依存しており、パイプ開口部の直径が大きいほどステレオ計測点を多く設定できるので、より正確なパイプ開口部の平面計算が可能で、これに基づくパイプ開口部の傾き計算の精度が高い。

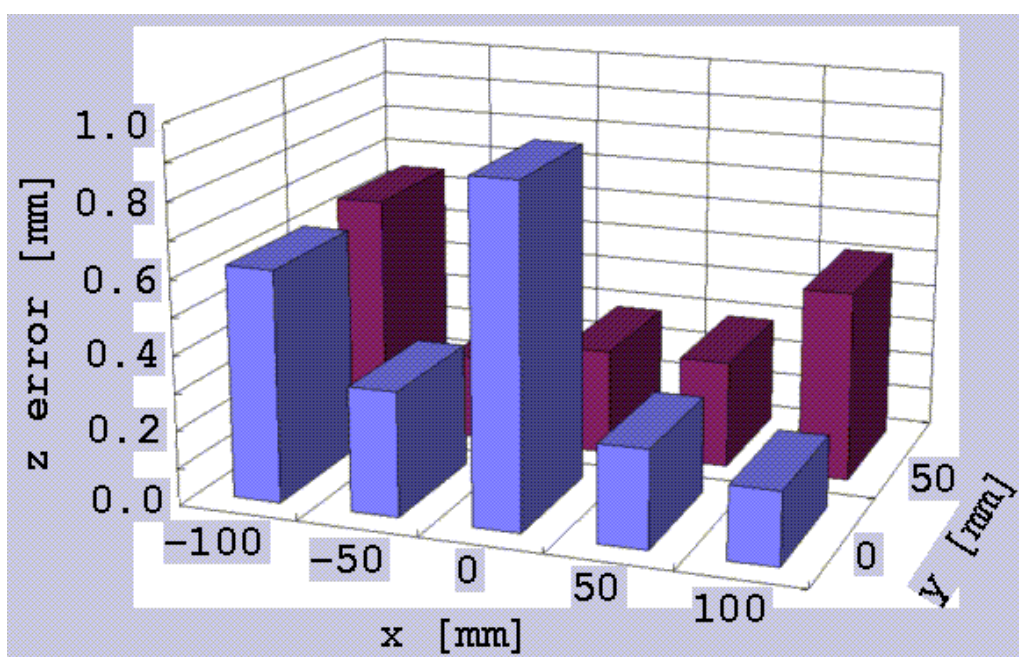


図4-25 パイプ継ぎ手の位置計算誤差

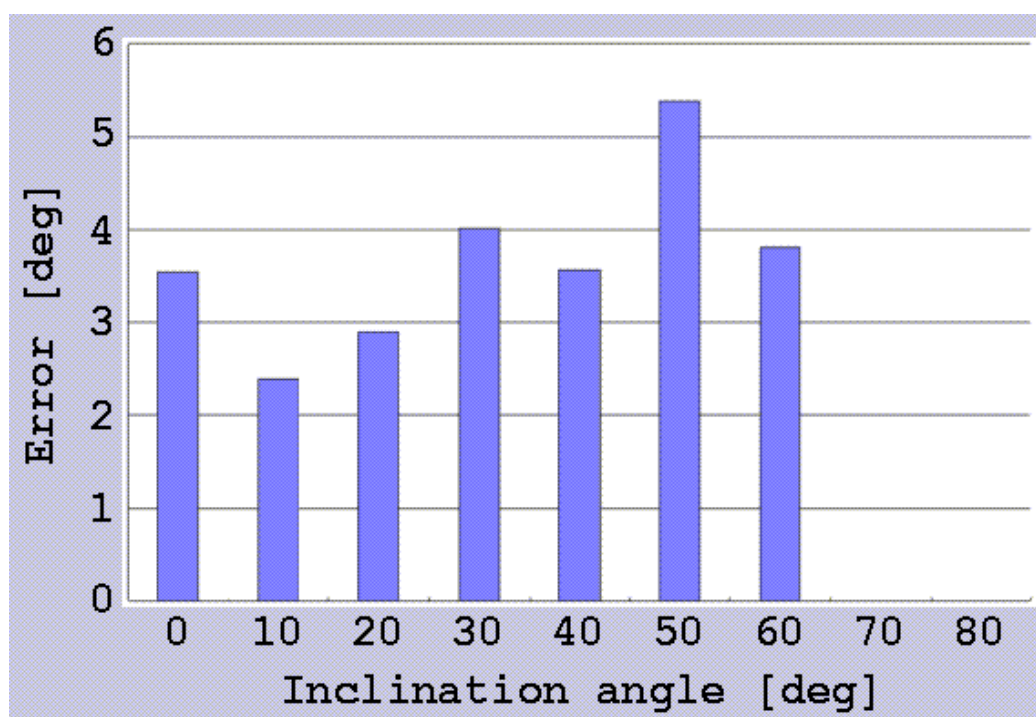


図4-26 パイプ継ぎ手の傾き角度の計算誤差

本節では、部品箱の中にランダムな状態に入っているパイプ継ぎ手部品を上方に設置した 2 台のカメラの画像中に検出してその 3 次元位置と姿勢を計算する手法を説明した。この方法は、パイプ継ぎ手部品の円形の開口部をカメラ画像中に検出してステレオ計測による 3 次元計測を行い、3 次元円としてその中心位置と法線ベクトルを計算して部品の位置と姿勢とするものである。さらに、実際のパイプ継ぎ手部品を使用して 3 次元円検出の実験を行い、部品箱の中に入れられた状態のパイプ部品を検出して 3 次元位置同定を行った。実験の結果、提案した方法が有効な方法であることを示した。

また、本方式の有効性をパイプ部品のみの実験で示したが、本方式は空間内に 3 次元的に存在する円形の形状を検出して位置と傾きを同定するものであり、パイプ部品に限らず部品表面に大きな円形の穴が存在する多くの一般的な工業部品に適用可能である。例えば、モータ部品やエンジン部品やギアボックスやポンプ部品などは、シャフトやパイプを通す大きな穴があいていて、これらが部品表面に視認できる。また、ギアやベアリングやタイヤやホイールなどは形状が円筒形で、これを把持するためにその回転方向を特定する必要がないので、パイプ部品の傾き検出で行った肩口方向の検出の処理が不要で、3 次元円検出の処理のみで部品位置を同定することが可能である。同様に、円盤形状の部品については穴がなくてもその外形の円を使用できる。このように、本方式による部品位置同定の方法はビンピッキング作業を必要とする多くの作業現場に適用可能である。

4.4 基準平面計算による部品位置同定

4.4.1 基準平面計算による部品位置同定の手順

部品表面に基準平面が存在する部品の検出では、この基準平面を検出の対象として使用する。この方式による部品位置同定の手順は、まず基準平面を構成する特徴モデルを使用してモデルベーストマッチングの手法によりカメラ画像中に対象部品を検出し、検出した特徴モデルの3次元計測を行ってこれらが含まれる平面を計算し、次に計算した平面上に部品をあてはめて位置を同定するものである。部品表面上で基準平面を構成する複数の計測点の3次元計測には、2台のカメラを使用するステレオ計測を使用する。この項では、カメラ画像の入力から部品の位置同定に至る一連の処理の詳細な手順を説明する。

まず、1台のカメラ画像を入力して、エッジ検出、特徴抽出、特徴マッチング、の一連のモデルマッチングのプロセスにより部品を構成する幾何学的な特徴を検出する。次に、検出した特徴上の複数の点の一つ一つについて、もう1台のカメラの画像を使用したステレオ計測を順次行い、部品の基準平面を構成することが予想される点の3次元位置を計算する。さらに、これらの計測点のデータをひとつの平面に回帰する計算を行い、基準平面がのる平面を決定する。最後に、計算した平面上に部品の基準平面を構成する特徴を投影し、その位置を部品の位置として出力する。部品の傾きは計算した基準平面の法線ベクトルで表現できる。図 4-27 は、この手順をフローチャートで示したものである。

まず、カメラ画像中から対象物を検出する方法は、第2章で述べたモデルベーストマッチングによる部品検出方法を使用した。つまり、あらかじめ対象物のモデルを対象物表面に視認できる特徴で記述しておき、この特徴組をカメラ画像から特徴抽出して得られる特徴と照合して対象物を検出し、画像中の位置を決定するものである。この過程では1台のカメラのみを使用する。

カメラ画像から特徴を抽出するまでの処理プロセスを詳細に説明する。はじめに、

カメラから画像を入力する。次に、入力した画像に対して前述したエッジ検出処理を施し、エッジ点列リストを作成する。次に、エッジ点列を線分と円弧の成分に分割する特徴抽出処理を行い、画像中に視認できる特徴を線分と円弧のリストで構成する。対象物のモデルを作製するときには、対象物のサンプル画像から取得した特徴のリストから、オペレータが適当な特徴を選択して特徴組をつくり、モデルとして登録する。こうしてつくられた特徴モデルを使って対象物検出を行うことになる。対象物検出のときには、あらためて入力するカメラ画像に対して、モデル作製時と同一のエッジ検出処理と特徴抽出処理を行い、得られる特徴のリストとモデルの特徴リストを照合して対応する特徴組を選択する処理を行う。なお、特徴組の照合については一定のしきい値を設定しておき、モデルを構成する特徴の中でしきい値以上の数の特徴が検出されたときにはそのときのカメラ画像中に対象物があると判断することにした。こうして得られた特徴組のカメラ画像中における位置は、対象物が正にそこに存在していることを示している。

次に、モデルマッチングで検出した部品の基準平面を構成する特徴の3次元計測は、第3章で述べた両眼ステレオ法による3次元計測を使用した。つまり、1台のカメラでモデルマッチング法を使用して検出した部品を構成する線分と円弧に沿って計測点を設定し、これらの計測点の1点ずつに対してもう1台のカメラ画像中の対応点を探索し、2台のカメラの間隔を含むカメラパラメータを使用して三角測量法の原理で計測点の3次元座標を計算する。3次元計測に関しては、工場内においてはステレオ計測以外にもレーザ距離計測法や空間コード化法が使用される場合がある。レーザを使用する場合には、光線が作業員の目に入らないよう注意する必要があり、このような現場では厳重な遮光措置が施される。しかしながら鑄造部品を扱う工場の現場においては、部品自体が大きいことや高温と粉塵など雰囲気が悪く、現場を囲う処置を取りにくい。また、レーザ距離計測の結果と画像処理の結果の微妙な軸あわせが必要なこともあり、このような現場でレーザを使用する計測方法を導入しにくい。また、特定の縞模様の光を部品に照射して反射光をカメラで捕らえて3次元計測を行う空間コード化法については、照射光が届く範囲が計測範囲であり、周囲の照明条件の変動の影響を受けやすいことも欠点で、鑄造部品を扱う

現場には向かない。これらに対してステレオ計測は、モデルベース法で部品を検出したカメラをそのまま使用可能なので同一のカメラ座標系で3次元計測できるのに加えて、レーザや特殊な光源を使用しない受動的なセンシング方法であるので、対象部品にも周囲にもほかのセンサにも影響を及ぼすことなく3次元計測を行うことが可能である。

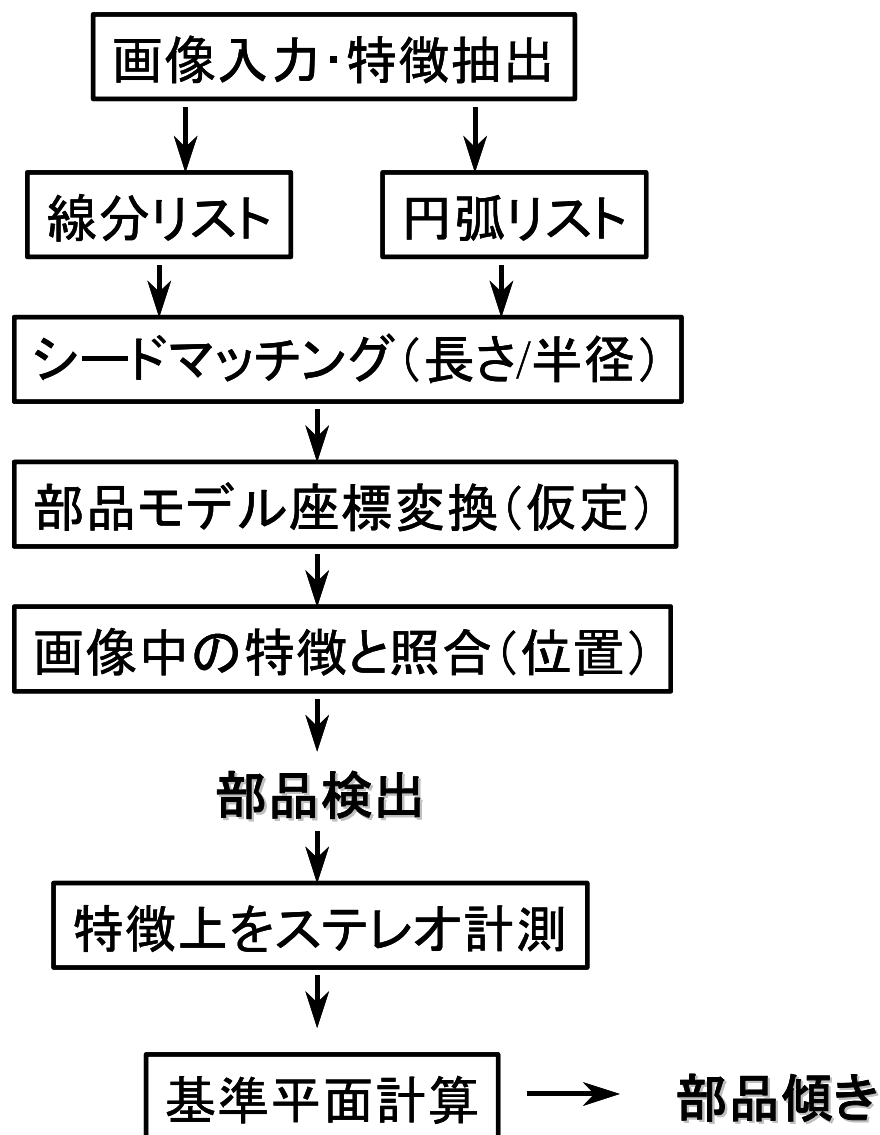


図4-27 基準平面計算による部品位置姿勢同定のフローチャート

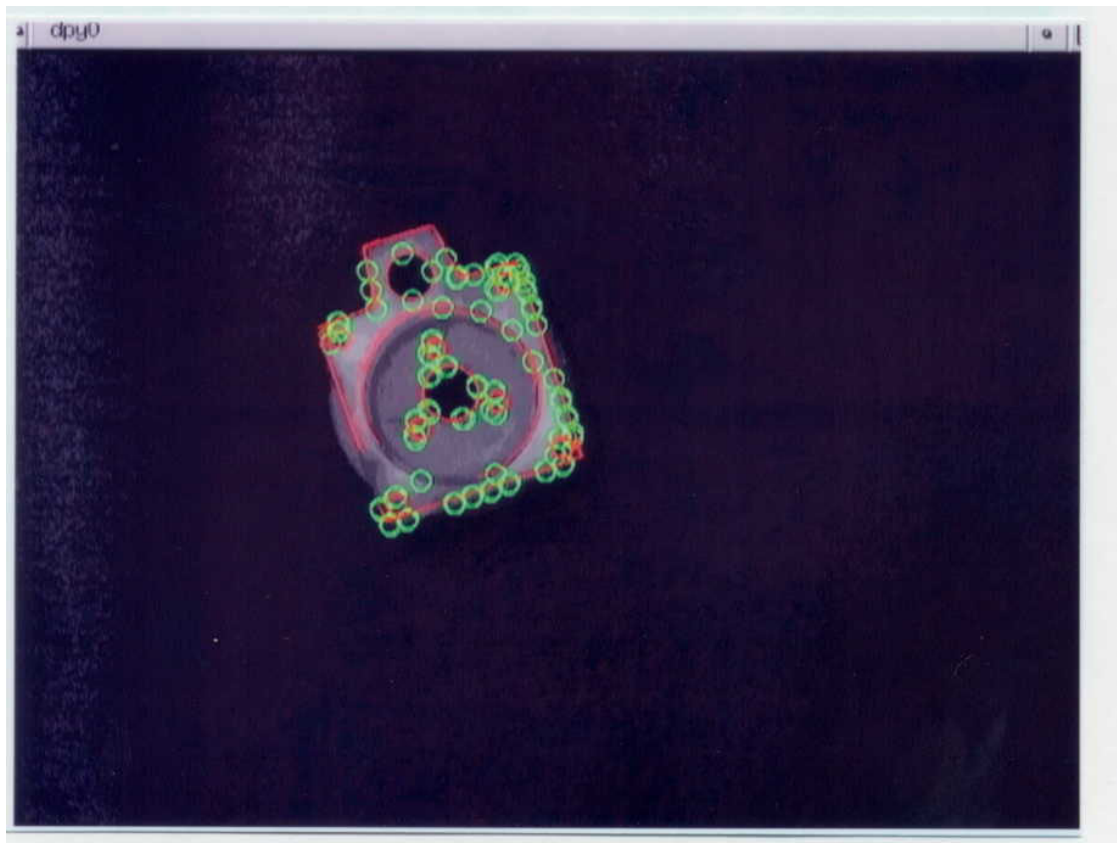


図4-28 基準平面計算に使用するステレオ計測点（小丸で表示）

ステレオ計測を適用するときには、カメラ画像中のどの点を計測するのかが重要なポイントである。つまり、2台のカメラ画像で同一の計測点が映っている位置を探索する時に、特徴的なテクスチャがなく均一な点、例えば白い壁の中央部とか、画像中に似たようなテクスチャが多く存在する点、例えば市松模様や縞模様の壁の中央部などは対応点を決定しにくく、または対応間違えを引き起こす危険があるため、ステレオ計測の計測点としては使用できない。つまり、正しい対応点探索を行うには計測点の周辺に他の点と区別できる適当なテクスチャがあることが望ましい。筆者の方法では、ステレオ計測を行う前にモデルマッチングで部品検出を行っており、そのときに部品の表面に視認できる線分と円弧の成分を抽出して使用しているので、ステレオ計測の際にはこれらの線分と円弧に沿って計測点を設定することにした。こうすることにより、これらの計測点は適当なテクスチャを持つことになり、正確なステレオ対応点探索が実現することが期待できる。図 4-28 は、部品

上に設定した計測点を示したものである。図中の小円はステレオ計測点として設定した点で、マッチした特徴上に置かれている。これらの計測点として設定した点の1点ずつに対して、2台のカメラ画像中で対応する点を探索する。こうして、設定したすべての計測点に対して第3章で示したステレオ計測を行い、対象部品の基準平面を構成する線分と円弧上の点の3次元位置を計算することができる。

次に、基準平面計算の方法を説明する。部品が変形しない場合は、部品上の3点以上の点について3次元位置座標が計測できれば、部品の3次元位置と姿勢を決定することができる。鋳造部品の大多数はその表面に、加工の基準に使用するかまたは産業用ロボットが把持することを目的とする基準平面が存在する。そこで、基準平面上の3点以上の点についての3次元計測を行って基準平面を直接計測して部品の高さや傾きを決定する。また、鋳造部品の基準平面上にはロボットが把持に使用するための穴や加工の基準となるキー溝などが存在し、これらがカメラ画像では線分や円弧として抽出できることに着目して、これら画像中の幾何学的な特徴を部品の検出と3次元計測に使用することにした。上述した手順で、基準平面を構成することが想定される特徴上の複数の点について3次元計測を行って3次元位置データを取得したあとにこれらをひとつの平面に回帰する計算を行い、基準平面を求める。平面の回帰計算は最小二乗法を適用した。3次元空間内に存在する平面の方程式の各パラメータは(4.6)式で計算する。

$$ax + by + cz + d = 0, \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

ここで、

$$a = \frac{\gamma_{xz} - \gamma_{xy}\gamma_{yz}}{1 - \gamma_{xy}^2} \times \frac{\sigma_z}{\sigma_x}$$

$$b = \frac{\gamma_{zy} - \gamma_{xy}\gamma_{zx}}{1 - \gamma_{xy}^2} \times \frac{\sigma_z}{\sigma_y}$$

$$c = -1$$

$$d = \frac{\gamma_{xz} - \gamma_{xy}\gamma_{yz}}{1 - \gamma_{xy}^2} \times \bar{x} + \frac{\gamma_{zy} - \gamma_{xy}\gamma_{zx}}{1 - \gamma_{xy}^2} \times \bar{y} - \bar{z}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{n \times \sigma_x \times \sigma_y}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \times (z_i - \bar{z})}{n \times \sigma_y \times \sigma_z}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}) \times (x_i - \bar{x})}{n \times \sigma_z \times \sigma_x}.$$

ステレオ計測に領域相関法を使用する場合に、左右画像中に似たテクスチャがあるときに原理的な対応間違えが発生することがある。つまり、本来の対応点とは異なる点を対応点として選択して三角測量法による計算で正しくない値を出力する場合がある。ただしこのような場合の誤計測点は、正しい計測点とは大きく離れた値になる。しかしながらこのような計測間違えの点が多いと、その後の基準平面の回帰計算に影響を及ぼすことがあるため、基準平面の計測精度を確保するためには何らかの方法でこれらの計測間違えの点を排除することが必要である。そこで筆者は、基準平面の回帰計算が終了した後にすべての計測点の1点ずつに対して回帰平面との距離を計算し、回帰平面と一定以上の距離が離れている点是对応点間違えによる計測ミスの点と判断して排除するプロセスを追加した。計測点 (x_i, y_i, z_i) と平面との距離 D_i の計算は(4.7)式を使用した。

$$D_i = \frac{|ax_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

計測ミスの点を排除した残りの点で再度基準平面の回帰計算を行い、さらに一定以上離れた点を排除して基準平面の回帰計算を行う処理を繰り返し、計測ミスの点なくなるまで繰り返し行う、再帰的な方法をとった。図 4-29 は、この再帰的基準平面検出方法を二次元で表したグラフである。横軸は水平面上の位置を、縦軸は高さである。グラフ中の小円はステレオ計測で計算した計測点の高さを示している。太線は、大きく離れた 3 点を除外して計算した回帰平面を示している。

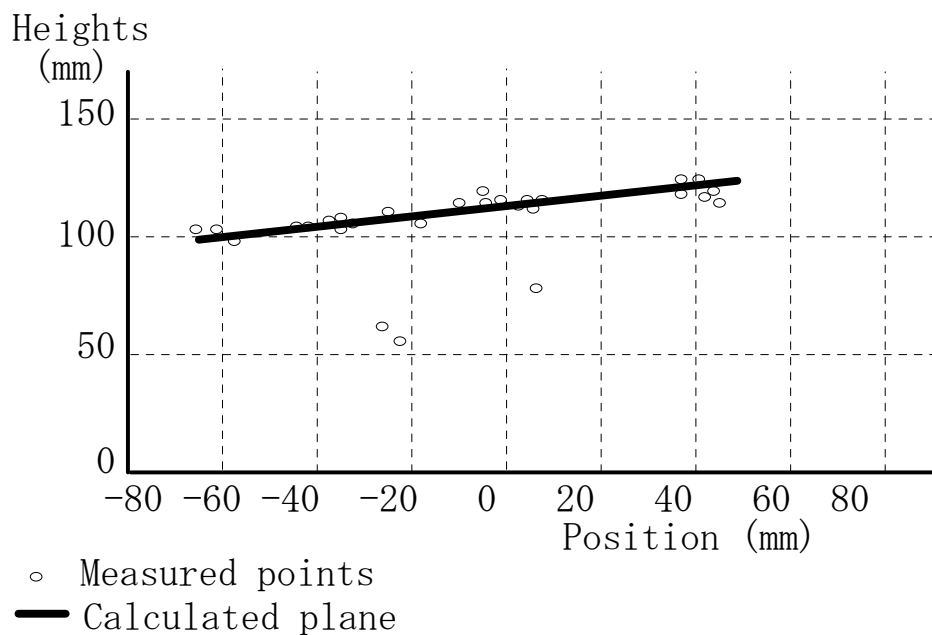


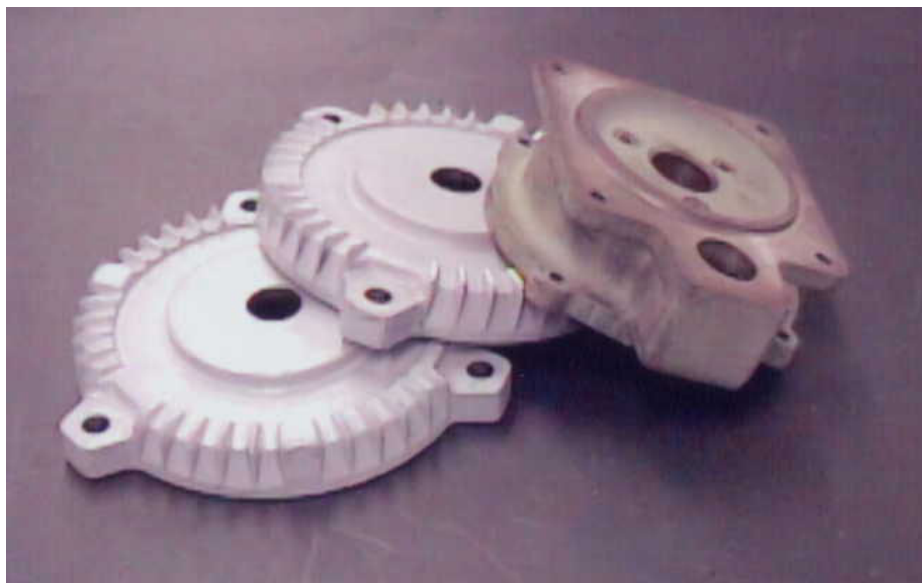
図4-29 ステレオ計測間違い点の排除

4.4.2 基準平面計算による部品位置同定実験

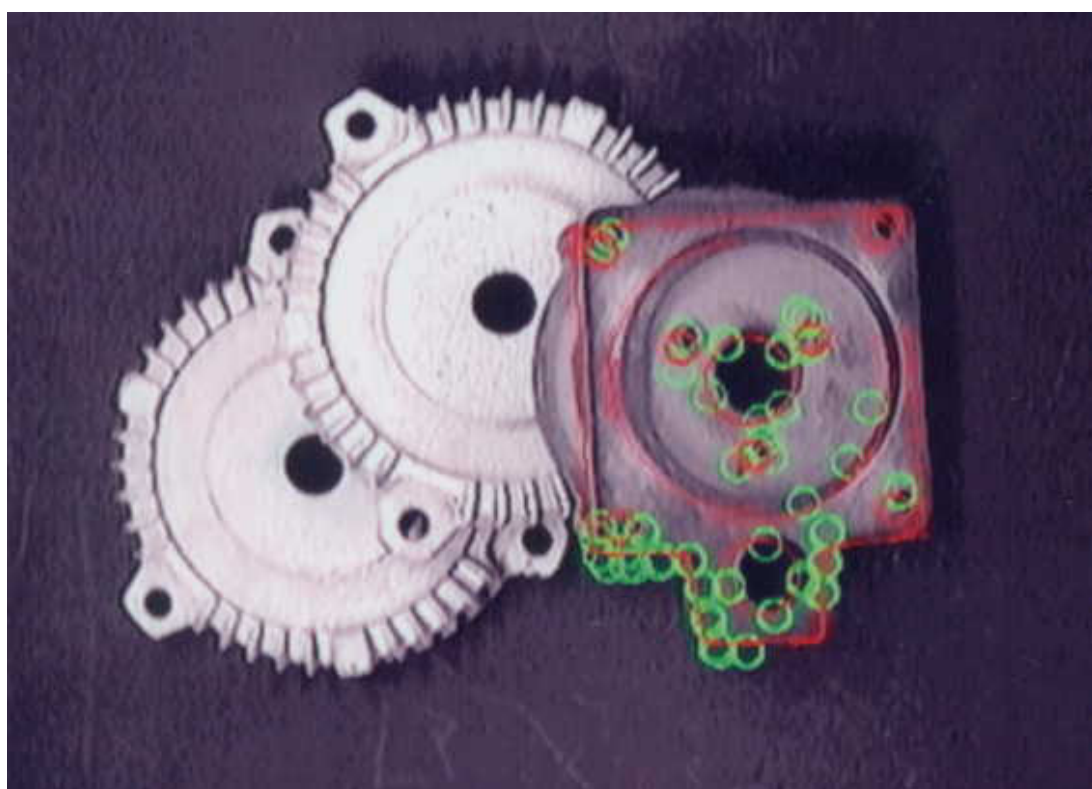
上述した基準平面計算による方法を用いて、いくつかの部品の検出と部品位置同定の実験を行った。実験の結果、提案した方法を使用することにより部品が水平面から 30 度まで傾いている場合に部品の検出と位置と姿勢の計算ができた。図 4-30 は、モータの軸受部品を他の部品（モータブラケット）にのせて傾いて置かれているときの検出実験の様子を示した。最上部の対象部品はカメラに対して横方向に 30 度傾いている。図 4-30(a)はこれを横から見た写真で、図 4-30(b)は、上方に設置したカメラの画像に、検出した部品モデルとステレオ計測点をオーバーレイ表示したものである。このときは部品の上面を基準平面として使用した。

図 4-31 は、図 4-23 の実験装置を使用し、図 4-30 の部品を 5 度から 30 度まで 5 度おきに傾けて置いて基準平面検出の実験を行った結果の傾き角度同定の誤差を示したものである。横軸は 5 度から 30 度までの部品の傾き角度で、縦軸は x 方向と y 方向の実際の部品の傾きと画像処理装置による位置同定の結果との誤差である。このときの傾き検出誤差は 2 度以下で、平均の誤差は 0.36 度であった。

図 4-32 は、自動車部品の一つでロッカーアームと呼ばれる鋳造部品のカメラ画像（図 4-32(a)）と、特徴マッチングにより検出した 3 つの部品とステレオ計測点のオーバーレイ表示（図 4-32(b)）である。3 つの部品が互いに重なり合っているがおおよそその部品の位置を同定し、ステレオ計測により正確な位置と姿勢を計測した。図 4-33 は、同一のカメラ画像から 2 つのモータ部品を検出した結果をオーバーレイ表示したものである。図 4-33(a)では右側の部品の基準平面をステレオ計測し、図 4-33(b)では右側の部品の基準平面をステレオ計測した。



(a) 机上で重なり合って置かれたモータ部品



(b) ステレオ計測点の検出した部品のオーバーレイ表示

図4-30 モータ部品の写真と基準平面検出

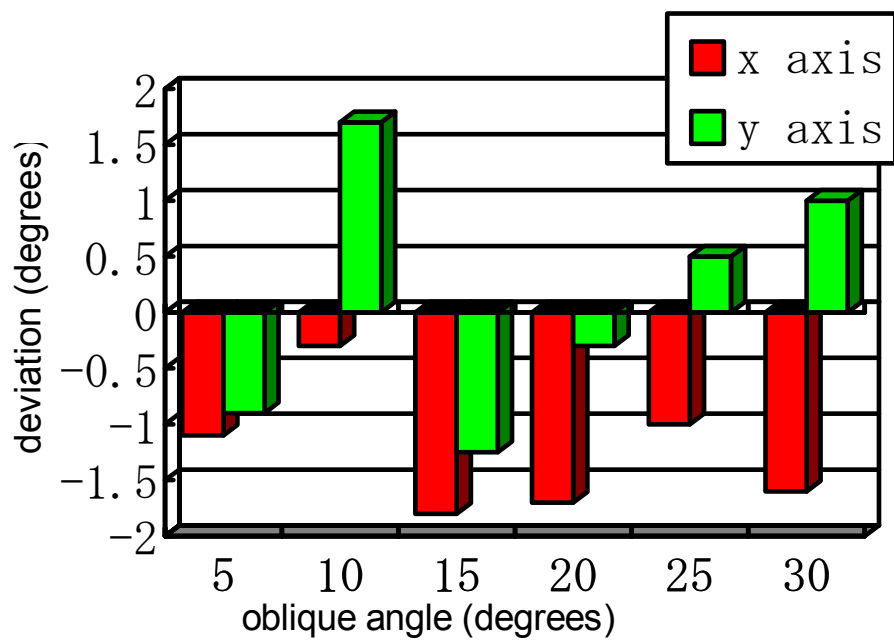
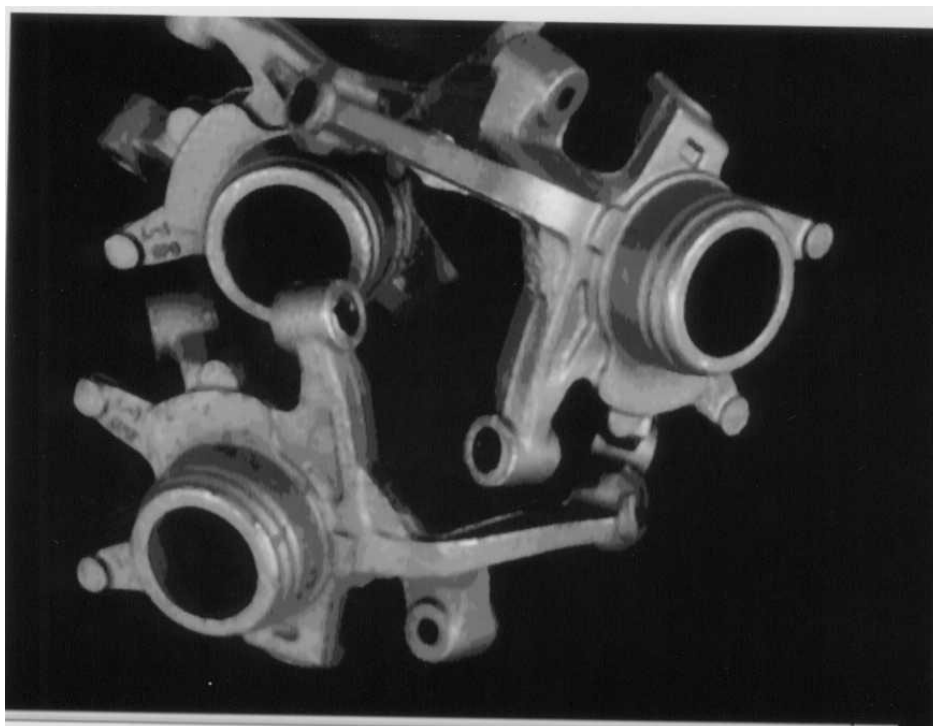
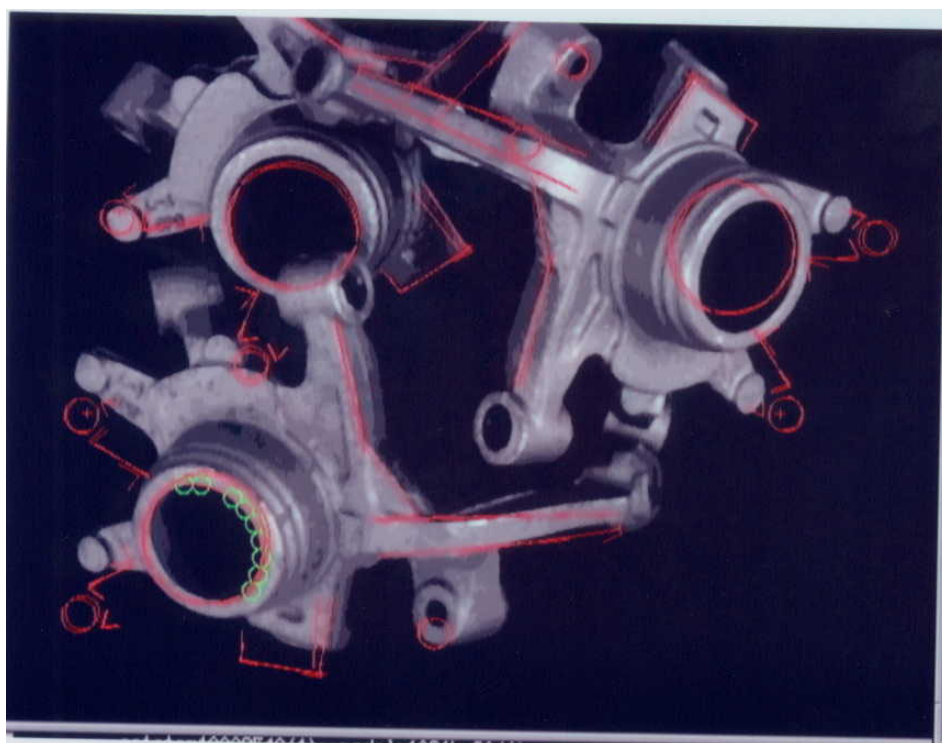


図4-31 部品傾き角度の計測誤差

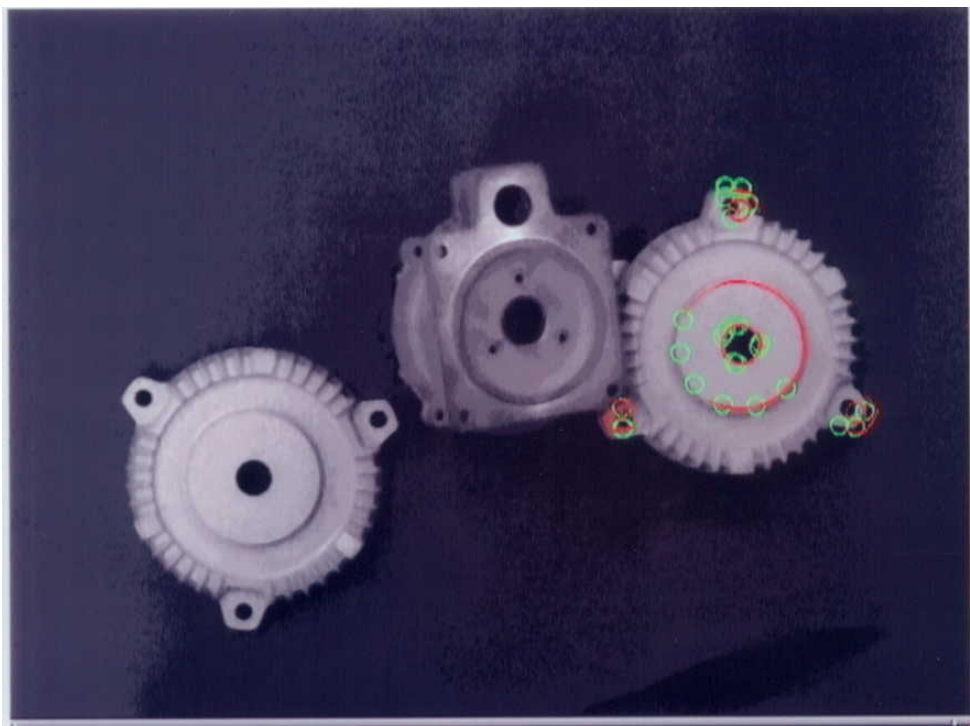


(a) 机上で重なり合って置かれた自動車部品（ロッカーアーム）

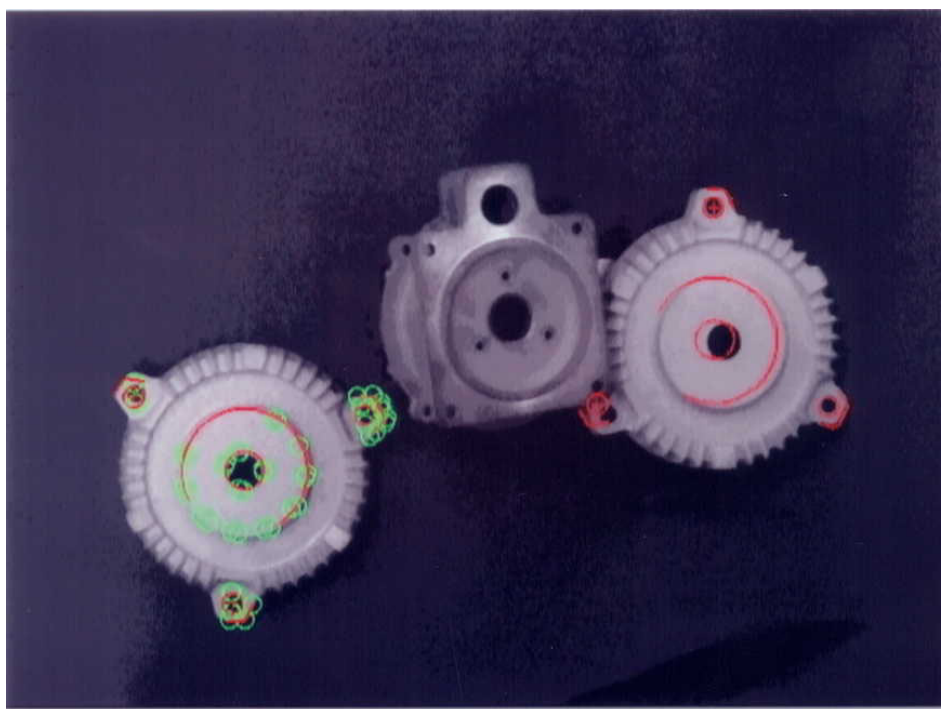


(b) 部品検出結果とステレオ計測点

図4-32 鋳造部品ロッカーアームの写真と基準平面検出結果



(a) モータ部品のステレオ計測点（右側部品）



(b) モータ部品のステレオ計測点（左側部品）

図4-33 モータ部品の基準平面検出結果

本節では、部品表面上に視認できる幾何学的な特徴を抽出してこれらが構成する部品固有の基準平面を計算することにより部品の3次元位置同定を行った。このときに、3次元計測には両眼ステレオ法を使用した。さらに、提案した方法を使用して、ランダムに置かれた部品を検出して3次元位置を同定をする実験を行った。実験により、提案したシステムが以下に記述する実用的な利点を持つことを確認した。

(1) ランダムに置かれた鋳造部品を2deg以内の精度で検出することができるためマニプレータが把持することが可能。(2) 計測条件に関して、周囲の照明条件や周辺部の汚れを含む背景の変動の影響を受けずに部品を検出してその位置を計算することが可能。(3) ステレオ計測技術により、部品の3次元的な傾きを計算することが可能。(4) 部品に非接触で計測を行うので部品に傷などをつけることなく、レーザ光を使用するときのように周囲に影響を及ぼすこともない。

4.5 特徴組のマッチングによる部品位置同定

4.5.1 閉曲線のマッチングによる対象物検出

本節では、部品表面に大きな穴も基準平面もない部品の検出方法について検討する。第2章で示したように、ハンドリングロボットのための対象物位置決めには特徴マッチングを利用したモデルベーストマッチング法が有効である。実用的な利点として、①カメラの入力画像に映っている既知の対象物を検出する技術であること、②対象物の位置と姿勢を計測すること、③照明条件の変化の影響を受けずに検出可能なこと、④対象物の背景の状態変化の影響を受けないこと、⑤汚れや変色など対象物自体の状態変化に左右されない検出ができること、⑥新規対象物を検出する場合にもモデルを設定するだけで検出プログラムの製作が不要なこと、⑦そのモデル作製は容易なこと、などを述べた。

3次元計測の手法はレーザレンジファインダや光切断法など様々提案されているが、実際の工場の現場においては2台のカメラを使用する両眼ステレオ法が実用的である。すなわち、①レーザを使用することなどによる外部への遮光措置が不要なこと、②計測場所周辺の光の変化の影響を受けにくいこと、③モデルマッチングを行うカメラ系とのキャリブレーションが容易なこと、などである。

これらを踏まえて、対象物の表面に存在する固有の特徴3次元位置を計測して直接に対象物の3次元位置と姿勢を計測する方法を提案する。制約条件として、①対象物には表面に見え方の変化しない固有な特徴が3つ以上存在すること、②それらの特徴が既知であること、③それらの特徴の3次元的位置関係が変化しないこと、を設定した。ただしこれらの条件は鋳造部品に限らず筆者が扱う工業部品に一般的に対応する。さらに、鋳造部品には加工や位置決めに使用する穴や突起や凹みが多く存在することに注目し、物体認識のための固有な幾何学的な特徴として閉曲線を使用することとした。対象物の3次元的位置を決定するためには3点の位置計測が必要なので、3つの閉曲線をモデルとして使用した。

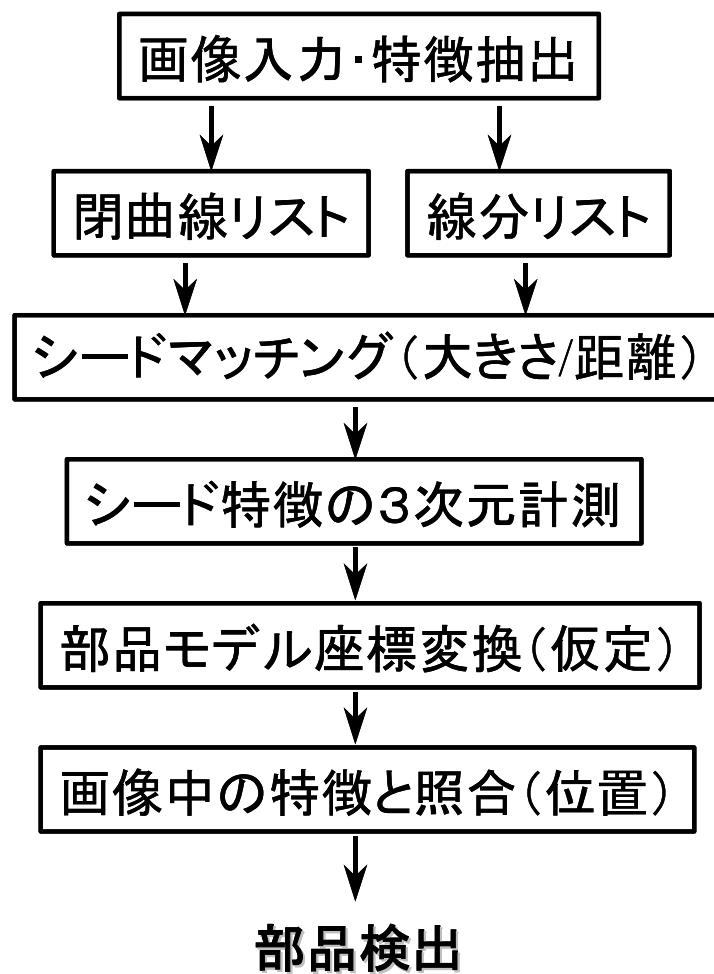


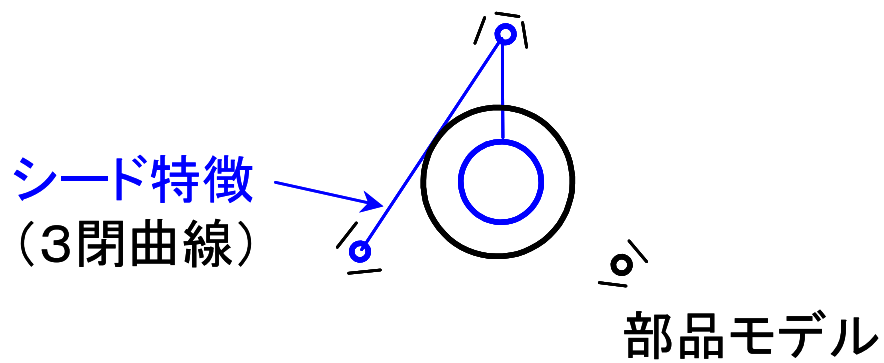
図4-34 閉曲線のマッチングによる部品位置同定のフローチャート

まず、第2章で述べたモデルマッチングのモデル作製と同様の手順で部品検出のためのモデルを作製する。①画像処理と認識に必要なパラメータをオペレータが設定し、②標準状態の認識対象物をカメラで画像入力する。③画像のエッジ検出と特徴抽出を行い抽出された閉曲線と線分をモニタに表示する。④オペレータが表示された特徴の中から3つの閉曲線を含む特徴を選択してモデルとして登録する。このとき同時に使用したパラメータを登録しておく。このモデルを使用した部品位置同定の手順を図4-34に示す。部品検出プロセスは、①画像を入力する。②モデル作製時と同一のパラメータを使用してエッジ抽出と特徴抽出を行う。③抽出された閉曲線とモデルの閉曲線との間でマッチングを行う。④一致した3つの閉曲線の位置か

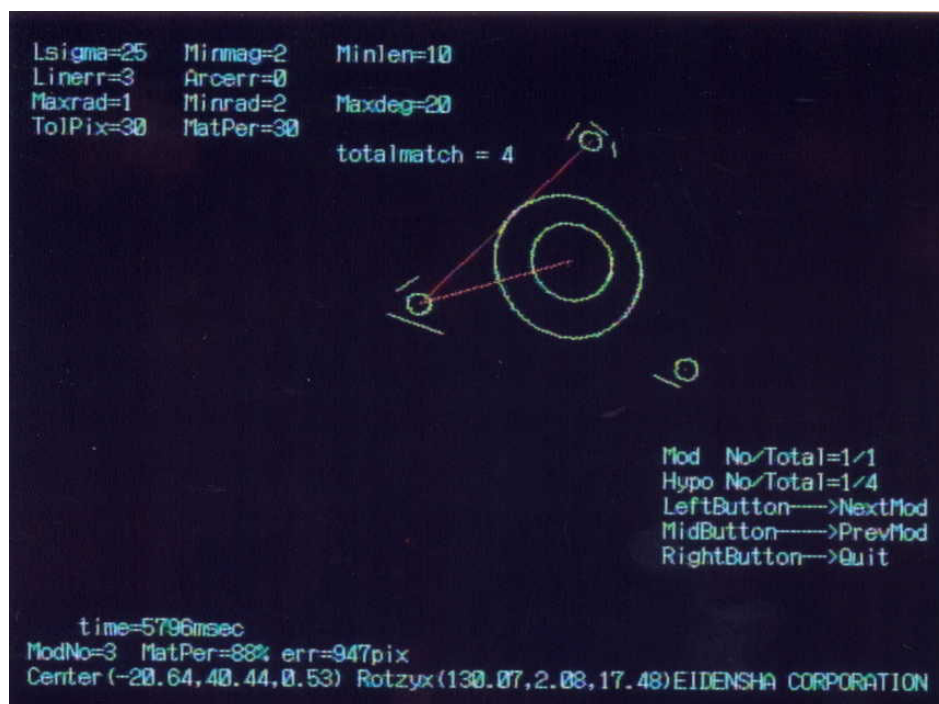
ら対象物の3次元的位置を計算する。⑤モデルのその他の特徴のマッチングを行い、⑥確認ができれば結果として位置と姿勢を出力する。

この方式のポイントは対象物に固有な特徴として閉曲線を使用したことである。これにより、鋳造部品を含む一般的な工業部品の表面に視認できる穴や溝や突起を固有な特徴として利用できるため、多くの工業部品の特定と位置決めに応用可能である。

次に、図4-35に示した部品モデルを使用した部品検出の手順を説明する。図4-35(a)は部品モデルの模式図で、部品検出の手がかりとする3つの閉曲線によるシード特徴とそのほかの特徴で構成されている。対象部品は鋳造部品で、ブラケットと呼ばれるモータのケーシングの部品である。部品モデルは外周部にある3つの取り付け穴を含む合計5つの閉曲線とアウトラインの9つの短い線分の組み合わせで表現されている。モデルの作製は、サンプル画像の特徴抽出結果からオペレータが適当な特徴を選択して行われる。また対象物位置決めに使用する3つの閉曲線の重心を2本の点線で結んである。図35(b)は二次元の表示だがモデルを構成する閉曲線と線分の各特徴のデータおよびこれらの位置関係は全て3次元のデータである。閉曲線は重心位置と共に閉曲線が囲む領域の面積と周囲長などの特徴量のデータを持つ。部品検出のプロセスは、まず入力画像から閉曲線を抽出した後にこれらの閉曲線の中からモデルを構成する個々の閉曲線に対応する閉曲線を選択する。モデルに対応する閉曲線を選択は閉曲線の特徴量つまり面積と周囲長の照合により行われる。次に、選択された閉曲線の3次元位置を両眼ステレオ法で計測し、個々の閉曲線の3次元位置を特定する。ステレオ法により距離計測を行う場合には計測点の決定と対応点探索の方法が重要な課題であるが、第3章で示したようにステレオ計測点を特徴抽出により得られる閉曲線上に設定することと、領域ベースの相関マッチングを行うことで対応点探索を行い三角測量法によってカメラからの距離を計測することとした。領域ベースのステレオマッチングは左右カメラ画像の画像処理が不要で直接対応点の探索できる利点がある。加えて計測点を閉曲線上に取ることで領域法を使用する場合に問題となる特徴のない領域の対応不可を回避した。



(a) モータ部品の部品モデル模式図



(b) 部品モデルのCRT表示例

図4-35 モータ部品の部品モデル

図4-36の黒点は抽出された閉曲線上に設定したステレオ計測点を示している。またステレオ法では相関値が低いことによる対応点探索の間違いを原理的に回避できないが、筆者は閉曲線が一つの平面を構成することに注目してこの点を削除する工夫をした。つまり、同一の閉曲線上に計測された複数の点を3次元平面に近似し、この平面と各計測点との距離を評価し、距離があらかじめ設定した値以上の場合にこの点を排除しさらに残った点で平面を求めることとした。これにより信頼できる計測点のみを使用した閉曲線のデータを得ることができた。

さらにモデルの閉曲線と計測された閉曲線のマッチングを行い、モデルの閉曲線組と位置関係が同一の閉曲線組を選択する。最後に対応した閉曲線組の位置データを使用して対象物の位置と姿勢を決定する。図4-37は検出された2つの対象物と、その閉曲線とこれらを結ぶ線分を示したものである。図4-38は、同じ部品が部品箱の中に入っているところを撮影したカメラ画像から対称部品検出したことを示す図である。

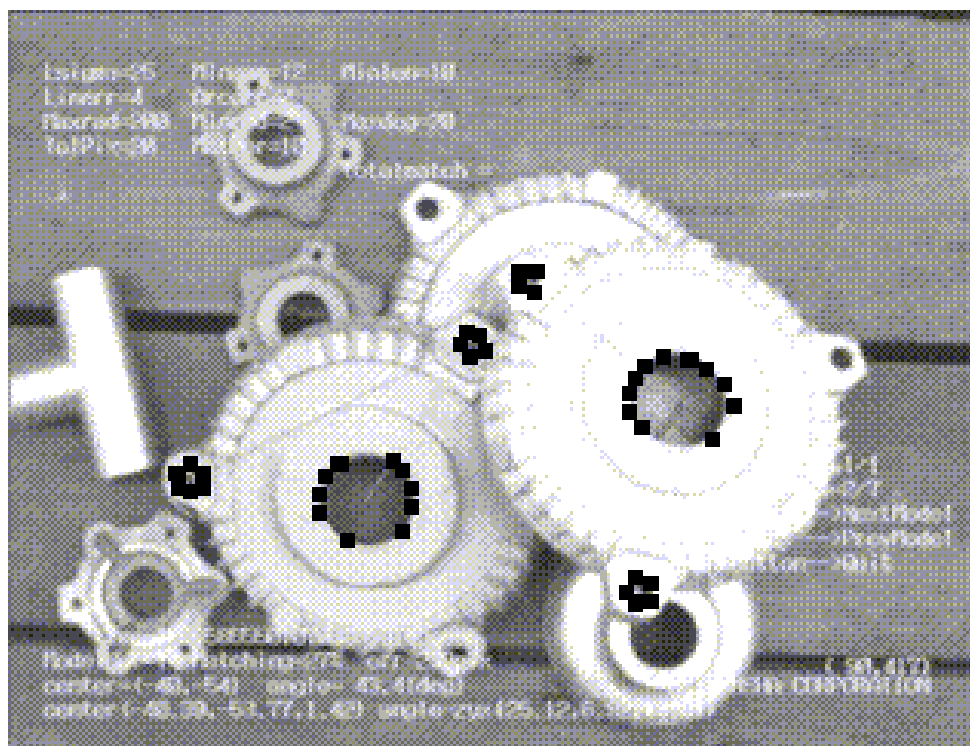


図4-36 ステレオ計測点（黒点）

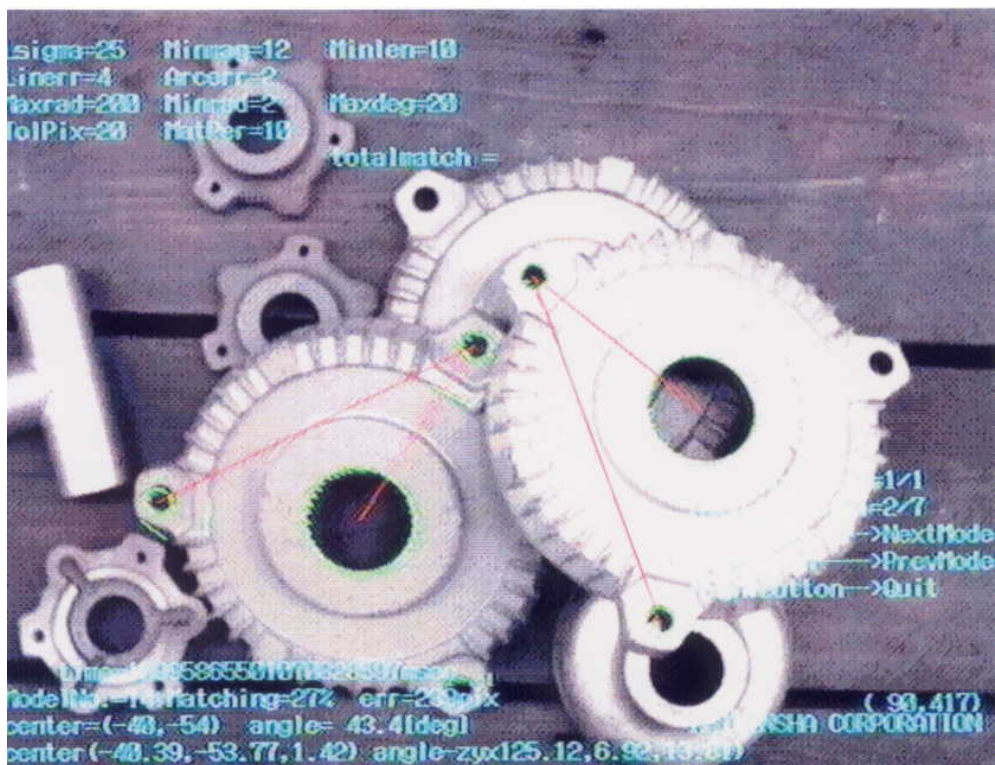


図4-37 モータ部品の検出結果表示

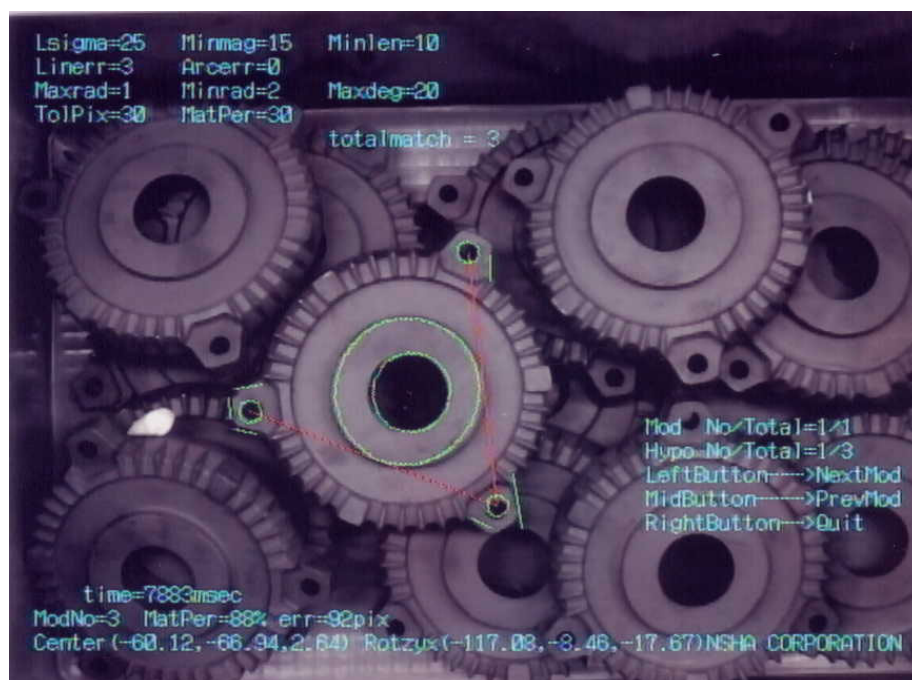
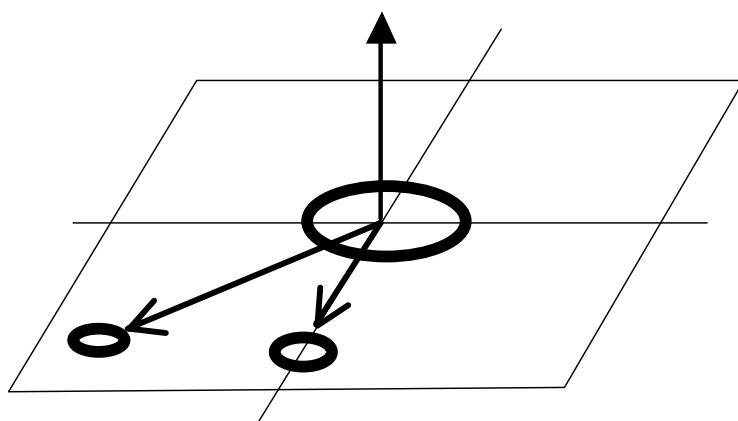


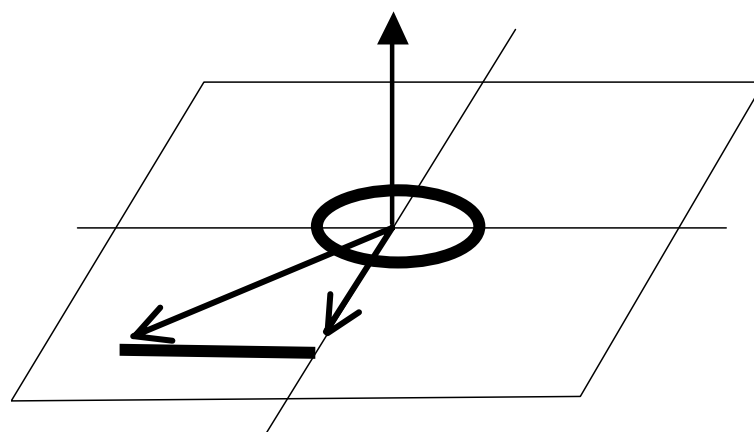
図4-38 部品箱の中のモータ部品の検出結果表示

4.5.2 そのほかの特徴組を使用した部品検出への拡張

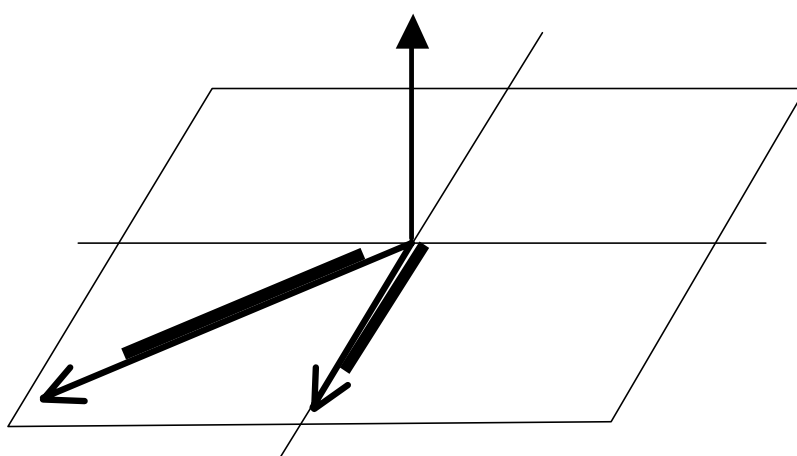
対象物のモデルを認識時と同一のパラメータで画像処理と特徴抽出した結果を元に作製する方式は、C A Dモデルを使用する他の方法の場合に問題となる実際の画像との見え方の相違がなく、特に表面状態や端面の状態が一定でない鋳造部品の認識に有用である。また、部品表面に3つの閉曲線を設定できない部品については、画像前処理の過程で抽出される線分を閉曲線とあわせて使用することにする。これによりさらに多くの種類の工業部品の位置同定が可能である。つまり、3つの閉曲線のかわりに、1つの閉曲線と1つの線分の両端点、または2つの線分の合計4つの端点の組み合わせでも、部品の三次元位置を同定することができる。図4-39は、これらの3つの部品位置同定の方法を図で示したもので、図4-40はそれぞれの方法に対応する実際の鋳造部品の例である。



(a) 3つの閉曲線の組み合わせによる部品位置同定



(b) 1つの閉曲線と1つの線分の組み合わせによる部品位置同定



(c) 2つの線分の組み合わせによる部品位置同定

図4-39 閉曲線と線分の組み合わせによる部品位置同定

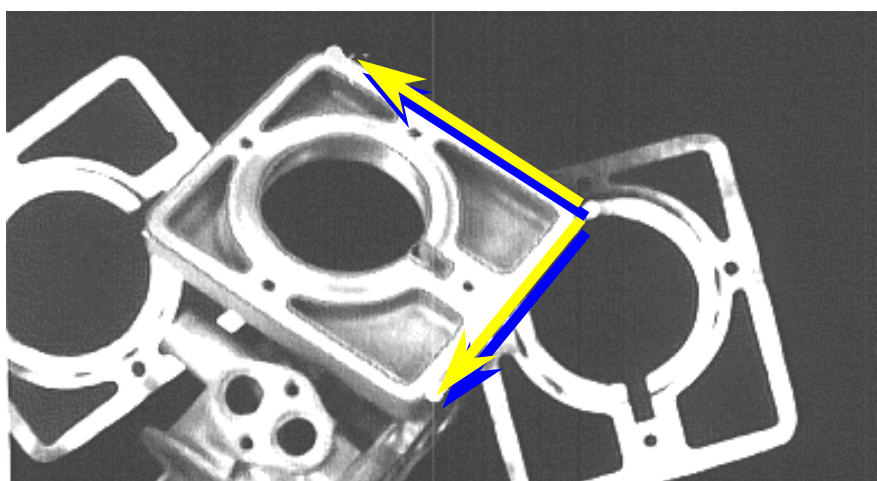
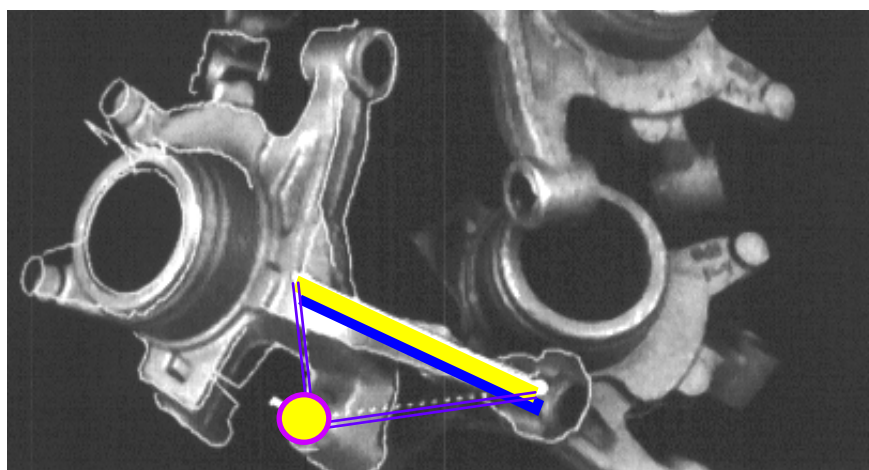


図4-40 閉曲線と線分の組み合わせによる部品位置同定

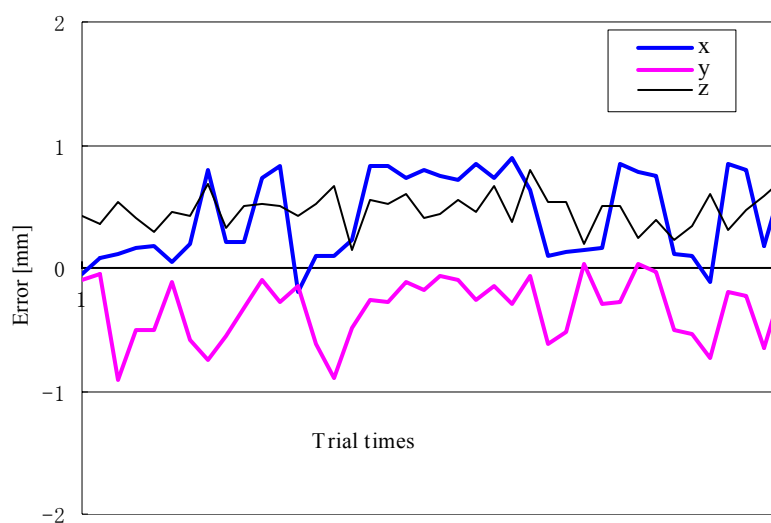
4.5.3 特徴組のマッチングによる部品位置同定実験

上述した3つの閉曲線を部品モデルとして使用する方法を用いて部品検出の実験を行った。実験の対象部品としては図4-35から図4-38で示した丸型のモータフランジを使用し、実験装置は4.3.3項で示したX-Yテーブルを使用して部品位置を設定する方法で行った。表4-1は、このときの計算結果とX-Yテーブルの設定値との差をまとめた表である。表の行は部品位置の設定値で、列はその設定位置における計算結果の誤差をまとめたものである。また、誤差のまとめとして部品検出の誤差の最大値と最小値を最下段にまとめた。これによれば、位置検出誤差の最大値は部品を90度回転させた時のzで-2.26mm、角度検出誤差の最大値はy方向に10度傾けた時のxで-3.16degであった。いずれも、ロボットによるハンドリング作業に適用することが可能な性能である。

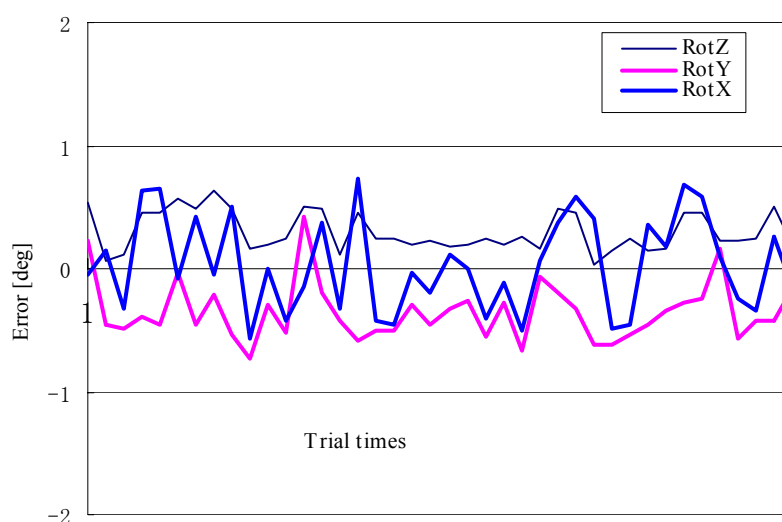
表4-1 丸型モータフランジの位置／傾き検出結果

部品の 移動量	検出 位置						
	x [mm]	y [mm]	z [mm]	角度 z [deg]	角度 y [deg]	角度 x [deg]	
原点	0.09 ~ -0.56	0.51 ~ -0.78	0.10 ~ -0.24	0.07 ~ -0.48	-0.04 ~ -0.32	0.13 ~ -0.37	
x+30y+00移動	0.82 ~ -1.32	1.52 ~ 0.12	0.01 ~ -1.03	1.04 ~ -0.01	0.66 ~ -1.16	0.78 ~ -0.58	
x-30y+00移動	0.45 ~ -0.30	0.49 ~ 0.21	1.89 ~ 0.74	0.64 ~ -0.10	0.74 ~ -0.16	0.94 ~ -0.90	
x+00y+30移動	0.45 ~ -0.60	0.72 ~ -0.83	0.48 ~ -0.47	0.70 ~ -0.19	0.88 ~ -0.65	0.84 ~ -0.61	
x+00y-30移動	0.89 ~ -0.15	1.91 ~ 0.96	1.80 ~ 1.14	0.63 ~ 0.04	0.43 ~ -0.73	0.73 ~ -0.57	
90度回転	~	~	-1.45 ~ -2.26	-0.16 ~ -0.37	-0.04 ~ -1.39	-1.91 ~ -2.36	
180度回転	~	~	-1.63 ~ -2.04	0.03 ~ 0.03	1.19 ~ -1.60	2.65 ~ -3.10	
z+30移動	~	~	-0.80 ~ -1.60	~	1.53 ~ -1.31	0.30 ~ -1.43	
z+60移動	~	~	-0.28 ~ -1.18	~	1.79 ~ -1.22	2.67 ~ 0.43	
z+90移動	~	~	0.18 ~ -0.25	~	0.11 ~ -0.22	1.32 ~ -1.53	
x+10度傾く	~	~	~	~	2.17 ~ -1.95	0.76 ~ -2.26	
y+10度傾く	~	~	~	~	1.58 ~ -1.73	0.05 ~ -3.16	
x+20度傾く	~	~	~	~	0.29 ~ -1.70	1.11 ~ -1.93	
y+20度傾く	~	~	~	~	1.49 ~ -1.94	1.76 ~ -0.11	
最大最小	0.89 ~ -1.32	1.91 ~ -0.83	1.89 ~ -2.26	1.04 ~ -0.48	2.17 ~ -1.95	2.67 ~ -3.16	

図4-41は、原点位置に対象部品を固定して部品検出を繰り返して行い、部品位置と傾き角度の計算結果の繰り返し誤差を測定した結果を示したものである。図の横軸は時間変化を示し、縦軸は検出誤差を示している。図を見ると、位置検出誤差はx, y, zの方向でそれぞれ1mm以内、傾き角度はx, y, zの方向でそれぞれ1deg以内であった。これらは、ロボットによるハンドリング作業に適用することが十分に可能な性能である。



(a) xyz方向の位置検出繰り返し誤差



(b) xyz方向の傾き検出繰り返し誤差

図4-41 部品位置計算と傾き角度計算の繰り返し誤差

本節では、部品表面に大きな穴も基準平面も存在しない一般的な形状の部品の検出について、部品表面に視認できる穴や凹みに注目し、これらを画像処理により閉曲線として抽出し、ステレオ計測を使用して3次元的な特徴マッチングを行う部品位置同定方法を提案した。穴や凹みを画像処理で閉曲線として抽出し、対象部品に固有な3つの閉曲線の3次元的な位置関係をもとに部品検出と位置同定を行う方法を基本とするが、部品の形状により1つの閉曲線と1つの線分を使用して部品を特定する方法と2つの線分を使用して部品を特定する方法への拡張についても述べた。さらに3つの閉曲線部品モデルとして使用した部品検出の実験を行い、位置と傾き検出の精度はそれぞれ2mm以内と3deg以内で、繰り返し検出精度はそれぞれ1mm以下と1deg以下であり、ロボットによるハンドリング作業に十分に適用可能であることを示した。

4.6 部品 3 次元位置同定の現場への適用

4.6.1 部品 3 次元位置同定方式の選択

前節までに、筆者は対象部品の個々の形状に対応した部品 3 次元位置同定の 3 つの方法を提案した。本節では、対象部品が与えられたときに、これらの方式の中から適当な一つを選択する手順について述べる。

筆者が扱う鋳造部品の多くはモータの構成部品であるため、ほとんどが円盤形状で一部に大きな円形の穴があいている。そこで、このように大きな円形の穴が視認できる部品は、カメラ画像中にこれを検出する方法、つまり 3 次元円検出による方法を用いる。この方法では、部品を 3 次元座標中に存在する一つの円で表現し、ステレオ計測を使用してその中心と法線ベクトルを計算することで部品の位置同定を行う。この 3 次元円検出の手順は、① 1 台のカメラから画像を入力し、エッジ検出処理によりエッジ画像を得る。②エッジ画像のエッジ点の連結状態を検査して閉じた点列を閉曲線として抽出する。③もう 1 台のカメラ画像を使用したステレオ計測により、閉曲線上の全ての点の 3 次元位置を計測する。④計測した閉曲線上の点群を 1 つの平面に近似する。近似した平面の法線ベクトルは最終的に検出される 3 次元円の法線ベクトルである。⑤近似した平面上に閉曲線上の計測点を投影し、投影された点群をその平面上で円に近似する。この近似円の中心は 3 次元円の中心位置である。

円形の穴がない部品の場合でも、加工や位置決めに使用するための部品基準平面を持つ部品に関しては、この基準平面を構成するキー溝や穴を幾何学的な特徴として画像処理により検出してステレオ計測を行い、これらを平面に近似することにより基準平面を計算する方法を用いる。基準平面計算による部品位置同定の手順は、①画像を入力し、②エッジ抽出と特徴抽出を行い、③モデルマッチングにより基準平面を構成する特徴を検出し、④特徴上の点のステレオ計測を行い、⑤計測点を 3 次元平面に近似する計算を行うことにより、基準平面を計算する。

また、部品表面に円形の穴も基準平面もない部品の場合は、鋳造部品には加工や

位置決めに使用する穴や突起や凹みが多く存在することに注目して、部品位置同定のための固有な幾何学的な特徴として閉曲線を使用し、対象物の表面に視認できる閉曲線の3次元位置を計測して直接的に対象物の3次元位置と姿勢を同定する方法を用いる。この場合、①対象物には表面に見え方の変化しない固有な特徴が3つ以上存在すること、②それらの特徴が既知であること、③それらの特徴の3次元的な位置関係が変化しないこと、が条件であるが、これらの条件は鋳造部品に限らず筆者が扱う工業部品に一般的に対応する。この場合の部品位置同定の手順は、①画像を入力する。②エッジ抽出と閉曲線を含む特徴抽出を行う。③抽出された閉曲線とモデルの閉曲線との間でマッチングを行う。④一致した3つの閉曲線の位置から対象物の3次元的な位置を計算する。⑤モデルのその他の特徴のマッチングを行い、⑥確認ができれば結果として位置と姿勢を出力する。

図4-42は、上述した部品検出方式の選択の流れを図で示したものである。部品表面に視認できる特徴がない部品については、提案した3つの方法を適用することができないが、距離画像を使用する方法や鏡面反射を使用する方法など、そのほかの方法を考えるものとする。

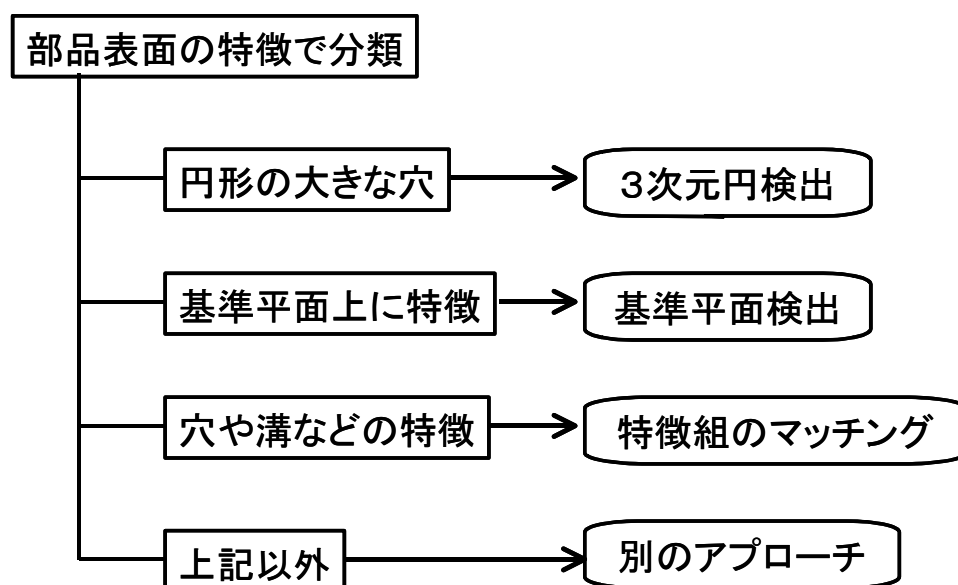


図4-42 部品検出方式の選択フロー

4.6.2 作業現場への適用プロセス

本項では、前節までに提案した部品 3 次元位置同定方法を使用した視覚ベースのハンドリングシステムを実際の現場へ適用する時の導入の流れを説明する。

1) まず、対象となる部品を観察して、対象部品がロボットの前面に供給される状態とあわせて検討し、部品検出方法を決定する。本研究で提案した 3 つの部品検出方法の選択方法は 4.6.1 項で述べたが、現場ではこれらの方法に限定することなく、第 2 章で述べた 2 次元のモデルベーストマッチングやその他の一般的な画像処理の方法を含む方法の中から、適当な方法を選択するべきである。ただ、本研究の成果として新しく部品 3 次元位置同定の方法が提案されたことにより、筆者が関係する工場で使用される大多数の部品について、ハンドリング作業が可能になった。

2) 次に、部品検出に使用するカメラを設置する。つまり、部品箱や作業現場に合わせてカメラとレンズを設計して画像の視野 (FOV: Field Of View) を設定し、照明や遮光措置などの計測環境の整備を行い、画像処理テストにより画像前処理のパラメータを調整する。一般的な画像処理を使用する方法では、計測環境の整備と画像処理パラメータの調整に多くの時間を必要としていた。しかしながら、本研究で提案した方法を使用すれば、第 2 章で述べた特徴抽出の工夫と特徴ベースのマッチングの効果で計測条件の変動の影響を受けないので、計測環境の整備と画像処理パラメータの調整が容易になった。

3) 次に、モデル作製を行い、部品検出テストにより確認を行う。ただし、3 次元円検出の方法を使用する場合は、3 次元円の半径と検出の許容値を設定するだけでモデル作製が完了する。それ以外の方法を使用する場合は、対象部品のサンプルを実際の現場に置いて画像前処理を行い、特徴抽出の結果表示される特徴からモデルとして使用する特徴をオペレータが選択することでモデル作製が行われる。部品検出の安定性や精度を確保するためにどの特徴を選択すべきか、シードフィーチャとしてどの特徴を使用すべきかなど、オペレータのスキルに依存する部分もあるが、部品のおおよその形状を表現する特徴を選択することは難しくない。

4) 画像処理による部品検出ができれば、あとの流れは一般的な画像処理を使用するときと同じである。つまり、ロボットとの調整を行い、システムの動作と機能確認を行ってから、実際に運用を開始する。ロボットとの調整とは、ロボットコントローラと画像処理装置との間の通信手段の確保、データ形式とプロトコルの調整、カメラ座標系とロボット座標系とのキャリブレーション、例外処理の設定、等々がある。このプロセスは、座標系の調整が3次元になることを除けば、一般的な画像処理を使用した視覚ベースハンドリングシステムの調整プロセスと同じである。

図 4-43 は、上述したシステム導入のプロセスを図で示したものである。本研究の成果により、1.4 節で述べた要求仕様のうち、現場に適用する時の課題であった計測条件の変動が避けられないことと新規部品検出の設定変更が容易でなければならないこと、の2点が解決された。つまり、独自の工夫による再現性良い特徴抽出により計測環境整備とパラメータ設定が容易になったこと、新規部品の設定は特徴モデルの作製で容易に実現可能であることは、実用上の大きな利点である。

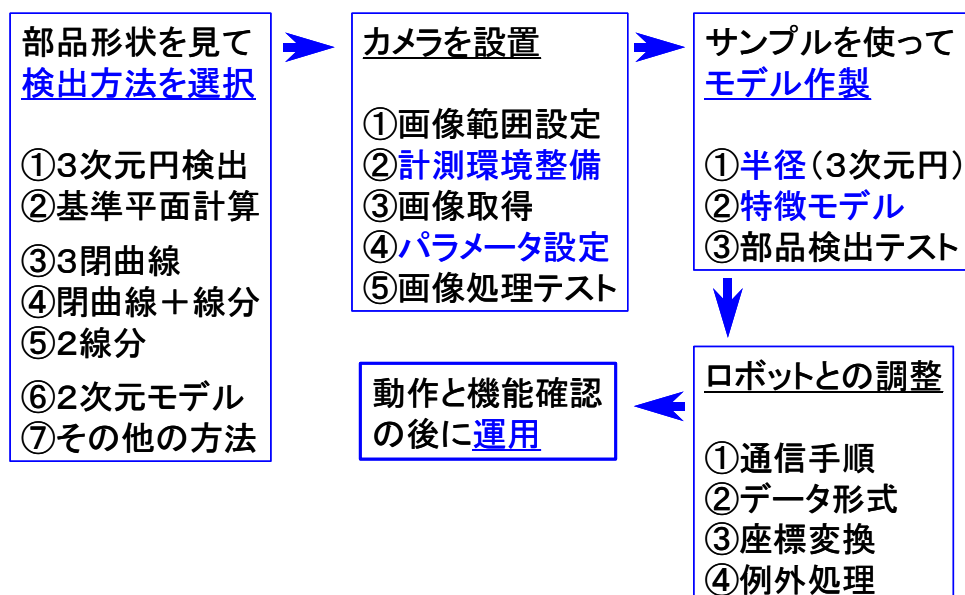


図4-43 ハンドリングシステム導入のプロセス

4.6.3 ハンドリングシステムの構成

図4-44は、ハンドリングシステムのシステム構成図で、システムはマニプレータとロボットコントローラおよび視覚システムで構成される。マニプレータは6自由度垂直多関節型の産業用マニプレータで可搬重量は20kg、把持部は電動の平行リンクのハンドで握力最大値は30kgである。ロボットコントローラはティーチングブレイバック制御を行うものであるが、対象部品の把持位置だけは視覚システムからのデータにより決定する。ロボットコントローラと視覚システムとの間は通信回線で接続されており、データのやりとりはこの通信回線を介して行う。

このシステムの動作は以下に示すとおりである。まず、ロボットコントローラは部品をハンドリングするときに画像処理装置に対して部品検出のリクエストを送信する。画像処理装置はこの要求を受けて、部品検出のプロセスを開始する。つまり、カメラ画像を入力して画像中に対象部品を検出し、部品検出のアルゴリズムでその位置と姿勢を計算し、その結果をロボットコントローラに出力する。ロボットコントローラはこのデータを使用してマニプレータを部品の位置まで移動させ、これを把持する。

視覚システムはロボットコントローラの計測指令を受けてから画像を入力し対象物の位置と姿勢を検出してデータを送るもので、これを受けてマニプレータがその位置に移動して対象物を把持する。

視覚システムは2台のモノクロCCDカメラと画像認識装置で構成した。2台のカメラは対象物が供給される場所の上方にステレオ計測をするのに適当な間隔で設置する。ステレオ計測の精度を確保するためには2台のカメラの間隔が大きい方がよいが、間隔が大きいと対象物の見え方が変わるので領域相関法による対応点探索時に相関値が低下して対応間違いの原因となる。照明に関しては、筆者の提案したエッジベースの特徴マッチングは計測条件の変化の影響を受けにくい利点があるので、計測のための遮光措置や特殊な照明は使用せず天井の蛍光灯の環境下で作業を行うことを基本としている。画像認識装置は、2.5節で説明したVMEボード

のコンピュータシステムで2台のカメラの他に表示用のモニタとパラメータ設定に使用する端末が接続されている。本章で示した画像認識の処理は全てこの画像認識装置が実行する。

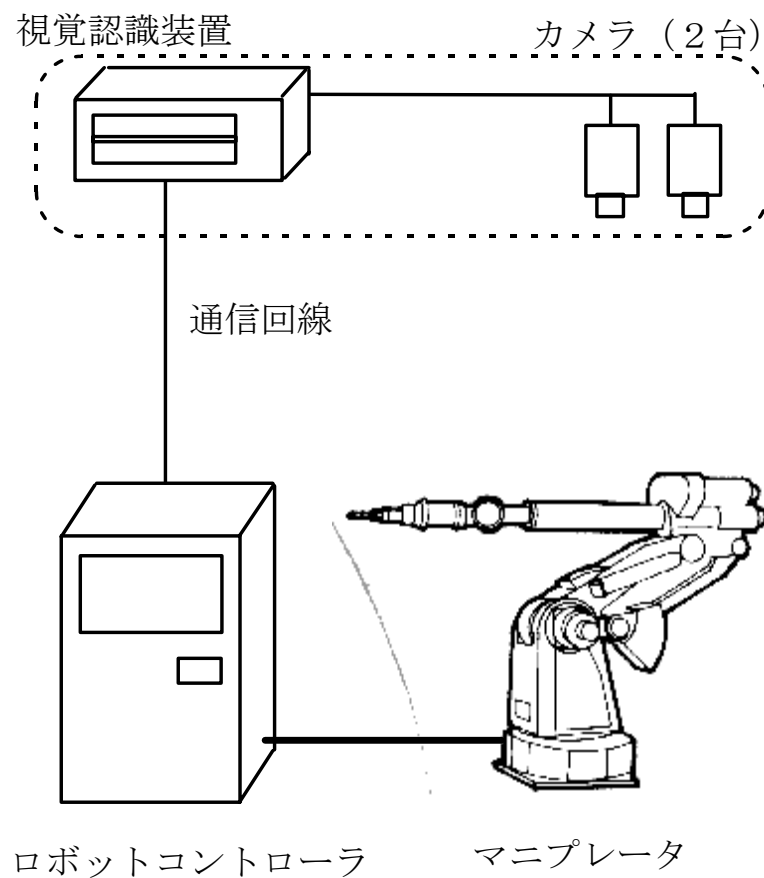


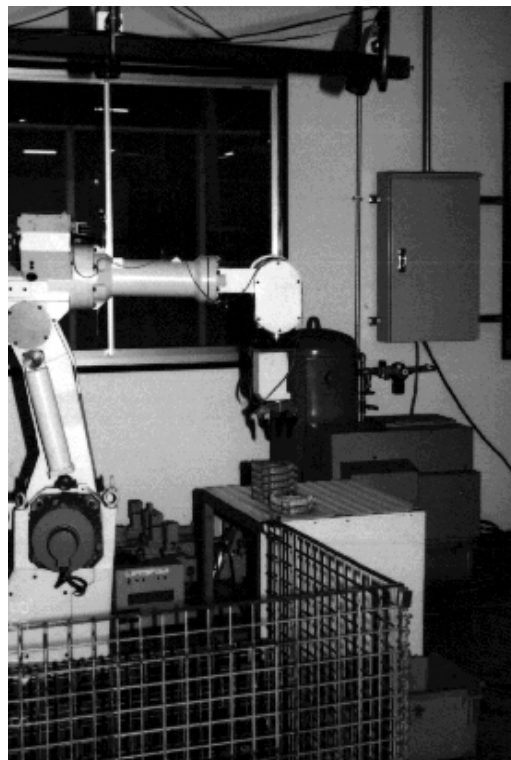
図4-44 ハンドリングシステムの構成図

ところで、通常のロボットコントローラは鋳造部品を把持するためには部品の位置として、部品の把持位置と把持姿勢の情報に加えてどの方向から部品を把持に行くべきかを表すアプローチベクトルが与えられなければならない。通常、アプローチベクトルは基準平面と垂直な方向、つまり基準平面の法線ベクトルと同じ方向なので、画像処理装置は、検出した部品の把持点の3次元位置を計算し、基準平面の傾きで部品の傾きを表現し、その後に法線ベクトルの計算を行う。ただし、アプローチベクトルは法線方向の単位ベクトルなので、計算が必要である。基準平面の方程式を(4.6)式とし、係数 a, b, c が求められているとすれば、法線ベクトル (x_a, y_a, z_a) は(4.8)式で表すことができる。

$$\begin{aligned} x_a &= \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \\ y_a &= \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad \dots\dots\dots (4.8) \\ z_a &= \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}. \end{aligned}$$

このようにして、ロボットコントローラは部品の位置と姿勢を知ることができるのでマニプレータはスムーズに部品を把持することが可能になった。

図4-45(a)は、システムを適用した作業現場の写真である。手先に平行リンクの電動ハンドを取り付けたマニプレータとその前面に供給されたカゴ型パレットである。図4-45(b)は、パレット上部に設置したカメラの写真で、床から1600mm上方に600mm間隔で2台のCCDカメラを使用した。カメラ視野はワーク供給位置でおよそ500mm×500mmである。カゴ型パレットの寸法は1200mm×1200mm×1200mmで内部には図4-46のように加工の対象部品である鋳造部品のモータブラケットが山積み状態になっている。モータブラケットは直径150mm厚み25mmの円盤形状で周辺部に3ヶ所の取り付け穴があり閉曲線として抽出可能である。作業現場の明るさは一定でなく約500-2000luxで変化する。図4-47は視覚システムが検出した部品をマニプレータが把持しているシーン、図4-48はハンドリングした部品を作業台上に整列して積み重ねているシーンである。整列され位置決めされたブラケットは次工程のロボットにより把持され加工機械に投入される。



(a) 作業現場の写真 (b) 上部に設置したカメラ
図4-45 ハンドリングロボットとカゴ型パレット



図4-46 カゴ型パレット内のモータ部品

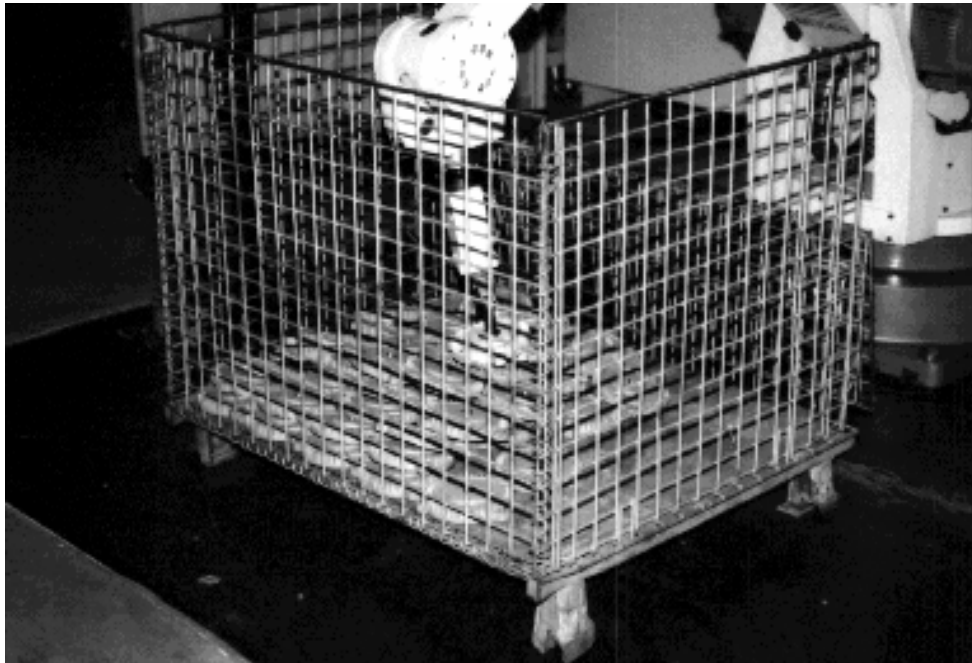


図4-47 ハンドが部品を把持中

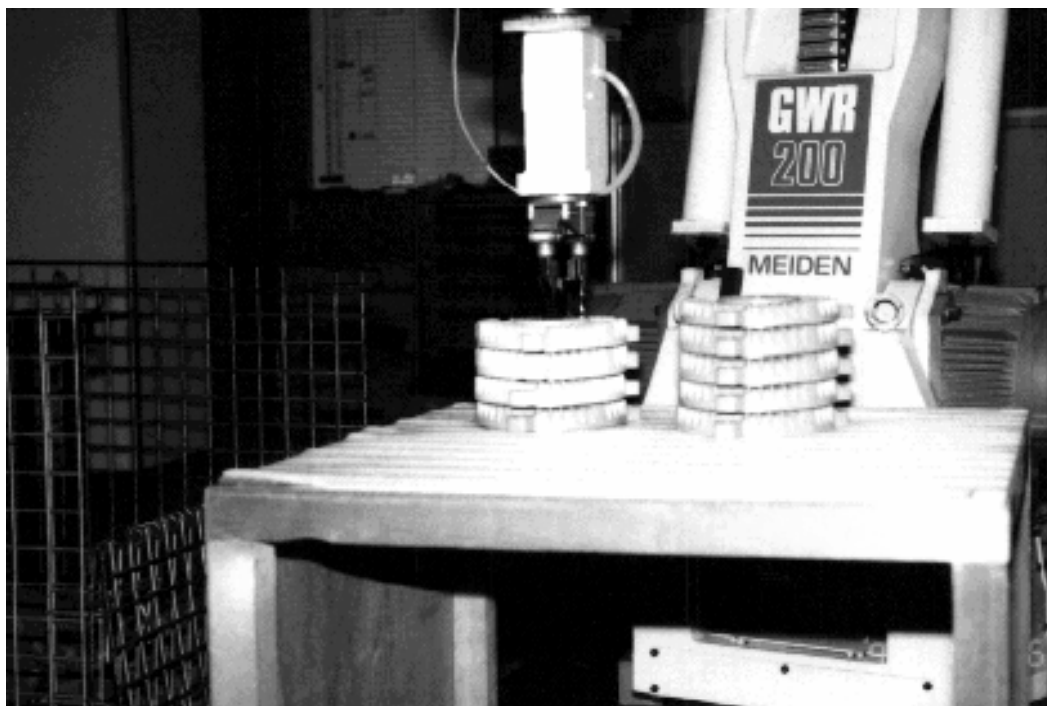


図4-48 モータ部品の整列作業

4.7 結 論

本章では、ハンドリング作業の自動化要求に応えるための、工業部品の3次元位置同定について、対象部品をその形状により3つに分類し、各分類の部品形状の分析を行い、それぞれに対応する適当な3つの方式を提案した。

第1の方法は3次元円検出による部品位置同定方法で、部品表面に大きな円形の穴が開いている部品の検出が可能である。この方法は、後述する2つの方法と比べて計算処理が単純なので、短時間に複数の部品検出が可能である。第2の方法は基準平面検出による部品位置同定方法で、部品表面に大きな穴はなくても基準平面があり、この基準平面上に視認できる特徴が存在する部品に適用できる。第3の方法は特徴組のマッチングによる部品位置同定方法で、部品表面に取り付け穴やキー溝などの特徴的な箇所が見える一般的な工業部品に広く適用できる。いずれの方法も、特徴モデルを使用してカメラ画像中に対象部品を検出し、部品を構成する特徴の3次元計測を行うことにより部品の位置と姿勢を計算した。これら3つの方法を使い分けることにより、鋳造部品を含む一般的な工業部品の表面に視認できる穴や溝や突起を固有な特徴として利用して、多くの工業部品の特定と位置同定に適用可能となった。また、3つの方法を個別に適用した部品位置同定の実験を行い、その結果位置検出精度が1-2mm以内、部品傾き検出精度が1-5deg以内であり、提案した方法により検出した部品をハンドリングロボットで把持可能であることを示した。

さらに、提案した部品位置同定方法を実際の現場に導入する時のプロセスを対象部品に適当な部品検出方法の選択フローとともに示し、本研究の成果が、調整時間の短縮を含む現場からの要求に応える実用上の利点があることを述べた。

第5章 ビンピッキング作業の実現

5.1 緒 論

図5-1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、1.3節で示したように画像処理応用の立場で多くの研究報告がある。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、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、オペレータは手動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。



図5-1 カゴ型パレット内のプーリ

そこで筆者は、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て異常を検出し、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。

本章では、筆者の提案したビ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3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、について説明し、箱の中に存在する全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述べる。

5.2 ロボットシステムとビンピッキング動作

筆者は、ビ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、ビ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3つのサブシステムで構成した。ビジョンシステムは対象物の3次元的な位置と姿勢を決定するために、第4章で提案した3つの方法のうち3次元円検出による方法、つまり、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3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時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、ビ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ビ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3つのユニークな機能を持つこととなった。第一はモータの構成部品など円盤形状の鑄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3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。

ところで、今回のビ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筆者の関係する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ビ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。鑄造部品に限らずビ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、この穴はマニプ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、画像前処理により入力画像から抽出する3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3次元位置と姿勢を検出するものである。
- 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。

5.3 3次元円検出による部品位置同定

部品の位置同定は、4.3節で提案した3次元円検出の手法で行う。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3次元位置を計測し、閉曲線がのる3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3次元円を検出する。エッジ検出は2.2節で示したLOGフィルタ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易い細く鋭いエッジが得られる利点がある。図5-2は対象部品であるプーリの3次元円のモデルを示したものであり、図5-3は3次元円検出のフローチャートである。3次元円検出の詳細な手順については4.3節で述べたので、ここでは省略する。

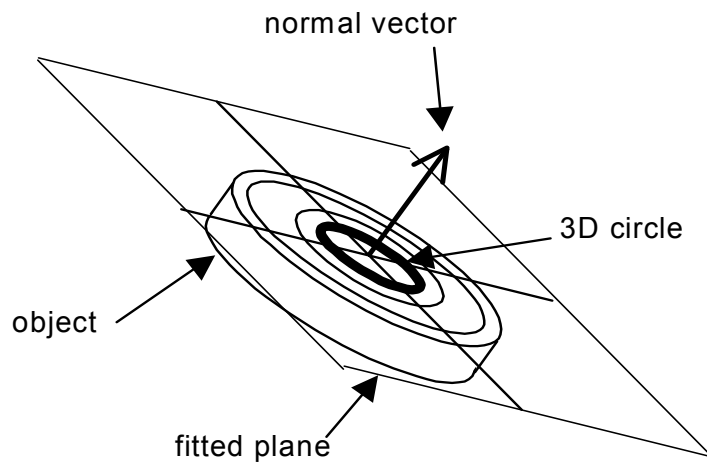


図5-2 プーリの幾何学モデル

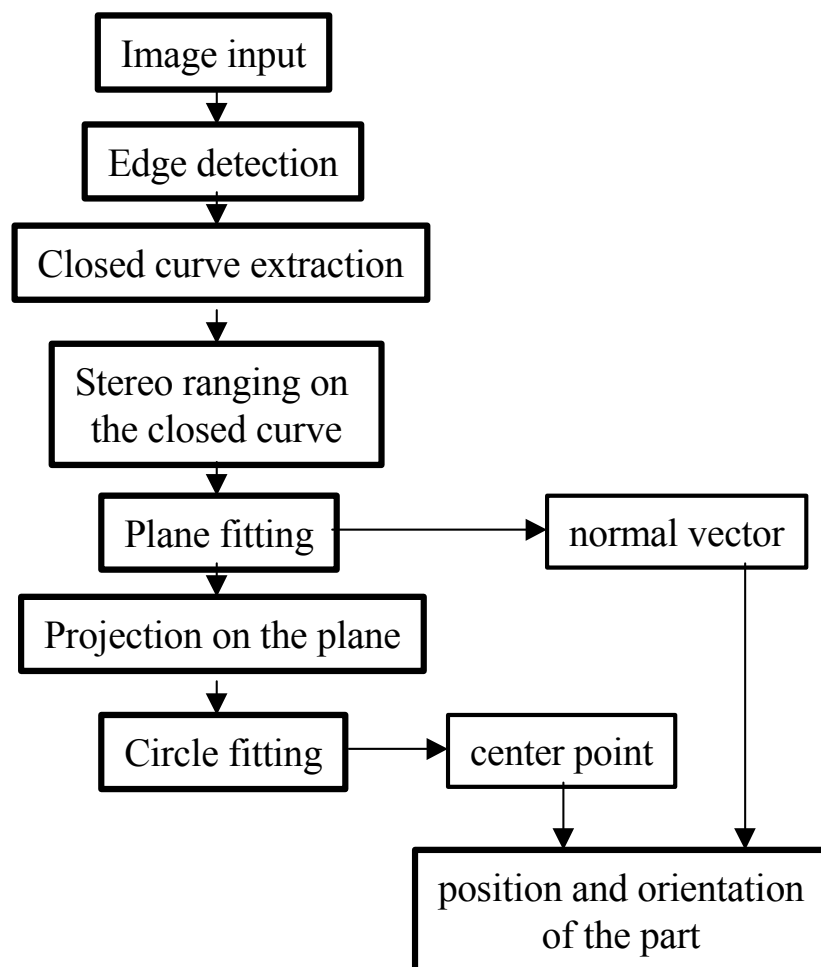


図5-3 3次元円検出のフローチャート

5.4 ラインを停止させないロボット側の工夫

ビ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（3次元円）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否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、この時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。図5-4は、ハンドを含むマニプレータとA、B、Cの3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。図5-5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全ての球と全てのビームの各々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、全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 との関係が、

$$\begin{aligned}
 x_{\min} + r_c &\leq x \leq x_{\max} - r_c \\
 y_{\min} + r_c &\leq y \leq y_{\max} - r_c \\
 z_{\min} + r_c &\leq z
 \end{aligned}
 \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

または

$$\begin{aligned}
 x &< -r_c, x_{\max} + r_c < x \\
 y &< -r_c, y_{\max} + r_c < y \\
 z_{\max} + r_c &\leq z
 \end{aligned}
 \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

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。

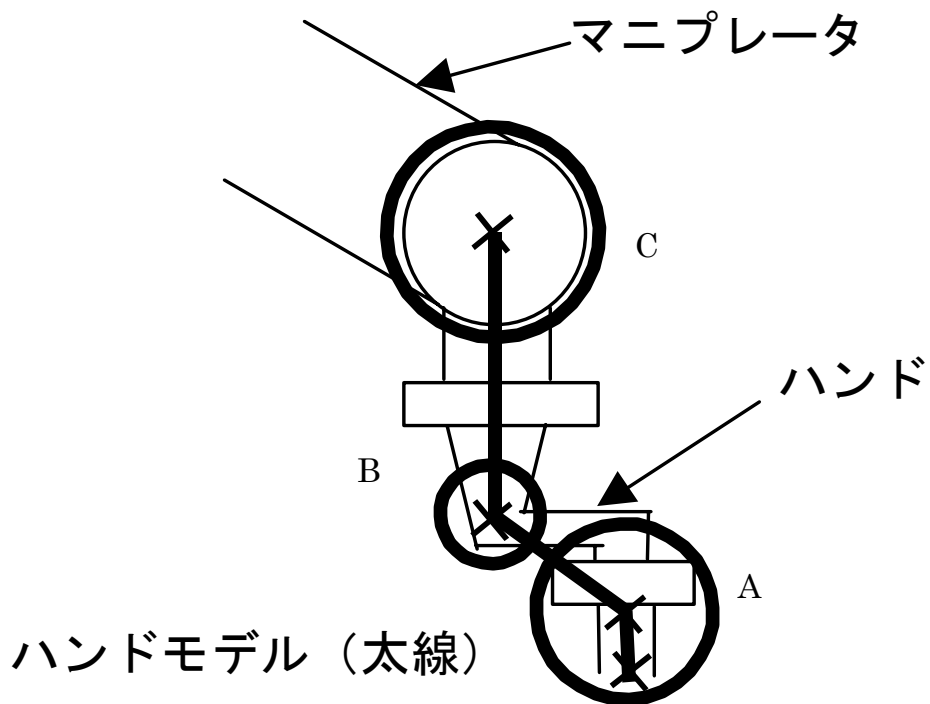


図5-4 ハンドとハンドモデル (太線)

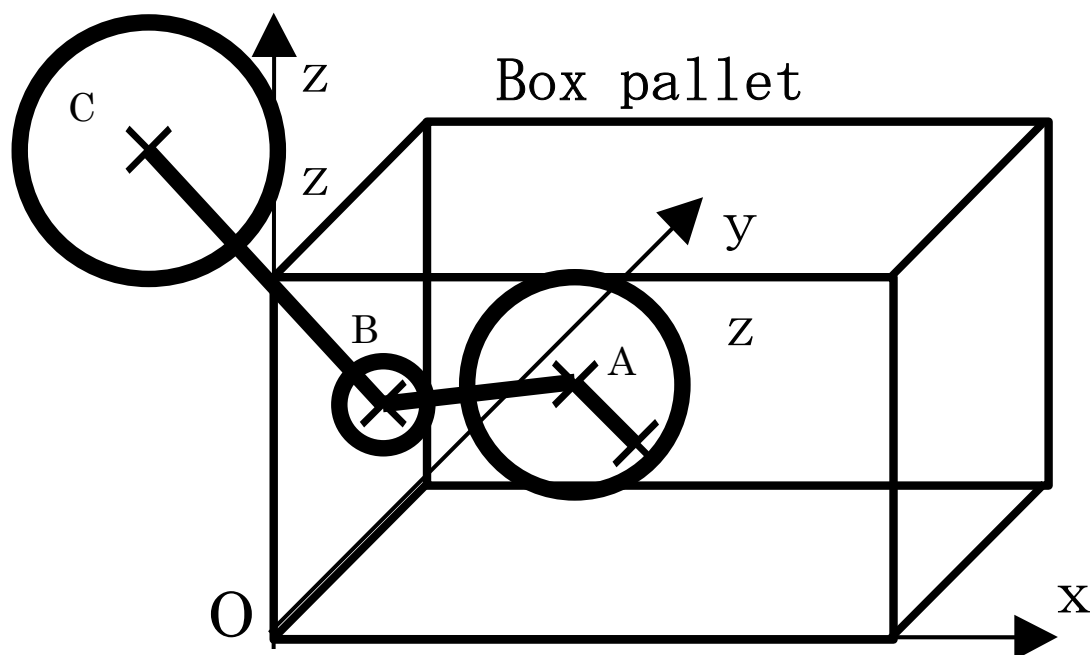


図5-5 部品箱とハンドの干渉チェックの模式図

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。

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一旦停止し、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。図5-6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。

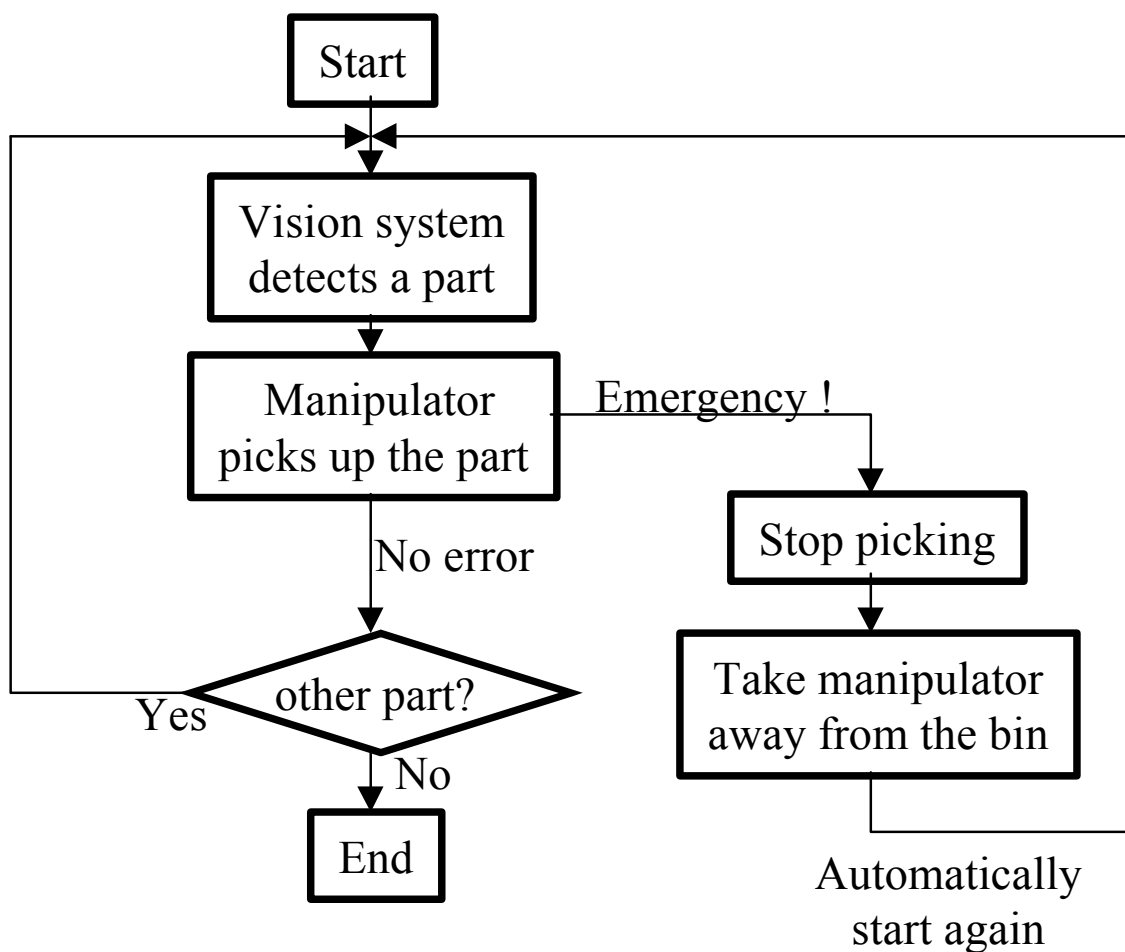


図5-6 自己復帰とリトライのフローチャート

5.5 ビンピッキング作業実験

図5-7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、3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。図5-8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400mm×400mm×800mm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170mm×厚み40mm）を、カメラ高さ2300mm、カメラ間隔600mm、カメラ視野800mm×600mm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。図5-9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、図5-10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を撮影した写真である。

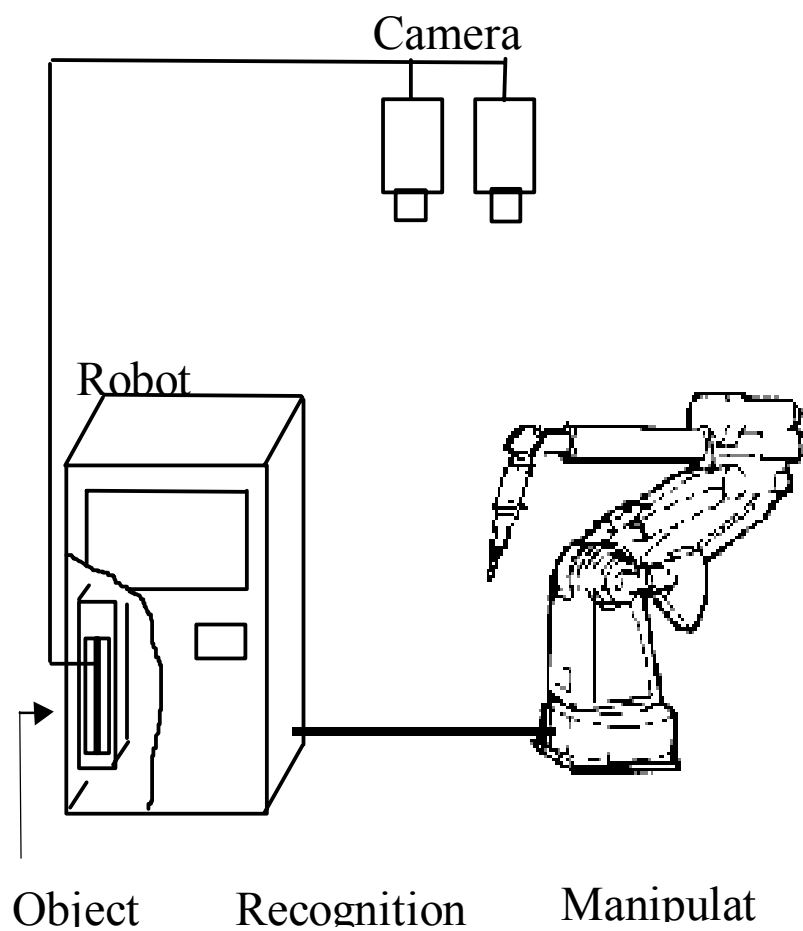


図5-7 ビンピッキングシステムの構成図

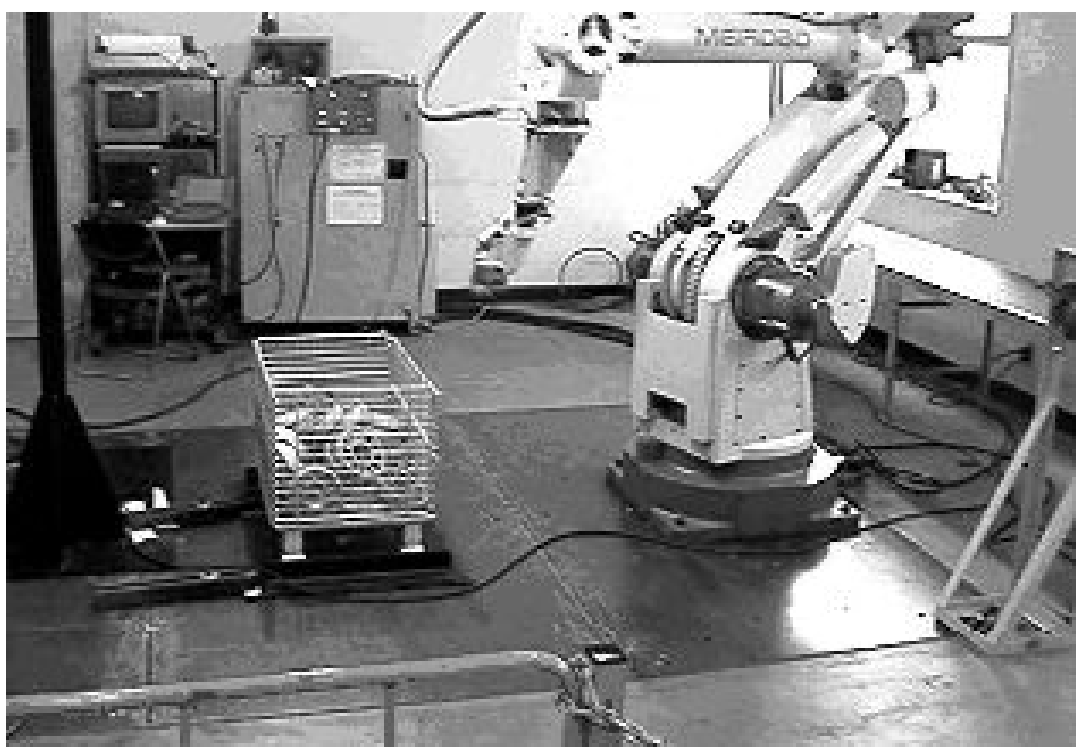


図5-8 ビンピッキング作業：画像処理中

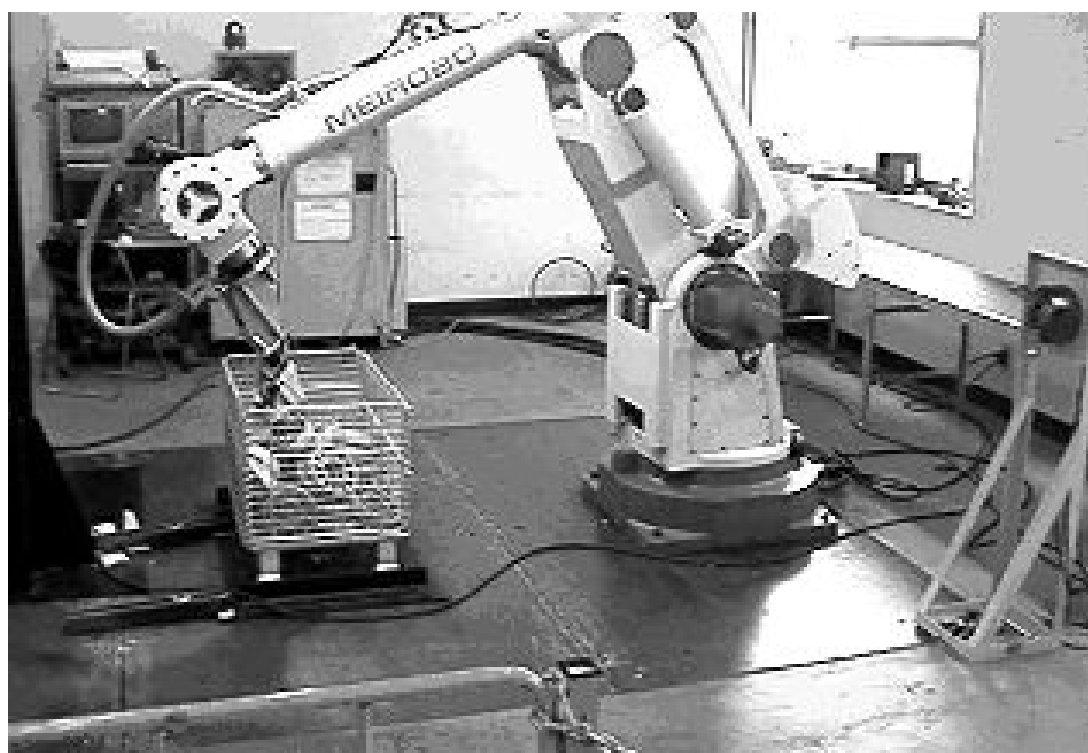


図5-9 ビンピッキング作業：部品把持中

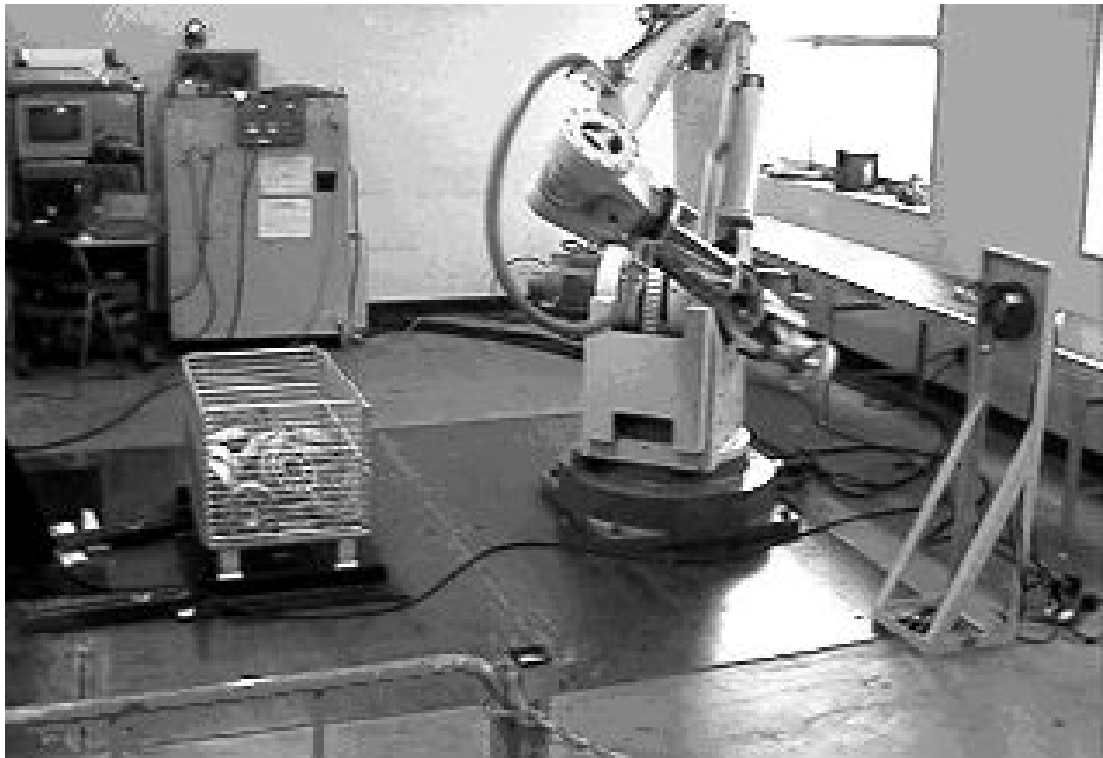


図5-10 ビンピッキング作業：加工機械へのセット動作中

図5-11から図5-13はハンドが部品を把持する動作を撮影した写真である。図5-11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。図5-12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、3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。図5-13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。

表5-1は、ビンピッキングシステムが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に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2.5節で示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。

表5-2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全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、3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4つの部品候補の中からハンドの干渉が起こ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等によりハンドが部品を把持できなかった時も、マニプレータを一旦退避させて次には部品を把持し、最終的に全ての部品を加工機にローディングすることができた。



図5-11 段積み状態の部品を把持

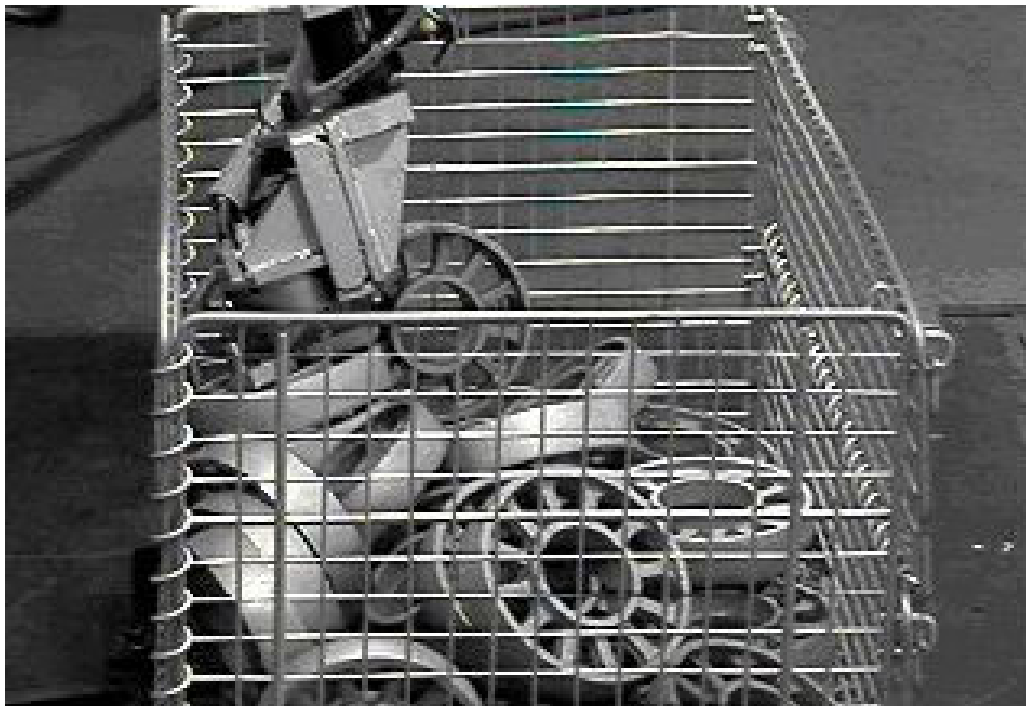


図5-12 カゴ型パレット内の周辺部の部品を把持

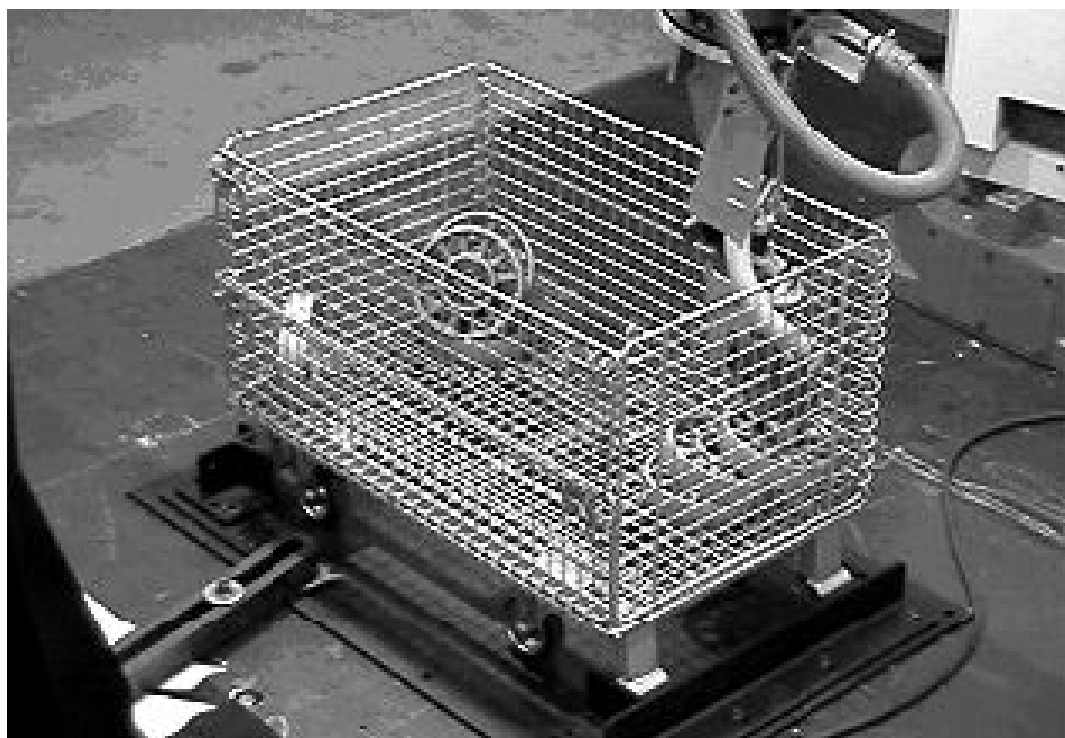


図5-13 カゴ型パレット内のコーナー部の部品を把持

表5-1 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

表5-2 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%

5.6 結 論

本章では、筆者が提案した画像処理による部品 3 次元位置同定方法を使用したビンピッキングのシステムとその動作について検討した。まず、ロボットシステムの構成とビンピッキング動作を説明し、3 次元円検出による部品位置同定のプロセスを示した。さらに、ビンピッキング作業を実現するためのロボット側の工夫として、把持動作時の事前の干渉チェック、異常状態のセンシング、異常発生時の自己復帰シーケンスの対策を説明し、作業実験の様子を示した。

これらの工夫により、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 3 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。

第6章 結 論

本論文は、筆者が行ってきた工業部品のハンドリングのための画像処理に関する研究成果をまとめたものである。その主眼とするところは、工場内において産業用マニピレータの前面に部品箱に入れられて供給される鑄造部品の3次元位置同定の方法を、実際の工場内で使用できる技術として確立することである。この目的の実現のために、本論文ではビンピッキングのために必要な画像処理技術の要求仕様の分析を行い、これに基づくモデルベーストマッチング法による部品検出と両眼ステレオ法による3次元計測とこれらを組み合わせた部品3次元位置同定方法の検討を行った。さらに提案した部品3次元位置同定方法を使用した部品ハンドリングシステムを構成し、ロボット側でもラインを停止させないための工夫を施してビンピッキング作業を実現した。

本論文の前半では、カメラ画像中に部品を検出する方法としてモデルベーストマッチング法を導入し、精細なエッジ画像の取得方法とその高速化、再現性良い線分と円弧の抽出方法とその高速化、閉曲線の抽出方法、および特徴ベースのモデルマッチングの具体的な方法を提案した。また、3次元計測の方法として両眼ステレオ法を導入し、領域相関法による精度の良い対応点探索方法のための計測点の設定と相関式の選択、対応間違えを排除する再帰的平面近似と2段階ステレオマッチングを含む高精度ステレオ3次元計測の具体的な方法を提案した。

本論文の後半では、特徴ベースのモデルマッチングを使った部品検出と高精度ステレオ3次元計測を組み合わせた部品3次元位置同定の3つの方法を提案した。第一の方法は3次元円検出による部品位置同定で、部品表面に大きな円形の穴がある部品に適用できる。第二の方法は基準平面計算による部品3次元位置同定で、部品の基準平面がカメラ画像中に視認できる部品や状況に適用できる。第三の方法は特徴組のマッチングによる部品位置同定で、部品表面に穴や凹凸など特徴的な部位が複数存在する部品に適用できる。さらに、3次元円検出による部品位置同定を使用してビンピッキングシステムを実現し、提案した部品位置同定方法の有効性を示した。

以下に本論文の主要な成果を要約する。

- 1) まず、ビンピッキングのための画像処理に対する要求仕様を分析し、その実現のための課題を整理した上で、本研究における研究課題について述べた。つまり、本研究における画像処理の目的がカメラ画像中の対象部品の検出とその部品の位置と姿勢の計測であり、対象部品は形状が既知で変形しないがその位置と姿勢は3次元的に未知で、部品箱の中で山積み状態で存在するのでカメラ画像中に同一形状の部品が複数存在する、という技術的な課題と、導入コストと運用コストが一定以下でなければならない、タクトタイムの時間内に画像処理を完了させ、部品検出の正確さと一定の精度の確保が必要なこと、計測環境を整備するがある程度の計測条件変動が避けられないなどの実用上の制約条件を総合的に分析した。その結果を踏まえ、本研究の研究課題として、①モデルベーストマッチング法を使用した安定した部品検出の実現、②両眼ステレオ法を使用した高精度ステレオ計測の実現、③改善されたモデルベーストマッチング法と両眼ステレオ法を結合した新しい部品の3次元位置同定方法の実現、④この画像処理を使用した部品3次元位置同定技術を使用したビンピッキング作業の実現、の4つを設定した。(第1章)
- 2) 次に、鋳造部品のハンドリングのためにカメラの画像中に対象物を検出してその位置と姿勢を計算する新しい方法を提案した。これは画像処理の手法としてモデルベーストマッチング法を基本とした方法で、筆者が独自に改良したエッジベースの特徴抽出と特徴マッチングによる部品検出と位置姿勢の計算を行うものである。特徴マッチングで使用する幾何学的な特徴を再現性良くカメラ画像から抽出するために、独自の工夫によるLOGフィルタの二階微分処理とゼロ交差点検出処理を含む再現性良く精細な独自のエッジ検出手法を開発し、ここで得られるエッジ画像から線分と円弧と閉曲線を効率よく抽出する独自の安定で高速な特徴抽出の方式を開発した。さらにハードウェアの負荷分散と特徴抽出処理時間短縮を含むアルゴリズムの最適化を行い、計測条件変化の影響を受けにくいなどの実用的な利点を持つ部品位置同定を実現した。また、提案した方式の有用性を示すために、照明条件の変動、背景の変化、対象物自体の状態変化を含む条件下で部品検出の実験を行った結果を示し、提案したモデルベーストマッチング法による対象物検出の応用例として、プレス加

工前の薄板状の部品を検出して複数の部品の重なり状態を計測するシステムと、顕微鏡画像中に特定の形状の微生物を検出して計数する装置を紹介した。（第2章）

- 3) 次に、視覚センサを用いて工業部品の3次元位置同定を行うときに使用する3次元計測の具体的な手順を述べた。まず、第2章で提案したモデルベーストマッチング法と組み合わせて使用することを前提に、対象物を構成する幾何学的な特徴の上に計測点を設定して対応点の探索を確実に行える工夫を行い、左右カメラの違いを含む計測条件の変動の影響を受けない正規化相関式を導入し、計測結果を平面回帰により評価をすることにより対応間違えの点を排除するなど、従来から提案されている要素技術をうまく組み合わせることで、工業部品の計測にマッチした効率良く高精度な3次元計測を可能にした。さらに、ビンピッキングのステレオ計測ではカメラ画像中に類似のテクスチャが多く存在するためにステレオ対応間違えが多く発生する問題があったが、領域相関法により決定する対応点探索を大小2段階のウインドウを使用したマッチングで行う方法を提案し、これにより安定して正しい対応点を決定することが可能となり、3次元位置計測精度を向上させることができた。また、箱にランダムに入れられた部品の位置姿勢同定の実験を行い、提案したステレオ計測の方法の有用性を示した。（第3章）

- 4) そして、ハンドリング作業の自動化要求に応えるための、工業部品の3次元位置同定について3つの方法を提案した。まず、箱の中にランダムに放り込まれたパイプ継ぎ手部品の開口部を3次元円として検出する方法を提案した。次に、ベルトコンベア上を運ばれる鋳造部品の位置と姿勢を計測するために、対象部品の基準平面の方向を計算して位置同定を行う方法を提案した。さらに、部品表面に視認できる穴や凹凸部を画像処理で閉曲線として抽出し、これらの組み合わせで部品モデルを構成して部品位置同定に使用する方法を提案した。これらの方法はいずれも、部品表面に視認できる幾何学的な特徴の3次元計測を行うことにより部品の3次元位置を同定するものである。筆者が扱う鋳造部品の多くはモータの構成部品であるため、ほとんどが円盤形状で一部に大きな円形の穴があいている。そこで、このように大

きな円形の穴が視認できる部品は、カメラ画像中にこれを検出する方法を用いる。つまり、部品を3次元空間内に存在する一つの円で表現し、ステレオ計測を使用してその中心と法線ベクトルを計算することで部品の位置同定を行う。円形の穴がない部品の場合でも、加工や位置決めに使用するための部品基準平面を持つ部品に関しては、この基準平面を構成するキー溝や穴を幾何学的な特徴として画像処理により検出してステレオ計測を行い、これらを平面に近似することにより基準平面を計算する方法を用いる。また、部品表面に円形の穴も基準平面もない部品の場合は、鋳造部品には加工や位置決めに使用する穴や突起や凹みが多く存在することに注目して、部品位置同定のための固有な幾何学的な特徴として閉曲線を使用し、対象物の表面に視認できる閉曲線の3次元位置を計測して直接的に対象物の3次元位置と姿勢を同定する方法を用いる。これら3つの方法を使い分けることにより、鋳造部品を含む一般的な工業部品の表面に視認できる穴や溝や突起を固有な特徴として利用して、多くの工業部品の特定と位置同定に適用可能となった。（第4章）

- 5) 最後に、筆者が提案した画像処理による部品3次元位置同定方法を使用したビンピッキングシステムとその動作について検討した。まずロボットシステムの構成とビンピッキング動作を説明し、3次元円検出による部品位置同定のプロセスを示した。さらに、ビンピッキング作業を実現するためのロボット側の工夫として、把持動作時の事前の干渉チェック、異常状態のセンシング、異常発生時の自己復帰シーケンスの対策を説明した。これらの工夫により、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。このシステムは、ビジョンシステムで3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。（第5章）

最後に、本研究の今後の展開と課題について述べる。

本研究の成果により、人手により行われていたビンピッキング作業を含む多くのハンドリング作業が自動化されることが期待できる。電子部品のプリント基板への実装作業など小部品のハンドリングに関しては、パーツフィーダーの導入や2次元の画像処理で自動化が実現されているが、現在ではパーツフィーダーが適用できない中型部品の加工・組立工程の自動化の要求が多くなっており、特に製造ラインの初段にあたる部品投入の工程で3次元部品位置同定の技術が必要とされている。筆者は今後もこのような現場に本研究の成果を積極的に適用していく所存である。

さらに多くの工業部品と作業現場に適用するためには課題も存在する。まず、画像処理による部品位置同定に関しては、計算時間と位置計算精度と部品検出安定性のさらなる向上が課題である。現在の計算時間と精度は鋳造部品の加工のためのハンドリング作業には十分であるが、単純な部品整列や仕分け作業に適用するには、現在の1/10以下の時間と精度が要求される。計算時間短縮については高速なコンピュータや専用ICの導入、計測精度向上については高精細なカメラの適用、部品検出安定性の向上には計測条件の整備など周辺技術の技術革新を待つのもひとつの方法だが、性能向上のためのアルゴリズムの改良も図っていききたい。ビンピッキング作業に関する課題としては、部品同士の干渉により把持できないケース、ハンドと干渉チェックの結果どの部品も把持できないケース、画像処理装置で部品が検出できないケースが指摘されている。また、現場の要求としては、ベルトコンベア上などを移動中の部品の把持、複数種の部品が混在する中から必要な部品のみを把持、など作業員の目の代替となる技術が要求されている。今後もこれらの要求仕様を満足する周辺技術を含む研究開発を進めていきたい。

以上まとめたように、本論文により開発された画像処理技術は、工場内の生産自動化、つまりファクトリーオートメーションに直接生かされるものである。また、派生的に確立した要素技術に関しても、環境条件を整備できない場所や屋外などの自然環境に設置したカメラの画像を対象にした画像処理のアプリケーションに発展すると確信する。

以 上

謝 辞

本論文をまとめるに際して、終始懇切なるご指導を賜った、東京工業大学大学院工学研究科の小林彬教授、ならびに大山真司助教授に、心から感謝の意を表します。

本研究に関して、適切なるご助言、ご教授を賜った、東京工業大学の奥富正敏助教授、笹島和幸教授、松尾芳樹助教授の諸先生に深く感謝します。

筆者が東京工業大学に在学中の卒業研究から大学院修士過程に至る3年間にわたってご指導賜り、研究の意義をご教授頂いた故福与人八東京工業大学名誉教授、大浦宣憲前東京工業大学助教授、桐蔭学園横浜大学の倉持内武教授、東京都立工業高等専門学校の松田勲教授に深く感謝の意を表します。

東京電機大学工学部の柿倉正義教授には、ロボット関係の学会や委員会活動等を通じて筆者の研究に多くの助言を賜りました。著者が本論文をまとめたのも先生のご教示によるものです。ここに心から感謝の意を表します。

㈱明電舎の矢野宏司専務取締役、坪島茂彦元専務取締役、熊丸博之元専務取締役、㈱明電機電工業の川出猛司代表取締役社長、㈱明電舎の中村亨専務取締役、丹羽亨常務取締役、尾花昌明常任監査役、同社総合研究所の宮嶋直人所長、同社総合研究所環境研究部の田村公良部長、同社総合研究所エネルギー研究部の片岡康夫部長には、直属の上司として絶えずご指導頂き、本研究の遂行に対して温かいご理解とご援助を頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

㈱明電舎ロジスティクス事業部長の寺嶋正之博士には、筆者が研究所で本研究を実施する機会を与えていただき、本研究を遂行する上で終始温かいご助言とご鞭撻をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究は、筆者が㈱明電舎開発本部開発第一部と同社総合研究所エネルギー研究部において行ったもので、研究の遂行には多くの上司、先輩、同僚の方々からご支援を頂きました。とりわけ同社総合研究所エネルギー研究部の野村昌克主管技師、庭川誠主任、藤原伸行主任、五十嵐貴氏には、研究を開始してから今日に至るまで多くのご協力を頂きました。ここに改めて感謝の意を表します。

㈱明電舎エネルギーソリューション推進部の山口雅行部長、同社ロジスティクス事業

部営業部の井倉浩司副課長、同社環境アセスメント事業準備室の高橋常悦技師、同社ロジスティクス事業部ロジスティクス工場の宮園好夫工場長、二村孝開発部長、阿部清秀主任、森宣人主任には、技術部門および工場部門の立場から多くのご助言とご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

(株)明電舎マイクロガスタービン事業開発室の市川雅英技師、成蹊大学工学部の柴田昌明助教授、(株)明電舎を退職された清家綾子氏には、研究の過程における共同研究者として多くのご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

京都工芸繊維大学繊維学部デザイン経営工学科教授の宮里勉博士、米国ロックウエルオートメーション社の松尾隆義博士には、筆者が東京工業大学に在学中の研究室の先輩として卒業研究と修士過程において研究への取り組み方などをご指導いただき、卒業後も情報交換を継続させていただくとともに、卒業後に論文博士を取得したご経験を含む多くの具体的なお助言を頂きました。ここに心からの感謝の意を表します。

最後に、筆者を精神面から支えてくれている妻の朱美、本研究の基礎となった勉学の機会を筆者に与えてくれた父寿男、母節子に感謝したい。

参考文献

- [1] 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.
- [2] K. Ikeuchi, "generating an Interpretation Tree from a CAD Model for 3-D Object recognition in Bin-Picking Tasks," *International Journal of Computer Vision*, Vol.1, No.2, pp.145-165, 1987.
- [3] 佐藤,"アクティブレンジファインダと距離画像処理", *日本ロボット学会誌*, Vol.13, No.3, pp7-10, 1995.
- [4] 富田,吉見,植芝,河井,角,松下,市村,杉本,石山,"3次元視覚システムVVV研究開発一概要" *情報処理学会研究報告*,CVIM-109-1, Jan, 1998.
- [5] T.Kanade,H.Kano,S.Kimura,Ayoshida,K.,"Development of a Video-Rate Stereo Vision" *Proc. of IEEE/RSJ IROS 1995*, vol. 3, pp.95-100, 1995.
- [6] 三輪,新保,山口, "リアルタイム多眼ステレオシステム" *O plus E*, Vol.20, No.11, pp.1259-1264, 1998.
- [7] Fukuda, Doi, Nagamine and Inari, "Relationships based recognition of structural industrial parts stacked in bin," *Robotica*, Vol.2, pp.147-154, 1984.
- [8] 山田、中野、山本、"照明変動にロバストな部品位置決め用ロボット視覚システム," *日本ロボット学会誌*, Vol.14, No.6, pp.911-914, 1996.
- [9] K. Rahardja 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.
- [10] 秦,"ロボットビジョンの産業への応用," *日本ロボット学会誌*, Vol.10, No.2, pp185-189, 1992.
- [11] 江尻, "ロボット工学と物体認識技術," *日本機械学会論文誌*, Vol.73, No.162, pp.26-33, 1970.
- [12] 石井, "パターン情報処理システムの研究開発," *電子情報通信学会誌*, Vol.82, No.5, pp.482-498, 1982.
- [13] R.C.Bolles, R.A.Cain, "Recognizing and locating partially visible objects, the

- local-feature-focus method," *International Journal of Robotics Research*, Vol.1, No.3, pp.57-82, 1982.
- [14] C.H.Chen, P.G.Mulgaonkar, "Automatic Vision Program-ming," *CVGIP: Image Understanding*, Vol.55, No.2, pp.170-183, Mar. 1992.
- [15] 西川、大西、松本、泉、福永、"カメラ位置姿勢制御を用いたモデルベース物体認識," *電気学会論文誌*, Vol.118-C, No.2, pp210-216, 1998.
- [16] 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.
- [17] マー著、乾、安藤訳,"ビジョン",産業図書,1987
- [18] M.Niwakawa, A.Okamoto, T.Onda, N.Fujiwara, "Object Recognition for Casting Parts with Model-Based Matching", *Proc. of JIASC'96*, vol II, pp.E24-E27, 1996.
- [19] 井倉、恩田、藤原,"局所の特徴マッチングによる部品の重なり状態認識," 平7年電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.127-128, 1995.
- [20] 恩田、市川,"画像認識による活性汚泥中生物種同定への画像処理の適用," 電気学会研究会資料, PPE-95-2~7, pp.37-46, 1995.
- [21] 画像処理ハンドブック編集委員会,"画像処理ハンドブック",昭晃堂,1987.
- [22] 石山、角、河井、植芝、富田,"セグメントベーストステレオにおける対応候補探索", *映像情報メディア学会誌*, Vol.52, No.5, pp.723-728, May 1998.
- [23] M.J.Hannah, "A System for Digital Stereo Image Matching," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.55, No. 12, pp.1765-1770, Dec. 1989.
- [24] M.Okutomi, T.Kanade, "A Multiple-Baseline," *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.15, No. 4, pp.353-363, April 1993.
- [25] T.Kanade, M.Okutomi, "A Stereo Matching Algorithm with an Adaptive Window: Theory and Experiment," *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.16, No.9, pp.920-932, Sep. 1994.
- [26] 松山、久野、井宮編,"コンピュータビジョン：技術評論と将来展望," 新技術コミュニケーションズ, 1998.

付 録 整数化LOGフィルタ処理プログラム

1. 整数化LOGフィルタ処理プログラム

- 1) フィルタの大きさ： 7×7 （＋、－、 $\ll$ で計算）
- 2) カメラ画像： 640×480 （fm[x][y]）
- 3) LOG計算結果： 640×480 （Fm[x][y]）
- 4) LOGフィルタの実行クロック数
 - ① ＋、－ $1 \times 38 = 38$ クロック
 - ② $\ll$ $1 \times 21 = 21$ クロック
 - ③ 合計 59クロック

```

/*****
整数化ラプラシアン－オブ－ガウシアンフィルタ処理
*****/
for(y=0 ;y<frm->ymax-6 ;y++ ){
    for(x=0 ;x<frm->xmax-6 ;x++ ){

        /*****
        フィルタを掛ける
        *****/
        p1 = 0 - fm0[x+2][y]
            - fm0[x+3][y]
            - fm0[x+4][y]
            - ( fm0[x+1][y+1] << 1 )
            - ( fm0[x+2][y+1] << 2 )
            - ( fm0[x+3][y+1] << 2 )
            - ( fm0[x+4][y+1] << 2 )
            - ( fm0[x+5][y+1] << 1 )
            - fm0[x][y+2]
            - ( fm0[x+2][y+2] << 2 )
            + fm0[x+3][y+2]
            + ( fm0[x+3][y+2] << 3 )
    }
}
```

```

- ( fm0[x+5][y+2] << 2 )
-   fm0[x+6][y+2]
-   fm0[x][y+3]
- ( fm0[x+1][y+3] << 2 )
+   fm0[x+2][y+3]
+ ( fm0[x+2][y+3] << 3 )
+ ( fm0[x+3][y+3] << 5 )
+   fm0[x+4][y+3]
+ ( fm0[x+4][y+3] << 3 )
- ( fm0[x+5][y+3] << 2 )
-   fm0[x+6][y+3]
-   fm0[x][y+2]
- ( fm0[x+2][y+4] << 2 )
+   fm0[x+3][y+4]
+ ( fm0[x+3][y+4] << 3 )
- ( fm0[x+5][y+4] << 2 )
-   fm0[x+6][y+4]
- ( fm0[x+1][y+5] << 1 )
- ( fm0[x+2][y+5] << 2 )
- ( fm0[x+3][y+5] << 2 )
- ( fm0[x+4][y+5] << 2 )
- ( fm0[x+5][y+5] << 1 )
-   fm0[x+2][y+6]
-   fm0[x+3][y+6]
-   fm0[x+4][y+6];

Fm2[x+3][y+3] = p1;
}
}

/**& ラプラシアン－オブ－ガウシアンフィルタ終了 &*/

```

2. 一般的なLOGフィルタ処理プログラム

- 1) フィルタの大きさ: 7×7 ($m[I][j]$)
- 2) カメラ画像: 640×480 ($fm[x][y]$)
- 3) LOG計算結果: 640×480 ($Fm[x][y]$)
- 4) LOGフィルタの実行クロック数
 - ① $\text{for}(j=0 ; j<6 ; j++) \{$ (1+2) $\times 7 = 21$ クロック
 - ② $\text{for}(i=0 ; i<6 ; i++) \{$ (1+2) $\times 7 \times 7 = 147$ クロック
 - ③ $p1 += fm0[x+i][y+j] * m[i][j];$ $4 \times 7 \times 7 = 196$ クロック
 - ④ 合計 346クロック

```
/*
ラプラシアンーオプーガウシアンフィルタを掛ける
*/
for(y=0 ;y<frm->ymax-6 ;y++ ){
    for(x=4 ;x<frm->xmax-6 ;x++ ){
        p1= 0; /* 計算値を 0 クリア */

        /*
        フィルタを掛ける
        */
        for(j=0 ;j<6 ;j++ ){
            for(i=0 ;i<6 ;i++ ){
                p1+= fm0[x+i][y+j] * m[i][j];
            }
        }
        Fm[x+3][y+3]= p1; /* 計算値をデータ配列へ代入 */
    }
}

/**& ラプラシアンーオプーガウシアンフィルタ終了 &*/
```

参考

i960Cxマイクロプロセッサユーザズマニュアル（インテルジャパン社）
インストラクションセットクイックリファレンスより

ニーモニック	意味	クロック数
addi	整数加算	1
bg	条件分岐	2
mul i	整数乗算	4
sub i	整数減算	1
shl i	左シフト	1

研究業績

1 発表論文

- 1) 恩田寿和、庭川誠、藤原伸行、
「工業部品の三次元位置同定のための高精度ステレオ計測」
電気学会論文誌C分冊、Vol. 121-C, No. 5、pp. 848-853、(2001)
- 2) 恩田寿和、藤原伸行、阿部清秀、森宣人、
「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」
日本ロボット学会誌、Vol. 18, No. 7、pp. 93-100、(2000)
- 3) 恩田寿和、庭川誠、藤原伸行、清家綾子、
「モデルベーストマッチング法を用いた鋳造部品の視覚位置決め」
電気学会論文誌D分冊、Vol. 119-D, No. 1、pp. 14-20、(1999)
- 4) 恩田寿和、庭川誠、
「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」
電気学会論文誌D分冊、Vol. 118-D, No. 3、pp. 371-376、(1998)

2 国際会議発表論文

- (1) N.Mori, K.Abe, N.Fujiwara, T.Onda, "Complete Automated Bin Picking System supported by Previously Collision Avoidance and Novel Drag In Motion", IEEJ International Power Electronics Conference (IPEC-Tokyo 2000), Vol.3, pp.1237-1242 (2000)
- (2) T.Igarashi, N.Fujiwara, T.Onda, "Hierarchical Stereo Matching Algorithm for Stereo Ranging on 3D Vision Based Bin Picking Tasks", 6th Korea-Japan Joint Workshop on

Computer Vision (FCV2000), pp.97-102 (2000)

- (3) T.Onda, N.Fujiwara, K.Abe, N.Mori, "Vision Based Bin-Picking System Using Three-dimensional Circle Detection and Previously Collision Avoidance", *5th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV'99)*, pp.229-233 (1999)
- (4) N.Fujiwara, T.Onda, M.Niwakawa, "Three-Dimensional Circle Detection and Location of Pipe Joints for Bin-Picking Tasks", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'98)*, Vol.2, pp.1216-1221 (1998)
- (5) M.Niwakawa, T.Onda, N.Fujiwara, "Vision-Based Handling System Using Model-Based Vision and Stereo Ranging", *2nd International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems (KES'98)*, pp.199-204 (1998)
- (6) H.Igura, M.Niwakawa, T.Onda, "Stereo Ranging and Feature Matching Based 3D-Vision for Casting Parts", *3rd Asian Conference on Robotics and Its Application (3rd ACRA)* (1997)
- (7) M.Niwakawa, A.Okamoto, T.Onda, N.Fujiwara, "Object Recognition for Casting Parts with Model-Based Matching", *Japan Industry Applications Society Conference (JIASC'96)*, vol II, pp.E24-E27 (1996)
- (8) T.Onda, H.Igura, M.Niwakawa, "A Handling System for Randomly Placed Casting Parts Using Plane Fitting Technique", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS'95)*, vol.3, pp.435-440 (1995)
- (9) T.Onda, H.Igura, M.Niwakawa, "A Handling System for Tilted Parts with Stereo Ranging", *IEEJ International Power Electronics Conference (IPEC-Yokohama'95)*, Vol.3, pp.1560-1565 (1995)
- (10) T.Onda, H.Igura, M.Niwakawa, N.Fujiwara, "A Handling System for Casting Parts with Feature-Based Matching", *Japan Industry Applications Society Conference (JIASC'94)*, vol II, pp.71-74 (1994)

3 研究会、シンポジウム等

- (1) 藤原伸行、庭川誠、五十嵐貴、恩田寿和、「視覚ベースビンピッキングにおける三次元位置計測のための階層的ステレオ対応点探索」、電気学会システム・制御研究会資料, SC-00-01～10, pp. 7-12 (2000)
- (2) 庭川誠、市川雅英、恩田寿和、「浄水場におけるろ過障害微生物の個体数の変動を顕微鏡画像を用いて自動監視する装置」、電気学会情報処理・産業システム情報化合同研究会資料, IP-99-10～20, pp. 11-15 (1999)
- (3) 井倉浩司、恩田寿和、庭川誠、藤原伸行、「ステレオ法を用いた特徴マッチングによる鋳造部品の三次元認識」、第2回知能メカトロニクス ワークショップ (1997)
- (4) 恩田寿和、庭川誠、藤原伸行、「特徴マッチングとステレオ計測を結合したロボットビジョン」、第3回画像センシングシンポジウム 講演論文集, pp. 177-180 (1997)
- (5) 恩田寿和、庭川誠、藤原伸行、「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」、電気学会システム・制御研究会、Vol. SC97-8-20、pp. 7-11、(1997)
- (6) 井倉浩司、恩田寿和、「モデルベーストマッチング法を使った画像認識による鋳造部品のハンドリング作業」、第1回 知能メカトロニクス ワークショップ, pp. 76-79 (1996)
- (7) 恩田寿和、市川雅英、「活性汚泥中生物種同定への画像処理の適用」、電気学会公共施設研究会資料, pp. 37-46 (1995)

4 全国大会講演論文

- (1) 恩田寿和、藤原伸行、「階層的ステレオマッチング手法を用いた三次元部品位置決めのためのステレオ計測」、機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演

- 会 (ROBOMECH' 00) (2000)
- (2) 森宣仁、阿部清秀、井倉浩司、藤原伸行、恩田寿和、「異常検知とかき混ぜ動作の追加によるビンピッキングシステムの完全自動化」、平成11年度電気学会産業応用部門全国大会 講演論文集, pp. 499-500 (1999)
 - (3) 藤原伸行、恩田寿和、「三次元部品位置決めのための階層的ステレオ対応点探索」、平成11年度電気学会産業応用部門全国大会 講演論文集, pp. 497-498 (1999)
 - (4) 井倉浩司、恩田寿和、藤原伸行、阿部清秀、森宣人、「鋳造部品の加工機へのローディングのための視覚ベースのビンピッキング」、機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH' 99) (1999)
 - (5) 藤原伸行、恩田寿和、森宣仁、阿部清秀、井倉浩司、「ロボットハンドとボックスパレットの衝突回避を考慮した視覚ベースビンピッキングシステムの開発」、第16回日本ロボット学会学術講演会 講演論文集, pp. 377-378 (1998)
 - (6) 恩田寿和、藤原伸行、森宣仁、阿部清秀、「ハンドの干渉チェックを考慮した視覚ベースのビンピッキング」、平成10年度電気学会産業応用部門全国大会 講演論文集, pp. 451-452 (1998)
 - (8) 市川雅英、岡本綾子、恩田寿和、「画像処理による珪藻の認識実験」、第49回全国水道研究発表会講演集, 平成10.5, pp536-537 (1998)
 - (7) 藤原伸行、恩田寿和、庭川誠、「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 講演論文集, pp. 127-128 (1997)
 - (8) 恩田寿和、庭川誠、藤原伸行、「ステレオ法を用いた特徴マッチングによる物体認識」ー鋳造部品の三次元視覚位置決めー、平成9年度電気学会産業応用部門全国大会 講演論文集, pp. 21-24 (1997)
 - (9) 藤原伸行、恩田寿和、庭川誠、「ビンピッキングのためのパイプ開口部の検出」、平成9年度電気学会全国大会 講演論文集, p. 4-388 (1997)
 - (10) 岡本綾子、庭川誠、恩田寿和、「円および円弧に注目した鋳造部品の画像認識」、平成9年度電気学会全国大会 講演論文集, p. 4-424 (1997)

- (11) 岡本綾子, 庭川誠, 恩田寿和, 藤原伸行, 「局所的特長マッチングをベースにした部品の画像認識」、平成 8 年度電気学会産業応用部門全国大会, pp. 149-150 (1996)
- (12) 岡本綾子, 庭川誠, 藤原伸行, 恩田寿和, 「モデルベース法を適用した画像認識装置の開発」、平成 8 年度電気学会全国大会, pp. 4-315 (1996)
- (13) 藤原伸行, 恩田寿和, 井倉浩司, 「階層的モデルマッチングによる鋳物部品の位置検出」、平成 8 年度電気学会全国大会, pp. 4-316 (1996)
- (14) 井倉浩司, 恩田寿和, 藤原伸行, 「局所的特長マッチングによる部品の重なり状態認識」、平成 7 年度電気学会産業応用部門全国大会, pp. 127-128 (1995)
- (15) 庭川誠, 恩田寿和, 藤原伸行, 岡本綾子, 「ステレオ認識による基準平面検出とハンドリング」、平成 7 年度電気学会産業応用部門全国大会, pp. 129-130 (1995)
- (16) 恩田寿和, 市川雅英, 「画像認識による活性汚泥中の微生物種の同定」、平成 7 年度電気学会全国大会, pp. 3-52 (1995)
- (17) 庭川誠, 恩田寿和, 井倉浩司, 藤原伸行, 岡本綾子, 「ステレオ計測を利用した鋳物部品の基準平面検出」、平成 7 年度電気学会全国大会, pp. 4-338 (1995)
- (18) 井倉浩司, 恩田寿和, 庭川誠, 藤原伸行, 「モデルベーストマッチング法による画像認識装置の開発」、平成 6 年度電気学会産業応用部門全国大会, pp. 1228-1229 (1994)
- (19) 恩田寿和, 井倉浩司, 「画像認識を使用した鋳物部品のハンドリング作業」、平成 6 年度電気学会全国大会, pp. 6-123 (1994)
- (20) 庭川誠, 恩田寿和, 井倉浩司, 藤原伸行, 「モデルベーストマッチング法による部品の認識」、平成 6 年度電気学会全国大会, pp. 6-129 (1994)

5 解説

- (1) 恩田寿和、庭川誠、五十嵐貴、「高度情報処理システムを支える明電舎の画像処理技術」、明電時報 2000 No. 3, 5・6月号, 通巻272号, pp. 45-49 (2000)
- (2) 恩田寿和、庭川誠、藤原伸行、阿部清秀、「ロボットの知能化に有効な三次元物体認識画像処理装置」、明電時報 No. 3, 5・6月号, 通巻266号, pp. 24-27 (1999)
- (3) 井倉浩司、恩田寿和、「三次元画像処理と知能ロボットー三次元物体認識画像処理装置を搭載した知能ロボットシステム」、画像ラボ, Vol. 10, No. 06 (通巻114号), pp. 45-48 (1999)
- (4) 岡本綾子、市川雅英、恩田寿和、庭川誠、「ろ過障害微生物監視装置」、学会誌「E I C A」、第3巻第1号(1998), pp67-71
- (5) 恩田寿和、庭川誠、井倉浩司、「F A技術を支える物体認識技術」、明電時報 No. 3, 5・6月号, 通巻254号, pp5-8 (1997)
- (6) 市川雅英、恩田寿和、「画像認識による微生物の同定」、用水と排水 Vol. 38, No. 11, pp. 943-948, 産業用水調査会 (1996)
- (7) 恩田寿和、「明電高速画像処理装置(Meiscope-III)」、一水会会報 Vol. 37, No. 1, cont. 16, pp. 44 (1996)
- (8) 高橋常悦、阿部清秀、井倉浩司、恩田寿和、「物体認識機能搭載画像処理装置 MEISCOPE-III」、明電時報 No. 5, 9・10月, 238号, pp. 50-54 (1994)

6 公開特許等

- (1) 恩田、「画像信号の二値判別回路」特願平05-292875、特開平07-147635
- (2) 恩田、井倉、庭川、「エッジ検出回路」特願平05-304483、特開平07-160896
- (3) 恩田、藤原、「円および円弧の近似方法」特願平06-113217、特開平07-320060
- (4) 恩田、藤原、「円弧の近似方法」特願平06-113218、特開平07-320057
- (5) 藤原、庭川、恩田、井倉、「エッジトレース方法」特願平06-118242、特開平08-050655

- (6) 井倉、恩田、「物体位置検出装置」特願平06-125960、特開平07-332944
- (7) 井倉、野村、恩田、「物体位置検出装置」特願平06-125961、特開平07-332945
- (8) 恩田、庭川、「画像処理装置のエッジ検出回路」特願平06-149246、特開平08-014820
- (9) 恩田、庭川、「相関マッチングの対応点位置計測方法および装置」特願平06-178022、
特開平08-043024
- (10) 庭川、恩田、井倉、「部品の姿勢検出装置」特願平06-239901、特開平08-105720
- (11) 藤原、井倉、恩田、庭川、「ステレオ計測における三次元位置計測方法」特願平
07-058505、特開平08-254416
- (12) 井倉、庭川、恩田、藤原、「三次元物体モデル生成方法」特願平07-232225、特開
平09-081737
- (13) 井倉、藤原、恩田、「重なり状態認識方法」特願平07-710451、特開平09-053915
- (14) 藤原、井倉、庭川、恩田、「三次元物体認識方法及びその装置」特願平08-018613、
特開平09-212643
- (15) 市川、恩田、「特徴マッチング方法」特願平08-110684、特開平09-305774
- (16) 藤原、恩田、岡本、庭川、「物体認識装置」特願平08-112222、特開平09-297857
- (17) 市川、恩田、「ろ過障害微生物監視装置」特願平08-180250、特開平10-024283
- (18) 恩田、藤原、岡本、「円または円弧の近似方法」特願平08-249468、特開平10-097620
- (19) 恩田、岡本、「線分の近似方法」特願平08-251241、特開平10-097622
- (20) 恩田、市川、「微生物の検出方法」特願平09-033397、特開平10-229894
- (21) 岡本、恩田、「位置姿勢検出装置」特願平09-110660、特開平10-302071
- (22) 藤原、恩田、庭川、「部品の円特徴の三次元位置姿勢検出装置」特願平09-136452、
特開平10-326347
- (23) 藤原、庭川、恩田、「物体の位置姿勢検出装置」特願平09-149002、特開平10-339609
- (24) 藤原、恩田、「モデル作製方法」特願平09-193451、特開平11-039500
- (25) 柴田、庭川、恩田、「線分・円弧の抽出方法」特願平09-213070、特開平11-053555
- (26) 庭川、恩田、「移動、静止物体追跡方法」特願平09-220284、特開平11-063986
- (27) 藤原、恩田、「把持位置姿勢教示装置」特願平09-225941、特開平11-058279
- (28) 柴田、恩田、「円弧位置推定方法」特願平09-288167、特開平11-120356

- (29) 藤原、恩田、柴田、「物品種類判別装置」特願平09-291938、特開平11-126243
- (30) 市川、恩田、岡本、「ろ過障害微生物の画像収集方式」特願平10-012195、特開平11-207317
- (31) 岡本、恩田、市川、「微生物の検出方法」特願平10-038370、特開平11-225744
- (32) 柴田、恩田、「画像情報による物体認識」特願平10-072031、特開平11-272863
- (33) 藤原、恩田、「ビンピッキング位置データ校正方法」特願平10-196965、特開2000-024973
- (34) 恩田、岡本、市川、「ろ過障害微生物監視装置」特願平10-212073、特開2000-042528
- (35) 藤原、恩田、「位置データ校正機能つきビンピッキング方法および装置」特願平10-231466、特開2000-067238
- (36) 藤原、恩田、「位置データ校正方法および装置」特願平10-244842、特開2000-076441
- (37) 藤原、庭川、恩田、「三次元位置決め方法および装置」特願平10-246648、特開2000-074628
- (38) 恩田、藤原、「三次元視覚位置決め方法および装置」特願平10-247968、特開2000-074642
- (39) 庭川、恩田、岡本、市川、「ろ過障害予防装置」特願平10-306480、特開2000-126750
- (40) 恩田、森、「ビンピッキング装置」特願平11-065858、特開2000-263480
- (41) 恩田、森、「ビンピッキング装置」特願平11-065859、特開2000-263481
- (42) 藤原、恩田、「部品の位置姿勢検出方法および装置」特願平11-232454
- (43) 藤原、恩田、「段階的対応点探索方法および三次元位置計測方法」特願平11-322232