研究報告 研究報告 Development of Stereo Vision System

Takashi Naito, Yoshikatsu Kimura

内藤貴志,木村好克

FA用途の視覚装置は,画像から対象の確実な2 次元情報を獲得し,得られた2次元情報から検査, 部品取り出し,位置決めなどの作業を実現してい る。このような作業を行うための画像処理手法と して,2値化画像処理および濃淡・カラー画像処 理手法が研究,実用化されてきた。しかしながら これらの方法ではアスペクト(見え方)の変化す る対象や複雑な3次元対象を扱うことは難しい。 そのため,拘束条件が少なくより自然な環境で対 象を3次元的に検出,認識しようとする3次元ビ ジョンシステムの開発が望まれている。

筆者らは,従来の2次元のビジョンでは困難で あった自動車部品などの,複雑な3次元対象の位

## 要

旨

置・姿勢検出および認識を目的としたシステムの 開発を行ってきた。

本システムは,使用環境及び扱うべき対象を考慮して,両眼視による特徴ベースの手法を採用している。特に自動車部品などの工業部品からは, 画像特徴として線分,円,楕円などの幾何学的形 状特徴が得られやすいため,濃淡画像から抽出されたエッジをプリミティブ(基本要素)として対 象の3次元形状を復元する3次元ビジョンシステムを開発した。

本稿では,開発したステレオビジョンシステム とその有効性について述べる。

#### Abstract

Most of the vision systems used for factory automation acquire straight pieces of two-dimensional information yielded from objects. By analyzing this information, the vision systems achieve tasks such as inspection, "pick and place" and assembling of the objects. To carry out these tasks, many kinds of image processing algorithms for binary, gray and color image data have been proposed and applied to practical tasks. However, it has been difficult for such systems to handle objects with unfixed aspects or complex threedimensional objects. Therefore, a vision system suitable for 3D objects and applicable in unconstrained environment has been expected.

We have developed a stereo vision system to inspect

and recognize complex 3D objects which conventional vision systems could not cope with. This system is a binocular and feature-based vision system in consideration of both the environment to be used and the target objects. Especially, since it is easy to extract geometrical features such as line, circle and ellipse from images of automobile parts, the vision system, which recovers 3D geometrical features using edge primitives extracted from the left and right gray images, has been developed.

This paper describes the developed stereo vision system and shows its performance using experimental results.

キーワード 🔰 画像 , ビジョン , アルゴリズム , 画像処理 , 認識 , 前処理 , エッジ , 両眼視 , ステレオ

1.はじめに

FA用途の視覚装置は,画像から対象の確実な2 次元情報を獲得し,得られた2次元情報から検査, 部品取り出し,位置決めなどの作業を実現してい る。

このような作業を実現するための画像処理手法 としていち早く実用化されたのは,求めるべき情 報が比較的単純であり,計算量も少なくて済む2 値化画像処理手法である。しかし2値化手法は, 明るさの変動やノイズに弱く,また複数の観測対 象が接触,重畳する場合などへの適用は困難であ る。

このため,より複雑な対象を扱うことができる よう,濃淡あるいはカラー画像を利用した画像処 理手法が研究されてきた。2値化処理に比べれば 計算量は増大するが,CPU性能の向上にともない 実時間での処理が達成され,より複雑な処理も実 現できるようになった<sup>1,2,3</sup>。

しかしながらこの方法も求める情報は基本的に 対象の2次元情報であり、いわゆる2次元のビジョン システムでは、アスペクト(見え方)の変化する 対象や複雑な3次元対象を扱うことは難しい。

そのため,拘束条件が少なく,より自然な環境 で対象を3次元的に検出,認識しようとする3次 元ビジョンシステムの開発が望まれており,これ までに数多くの手法が提案されてきた<sup>4)</sup>。Table 1 は,従来提案されてきた3次元情報の復元手法を2 つの観点から分類したものである。3次元形状復 元のための入力画像としては,人間の左右の眼の

Table 1 Methods to recover 3D information.



ように2つの視点から得た画像を用いる両眼視手 法(binocular)が一般的であるが<sup>5)</sup>,これまでの2 次元の画像処理のように,対象の光反射率や幾何 モデルを拘束条件として1枚の画像のみから3次 元形状の復元を行う単眼視手法(monocular)も提 案されている<sup>6)</sup>。また,両眼視における曖昧性を 除去する手法として,3つの視点を利用する3眼視 (trinocular)も広く試みられている<sup>7)</sup>。さらに4つ 以上の視点を用いる多眼視(multiple)<sup>8)</sup>や,CCD カメラなどの撮像装置や観測対象を移動させ,結 果的に複数の視点から得た画像を用いて3次元の 形状を復元しようとする移動視(motion)などの 研究もなされている<sup>9)</sup>。特に後者は自律走行車用 の眼として,外界環境のモデリングなどに用いら れている。

一方,2次元平面(XY)の情報だけでなく,3次 元形状の復元のための対象の奥行き(Z方向)情 報を画像から求める手法で分類すると,領域ベー スの手法と特徴ベースの手法の2つに分けること ができる。両者とも基本的には3角測量の原理に より奥行きを求めるが,領域ベースの手法は濃度 値相関を使って左右画像間の対応をもとめて奥行 き距離を得る<sup>®)</sup>。一方特徴ベースの手法は,画像 中からエッジあるいはその集まりであるセグメン トを抽出して,それらの画像間の対応から奥行き を求める手法である<sup>5)</sup>。

筆者らは,従来の2次元のビジョンでは困難で あった自動車部品などの,複雑な3次元対象の位 置・姿勢検出および認識を目的としたシステムの 開発を行ってきた<sup>10</sup>。

本システムは,使用環境及び扱うべき対象を考慮して,両眼視による特徴ベースの手法を採用している。特に自動車部品などの工業部品からは, 画像特徴として線分,円,楕円などの幾何学的形 状特徴が得られやすいため,濃淡画像から抽出されたエッジをプリミティブ(基本要素)として対象の3次元形状を復元するステレオビジョンシス テムを開発した。

本稿は,開発したステレオビジョンシステムに ついて述べるものである。

2章ではステレオビジョンシステムの概要につ いて紹介する。3章では開発したエッジ抽出ハー ドについて述べ,4章では3次元形状復元,認識 のための処理方法について述べる。5章で実部品 を用いた実験を例に本システムの有効性を示し, 最後にまとめと今後の課題について述べる。

2.ステレオビジョンシステムの概要

開発したステレオビジョンシステムの,画像入 力から3次元形状復元,認識までの処理フローを Fig.1に示す。

まず左右のカメラから入力された濃淡画像から, Cannyのオペレータ<sup>11)</sup>を利用した専用のハード ウェア(VPSEE)により高精度のエッジを抽出す る(edge detection)。

抽出されたエッジデータは計算機に読み込まれ, 各エッジ画素の連結状態を調べてセグメンテー ションを行い,エッジのストリングデータを求める(edge segmentation)。

次に,左右のエッジ間の対応を求める対応点探 索処理を効率よく行うため,左右のカメラ座標系 が平行になるよう座標変換を行う(rectification)。

また左右エッジのストリングデータから線分, 楕円要素からなる2次元の形状特徴を抽出する<sup>12)</sup> (2D geometry)。



Fig. 1 Processing flow.

次に,対象の奥行き距離を求めるため,エッジ データと2次元形状データを使って,左画像のエッジ に対する対応点探索を行う<sup>13,14)</sup>(stereo matching)。

そして, 左画像のエッジに対する距離情報と左の2次元形状特徴から, 対象の3次元形状特徴を 復元する(3D geometry)。

最後に,あらかじめ定義しておいた3次元形状 モデルと,左右画像から復元した形状特徴との間 で照合を行い<sup>15,16)</sup>(model matching),対象の3 次元空間内での位置姿勢を求める<sup>17)</sup>(positioning)。

以上が,一連の処理の流れである。なおrectification やpositioningのための左右カメラのキャリブレー ションはレンズひずみを考慮した高精度な方法で オフラインで実施する<sup>18)</sup>(calibration)。

3.高精度エッジ抽出ハードウェア

本システムでの3次元物体認識処理においては, 対象の複雑さにも依存するが,Fig.1のエッジ抽 出過程の処理時間が全体の約半分を必要とする。 高速な処理を実現するには,このエッジ抽出の演 算時間を短縮することが重要である。

筆者らは濃淡画像からビデオレート(33ミリ秒) で高精度のエッジを抽出するハードウェアVPSEE (Videorate Pipeline Subpixel Edge Extractor)を開発 してきた。エッジの抽出はCannyのオペレータを ベースとした方法で実現した<sup>11)</sup>。

Fig. 2にVPSEEの構成を示す。ホストコンピュ ータとはGP-IB, VMEバスとローカルバスを経由 してアクセスできる。以下,各ボードの機能につ いて述べる。

CCDカメラからの映像信号はTransmitterボード でデジタル化する。Timing Converterボードはデ ジタル画像のインタレース・ノンインタレース変 換を行う。Timing Generatorボードは10MHzのマ スタークロックや水平同期信号,垂直同期信号を 発生し,それらの信号を各ボードやカメラに供給 する。

2D CONVOLVERボードは2つのLUT (Look Up Table)と4つのDSP (Digital Signal Processor)から なる。4つのDSPはそれぞれ2次元の畳み込み積分, 2つの複素信号累算器とピタゴラス演算のための プロセッサである。このボードで,濃淡画像はガ ウシアンフィルタで平滑化されたのち1次微分処 理され,エッジ強度画像とエッジグラジェント画 像に変換される。

Peak ExtractorはPeak Interpolatorを子亀にもつボー ドであり,TTLとコンパレータから構成される。 対象画素のエッジ強度と,エッジ方向に対して垂 直に隣接する画素のエッジ強度を比較することで, エッジピークの画素を決定する。

Peak Interpolatorは,放物線近似によりサブピク セル精度をもつエッジのピーク位置を補間する機 能をもつ。このボードはLUTや加算器などから構 成される。出力データはエッジ位置中心からのオ フセット値である。

結果として, VPSEEは512×512の濃淡画像か ら33ミリ秒でエッジ強度, エッジグラジェント, ピークエッジ座標値とそれからの内挿オフセット 値を演算する。

濃淡画像や処理結果画像は, Frame Grabberに取 り込まれる。各データは, Frame Grabberからホス トコンピュータにバスを介して転送される。 4.3次元形状復元,認識処理

### 4.1 2次元形状の抽出

本システムでは,抽出されたエッジセグメント から対象の形状特徴として線分および楕円形状を 抽出する。以下に各特徴の抽出法の概要を述べる。

4.1.1 線分形状の抽出

Fig. 3(a) に示すように,与えられたエッジセグ メント{ $x_i = (x_i, y_i)$ }のある区間に対して次式で 表される線分*L*を求める。

 $L(x, y) = \sin(\theta)x + \cos(\theta)y - d = 0$ (1)

ここで $\theta$ は線分Lの傾き,dは線分Lと原点Oとの距離を表す。このとき,エッジ( $x_i$ , $y_i$ )と線分L との距離(当てはめ誤差)を $e_i$ とすると,

$$E = \sum |e_i| = \sum \left| \sin \left( \theta \right) x_i + \cos \left( \theta \right) y_i - d \right| \to \min$$
(2)

となるよう最小二乗法により( $\theta$ , d)をもとめる。  $e_i$ がある閾値以上になった場合は,当てはめの区 間を変更して再度線分抽出を行う。以上の処理を



Fig. 2 Configuration of VPSEE.

全てのエッジセグメントに対して行い線分を抽出 する。ただし短い線分については除去する。

4.1.2 楕円形状の抽出

Fig. 3(b) に示すように,与えられたエッジセグ メント{ $x_i = (x_i, y_i)$ }のある区間に対して次式で表 される楕円*C*を求める。

C (x, y) = 
$$ax^2 + 2bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$$
  
ただし,  $ac - b^2 > 0, a + c > 0$  (3)

このとき楕円中心 $(x_c, y_c)$ は $-\frac{1}{ac-b^2}(cd-be, ae-bd)$ で与えられる。またa cであれば主軸の傾き $\theta$ は  $\frac{1}{2}$ tan<sup>-1</sup> $\frac{2b}{a-c}$ である。ここでa + c = 1として正規化 すれば,楕円C(x, y)は(a, b, d, e, f)の5つのパ ラメータについて解けばよいことになる。ここで も線分と同じように当てはめ誤差の和 $\Sigma | e_i |$ が最 小になるようにパラメータを推定する。また誤差  $| e_i |$ がある閾値以上になれば,線分と同様当ては め区間を変更し再度楕円抽出を行う。

すべてのエッジセグメントに対して楕円抽出の 処理を行い,先に求めた線分の内で楕円の抽出に 成功したエッジセグメントを含む線分は除去する。

以上でエッジセグメントから線分および楕円の 2次元形状を抽出する処理を終える。

4.2 対応点探索

ステレオビジョンにおいては,三角測量の原理 により対象の奥行き(Z方向)の情報を得るが, そのためには左右の画像間の対応関係を求めなけ ればならない。

ここでFig. 4のように左右のカメラ $C_L$ ,  $C_R$ で対象を観測している場合を考える。 $I_L$ ,  $I_R$ をそれぞれカメラ $C_L$ ,  $C_R$ の画像平面とし, 3次元空間上におかれた物体上の点Pは $I_L$ ,  $I_R$ 上でそれぞれ $p_L$ ,  $p_R$ 

として観測されるとする。

今 $p_L$ に着目すると,対応点探索とは観測点 $p_L$ に 対応する点を $I_R$ 上から探すことをいう。しかしこ の場合 $I_R$ の画像全体を探索する必要はない。なぜ ならばカメラ配置の幾何学的性質により, $p_L$ の対 応点は $p_L$ , $O_L$ , $O_R$ からなる平面と $I_R$ が交わってで きる直線 $I_R$ (エピポーラライン(視線像)と呼ぶ) 上にあるはずだからである。このように対応点探 索は,エピポーラライン上の1次元探索に帰着さ れる。

以下では対応点探索を効率よく行うためのカメ ラ座標変換について述べた後,対応点探索手法の 詳細を述べる。

4.2.1 カメラ座標変換

対応点探索の処理を簡単に行うためにはFig.5(b) のようにエピポーララインが画像の走査線に一致 している方が都合がよい。しかしながら,できる だけ広く左右カメラ共通の視野を確保するために

 $\begin{array}{c}
I_L \\
O_L \\
O_L \\
C_L
\end{array}$ 

Fig. 4 Binocular system.



Fig. 3 Extraction of 2D geometry.

Fig. 5 Camera coordinate system.

はFig. 5(a)のようなカメラ配置にした方がよいた め,実際にはFig. 5(a)のカメラ配置で対象を観測 し,対応点探索を行う際,計算機内部で左右カメ ラの座標系をFig. 5(b)のように変更することで, 処理を簡単化している。この処理がカメラ座標変 換であり,カメラキャリブレーションによりあら かじめ得られている座標系の<sub>L</sub>との<sub>R</sub>の関係から, 簡単な行列演算で座標変換が実現できる。

4.2.2 処理の詳細

Fig. 6の場合を考える。左画像中の点pに対応す る右画像中の点はエピポーララインl<sub>p</sub>上にある。

一般に, *l<sub>p</sub>*上には複数の点が存在するため, 図の 例では, *q*1, *q*2, *q*3のどれが対応点かを一意に決 定する必要がある。また場合によっては隠れ(オ クルージョン)やノイズの影響によって*p*に対応 する点が右画像中に現れない場合も生じる。この ような曖昧性をできるだけ解消して唯一の対応点 を求めようと,これまでに数多くの対応点探索の 手法が提案されてきた。

筆者らは,エッジを基準とした対応点探索手法 を開発し,実際の工業部品を含む画像に有効な拘 束条件,評価関数を組み込むことで信頼性の高い 対応点探索を実現した。以下に本手法の処理内容 をステップごとに述べる。

Step-1. 探索範囲の限定

対象とカメラ間の距離および対象の大きさが大 まかにでも予想できれば,探索範囲を限定するこ とができる。たとえばFig.7において,基線長(カ メラ間距離)をI,焦点距離をf,対象物との距離 範囲をd ± Δdとすれば,点plに対応する右画像中 の点の存在すべき範囲rangeは視差(xr - xl)で表 すと式(4)で与えられる。よって,plに対して視差 がこの範囲にあるエピポーラライン上のみ探索す



Fig. 6 Problem of stereo correspondence.

ればよい。このように探索範囲を限定することで, 誤対応を減らしたり,処理時間の短縮化をはかる。

$$\frac{-fI}{d + \Delta d} \le range \le \frac{-fI}{d - \Delta d} \tag{4}$$

Step-2. 視差勾配による対応候補の限定

左画像中の注目エッジelの対応点候補を右画像 中から選ぶ。このとき,elのエピポーラ線上にあ リ,Step-1.の探索範囲にある右画像エッジの内で, 式(5)を満たすエッジerを対応候補とする。

$$\frac{4\left(\tan\theta(el) - \tan\theta(er)\right)^2}{\left(\tan\theta(el) + \tan\theta(el)\right)^2 + 4 \ \tan^2\theta(el) \tan^2\theta(er)} < 0.5^2$$
(5)

ここでθ(el),θ(er)はそれぞれエッジel,erの エッジ方向を表している。式(5)は視差勾配限界 (Disparity Gradient Limit)とよばれる拘束条件で あり,心理物理学的知見から提案されたものであ る<sup>19,20</sup>。式(5)は左右のエッジの方向が急しゅん である場合は,人はその奥行きを知覚できないこ とを意味している<sup>注)</sup>。このように人間の視覚特性 を利用することで対応候補の限定を行っている。

Step-3. エッジおよび形状特徴の類似性に基づ

# く対応度sの算出

elに対して先の視差勾配限界を満たすerを対応 候補とし, Fig. 8に示すように左右エッジelとer

注)例えばシャープペンの先を注視した場合,シャープペ ンの奥行き感は得られにくい。



Fig. 7 Limitation of search area by using both the distance from cameras to the object and the scale of the object.

の対応度s(el, er) それ(の)から算面9る。  
s(el, er) = c(el)×
$$\left(1 - \frac{|c(el) - c(er)|}{c(el) + c(er)}\right)$$
× or \_ratio  
ただし  
 $\left(1 - \frac{\pi - |\theta(el) - \theta(er)|}{\pi/2}, if |\theta(el) - \theta(er)| \ge \pi/2$ 

いわた谷山

or \_ratio = 
$$\begin{vmatrix} \pi/2 \\ 1 - \frac{|\theta(el) - \theta(er)|}{\pi/2}, & \text{if } |\theta(el) - \theta(er)| < \pi/2 \end{aligned}$$
(6)

ここでc(el), c(er)はそれぞれエッジel, er のエッジ強度である。式(6)は, 左のエッジ強度 が大きく, 左右のエッジ強度およびエッジ方向の 差が小さい程, 対応度sが大きなることを表して いる。つまり, 注目しているエッジが顕著な特徴 でかつ左右でその性質が類似しているほど, 対応 度が高くなるよう評価関数を設定した。

一般にエッジオペレータは局所演算であり,それによって得られたエッジの方向値はノイズなどの影響を受けやすい。そのため,式(6)でのエッジ方向のはFig.9に示すように,そのエッジが含まれる2次元形状から求めている<sup>14)</sup>。つまりエッジが線分形状に含まれる場合はその線分方向が, 楕円形状に含まれる場合は接線の方向がエッジの方向となる。このように2次元形状情報を利用す



Fig. 8 Matching strength between left and right edges.



Fig. 9 Edge orientation using 2D geometrical feature.

ることでノイズの影響を受けにくい対応度を求めている。

Step-4. 形状の連続性に基づく対応度tsの算出

Fig. 10に示すように左画像で長い線分あるいは 楕円として観測された顕著な特徴は右画像中でも 同様な特徴として観測されることが多い。このよ うな性質を利用して左画像中の同じセグメントに 属するエッジ点が右画像中でも同じエッジセグメ ントと対応が付いている場合は,相互に対応度s を足し合わせる。これをセグメントの連続性を考 慮した対応度ts(el,er)とする。

エッジ対エッジの局所的な対応度sのかわりに, 大局的な対応度tsを評価することで,形状の連続 性を考慮した,より信頼性の高い対応点探索を実 現することができる。

Step-5. 対応度をコストとしたDPによる順序拘束 これまでのところで,すべてのelに対するすべ ての対応候補との対応度{ts(el,er)}が得られた。

最後に動的計画法 (Dynamic Programming)によ り,対応度tsをコストとしたelに対する唯一の対 応点を決定する。この時,視差が滑らかに変化す ると仮定すると,Fig.11のように左右の対応の順



Fig. 10 Matching strength between left and right edges using figural constraint.



Fig. 11 Violation of order constraint.

序が逆転することはあり得ない。これを順序拘束 とよび,この拘束条件をDP法に組み込んで,エ ピポーララインごとに対応点を決定する。

以上の処理により,エッジ単位での左右の画像 間の対応が得られる。

4.3 3次元形状復元

先の対応点探索の結果から,対応の付いた左画 像エッジに対しては奥行き距離が求められる。そ して,左画像の2次元形状とこの奥行き情報から3 次元の形状を復元する。ただし誤対応が含まれて いる場合もあるため,3次元線分および楕円の存 在する平面を最小2乗法によって推定して3次元 形状を復元する。

4.4 照合および位置姿勢検出

最後に,画像から復元された3次元形状とモデ ルとの間で照合を行い,位置姿勢を検出すること で物体認識を実現する。

照合,位置姿勢検出アルゴリズムは,基本的に は我々がこれまでに開発した2次元のモデルベー スド・ビジョンシステムに組み込まれた手法とほ ぼ同じである。<sup>3,15,16)</sup>

4.4.1 照合

照合に使われる対象物体のモデルは, CADデー タや図面などから作成した線分と楕円よりなる3 次元のワイヤフレームモデルである。

画像から復元された3次元形状要素( $F = \{F_i\}$ ) とモデル要素( $M = \{M_j\}$ )との照合は,要素間の 組み合せの探索木を生成し,各ノードでの評価値 からゴールを探索することで行う。評価値は線分 や楕円の長さ,半径などの形状の類似性および形 状要素間の相対的位置関係の類似性から算出す る。

4.4.2 位置姿勢検出

照合で得られた復元形状 {F} とモデル{M}の組 から,復元形状Fの位置姿勢を求める。位置姿勢 の内,まず回転成分Rを計算し,次のステップで 並進成分tを求める。以下に計算手法の概略を述 べる<sup>17)</sup>。

Step-1. 回転成分の計算

ベクトルm'が回転によってベクトルmに移動し たとき,2つのベクトルの集合から最小二乗法に よって回転行列Rを求める問題を考える。このと きRは式(7)の式を解くことで求められる。

$$P = \sum_{i=1}^{n} w_i | \boldsymbol{m}_i - \boldsymbol{R} \boldsymbol{m}'_i |^2 \to min$$
<sup>(7)</sup>

つまり最小のPを与えるRが求める回転行列で ある。ここでwiは各mi,m'iに対する重み係数で あり,先の照合での評価値を用いる。また式(7) のm,m'には,復元形状 {F}とモデル {M}の照 合の組が線分の場合は線分の単位方向ベクトル を,楕円の場合は楕円の存在する平面の単位法線 ベクトルを用いる。

Step-2. 並進成分の計算

Fig. 12に示すように,点p'が並進ベクトルtによって点qに移動したと考える。点p,p'における単位方向ベクトルをそれぞれv,v'と表し,qからpを通る方向vの直線に垂線を下ろしたときの直線との交点をrとすると式(8),(9)が得られる。

$$\overrightarrow{pq} = \mathbf{p}' + \mathbf{t} - \mathbf{p} \tag{8}$$

$$\vec{pr} = v \left( v \cdot \vec{pa} \right)$$
(9)

いま,点p<sup>-</sup>が並進*t*によって点pの直線上に移動 した場合, *q*r=0 であるから,結局

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left| \overrightarrow{pq} - \overrightarrow{pr} \right|^2 \to min$$
(10)

となるtを求めることに問題は帰着される。ここ で  $\frac{\partial E}{\partial t} = 0$ を解くことでtが得られる。

5.実験結果

5.1 エッジ抽出

Fig. 13にVPSEEによって処理された画像を示 す。Fig. 13(a)はFrame Grabberに取り込まれた工業 部品の濃淡画像である。Fig. 13(b)は処理結果後の エッジ強度画像, Fig. 13(c)はサブピクセル精度を



Fig. 12 Translation from *p*' to *p*.

もったエッジ画像である。この例では,画素レベ ルでエッジ位置を表現している。画像中の長方形 で囲まれた穴の部分を拡大するとFig. 13(d)にな る。正方形は1画素を表し,その内部にサプピク セルのエッジが表示されている。サプピクセルの エッジは画素レベルのエッジにくらべ明らかに滑 らかな曲線を表現しており,高精度なエッジが抽 出できていることが確認できる。512×512の濃淡 画像から33ミリ秒で処理は完了する。ただし,ス ループットレートは7H(1H=63.6μ秒)である。

VPSEEのエッジ抽出精度を評価するために以下 の実験を行った。実験装置をFig. 14に示す。理 想的なステップエッジが抽出されるよう白黒に塗



Fig. 13 Data flown from VPSEE.



Fig. 14 Setup for investigation of edge resolution.

分けられた測定対象を用意し,カメラの光軸と垂 直になるように配置した実験ステージ上において 0.1mmづつシフトさせときの抽出したエッジ位置 座標を計測する。

評価実験の結果をFig. 15に示す。得られたエッジ座標値とそのシフト量の関係はばらつきを持った直線となる。定量的な評価を行うために,理論上の直線と計測値との差の3σをとることにより分解能を計算する。

横軸にスケールファクタ(1画素あたりの実寸 の大きさ),縦軸に理論値と計測値の差の3σより 解像度に換算した値を示す。図に示すようにエッ ジ抽出精度は0.047画素以上であることが分かり, サプピクセル(0.1画素)以上のエッジ抽出精度が 確認できた。

5.2 実部品認識

実部品の認識実験の結果の一例をFig. 16に示す。 Fig. 16(c)は左右カメラの濃淡画像Fig. 16(a),(b)か ら復元された3次元形状である。またFig. 16(d),(e) は(c)の3次元形状を真上,真横から見たものであ る。顕著な特徴である長い線分や円形状が3次元 的に復元されていることがわかる。

Fig. 16(f)は照合,位置姿勢検出のためのモデル 形状である。Fig. 16(g)は照合,位置姿勢検出後, モデルを左カメラの濃淡画像上にオーバーライト したものである。この結果から部品の位置姿勢を 正しく検出していることがわかる。

異なる視点からの画像に対する認識実験の結果 をTable 2に示す。



Fig. 15 Resolution test.

Fig. 16の部品をおよそ20度づつ回転させて対象 の全方位から撮像した17種類の画像に対しては, 15例で認識に成功した。

失敗した2例は,部品後方から撮像した場合で



Fig. 16 Example of the object recognition.

Table 2	Results	of rec	ognition.
---------	---------	--------	-----------

Group (Sample No.)	No. of success	Percent %
Omni-direction views (17)	15	88
Front vieus (19)	19	100

ある。部品後方からは顕著な特徴が復元されにく いため,認識に失敗したと考えられる。一方顕著 な特徴が抽出されやすい部品前方から撮像した19 種類の画像に対しては,すべての場合で認識に成 功した。

なお,画像入力から認識までの処理時間は, Sun SPARCstation 20(60MHz)でおよそ20秒であった。

6.まとめ

本稿では,画像による3次元物体の形状復元お よび認識を目的としたステレオビジョンシステム について述べた。

本システムの特徴として

- ・CCDカメラを入力センサとしているため使用 環境があまり限定されない
- ・線分,楕円などの形状情報を用いたモデルベ ースのビジョンシステムであり汎用性に富む
- 高精度なエッジをビデオレートで抽出するハ ードウェアVPSEEを備えている
- ・対応点探索に実際の工業部品を含む画像に有 効な拘束条件を付加することで,誤対応の少 ない立体視を実現した

などが挙げられる。

実験において,サブピクセルの精度でエッジが 抽出できることを明らかにした。また,複雑な 形状をもった自動車部品に本システムを適用した 結果,高い成功率で認識が可能であることを示し た。

今後の課題としては,(1)処理の高速化,(2)線 分,楕円以外の特徴の復元,(3)奥行き情報復元 の信頼性向上などが挙げられる。

(1)の問題は,高速なCPUの利用あるいはアプ リケーションに応じた処理の簡略化などで対応で きると考えている。(2)に関しては,より多くの 対象を取り扱うためには,現状の形状特徴だけで なく平面,円筒面などの面情報が有効であると考 えている。また(3)については,現在のエッジベ ースの立体視手法に加えて,新たに濃度値をベー スとした相関手法を組み合わて利用することで, 信頼性が高められると考えている。

おわりに,本研究の共同研究者である英国シェ

フィールド大学AI Vision Research UnitのProf. J. P. Frisby, Prof. J. E. W. Mayhew, Dr. J. Porrillおよび トヨタ自動車ITエンジニアリング部の関係各位に 深謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 藤原和紀,他:"高速画像認識装置HIDIC-IP/200とその 応用"日立評論,70-7(1988),69~75
- 水谷栄二: "グレースケールパターンマッチングを用いたFA用画像処理装置とその応用例", O pluse E, 4(1991), 141~152
- Moribe, H., Nakano, M., Kuno, T. and Hasegawa, J. : "Image Preprocessor of Model-Based Vision System for Assembly Robots", Proc. ICRA, (1987), 366 ~ 371
- 谷内田正彦: "ロボットビジョンの概要と今後の展望",
   日本ロボット学会誌, 10-2(1992), 140~145
- 5) 富田文明: "3次元ビジョンシステムの実用化に向けて ",日本ロボット学会誌, 12-8(1994), 1124~1127
- Lowe, D. G. : "Three-Dimensional Object Recognition from Single Two-Dimensional Images", Artificial Intell., 31(1987), 355 ~ 395
- Yachida, M., Kitamura, Y. and Kimachi, M. : "Trinocular Vision : New Approach for Correspondence Problem", Proc. ICPR, (1986), 1041
- 8) 奥富正敏,金出武雄: "統計的モデルに基づく適応型ウ ィンドウによるステレオマッチング",電子情報通信学 会論文集, J74-D-II(6)(1991), 669~677
- Zhang, Z. and Faugeras, O. : "Three-Dimensional Motion Computation and Object Segmentation in a Long Sequence of Stereo Frames", Int. J. of Computer Vision, 7-3(1992), 211 ~ 241
- Kimura, Y., Naito, T., Nakano, M., Moribe, H. and Kuno, T.
   "Stereo Vision System for Car Assembly", Proc. ICRA, (1995), 1403 ~ 1409
- Canny, J. F. : "A Computational Approach to Edge Detection", IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8-6(1986), 679 ~ 698
- Porrill, J. : "Fitting Ellipses and Predicting Confidence Envelopes Using a Bias Corrected Kalman Filter", Image and Vision Computing, 8(1990), 37 ~ 41
- 13) Pollard, S. B., Mayhew, J. E. W. and Frisby, J. P. :

"Implementation Details of the PMF Stereo Algorithm", 3D Model Recognition from Stereoscopic Cues, Ed. by J. E. W. Mayhew and J. P. Frisby, (1991), 33 ~ 39, The MIT Press

- 14) Naito, T., Kikuchi, K., Kimura, Y., Nakano, M. and Moribe, H. : "Binocular 3D Vision System to Recognize Complex Industrial Parts", Int. Conf. Robotics and Manufacturing, (1993), 229 ~ 233
- Bolles, R. C. and Cain, R. A. : "Recognizing and Locating Partially Visible Objects : The Local-Feature-Focus Method", Int. J. Robotics Res., 1-3(1982), 57 ~ 82
- 16) Grimson, W. E. L. and Lozano-Pérez, T. : "Search and Sensing Strategies for Recognition and Localization of Two and Three Dimensional Objects", Int. Symp. on Robotics Res., (1985), 81 ~ 88
- 17) 金谷健一:画像理解 3次元認識の数理, (1990), 森北出版
- 18) Tsai, R. Y.: "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Offthe-Shelf TV Cameras and Lenses", IEEE J. of Robot. and Auto., 3-4 (1987), 323 ~ 344
- Prazdny, K. : "Detection of Binocular Disparities", Biological Cybernetics, 52(1985), 93 ~ 99
- 20) Pollard, S. B., Mayhew, J. E. W. and Frisby, J. P. : "PMF : A Stereo Correspondence Algorithm using a Disparity Gradient Limit", Perception, 14(1985), 449 ~ 470

# 著者紹介



内藤貴志 Takashi Naito 生年:1961年。 所属:ロボティクス研究室。 分野:コンピュータビジョンに関する研 究開発。 学会等:電子情報通信学会,日本ロボット 学会会員。



木村好克 Yoshikatsu Kimura
 生年:1964年。
 所属:ロボティクス研究室。
 分野:コンピュータビジョンに関する研究開発。
 学会等:日本ロボット学会会員。