エッジベクトル場における楕円形状検出[†]

後 藤 啓 介*・築 根 秀 男**

Extracting Elliptical Figures from an Edge Vector Field

Keisuke GOTO* and Hideo TSUKUNE**

This paper describes a method for extracting elliptical figures in an image by the Hough transformation. We overcome the dimension problem inherent to the Hough transformation by decomposing the five-dimensional Hough transformation space into three sub-spaces based on the edge vector field properties of ellipses. A peak in a sub-space represents a group of ellipses which have the same geometric property. By sequentially selecting the peaks in the three sub-spaces we can extract elliptical figures.

Experiments using images of machine parts show that this method extracts ellipses of various shapes under practical conditions.

Keyword: image processing, Hough transformation, elliptical figures, edge vector field

1. 緒 言

機械部品などの検査の自動化や機械部品の組立作業の自動化を行う場合には、対象物の幾何学的特徴を画像中から信頼性良く抽出する必要がある。特に、機械部品には円形状が多数用いられており、その画面上の投影像である楕円形状は重要な特徴と考えられる。

従来より、楕円形状を検出する方法は種々提案されている。それらは大別して、(1)局所的な連結性に基づく方法と(2)大局的な楕円の特徴をパラメータ空間上で抽出する Hough 変換法、の二つになる。いずれの方法にしてもまず画像の明暗変化を微分演算によって画像化したエッジ画像を求める。

(1)の方法には、隣接するエッジを接続して構成される弧に対して最小2乗法のあてはめを行った Naka-

gawa ら⁹⁾の方法などがある。このような方法は弧を描くことができれば遮へい物により楕円の一部しか見えない場合でも検出できる特長をもつが、楕円が分断されているとべつべつの楕円と誤認識してしまったり、雑音に弱いなどの問題点を有している。

いっぽう、(2)の Hough 変換は特徴抽出の基本的な方法として提案された。抽出すべき特徴を記述するパラメータを座標軸とする空間を構成し、画像内の各エッジの情報により決まる各曲面の交点として特定の特徴を抽出するものである。実際にはパラメータ空間の各メッシュにアキュムレータを配し、曲面の通過ごとに単位加算を行って空間上でヒストグラムを作成し、極大値を探索してその座標値で特徴を決定する。検出対象は直線に始まって、円、楕円、さらに任意形状へと手法の拡張が図られてきており^{1), 2), 4)~8), 10), 15)}, 手法の理論的側面の研究も行われている^{11)~13)}。初期の Hough 変換はエッジの位置情報のみを用いたが⁵⁾, まもなくエッジの方向情報の併用の有効性が認められ^{1), 7), 10)}, 処理結果の確実さを増すとともに、任意形状の検出を行う方法も提案されている^{1), 2)}。Hough 変換を用いる楕円検出は楕円の特徴をパラメータ空間において大局的に把握できるため、雑音に強くしかも楕円が分断されていても同じ一つの楕円として検出できるなど、(1)の場合と比較して優れた方法となっている。

しかし、Hough 変換を実行するうえでの最大の障害はパラメータ数の増大とともに指数的にパラメータ空間の次元が増大してしまうことであり、要する処理時間や記憶容量が実行不可能なほど大きくなってしまふ。任意の楕円形状を記述するためには5つのパラメータが必要であり、5次元のパラメータ空間を扱わねばならない。Tsuiji ら¹⁴⁾は楕円上の二つのエッジ間に成立する性質を用いて二つのパラメータ空間を構成し Hough 変換を適用する方法を示した。パラメータ空間の次元数は共に2以下であり、処理時間や記憶容量に関しては大きく改善された。しかし、あらかじめ長

[†] 第25回自動制御連合講演会で発表 (昭 57・11)

* (株)明電舎 東京都品川区大崎 2-1-17

** 電子技術総合研究所 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

* Meidensha Electric Mfg. Co., Ltd., Shinagawa-ku, Tokyo

** Electrotechnical Laboratory, Nihari-gun, Ibaraki

(Received September 24, 1983)

(Revised January 5, 1984)

い直線部分の除去が必要であったり、楕円とは無関係な点の除去が不十分なため雑音の多い画像には適用が難しいなど楕円の性質に関わる問題点を残している。

Ballard¹⁾は楕円上の二つのエッジに対して成立する 4 つの方程式を連立させて 1 次元のパラメータ空間を構成したが、その計算は容易ではない。さらに、Ballard^{2), 3)}は一般的にパラメータ空間の部分パラメータ空間への分解を提案し、2 次元多角形と 3 次元多面体の検出に適用している。

本論文では Hough 変換を用いた楕円検出を試みている。Ballard^{2), 3)}と同じくパラメータ空間の部分パラメータ空間への分解を行うが、これが可能かつ効果的であるためには部分パラメータ空間の構成を楕円の性質に基づき行う必要がある。ここでは、エッジ画像を 2 次元ベクトル場と見、楕円上のエッジベクトル場の性質を用いて 5 次元のパラメータ空間をおおの 2 次元以下の三つの部分パラメータ空間に分解する。この方法は Tsuji¹⁴⁾の方法の発展にもなっている。

本方法によれば、直線部分の除去などの前処理を必要とせずに個々の楕円形状（一般には有心 2 次曲線）を的確に検出することができる。また、複数楕円が存在する場合でも各部分パラメータ空間でつぎつぎに分離することができる。処理時間と記憶容量についても十分実行可能なものとなっている。

2. 原 理

画像中の点 (x, y) における濃度 I の 1 次微分は次式で与えられる。

$$\text{grad } I = (\partial I / \partial x, \partial I / \partial y) \quad (1)$$

$|\text{grad } I|$ の大きな点は、画像中の明暗の差の大きな点（エッジ）に対応する。このような点に対し、ベクトル $\vec{n}$ をつぎのように定めるとき、 $\vec{n}$ をエッジベクトルと呼ぶものとする。

$$\left. \begin{aligned} \text{grad } I \cdot \vec{n} &= 0 \\ \frac{\text{grad } I \times \vec{n}}{|\text{grad } I \times \vec{n}|} &= (0, 0, 1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 $\vec{n} = (n_x, n_y)$ 、 $|\vec{n}| = 1$ である。(2) の第 2 式では $\text{grad } I$ と $\vec{n}$ を画像面に垂直な軸を加えた空間における 3 次元ベクトルと見ている。このベクトルはエッジに沿って明と暗の領域を常に一定の側に見る向きを示す。Fig. 1 にそのようすを示す。

楕円は 2 次曲線であり、その一般式はつぎのように示される。

$$ax^2 + 2hxy + by^2 + 2gx + 2fy + c = 0 \quad (3)$$

ここに、 a, h, b, g, f, c は定係数である。さらに $a \neq 0$ として a に関して各係数を正規化し、改めて次式を一

Fig. 1 An edge vector

般式とする。

$$x^2 + 2Hxy + By^2 + 2Gx + 2Fy + C = 0 \quad (4)$$

(4) 式に直接 Hough 変換を適用すると 5 次元のパラメータ空間が必要で、処理時間と記憶容量が莫大なものとなり現実的な方法とはなりえない。

さて、 $H^2 - B \neq 0$ のとき、(4) 式は有心 2 次曲線であり、唯一の中心をもつ。その座標を (x_0, y_0) とおけば、(4) 式はつぎようになる。

$$X^2 + 2HXY + BY^2 + C' = 0 \quad (5)$$

ここに、 $X = x - x_0$ 、 $Y = y - y_0$ 、そして C' は H, B, G, F, C により決まる定数である。

(5) 式の微分式はつぎようになる。

$$XdX + H(YdX + XdY) + BYdY = 0 \quad (6)$$

本式は点 (x_0, y_0) を中心とした有心 2 次曲線群の微分係数ベクトルのベクトル場を表わしている。 $n_x/dX = n_y/dY$ に注意すれば、 dX, dY は (2) 式により画像の 1 次微分値から求められる。したがって (6) 式は有心 2 次曲線上のエッジのベクトル場を表わしていると考えてよい。 X, Y, dX, dY はすべて画像より計算可能な値であり、これらを用いて H と B の 2 軸からなる 2 次元のパラメータ空間に Hough 変換を適用できることになる。

有心 2 次曲線の中心はエッジベクトルに関するつぎの性質を利用して求める (Fig. 2)。

性質 A：中心に関し対称な、有心 2 次曲線上の 2 点のエッジベクトルは互いに正反対の向きを示す。

(a) Edge vectors of an elliptical region

(b) Edge vectors of a hyperbolic region

Fig. 2 Edge vectors of central conic regions

Fig. 3 Constructing the (H, B) histogram

そこで、エッジベクトル $\vec{n}_1, \vec{n}_2$ が、

$$\vec{n}_1 + \vec{n}_2 = 0 \quad (7)$$

の関係にあるような2点の組を求め、その中点の分布を求めることにより有心2次曲線群の中心を推定することができる。実際には中点位置に関して画像の x, y 軸で張られる2次元ヒストグラムをとり、その極大値を与える点を中心の候補とすればよい。このヒストグラムを以後、中点ヒストグラムと呼ぶ。

中点ヒストグラムには Fig. 2(b) で示すような双曲線形状が含まれることに注意が必要である。これは双曲線の焦点を含む二つの領域が明、含まない一つの領域が暗の状況などに現れる。性質Aを満足しているので中点ヒストグラムをとるだけでは楕円形状と区別することはできない。楕円形状のみを検出するためにはさらに別の条件が必要ということになる。

さて、中心の候補点が決まれば、(6)式に Hough 変換を適用し H と B を求めることができる。Fig. 3 (a) は中点ヒストグラムの極大値を支持するエッジベクトルを示す。もし、これらが実際に有心2次曲線上にあれば Fig. 3(b) に示すように画像中の各点の観測値は適当に定めた2次元空間上で一つの直線上にのる。(たとえば、2軸を $p = XdX/YdY$, $q = (YdX + XdY)/YdY$ と考えることができる)。(6)式に基づいて Hough 変換を行うことは、 H と B をパラメータとする空間 ((H, B) パラメータ空間) 内で H と B に関する直線式の交点を求めそのヒストグラムを作ることである。このヒストグラムを以後、 (H, B) ヒストグラムと呼ぶ。そのようすを Fig. 3 (c) に示す。この極大値を求めることにより H と B を推定し、極大値を支持するエッジベクトルを取り出すことができる。

以上の手続きは有心2次曲線であれば等しく有効であり、すでに述べたように楕円のみならず Fig. 2 (b) のような双曲線形状についても検出される。実用的には、楕円の検出が重要であるが、その区別は (H, B) パラメータ空間上でつぎの条件を用いることで容易にできる。

$$H^2 - B < 0 \quad (8)$$

これは Fig. 3 (c) の斜線を施した範囲に相当する。

さらに、実際には検出する楕円の短軸と長軸の長さの比は常識的な値以上としてよい。その値を r とすればつぎのような関係にあり、たとえば、 $0.2 \sim 0.3$ 以上の値と考えることができる。

$$r < \frac{\text{検出楕円の短軸の長さ}}{\text{検出楕円の長軸の長さ}} \leq 1 \quad (9)$$

ここで、 r に関して H と B の関係式に直せば、次式のようになる。

$$\frac{H^2}{\frac{1}{4} \cdot \frac{(r^2 - 1)^2}{r^2}} + \frac{\left\{ B - \frac{1}{2} \left(r^2 + \frac{1}{r^2} \right) \right\}^2}{\frac{1}{4} \left(r^2 - \frac{1}{r^2} \right)^2} < 1 \quad (10)$$

(10)式は(8)式の範囲内にあり、楕円の存在範囲を Fig. 3(d) に示すように (H, B) パラメータ空間の閉領域内部に限定することができる。図において領域 R_1 が(8)式を満たし、領域 R_2 が(10)式を満たす。これはヒストグラムをとる場合、処理時間と記憶容量の点できわめて有利なことである。

以上の処理により楕円上のエッジベクトル場を分離抽出し、そのパラメータを推定できる。

最後の未定係数は(4)式の C であり、これは楕円の大きさを決めるものである。(4)式より、

$$C = -x^2 - 2Hxy - By^2 - 2Gx - 2Fy \quad (11)$$

ここに, $G = -x_0 - Hy_0$, $F = -Hx_0 - By_0$ である.

(11) 式の右辺の係数はすべて推定済であるので, 抽出されたエッジベクトル場上のベクトルの位置座標から C に関する 1 次元のヒストグラムを作成できる. 以後, これを C ヒストグラムと呼ぶ. この極大値を C の推定値とする. このようにして楕円の大きさも簡単に得ることができる.

以上のように順次三つのヒストグラム, すなわち, 中点ヒストグラム, (H, B) ヒストグラム, および, C ヒストグラムを作成し, それらの極大値とそれを支持するベクトルを抽出していくことにより楕円の検出を行うことができる. 三つのヒストグラムは 5 次元のパラメータ空間の部分パラメータ空間に相当する.

3. 複数個の楕円検出

本方法は 1 個の楕円ばかりではなく, 複数個の楕円 (一般には有心 2 次曲線) を正しく分離して検出できる. それぞれのヒストグラム上の複数個の極大値と複数個の楕円との関連を以下に述べる.

3.1 中点ヒストグラム

中点ヒストグラム上の複数個の極大値は複数個の中心の異なる有心 2 次曲線の存在を示している. しかし, 楕円の場合を例にとると, Fig. 4(a) に示す中心の異なる楕円間で, (7) 式を満たすエッジの中点が余分に計算され, 結果として Fig. 4(b) のように, 存在する楕円の個数以上の極大値が現れる可能性がある. このような楕円間の相互干渉による極大値 (干渉極大値と以後呼ぶ) を支持するエッジベクトル場は後のヒストグラム上で有意な極大値をもつことはほとんどないが, これを選ばないことは処理の効率化につながる. 干渉極大値は極大値群の中央寄りに出現するので, 極大値群の周辺に位置する極大値を優先して処理することが考えられる.

本方法では, 極大値の個数を K , 極大値群の重心位

(a) Midpoints between pairs of the vectors by (7) (b) Peaks in the center histogram

Fig. 4 Spurious peaks by interactions between edges of central conic regions

置を G , また, 重心から各極大値までの位置ベクトルを $r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_k$ としたとき, まず最初の極大値を重心から最も遠い位置にある, つまり, $|r_i|$ が最大となる極大値を選んでいく.

この極大値を支持するエッジベクトル場が (H, B) ヒストグラム上で極大値をとれば, このエッジベクトル場は有心 2 次曲線上に分布しているエッジを多く含むので, 中点ヒストグラムの極大値の選択が正しいと判定できる. その場合このエッジベクトル場をエッジ画像から取除き, 再度中点ヒストグラムをとる操作を行う. 検出済のエッジを消去することにより, 干渉極大値は急減してゆく.

しかし, もし, 有心 2 次曲線上のエッジでなければ第 2 番目に選択する極大値をつぎのように決める.

$$\max_i (|r_i| + |r_i - r_p|) \quad (12)$$

ここに, r_p は第 1 番目に選択された極大点の位置ベクトルである. (12) 式は重心までの距離と選択済極大点との距離の和が最大となる極大点の選択を意味するもので実験的に工夫したものである. なお, 第 2 番目以降の極大値が棄却された場合, (12) 式を繰返して第 3 番目以降の極大点を求めてゆき, 有心 2 次曲線上のエッジを含む極大値を探す.

以上の操作を行えば, 無差別に中点ヒストグラムの極大点を選択する場合に比べて (H, B) ヒストグラム上で棄却されることが少なく効率的な検出を行うことができる.

3.2 (H, B) ヒストグラム

(H, B) ヒストグラム上の複数個の極大値は中心を共有し, 離心率や傾きの異なる有心 2 次曲線 ((8) 式または (10) 式を満たす場合は楕円) が複数個存在していることを示している. なお, (H, B) ヒストグラム上で極大値を支持しないエッジは中点ヒストグラムでたまたま (7) 式を満足するために除去できなかった雑音であり, その区別もまた容易である.

3.3 C ヒストグラム

楕円の大きさを定める係数 C だけが異なる複数個の楕円は同心楕円である. 同心楕円は (H, B) ヒストグラム上では 1 個の極大値として現れるが, C ヒストグラム上では複数個の極大値として存在する. これらを順次拾い上げるにより, すべての同心楕円を求めることができる.

この場合, Fig. 5 に示すようにエッジベクトルの楕円中心に関する回転方向を考慮して, 時計, 反時計回りの両者についてそれぞれ C ヒストグラムをとるようになれば, 非常に幅の狭い同心楕円でも分離が可能

Fig. 5 Separating edge vectors

である。

以上のように、三つのヒストグラムについて、複数个の極大値が存在する場合の意味を考え、複数个の楕円を的確に分離し検出できることを示した。

4. 最小2乗法の適用

本方法の推定精度を上げるために統計的手法を援用することができる。三つのヒストグラム上の極大点から直ちに楕円定数を決定するのではなく、それらの極大値に寄与したエッジに対して改めて最小2乗法を適用する。中点ヒストグラムと (H, B) ヒストグラムを用いて抽出されたエッジベクトル場に対しては、つぎに示す (13) 式の Q_1 、さらに C ヒストグラムを用いて抽出されたエッジベクトル場に対しては (14) 式の Q_2 をそれぞれ最小にするように定数を決定する。

$$Q_1 = \sum_i \{x_i dx_i + H(y_i dx_i + x_i dy_i) + B y_i dy_i + G dx_i + F dy_i\}^2 \quad (13)$$

$$Q_2 = \sum_i \{C + x_i^2 + 2\tilde{H} x_i y_i + \tilde{B} y_i^2 + 2\tilde{G} x_i + 2\tilde{F} y_i\}^2 \quad (14)$$

ただし、(14) 式の $\tilde{H}$ 、 $\tilde{B}$ 、 $\tilde{G}$ 、 $\tilde{F}$ は Q_1 の最小化によりすでに推定済の値である。

5. 処理ならびに結果

原画像は機械部品としてハンドドリルのヘッドおよびガasketを組合せたものを用いた。画像の大きさは 256×256 画素で、各画素は 256 階調で表現される。原画像を Photo. 1 に示す。

本方法の処理手順を Fig. 6 に示す。以下にこれに従って処理および結果を述べる。

5.1 前処理

原画像のエッジベクトルは Sobel 1 オペレータを用いた空間微分処理より (2) 式を適用して求めた。このときその大きさがしきい値以下の微分値は取除いたが、Photo. 1 に示す原画像に対しては、しきい値を 24.5 とした。その結果、エッジは 5,394 点得られた。またエッジベクトルの向きに関して 0° から 360° の範

Photo. 1 The original image

Fig. 6 The image processing sequence

Photo. 2 Edge vectors

围を 2° 刻みで量子化している。

Photo. 2 はエッジ画像の一部 ($49 \leq x \leq 112$, $17 \leq y \leq 80$) を拡大したものである。

Fig. 7 The center histogram

Photo. 3 The edge vectors of a selected peak in the center histogram

5.2 中点ヒストグラム

中点ヒストグラムは Photo. 1 で示した原画像のように複雑なものに対しては、極大値の数は Fig. 7 に示されるように多数にのぼる。これらの極大値の中にはすでに述べたように、楕円形状によるものだけでなく、干渉極大値や楕円とは無関係な雑音の影響で小さな極大値となって出現したものも多く見受けられる。

そこで、特に雑音の影響を少なくするため極大値に関してもしきい値処理を行っている。本実験では度数が 45 以上となる極大値だけを検出対象とした。また、第 3 章で述べたように極大値の選択方法に工夫を行った結果の一例を Photo. 3 に示す。これは Photo. 2 の領域に対応し、選択された極大値のエッジベクトルである。

5.3 エッジベクトルの分離

中点ヒストグラム処理の後でエッジベクトルの分離を行っている。原画像にはほとんど同じ大きさの同心楕円が含まれているが、それぞれエッジベクトルの回転方向に従って時計、反時計回りに分離した。以降、同心性の判定を行うまではそれぞれ処理を区別している。

5.4 (H, B) ヒストグラム

Photo. 3 における反時計回りのエッジベクトル場に Hough 変換を適用して得られた (H, B) ヒストグラム

Fig. 8 The (H, B) histogram Photo. 4 The edge vectors of a selected peak in the (H, B) histogram

ラムを Fig. 8 に示す。Photo. 3 に示す例では、ほぼ楕円の傾向を示すエッジが得られているので、 (H, B) ヒストグラムの極大値も先鋭なものとなっている。

Photo. 4 は Fig. 8 の極大値のエッジベクトルを示したもので、Photo. 3 にわずかに見える雑音はこの処理で取除かれている。

なお、 (H, B) ヒストグラムの軸の取りかたは Fig. 9 に示すように工夫している。 H と B は原理にあるように a に関して正規化した係数であり、 $B=1$ を境として、 a と b の大小関係、つまり、楕円の長軸と短軸の関係が逆転するので両係数の対称性を保つ必要があるためである。これによって領域 R_1, R_2 の形も図のように変わる。

5.5 エッジベクトル場の拡大

本方法において、同一楕円上にありながら (7) 式の

Fig. 9 The symmetrical axis in the (H, B) histogram

Photo. 5 Extended edge vectors

条件に合う相手のエッジが存在しなかったため中点を支持するエッジとして採用されなかったエッジが多数存在する可能性がある。これらのエッジは次式を満足するエッジとして救済し、(13)式を最小化する際の標本点として用いることができる。

$$\frac{\bar{n}_p \cdot \bar{n}_i}{|\bar{n}_p| \cdot |\bar{n}_i|} \geq 1.0 - \varepsilon \quad (15)$$

$\bar{n}_p$ は画像から得られるエッジベクトルで、 $\bar{n}_i$ は (H, B) ヒストグラムの極大点に相当する H, B の値で決まる同心楕円の接線ベクトルで、向きも(2)式に従って考慮している。 ε は適当に選んだ正の微小値である。

本実験では ε は、救済するエッジベクトルの向きが楕円上のエッジベクトルの向きと比較して、 $\pm 5^\circ$ の角度差を許容する範囲に設定した。Photo. 5 はその結果で中点ヒストグラムでは得られなかった多数のエッジベクトルを含んでいる。

5.6 同心性の判定

同心楕円の場合、(4)式の H, B, G, F の値は共通である。しかし、幅が狭い同心楕円を検出できるようにエッジベクトルを回転方向で分離して、それぞれ最小2乗法により各係数を推定するとやや異なった値をとってしまい実用上問題となる。そこでエッジベクトル場の同心性につき判定を行う。

いま、時計・反時計回りの二つのエッジベクトル場について、それぞれ中心を $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 、軸の傾きを θ_1, θ_2 とする。実験的に定めたつぎの判定式を用いる。

$$U = W_1 \cdot (\Delta x^2 + \Delta y^2) + W_2 \cdot \Delta \theta^2 \quad (16)$$

ここに、 $\Delta x = x_2 - x_1$, $\Delta y = y_2 - y_1$, $\Delta \theta = \theta_2 - \theta_1$ で、 W_1, W_2 は重みである。 $W_1 = (2\pi)^2$ を、 W_2 は画像サイズ $N \times N$ 画素のとき、 $W_2 = (N/2)^2$ とした。

U を評価基準として用い、 U の値がしきい値以下のとき、二つのエッジベクトル場は同心性を有するものとした。実験では、しきい値 620 を与えた。

これより、もし、同心楕円と判定されれば、いった

Photo. 6 The final result

ん二つのエッジベクトル場を統合し、再度最小2乗法によりエッジベクトル場の各係数を推定している。

5.7 エッジベクトルの消去

C ヒストグラムで最終的に楕円または複数の同心楕円が決定されると、新たにほかの楕円群を検出するため以上の一連の手続きを繰返すが、第3章で述べたように楕円間の相互干渉を排除するため、検出された楕円上のエッジベクトルは元のエッジ画像から消去する。

5.8 最終結果

最終的に得られた結果を Photo. 6 に示す。これは原画像に検出した楕円を重ねて表示したものである。

なお、Photo. 6 においては、完全楕円の全周囲長の40パーセント以上の弧の長さを有するさまざまな楕円（重畳楕円、部分楕円、同心楕円）を検出したものである。

6. 考 察

Hough 変換の適用では、従来から処理時間が問題となっている。本方法の場合を以下に検討する。

エッジ画像におけるエッジベクトル数を N 、エッジベクトルの向きの量子代数を d_θ 、中点ヒストグラムの極大値を支持するエッジベクトル数を N_H とし、 (H, B) ヒストグラムの極大値を支持するエッジベクトル数を N_C とする。通常の場合、 $N \gg N_H, N_C$ であるから、Tsuji ら¹⁴⁾と同じ論法により、中点ヒストグラムの作成に最大の処理時間が必要となる。したがって、総処理時間は N^2/d_θ に比例した時間といえることができる。

なお、Photo. 6 の検出に関して、実際に要した時間は VAX11/780 を用いて、1 エッジベクトル場あたり 1~1.5 分程度である。

7. 結 言

本方法はエッジ画像を2次元のベクトル場と見て、楕円形状を検出するため Hough 変換を適用したもの

である。Hough 変換に特有のパラメータ空間の次元数の問題は三つのヒストグラムを用いることで解決することができた。これらのヒストグラムは楕円上のエッジベクトル場の性質に基づいたもので、本方法は以下の特長を有する。

- (1) 各ヒストグラムは 2 次元以下なので処理時間や記憶容量に関して十分実行可能な範囲にある。
- (2) 楕円をほかの有心 2 次曲線から分離できる。
- (3) 複数個の楕円をそれらの形態に応じて検出できる。
- (4) 楕円が分断されていても一つの楕円として検出できる。
- (5) 雑音に強い。

最後に、本研究を行うにあたって種々のご助力ならびにご指導をいただきました電子技術総合研究所制御部長若松清司氏、システム制御研究室長赤堀寛氏、情報制御研究室長柿倉正義氏、ならびに各研究室の皆様へ深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) D. H. Ballard: Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes, *Pattern Recognition*, **13-2**, 111/122 (1981)
- 2) D. H. Ballard: Parameter Networks: Towards a Theory of Low-Level Vision, *Proc. of 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1068/1078 (1981)
- 3) D. H. Ballard and D. Sabbah: On Shapes, *Proc. of 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 607/612 (1981)
- 4) D. H. Ballard and C. M. Brown: *Computer Vision*, 123/131, Prentice-Hall (1982)
- 5) R. O. Duda and P. E. Hart: Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures, *Comm. of the ACM*, **15-1**, 11/15 (1972)
- 6) A. Iannino and S. D. Shapiro: A Survey of the Hough Transform and Its Extensions for Curve Detection, *Proc. of Conference on Pattern Recognition and Image Processing*, 32/38 (1978)
- 7) C. Kimme, D. H. Ballard and J. Sklansky: Finding Circles by an Array of Accumulators, *Comm. of the ACM*, **18-2**, 120/122 (1975)
- 8) P. H. Merlin and D. J. Farber: A Parallel Mechanism for Detecting Curves in Pictures, *IEEE Trans. on Computers*, **C-24-1**, 96/98 (1975)
- 9) Y. Nakagawa and A. Rosenfeld: A Note on Polygonal and Elliptical Approximation of Mechanical Parts, *Pattern Recognition*, **11-2**, 133/142 (1979)
- 10) F. O'Gorman and M. B. Clowes: Finding Picture Edges through Collinearity of Feature Points, *IEEE Trans. on Computers*, **C-25-4**, 449/456 (1976)
- 11) S. D. Shapiro: Transformations for the Computer Detection of Curves in Noisy Pictures, *Computer Graphics and Image Processing*, **4**, 328/338 (1975)
- 12) S. D. Shapiro: Generalization of the Hough Transform for Curve Detection in Noisy Digital Images, *Proc. of 4th International Joint Conference on Pattern Recognition*, 710/714 (1978)
- 13) J. Sklansky: On the Hough Technique for Curve Detection, *IEEE Trans. on Computers*, **C-27-10**, 923/926 (1978)
- 14) S. Tsuji and F. Matsumoto: Detection of Ellipses by a Modified Hough Transformation, *IEEE Trans. on Computers*, **C-27-8**, 777/781 (1978)
- 15) H. Wechsler and J. Sklansky: Finding the Rib Cage in Chest Radiographs, *Pattern Recognition*, **9**, 21/30 (1977)