Hough 変換平面からの円筒状図形内の楕円 パラメータ決定法

正会員 恩 田 邦 夫[†], 青 木 由 直[†]

A Method for Determining Parameters of Two Ellipses in a Cylindrical Picture from Hough Transform Space

Kunio Onda[†] and Yoshinao Aoki[†]

Abstract : This paper proposes a method for determining parameters of two similar ellipses appearing at both ends of a cylindrical object. A contour of the object is mapped to a parametric curve by the Hough transform, where each point on the curve in the Hough transform space corresponds to a tangential line of the contour. The shape of the curve relates with parameters of both ellipses. The method uses these properties of the Hough transform. Parameters of ellipses are determined by extracting an edge of the Hough accumulation and by a curve-fitting for the edge with the least square method. Experimental results prove that the method is unaffected by gaps in the contour and by inside noise of the object.

1. ま え が き

人工環境内には、円筒あるいは円錐台としてモデル化される物体が少なくない。これらを視覚システムによって認識しようとする場合、まずその構成要素(円筒であれば、直線と2つの楕円)の抽出やそのパラメータを決定する必要がある。従来、直線や楕円などの基本図形の抽出やパラメータの決定に関して、多くの手法が提案されてきた。特に楕円に関しては、Hough 変換や最小2乗法をベースに、計算時間やメモリー量の効率化を図った手法が報告されている^{1)~8)}。

しかし、従来の楕円パラメータ決定法は、複数の楕円を対象にしている場合でも、基本的にはそれらを各々独立に扱っているものが多い。そのためランダム

に配置された楕円を扱う場合には問題ないが、円筒や円錐台の図形(これらをあわせて円筒状図形と呼ぶ)内の楕円部分を各々独立に扱うと、本来相似であるべき2つの楕円パラメータの間で整合性がとれない場合も生じる。また従来法では、原図形でのエッジ勾配や曲率、画素間の中点(いわゆる「中点図形」⁶⁾)などが利用され、そのために楕円輪郭線の途切れや部分楕円、楕円内部のノイズなどによる影響が避けられない手法もある。渡辺ら⁸⁾は、外輪郭線を追跡してその曲率変化から重なり合う楕円を分離し、分離された各々の輪郭線に最小2乗近似を施して、パラメータ決定を行う手法を提案している。この手法では、外輪郭線さえうまく抽出できれば、図形内部のノイズの影響を受けずにすみ、部分楕円からもパラメータの決定が行えるという利点がある。しかし実際上では、楕円の片側しか

キーワード：楕円のパラメータ決定, Hough 変換, 最小2乗近似, エンベロープ, 円筒状図形

1989年10月, 電子情報通信学会論文誌, J72-D-II, 10に発表

1989年10月14日受付, 1989年12月20日再受付

[†] 北海道大学 工学部情報工学科 (〒060 札幌市北区北13西8, TEL. 011-716-2111)

[†] Faculty of Engineering, Hokkaido University (N13W8, Kita-ku, Sapporo 060, Japan)

ない輪郭線情報からでは、精度良くパラメータを求めることが困難な場合が生じる。

本論文で提案する円筒状図形の楕円パラメータの決定法では、図形の輪郭線を接線群で置き換えて考え、「その接線群に最もうまく内接する相似な2つの楕円を求める」というアプローチをとる。村上ら⁹⁾は、ある図形に Hough 変換を施したときの軌跡のエンベロープから、その図形の凸包が抽出できることを示した。これを円筒状図形に当てはめると、このエンベロープはその図形の接線群に相当し、しかも2つの楕円のパラメータの関数で表現される。本手法では、このエンベロープに対し最小2乗近似を行うことで、2つの楕円のパラメータを同時に決定する。

以下2章では、円筒状図形が Hough 変換平面で描く軌跡の性質をまとめ、3章では、この性質を利用した楕円パラメータ決定法を述べる。最後に4章で実験結果を示し、本手法の有効性を検討する。

2. 円筒状図形が Hough 変換平面で描く軌跡の性質

2.1 単一楕円の Hough 変換平面での軌跡の性質

以下の準備として、まず単一の楕円が Hough 変換平面（以下 ρ - θ 平面という）で描く軌跡の性質から説明する¹⁰⁾。

x - y 平面内で単一の楕円の輪郭線を構成する画素を (x_i, y_i) ($i=1, \dots, N$; N は画素数) とする。各画素に対し(1)式の直線検出用 Hough 変換を施し、その軌跡 (Hough 曲線) を ρ - θ 平面に描いたとき、最も外側の軌跡を追跡して得られる曲線をエンベロープと呼ぶ⁹⁾。

$$\rho(\theta) = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta \quad (1)$$

ただし、 θ は $0 \sim \pi$ の範囲の離散値である。

このエンベロープには以下のような性質がある(図1参照)。

〔性質1〕

ある角度 θ_k での、 ρ の最大値 $\rho_{\max}(\theta_k)$ と最小値 $\rho_{\min}(\theta_k)$ (図1(b)中●点と■点)で決まる(2)式の2本の直線は、傾きが $\theta_k + \pi/2$ であるような楕円の並行2接線(図1(a)中破線)である。

$$\rho_{\max}(\theta_k) = x \cos \theta_k + y \sin \theta_k$$

$$\rho_{\min}(\theta_k) = x \cos \theta_k + y \sin \theta_k \quad (2)$$

楕円の中心はこの2接線の中心線上にあり、 ρ - θ 平面上では $(\rho_{\text{mid}}(\theta_k), \theta_k)$ (図1(b)中○点)がこの中心線(図1(a)中点線)に相当する。ここで、

$$\rho_{\min}(\theta_k) = (\rho_{\min}(\theta_k) + \rho_{\min}(\theta_k))/2 \quad (3)$$

〔性質2〕

パラメータ平面全体では、 $\rho_{\max}(\theta)$ 、 $\rho_{\min}(\theta)$ は楕円の接線群を表し、楕円の中心はこれらの接線群から決まる中心線 $(\rho_{\text{mid}}(\theta), \theta)$ の共通交点である。すなわち、 ρ - θ 平面上で、(4)式を満足する Hough 曲線(図1(b)中破線)の係数 x_c, y_c が求める楕円の中心座標である。

$$\rho_{\min}(\theta) = x_c \cos \theta + y_c \sin \theta \quad (4)$$

〔性質3〕

θ_k での接線間の距離 $d(\theta_k)$ は(5)式で与えられる⁴⁾。ここで、 a, b, ϕ は各々楕円の長径、短径および傾きを表す。

$$\begin{aligned} d(\theta_k) &= |\rho_{\max}(\theta_k) - \rho_{\min}(\theta_k)| \\ &= \sqrt{\{a \cos(\theta_k - \phi)\}^2 + \{b \sin(\theta_k - \phi)\}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

しかし、(5)式は3.4節で後述する最小2乗近似での解析解が複雑となるため、ここでは(5)式に代えて

図1 単一楕円の接線と中心の Hough 変換平面での軌跡
Tangential lines and the center of an ellipse on Hough transform space.

(6)式の近似式を用いる。

$$d'(\theta_k) = a \cos^2(\theta_k - \phi) + b \sin^2(\theta_k - \phi) \quad (6)$$

$d(\theta_k)$ は $\theta_k = \phi$ のとき最大値 a , $\theta_k = \phi + \pi/2$ のとき最小値 b を持つ周期関数であるが, $d'(\theta_k)$ もこの性質を保つ。また, (5)式と(6)式の近似誤差を, $|d(\theta_k)^2 - d'(\theta_k)^2|$ で評価したとき, その値は $(a-b)^2 \cos^2(\theta_k - \phi) \sin^2(\theta_k - \phi)$ となる。 $\cos^2(\theta_k - \phi)$ と $\sin^2(\theta_k - \phi)$ の積が互いに値を小さくし合うこともあって, a と b の差がよほど大きくならないかぎり, (6)式による近似誤差は無視できる。

2.2 円筒状図形の Hough 変換平面図での軌跡の性質

ここで考える円筒状図形は, 図2(a)または図3(a)に示すように図形両端の楕円に重なりがあり, かつ, 一方の楕円がもう一方に含まれてしまわないような場合に限定される。円筒物体では視点が真正面にある場合, 円錐台図形ではこの状態に近い場合に, 上述

の条件を満たさなくなり, 図形の外輪郭線は単一の楕円となる。このような場合はここでは除いて考える。

図中の2つの楕円は, 合同あるいは相似で, その傾きは等しいとする。このとき図形全体の ρ - θ 平面でのエンベロープには以下の性質がある。なお, $\theta = 0 \sim \pi$ の区間での上下のエンベロープを, 先と同じく各々 $\rho_{\max}(\theta)$, $\rho_{\min}(\theta)$ と表現する。実際にはこの上下のエンベロープは連続しており, これらをまとめて $\rho_{\text{env}}(\theta)$ ($\theta = 0 \sim 2\pi$) とすれば,

$$\rho_{\text{env}}(\theta) = \rho_{\max}(\theta) \quad 0 \leq \theta < \pi$$

$$\rho_{\text{env}}(\theta) = -\rho_{\min}(\theta) \quad \pi \leq \theta < 2\pi$$

のような関係にある。

[性質4]

このエンベロープ上には図2(b), 図3(b)中の●点と■点のような曲率の急変する2つの点ができる。これらの点 $(\rho_{\max}(\theta_{k1}), \theta_{k1})$ と $(\rho_{\min}(\theta_{k2}), \theta_{k2})$ は, 2つの楕円の共通接線(図中破線)を表している。2つの楕

図2 円筒図形と Hough 変換平面での軌跡の関係

A cylinder and its feature curves on Hough space.

図3 円錐台図形と Hough 変換平面での軌跡の関係

A truncated cone and its feature curves on Hough space.

円が合同のときは、2本の接線は並行となるため $\theta_{k1} = \theta_{k2}$ となる。

エンベロープは、これらの点を境に異なる楕円の接線群を表している。

[性質5]

$\theta_{k1} \neq \theta_{k2}$ のとき、●点と■点で表される2本の接線はある点 (x_s, y_s) で交わり、この点は相似変換の基準点である。この点は ρ - θ 平面上では、●点と■点を通過するような Hough 曲線である。すなわち、

$$\rho_{\max}(\theta_{k1}) = x_s \cos \theta_{k1} + y_s \sin \theta_{k1}$$

$$\rho_{\min}(\theta_{k2}) = x_s \cos \theta_{k2} + y_s \sin \theta_{k2} \quad (7)$$

の関係がある。また2つの楕円の中心 $P_R(x_R, y_R)$, $P_r(x_r, y_r)$ と (x_s, y_s) は、同一の直線(図3(b)中点線)上にあり、 ρ - θ 平面では(8)式~(10)式の Hough 曲線の共通交点である $(\rho_{\text{mid}}(\theta_{k3}), \theta_{k3})$ (図3(b)中○点)がこの直線に相当する。

$$\rho(\theta) = x_s \cos \theta + y_s \sin \theta \quad (8)$$

$$\rho(\theta) = x_R \cos \theta + y_R \sin \theta \quad (9)$$

$$\rho(\theta) = x_r \cos \theta + y_r \sin \theta \quad (10)$$

一方、 $\theta_{k1} = \theta_{k2}$ のときには、2つの楕円の中心は図形の中心線(図2(a)中点線)上にあり、 ρ - θ 平面では●点と■点の中点 $(\rho_{\text{mid}}(\theta_{k3}), \theta_{k3})$ (図2(b)中○点)がこの直線に相当する。

[性質6]

円筒状図形での接線間の距離 $d(\theta_k) = |\rho_{\max}(\theta_k) - \rho_{\min}(\theta_k)|$ は、 x 軸と θ_k だけ回転した軸上に射影された楕円の輪郭線と中心間の距離、および2つの楕円の中心点間の距離の和となる。すなわち、2つの楕円の中心点間の距離を $c = |P_s - P_r|$ とすると、距離 $d(\theta_k)$ は(11)式で与えられる。ここで a_R, a_r は2つの楕円の各々の長径を、同じく b_R, b_r は短径を、 ϕ は長径と x 軸との傾きを表す。

$$\begin{aligned} d(\theta_k) = & \{(a_R + a_r) \cos^2(\theta_k - \phi) \\ & + (b_R + b_r) \sin^2(\theta_k - \phi)\} / 2 \\ & + c |\sin(\theta_k - \theta_{k3})| \end{aligned} \quad (11)$$

ただし円錐台では、 $\theta_{k1} \sim \theta_{k2}$ の区間でエンベロープが上下とも径の大きな方の楕円の接線群となる。この区間のみ接線間の距離 $d(\theta_k)$ は、大きな楕円の輪郭線間の距離だけで決まり、(12)式のようになる。

$$d(\theta_k) = a_R \cos^2(\theta_k - \phi) + b_R \sin^2(\theta_k - \phi) \quad (12)$$

3. 円筒状図形のパラメータ決定法

3.1 エンベロープの抽出

基本的には村上らと同様の手法によってエンベロープの抽出を行う。対象図形に対しエッジ抽出、細線化、2値化などの前処理を終え、値“1”である画素が

図4 エンベロープの抽出
Extraction of the envelope from Hough space.

配列 $P_i(x_i, y_i)$ に得られているとする。

この各点に(1)式の Hough 変換を行い、 ρ - θ 平面上に軌跡を累積加算する。ただし、エンベロープの位置は各 θ 毎に決めるので、実際の ρ - θ 平面は1次元配列 $H(\rho)$ を用意すればよい。村上らは、ある θ_k での軌跡のエンベロープを見つけるために、軌跡の累積を終えた配列 $H(\rho)$ の両端から累積値が $\neq 0$ である位置を探索し、この位置をそれぞれ $\rho_{\max}(\theta_k), \rho_{\min}(\theta_k)$ とした⁹⁾。

ここでも、図形の外輪郭線より外側のノイズが完全に除去されている場合には、村上らと同じ方法でよい。しかしこの方法では、真の外輪郭線のさらに外側に1画素でもノイズがあると、抽出されたエンベロープはこの影響を受け誤差が生じる。そこで、累積値がある閾値 T_1 以上の位置をエンベロープの位置とし(図4)、弧立点状のノイズの影響を軽減する。実験では $T_1=4$ とした。つまり、接線方向に並ぶ3個以下の画素はノイズとみなされる。

3.2 エンベロープからの変曲点の検出

エンベロープ上の変曲点 $\rho_{\max}(\theta_{k1}), \rho_{\min}(\theta_{k2})$ には、以下のような特徴がある。

(1) これらの変曲点は、[性質4]で述べたように2つの楕円の共通接線である。この接線上に実際に線分があれば、この線分を構成する画素数に相当する値が●点、■点の累積値となるため、これらの点には急いゆるなピークが形成される。また実際には線分がない場合でも、接線が2つの楕円に接している分、累積値は他の軌跡上の点よりは多くなる傾向がある。

(2) この点を境に接する楕円が別的一方へ変化するので、軌跡の傾きが急変する。2つの楕円の距離が遠いほどこの変化は大きい。この曲率の変化量は、

$$|\rho_{\text{env}}(\theta_{k-1}) + \rho_{\text{env}}(\theta_{k+1}) - 2\rho_{\text{env}}(\theta_k)|$$

を評価することによって知る.

本手法では, エンベロープから, (1), (2)の特徴量の積を求め, その値が最大となる位置を θ_{k1}, θ_{k2} としている.

3.3 中心線の検出

図形の中心線に相当する $(\rho_{\text{mid}}(\theta_{k3}), \theta_{k3})$ を検出する. まず $\theta_{k1} \sim \theta_{k2}$ 間の距離を調べ, その値に応じて以下のように検出法を選択する.

(1) $|\theta_{k1} - \theta_{k2}| \leq T_2$ (実験では 10°) のとき

接線の傾きの差があまり大きくない場合, すなわち 2つの楕円の大きさに差がない場合であり, その中心点を 2 接線の平均値とみなす.

$$\begin{aligned}\rho_{\text{mid}}(\theta_{k3}) &= (\rho_{\text{max}}(\theta_{k1}) + \rho_{\text{min}}(\theta_{k2})) / 2 \\ \theta_{k3} &= (\theta_{k1} + \theta_{k2}) / 2\end{aligned}\quad (13)$$

(2) $|\theta_{k1} - \theta_{k2}| > T_2$ のとき (図 5 参照)

接線の傾きの差が大きい場合, すなわち, 大小の楕円の大きさに差がある場合には, 楕円の歪み具合によっては 2 接線の平均をとったものが中心線とはならなくなる. [性質 5] で述べたように, $(\rho_{\text{mid}}(\theta_{k3}), \theta_{k3})$ は (8) 式~(10) 式の Hough 曲線の共通交点であるから, これらの Hough 曲線のうちの 2 本の交点を見つければよい. ここでは以下のように近似的にこの交点を見つける. 図 5 中の①~④はその手順に対応する.

- ① ●点と■点を結ぶ直線を (8) 式の Hough 曲線とみなす.
- ② ●点と■点の対である $\rho_{\text{min}}(\theta_{k1}), \rho_{\text{max}}(\theta_{k2})$ をエンベロープ上から求め,
- ③ その中間点 (図 5 中○点と□点) を求める. [性質 6] で述べたように $\theta_{k1} \sim \theta_{k2}$ の区間のエンベロープは上下とも, 径の大きな方の楕円の接線群なので, ○点と□点を通過する Hough 曲線はこの大きな楕円の中心点に相当する. そこで○点と□

図 5 中心線の決定

Detection of a point corresponding to the central line.

点を結ぶ直線を (9) 式の Hough 曲線とみなす.

- ④ ①の直線と③の直線の交点を $(\rho_{\text{mid}}(\theta_{k3}), \theta_{k3})$ とする.

3.4 図形全体の大きさの制限から決まるパラメータ

[性質 6] から, $\theta_{k1} \sim \theta_{k2}$ の区間を除く θ の全区間で, 次の (14) 式が満足されなければならない.

$$\begin{aligned}d(\theta) &= a \cos^2(\theta - \phi) + b \sin^2(\theta - \phi) \\ &\quad + c |\sin(\theta - \theta_{k3})| \\ \text{ただし, } a &= (a_R + a_r) / 2 \\ b &= (b_R + b_r) / 2\end{aligned}\quad (14)$$

そこで最小 2 乗近似によってこの式を最もよく満足するような a, b, c, ϕ を決定することを考える.

これは以下の手順で行う.

- ① ϕ_m を $0 \sim \pi$ の範囲で, あるきざみで変化させながら, ②, ③を行う.

- ② ある ϕ_m での a_m, b_m, c_m は, 2 乗誤差

$$\begin{aligned}Q_m &= \sum [d(\theta) - \{a_m \cos^2(\theta - \phi_m) \\ &\quad + b_m \sin^2(\theta - \phi_m) \\ &\quad + c_m |\sin(\theta - \theta_{k3})|\}]^2\end{aligned}\quad (15)$$

を最小化するような偏微分方程式をたてればよく, 次の正規方程式を解いて求められる.

$$A_{ij} \begin{pmatrix} a_m \\ b_m \\ c_m \end{pmatrix} = B_j \quad (i, j=0, 1, 2) \quad (16)$$

ここで,

$$\begin{aligned}A_{00} &= \sum \cos^4(\theta - \phi_m), A_{11} = \sum \sin^4(\theta - \phi_m) \\ A_{22} &= \sum \sin^2(\theta - \theta_{k3}) \\ A_{10} &= A_{01} = \sum \cos^2(\theta - \phi_m) \sin^2(\theta - \phi_m) \\ A_{20} &= A_{02} = \sum \cos^2(\theta - \phi_m) |\sin(\theta - \theta_{k3})| \\ A_{12} &= A_{21} = \sum \sin^2(\theta - \phi_m) |\sin(\theta - \theta_{k3})| \\ B_0 &= \sum d(\theta) \cos^2(\theta - \phi_m) \\ B_1 &= \sum d(\theta) \sin^2(\theta - \phi_m) \\ B_2 &= \sum d(\theta) |\sin(\theta - \theta_{k3})|\end{aligned}$$

- ③ ここで得られたパラメータ値 a_m, b_m, c_m を (15) 式に代入して Q_m を求める.

- ④ Q_m の値が最も小さくなる時の a_m, b_m, c_m, ϕ_m を最終的な解 a, b, c, ϕ とする.

実際の計算では, ϕ と $\theta_{k3} + \pi/2$ がほぼ近い値となることから, ϕ の掃引範囲はもっと狭く制限して計算時間の短縮を図っている.

以上の処理で, 2つの楕円の長径, 短径の和 a, b , 楕円中心点間の距離 c , 楕円の傾き ϕ が決定するので, 後は各楕円毎のパラメータが決定できればよい.

3.5 2つの楕円の相似比が既知の場合

前もって対象物体のモデルがわかっている場合に

は、円筒状図形の2つの楕円の大きさの比もわかる。すなわち、 $a_r/a_R = b_r/b_R = S (\leq 1)$ とすると、3.4節で得られた結果をもとに、個々の楕円のパラメータが以下のように決定できる。

- ① 各楕円毎の長径，短径を求める。

$$\begin{aligned} a_R &= 2a/(1+S), a_r = a_R \cdot S \\ b_R &= 2b/(1+S), b_r = b_R \cdot S \end{aligned} \quad (17)$$

- ② エンベロープの，どの部分が大きな(あるいは小さな)楕円の接線群に対応するかを決める。上下のエンベロープを $\rho_{\text{env}}(\theta)$ としてみたとき， $\theta = \theta_{k1} \sim \theta_{k2} + \pi$ の区間が一方の楕円，残りの区間がもう一方の楕円のエンベロープにそれぞれ対応している。

円錐台では，その区間が長い方が大きな楕円のエンベロープである。 $\rho_{\text{max}}(\theta)$ ， $\rho_{\text{min}}(\theta)$ には，楕円の区別をつけておく。

- ③ 楕円の中心点が描く Hough 曲線の軌跡を推定する。

例えば，ある θ での $\rho_{\text{max}}(\theta)$ が大きな楕円のエンベロープ上の1点とすると，ここから，

$$\{a_R \cos^2(\theta - \phi) + b_R \sin^2(\theta - \phi)\}/2$$

だけ下の点(図6中○点)を，中心点が描く Hough 曲線が通過するはずである。同様にして，すべての θ についてこのような点を推定する。

- ④ この点列 $(\rho_{\text{cen}}(\theta), \theta)$ から，

$$\rho_{\text{cen}}(\theta) = x_R \cos \theta + y_R \sin \theta \quad (18)$$

を満足する (x_R, y_R) を最小2乗近似¹⁰⁾で求める。それが楕円の中心である。結果のみ示すと，

$$x_R = (A_{11}B_0 - A_{01}B_1)/(A_{00}A_{11} - A_{01}A_{10})$$

$$y_R = (A_{00}B_1 - A_{01}B_0)/(A_{00}A_{11} - A_{01}A_{10})$$

図6 楕円の中心の決定

Detection of the Hough curve corresponding to the center of ellipse.

ここで，

$$A_{00} = \sum \cos^2 \theta + w \cos^2 \theta_{k3}$$

$$A_{11} = \sum \sin^2 \theta + w \sin^2 \theta_{k3}$$

$$A_{01} = A_{10} = \sum \cos \theta \sin \theta + w \cos \theta_{k3} \sin \theta_{k3}$$

$$B_0 = \sum \rho_{\text{cen}}(\theta) \cos \theta + w \rho_{\text{mid}}(\theta_{k3}) \cos \theta_{k3}$$

$$B_1 = \sum \rho_{\text{cen}}(\theta) \sin \theta + w \rho_{\text{mid}}(\theta_{k3}) \sin \theta_{k3}$$

(19)

ここで， w は重み係数で，[性質5]で述べたように，(18)式の Hough 曲線が $(\rho_{\text{mid}}(\theta_{k3}), \theta_{k3})$ を通過する，という制約を考慮したものである。

- ⑤ 同様に，もう一方の楕円の中心を決定する。

以上ですべてのパラメータが決定された。

3.6 相似比が未知の場合

相似比 S が未知で，3.5節でのように2つの楕円の長径，短径を定められないときは，2つの楕円の中心を中心線上で掃引しながら，中心点が描く Hough 曲線とエンベロープまでの距離を求め，ここから最適な相似比を推定する。具体的には以下の処理によって各楕円毎のパラメータを決定する。

- ① 2つの楕円の中心を各々 $(x'_1, y'_1), (x'_2, y'_2)$ ($x'_1 < x'_2$) であると仮定し，これら2点の描く Hough 曲線を $\rho_1(\theta), \rho_2(\theta)$ とする。

まず x'_1 を $\rho_{\text{min}}(0)$ に選ぶ。

- ② $\rho_1(\theta), \rho_2(\theta)$ 間の距離の制約と， $(\rho_{\text{mid}}(\theta_{k3}), \theta_{k3})$ を通過するという制約を用いて，以下のように中心点の座標が決定する。

$$x'_2 = x'_1 + c |\sin \theta_{k3}|$$

$$y'_1 = \{\rho_{\text{mid}}(\theta_{k3}) - x'_1 \cos \theta_{k3}\} / \sin \theta_{k3}$$

$$y'_2 = \{\rho_{\text{mid}}(\theta_{k3}) - x'_2 \cos \theta_{k3}\} / \sin \theta_{k3} \quad (20)$$

- ③ θ の全範囲で $\rho_1(\theta), \rho_2(\theta)$ は上下のエンベロープの内側になければならない。もしこれが満たされないなら，⑤へスキップする。

- ④ θ が $\theta_{k1} \sim \theta_{k2}$ を除く全区間で， $\rho_1(\theta)$ から $\rho_{\text{min}}(\theta)$ までの距離 $d_1(\theta)$ (θ_{k3} を境に $\rho_{\text{max}}(\theta)$ までの距離に変わる) を求める。同様に $\rho_2(\theta)$ から $\rho_{\text{max}}(\theta)$ までの距離 $d_2(\theta)$ を求める。

さらに $d_1(\theta)/d_2(\theta)$ の比を求める。

もし $(x'_1, y'_1), (x'_2, y'_2)$ が正しい楕円中心であるなら， $d_1(\theta), d_2(\theta)$ は，1つの楕円についての接線間距離の1/2，すなわち，

$$\{a_R \cos^2(\theta - \phi) + b_R \sin^2(\theta - \phi)\}/2$$

または，

$$\{a_r \cos^2(\theta - \phi) + b_r \sin^2(\theta - \phi)\}/2$$

であるはずである。よって $d_1(\theta)/d_2(\theta)$ は，すべての θ で， S または $1/S$ の一定値となるはずである。そこで，この $d_1(\theta)/d_2(\theta)$ の平均値 S' と，

分散値 σ を求め、中心座標とともに保存しておく。

⑤ x_1' を +1 し、 x_1' が $\rho_{\max}(0) - c|\sin \theta_{k63}|$ となるまで、②～④を繰り返す。

⑥ 最後に、分散値が最も小さいときの (x_1', y_1') , (x_2', y_2') を真の楕円中心とする。同時に相似比 S も決定する。ここで、

$$\left. \begin{aligned} (x_r, y_r) &= (x_1', y_1') \\ (x_R, y_R) &= ((x_2', y_2')) \end{aligned} \right\} S' \leq 1 \text{ のとき} \\ S = S'$$

$$\left. \begin{aligned} (x_r, y_r) &= (x_1', y_1') \\ (x_r, y_r) &= (x_2', y_2') \end{aligned} \right\} S' > 1 \text{ のとき} \\ S = 1/S'$$

とする。この S と(17)式より、各楕円の長径、短径を決定する。以上ですべてのパラメータが決定された。

4. 実験と検討

4.1 実験

カン(円筒)とコップ(円錐台)の画像(256×200画素)に対し、本手法を用いて楕円検出を行った実験結果を各々図7、図8に示す。ここで2つの楕円の相似

比 S は未知とした。

各図で(a)はエッジ画像を、(b)は Hough 変換平面での軌跡(累積値は濃淡で示した)を、(c)は抽出されたエンベロープ、変曲点(■)、中心点(×)、推定された楕円中心の Hough 曲線(破線)を、(d)は検出された2つの楕円とその中心(+), 共通接線と中心線(破線)を、各々示している。

従来法では、図7のような内部にノイズを多数含む図形からの楕円抽出は非常に困難と思われるが、本手法では、短径に4画素程度の誤差が生じているが、他はほぼ正しいパラメータを得ることができた。また、底側の部分楕円も検出されている。図8のコップでは、大きな楕円については従来法でも検出が可能であるが、底側の楕円は欠落が半分以上あり、従来法では正確なパラメータ値の検出が難しいと思われる。

4.2 処理時間に関する検討

本実験には、16ビットパソコン PC-9801UV (8MHz) (数値演算プロセッサ併用) を用いた。言語は MS-C を使用した。処理時間は、図7の画像で、エッジ抽出に18秒(画素数1475点)、Hough 変換およびエンベロープ抽出に98秒、パラメータ決定に47秒の計163秒を要した。同じく図8の画像(画素数521

図7 円筒図形に対する処理結果

An experimental result for a cylindrical can.

(a) Extracted edge, (b) accumulation on Hough space, (c) extracted envelope and other features, (d) determined two ellipses.

図 8 円錐台図形に対する処理結果

An experimental result for a cup.

(a) Extracted edge, (b) accumulation on Hough space, (c) extracted envelope and other features, (d) determined two ellipses.

点) に対しての処理時間は計 115 秒であった。時間計測には内蔵クロックを用いた。ただし、処理時間には結果の画面表示時間(全体の 3 割程度)も含まれる。

3.1 節で述べたエンベロープの抽出では、直線検出での Hough 変換と同等の計算量を必要とする。すなわち、画素数 N , θ 方向分割数 K (実験では $K=180$) とすると、(1) 式の計算を KN 回行う。よって、対象図形の画素数が多いほど計算時間が増す。図 7 の画像に対する処理時間が多いのはこのためである。なお、使用メモリ量については、3.1 節で述べたように、 ρ 方向分割数で決まる大きさ L (実験では $L=256$) の作業用 1 次元配列 1 つと、得られたエンベロープの座標値とその座標での累積値を保存しておくための、大きさ $2K$ の 1 次元配列 2 つが必要である。

3.2 節で述べたエンベロープの変曲点の検出では、上で得た大きさ $2K$ の 2 つの配列から累積値が大きく、曲率の急変する 2 つの点 ($\rho_{\max}(\theta_{k1})$, $\rho_{\min}(\theta_{k2})$) を発見することであり、3.3 節での図形の中心線に相当する Hough 変換平面上の点 $\rho_{\text{mid}}(\theta_{k3})$ を決定する処理と合わせても数秒の処理時間である。

次に 3.4 節で述べた a , b , c および ϕ を決定するための最小 2 乗近似計算では、 ϕ をパラメータとしてある範囲で掃引しながら、 a , b , c を繰り返し求める方

法となっている。実験では、 ϕ は $\theta_{k3}+90^\circ$ を中心とする $\pm 20^\circ$ の範囲を 1° 毎に掃引しており、これも計算時間のかかる部分となっている。 20° の値は実験的に定めたもので特に根拠はなく、図形の見え方によってはより大きく、あるいは小さくする場合もあり得る。

3.5 節の相似比既知の場合の処理では、繰り返し計算はなく、(19) 式の K 個の標本点についての積和計算も 3.1 節や 3.4 節での計算量に比べれば小さい。

一方、3.6 節での相似比未知の場合では、端的に言えば、楕円の中心を図形の中心軸に沿って移動させ、最も妥当な位置を探索しているのに等しい処理を行っている。そのため再度繰り返し計算が必要で、繰り返し回数は $\rho_{\max}(0) - \rho_{\min}(0) - c|\sin \theta_{k3}|$ となる。つまり図形が大きくなったり、2 つの楕円の中心間の距離が小さくなった場合に、繰り返し回数が増加する。ただし、3.6 節で述べたように、 σ は探索中の中心位置が真の中心位置に近くなるにつれて小さくなり、真の位置で最小、そして遠ざかると再び大きくなる。そこで実際の処理では、この時点で探索を中止することで繰り返し回数の減少を図っている。

4.3 有効性に関する検討

本手法は、対象図形が合同または相似な 2 つの楕円

であって、2つの楕円にある程度の重なりがあることを条件としている。これは、抽出した図形の接線間の距離が(11)式を満足することの大前提であり、上記条件が満足されない図形では、3.4節での最小2乗近似も意味のないものとなる。したがって本手法は、あらかじめ対象物体が同軸円筒または円錐台であることがわかっている場合に限定される。これらの物体は、至近距離で撮像した場合、中心投影の影響で厳密には合同あるいは相似という条件を満足できなくなる場合もある。しかし、実験画像で示した例のように、ある程度の撮像距離があればおおむね正射影とみなせ、2つの楕円は合同または相似となると考えられる。

また実際の例では、本手法の適用の前処理として、2つの楕円に重なりがあるかないかの判定が必要である。この方法としては、例えば、エンベロープに明確な変曲点が存在するかを調べるなどが考えられる。

本手法は、実図形からの輪郭線抽出過程を、接線群抽出という形で置き換えたのに等しい。このため図形内部のノイズには全く影響を受けず、また輪郭線の欠落に対してはその長さが大きいことより、欠落部分の曲率が大きいことの方が抽出精度に影響するという特徴がある。一方、輪郭線外部にノイズがあると正しい接線群が抽出できない。ノイズが真の輪郭線に近接している場合は、エンベロープの検出誤差は小さく、最終結果に与える影響も小さくなるが、大きな背景ノイズの混在する図形を扱うことはできない。3.1節で述べたエンベロープ抽出法は、弧立点性のノイズ除去にはある程度効果があるが、大きな背景ノイズを含む線画から対象図形だけを抽出するためには、別の前処理が必要となる。実験画像では、撮像時に無地の背景を使用したため、2値化処理での閾値設定だけで背景ノイズを除去できた。また一般の情景画像でも、ドアや壁面など無地の背景にある円筒状物体(例えばドアノブなど)では、背景ノイズの状態がこの実験画像に似たものが多く存在する。しかし、本手法をより実用性の高いものにするためには、エンベロープ抽出法にさらに改善が必要で、今後の課題である。

5. む す び

本論文では、円筒や円錐台などの図形中の2つの相似な楕円のパラメータを、Hough変換平面での軌跡のエンベロープの性質を利用して求める手法を提案した。本手法の特徴は以下のとおりである。

- (1) 原図形ではなく、Hough変換平面の軌跡からパラメータを決定する。

- (2) 重なりのある2つの楕円パラメータの決定を並行して行い、これらが合同または相似であるという整合性が保たれる。
- (3) 図形の輪郭線を接線群として扱うため、図形内部のノイズの影響を全く受けない。また輪郭線の欠落では、その部分の長さより曲率の方が影響を与える。
- (4) 複数の図形は扱えない。また、図形の外側のノイズの影響を強く受けるので、背景ノイズを除去するための前処理が必要である。
- (5) パラメータ決定に総あたりの処理が多く、計算時間がかかる。またHough変換にも計算がかかる。

今後は、エンベロープ抽出法の改善、処理時間の改善を図っていきたいと考えている。

〔参 考 文 献〕

- 1) R. O. Duda, P. E. Hert: "Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures", Comm. ACM, **15**, 1, pp. 11-15 (1972)
- 2) D. H. Ballard: "Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes", Pattern Recognition, **13**, 2, pp. 111-122 (1981)
- 3) S. Tsuji, F. Matsumoto: "Detection of Ellipses by a Modified Hough Transformation", IEEE Trans., **C-27**, 8, pp. 777-781 (1978)
- 4) D. Casasent, R. Krishnapuram: "Curved Object Location by Hough Transformations and Inversions", Pattern Recognition, **20**, 2, pp. 181-188 (1987)
- 5) 富永, 森, 中村: "部分楕円を含む図形の検出に関する一考察", 信学技報, IE86-103, pp. 9-16 (1987)
- 6) 大和, 入澤, 石井, 牧野: "重み付け中点図形を用いる楕円検出アルゴリズム", 信学技報, PRU88-95, pp. 31-37 (1988)
- 7) 佐藤, 神山: "共役直径の傾きを用いた楕円パターンの抽出法", 信学技報, IE88-125, pp. 85-92 (1989)
- 8) 渡辺, 高橋: "最小2乗法による重なり合う楕円状パターンの分離計測", 信学論誌, **J70-D**, 6, pp. 1173-1180 (1987)
- 9) 村上, 長谷川, 興水: "Hough変換平面における図形の凸包抽出アルゴリズム", 情報処理, **CV51-3** (1988)
- 10) 恩田, 渡並, 青木: "Hough変換平面からの楕円パラメータ決定法", 信学論誌, **J72-D-II**, 10, pp. 1760-1764 (1989)

おんだ くにお
恩田 邦夫 昭和51年、北海道大学工学部電気工学科卒業。同年、同大助手となり、現在に至る。ロボットビジョンの研究に従事。正会員。

あおき よしなお
青木 由直 昭和41年、北海道大学大学院修士課程修了。同年、同大学講師。54年、同大電子工学科教授。62年から、同大学情報工学科教授。長波長ホログラフィ、信号処理、マイクロコンピュータ応用、雪中レーダ、コンピュータグラフィックスなどの研究に従事。工学博士。

MUSE-525 本コンバータの開発

和泉吉則・二宮佑一・大塚吉道

ハイビジョン放送は、MUSE 方式による実験放送が 1989 年 6 月より開始され、実用化に向けての準備が進められている。しかし、MUSE 方式はハイビジョンの放送システムとして開発されたもので MUSE 放送によるハイビジョン放送を見るためには専用のデコーダが必要であり、現行の受像機では映像を見ることはできない。そこで、MUSE 方式による放送を現行の受像機でも映像が見えるようにすることが望まれた。本論文では、MUSE 方式によるハイビジョン放送を現行のテレビ受像機で楽しめるように方式変換する装置（コンバータ）について検討を行い、試作装置の開発を行ったので報告する。

テレビジョン学会誌 Vol. 44, No. 6, pp. 705~712 (1990)

磁気ヘッドの磁化特性の測定とその応用 —コア効率とギャップ深さの測定—

勢木真一・山木比呂志・金場 豊

磁気ヘッドの磁化特性を、容易に測定する装置を考案した。この装置は、磁気ヘッドに巻かれているコイルに交流電流を流し、その電流波形と電圧波形から、起磁力と磁束を求めるものであり、コンピュータを用いたデータ処理により、高周波（MHz 帯）においても測定が可能である。

この装置を用いて、フェライト製ビデオヘッドの磁化特性を測定し、その結果を以下に示す磁気ヘッドの評価に応用した。はじめに、ギャップが飽和する起磁力からコアの性能を表わすコア効率の絶対値を求め、次に、飽和ギャップ磁束からビデオヘッドの寿命に関係するギャップ深さを求めた。これらの応用により磁気ヘッドの評価における磁化特性の有用性を示した。

テレビジョン学会誌 Vol. 44, No. 6, pp. 713~718 (1990)

Hough 変換平面からの円筒状図形内の楕円パラメータ決定法

恩田邦夫・青木由直

2 次元平面上の円筒または円錐台の物体図形には、その構成要素として合同または相似な 2 つのだ円が含まれる。本論文では、この図形に対し Hough 変換を施したときの ρ - θ 平面で描かれる Hough 曲線群の軌跡のエンベロープの性質を利用し、この 2 つのだ円のパラメータとだ円間の距離を同時に決定する手法を提案する。本手法で行っていることは、図形の接線群に最もうまく内接するような相似な 2 つのだ円を、最小 2 乗法で求めているのに等しい。このため、図形内部のノイズの影響を全く受けずにパラメータ決定が行えるという特徴がある。

テレビジョン学会誌 Vol. 44, No. 6, pp. 719~727 (1990)