

研究速報

だ円検出問題に対する組合せハフ変換の有効性について

非会員 木村 彰男[†] 正員 渡辺 孝志[†]
正員 田山 典男[†] 正員 横山 隆三[†]

On the Effectiveness of Combinatorial Hough Transform for Ellipse Detection Problem

Akio KIMURA[†], Nonmember, Takashi WATANABE[†], Norio TAYAMA[†] and Ryuzou YOKOYAMA[†], Members

[†] 岩手大学工学部情報工学科, 盛岡市

Faculty of Engineering, Iwate University, Morioka-shi, 020 Japan

あらまし 最近, 画像からの直線検出法であるハフ変換の改良法として組合せハフ変換 (CHT) が提案されている。本論文では CHT の考え方が一般化ハフ変換 (GHT) を用いただ円検出問題にも適用可能なことを示すと共に, 評価実験を行ってその有効性について検討を行った。

キーワード 組合せハフ変換, だ円検出, 欠損だ円, 一般化ハフ変換

1. まえがき

ハフ変換は雑音に強いパターン検出法として知られており, 直線検出については既に実用レベルにある⁽¹⁾。最近, 直線検出を行う標準的なハフ変換 (以下, SHT と言う) を改良した手法として, 組合せハフ変換 (CHT) が提案されている⁽⁷⁾。SHT では投票単位がエッジ点であり, その投票軌跡は正弦曲線である。これに対して CHT では投票単位がエッジ点对であり, その投票軌跡は 1 点で済む。エッジ点对の組合せを制限することで, CHT では処理時間と検出精度に関して改善が図れるとされている。

一方, だ円検出を行うハフ変換についてはいくつかの方法が提案されているが^{(2)~(5)}, 雑音や隠ぺい等によって輪郭線が大幅に欠損した画像に適用できるものは少ない。その中で, 渡辺らの方法⁽⁵⁾ は欠損だ円に本格的に対処できる手法と言えるが, 処理時間や検出精度の面でまだ十分とは言えない。彼らの方法は一般化ハフ変換 (GHT) の原型を与えた Merlin-Farber 法⁽⁶⁾ (以下, MF 法と言う) を基本としているが, CHT 的要素を導入することで, 更に改善を図ることが可能と考えられる。

そこで本論文では, MF 法に CHT 的要素を導入した改良だ円検出法 (CMF 法) を新たに提案すると共に, 評価実験を行ってその有効性について検討を行った。

CMF 法はだ円以外の一般図形検出にも拡張可能である。

2. 組合せハフ変換 (CHT)

処理対象画像は 2 値の輪郭線画像とし, エッジ点の座標を (x, y) で表す。また, 画像中の直線をパラメータ (ρ, θ) で表す。ここで, ρ は画像の原点から直線に下ろした垂線の長さであり, θ はその垂線が x 軸となす角度である。SHT では, ρ - θ 投票空間においてエッジ点 $P_i=(x_i, y_i)$ ごとに正弦曲線

$$\rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta \quad (0 \leq \theta < \pi) \quad (1)$$

を描き, その上の全要素 (ρ, θ) に 1 を加算 (投票) する。一方, 二つのエッジ点 $P_i=(x_i, y_i)$ と $P_j=(x_j, y_j)$ を通る直線のパラメータ (ρ_0, θ_0) は唯一に

$$\theta_0 = -\tan^{-1}\{(x_i - x_j)/(y_i - y_j)\} \quad (2)$$

$$\rho_0 = x_i \cos \theta_0 + y_i \sin \theta_0 \quad (3)$$

で定まる。そこで CHT では, エッジ点对 (P_i, P_j) ごとに 1 点 (ρ_0, θ_0) だけに投票を行う。

CHT では投票が集中化されるので, ピーク点が検出しやすくなるとされている。しかし, エッジ点数を n とすると, 投票回数が SHT では $n\pi/\Delta\theta$ ($\Delta\theta$ は角度の量子化幅) であり, CHT では $n(n-1)/2$ となる。従って, 処理時間を短縮するためには, CHT ではエッジ点对の組合せ数を抑制する工夫が必要となる。

3. MF 法によるだ円検出

渡辺ら⁽⁵⁾ による MF 法を用いただ円検出手順の概略は次のとおりである。

(手順 1) 長短の半径が a, β , 回転角 θ のテンプレートだ円 T を考え, その輪郭点座標を計算する。

(手順 2) 画像と同じ大きさの投票用配列 A を用意して, その初期値を 0 にセットする。

(手順 3) 画像の各エッジ点を中心としてだ円 T を描き, その軌跡が通る配列 A の要素に 1 を投票する。

(手順 4) 配列 A を走査し, しきい値以上の投票数をもつ配列要素 (x, y) , その投票数, (a, β, θ) をリストに登録する。

(手順 5) すべての組 (a, β, θ) について上記の手順 1~4 を繰り返す。最後に, リストの登録パラメータを検出候補だ円とし, 投票数の大きい順にだ円度判定を用いて適切なものを選別していく。

このだ円検出法では, 階層化画像を用いた高速化や最小 2 乗法による検出精度の高度化なども同時に考慮されているが, 実用的には処理時間と検出精度の面で更なる改善が望まれている。

4. CHT によるだ円検出手順の改善

以下では、CHT の考え方を導入して前述のだ円検出法を改良することを考える。

今、二つのエッジ点 $P_i=(x_i, y_i)$ と $P_j=(x_j, y_j)$ を考える。MF 法ではそれらを中心として描いた二つのテンプレートだ円 T_i と T_j の全輪郭点が投票対象となった。これに対して、 P_i と P_j を同時に通るだ円の中心は T_i と T_j が交差する 2 点に限られるので、投票対象はこの 2 点だけで済むことになる(交差点の算出法は次の 5. に示す)。

これから、前述のだ円検出手順における手順 3 は次のような形に変更できる。

(手順 3') 画像の各エッジ点对 (P_i, P_j) に対してそれらを中心とする二つのテンプレートだ円 T_i, T_j を考え、その交差点に位置する配列 A の要素に 1 を加算する。

これにより、次のような効果が期待できる。

(1) 手順 1 でテンプレートだ円 T の輪郭点座標を計算する必要がなくなる。また、投票パターンがだ円輪郭点の全部でなく、交差点の 2 点だけで済むので、投票処理を効率化できる。

ここで、エッジ点对については次のような考え方でその組合せを制限できる。すなわち、 (α, β, θ) はあらかじめ与えられているので、2 エッジ点間の距離 d が $\max\{2\alpha, 2\beta\}$ 以上となる場合、この 2 点は同一だ円に属さないことがわかる。更に、近接しているエッジ点の対から得られる中心座標の推定精度は低いので、このような対も選ばないことにする。すなわち、

$$\min\{\alpha, \beta\} \leq d \leq \max\{2\alpha, 2\beta\} \quad (4)$$

を満たすエッジ点对のみを投票処理の対象とする。これによって次のような効果が期待できる。

(2) 投票が分散されずに集中化するので、投票結果の SN 比が改善され、投票ピーク点が検出しやすくなる。従って、検出精度を改善できる。

5. だ円の交点座標の算出

今、二つのだ円 T_1 と T_2 は (α, β, θ) が等しく、その中心座標が $P_1=(x_1, y_1)$ と $P_2=(x_2, y_2)$ で与えられるとする。このだ円を (x, y) 座標系で表現すると

$$a_1x^2 + 2h_1xy + b_1y^2 + 2g_1x + 2f_1y + c_1 = 0 \quad (5)$$

$$a_2x^2 + 2h_2xy + b_2y^2 + 2g_2x + 2f_2y + c_2 = 0 \quad (6)$$

である。次に、 (x, y) 座標系に対して原点を P_i に平行移動し、更に角度 θ の回転を加えた新しい (X, Y) 座標系を考える ($i=1, 2$)。この変換は

$$\begin{cases} x = X \cos \theta - Y \sin \theta + x_i \\ y = X \sin \theta + Y \cos \theta + y_i \end{cases} \quad (7)$$

と書け、変換後の座標系ではだ円が標準形

$$X^2/\alpha^2 + Y^2/\beta^2 = 1 \quad (8)$$

となる。式(7)を X, Y について解き、これを式(8)に代入して、その結果を式(5)、式(6)と比較すると、

$$\begin{cases} a_i = \beta^2 \cos^2 \theta + \alpha^2 \sin^2 \theta \\ h_i = (\beta^2 - \alpha^2) \sin \theta \cos \theta \\ b_i = \beta^2 \sin^2 \theta + \alpha^2 \cos^2 \theta \\ g_i = -(\alpha^2 \sin^2 \theta + \beta^2 \cos^2 \theta) x_i \\ \quad + (\alpha^2 - \beta^2) y_i \sin \theta \cos \theta \\ f_i = -(\alpha^2 \cos^2 \theta + \beta^2 \sin^2 \theta) y_i \\ \quad + (\alpha^2 - \beta^2) x_i \sin \theta \cos \theta \\ c_i = \beta^2 (x_i \cos \theta + y_i \sin \theta)^2 \\ \quad + \alpha^2 (x_i \sin \theta - y_i \cos \theta)^2 - \alpha^2 \beta^2 \end{cases} \quad (9)$$

を得る。これから $a_1 = a_2, h_1 = h_2, b_1 = b_2$ となることがわかるので、式(5)から式(6)を引いて、

$$2(g_1 - g_2)x + 2(f_1 - f_2)y + c_1 - c_2 = 0 \quad (10)$$

を得る。これを $y = ax + b$ の形に表し、式(5)に代入して x の 2 次方程式

$$Ax^2 + Bx + C = 0 \quad (11)$$

を得る。ここで、 A, B, C は $\alpha, \beta, \theta, x_i, y_i, x_2, y_2$ で定まる定数である。従って、式(11)における判別式 $D = B^2 - 4AC$ を用いて、交点が二つ ($D > 0$)、交点が一つ ($D = 0$)、交点がない ($D < 0$) の三つの場合に分けられる。交点の座標値 (x, y) は、式(11)を x について解き、それを式(10)に代入して y を求めればよい。

6. 改良だ円検出アルゴリズム (CMF 法)

MF 法に CHT を導入した改良だ円検出法 (以下、CMF 法と言う) の詳細な検出手順を次に示す。

(手順 1) 入力 2 値画像を最下位層 (第 0 層) に、下位層の 2×2 画素を上位層の 1 画素とする全部で $p+1$ 階層の階層化画像を作成する[†]。第 k 層目 ($0 \leq k \leq p$) の画像を I_k で表す。

(手順 2) $k=p$ とする。

(手順 3) 画像 I_k に対して、 $a_{\min} \leq a_k, \beta_k \leq a_{\max}, 0^\circ \leq \theta_k < 90^\circ$ の範囲で (a_k, β_k, θ_k) を増分 $\Delta a_k, \Delta \beta_k, \Delta \theta_k$ で動かす、(3.4) までの処理を繰り返す。

(3.1) 画像 I_k に含まれるエッジ点の対で、2 点間の距離 d が $\min\{a_k, \beta_k\} \leq d \leq \max\{2a_k, 2\beta_k\}$ となるものを登録する。

(3.2) 投票用配列 A の初期値を 0 にセットする。

(3.3) 登録された各エッジ点对に対して、そのエッジ点を中心として描いた二つのテンプレートだ円の交点

[†] 画素値としてはいろいろ考えられるが、ここでは単純に論理和を採用しておく。

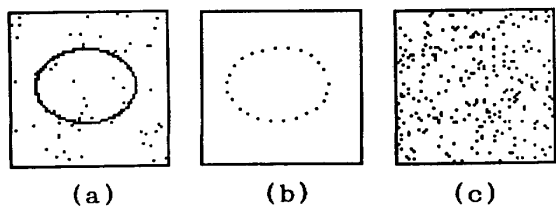


図1 実験に用いただ円パターンの例
Fig. 1 Example of tested ellipse patterns.

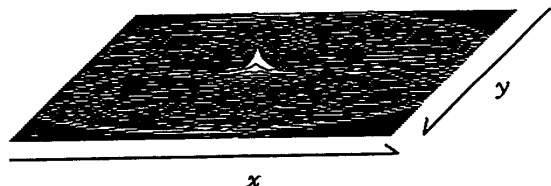


図2 MF法の投票空間における分布
Fig. 2 Distribution in voting space of MF method.

座標を求め、対応する配列 A の要素に 1 を加算する。
(3.4) 配列 A を走査し、投票数 v がしきい値 TH_k 以上である要素 (x_k, y_k) について、 $(x_k, y_k, \alpha_k, \beta_k, \theta_k)$ と v を候補だ円リストに登録する。なお、 TH_k は

$$TH_k = S_k \cdot v_{\max} \quad (0 < S_k < 1) \quad (12)$$

で与える。 v_{\max} はその時点までの最大投票数である。
(手順4) 以下の処理を行う。

- (4.1) 候補だ円リストから投票数 v が最大となるパラメータ $(x_k, y_k, \alpha_k, \beta_k, \theta_k)$ を選ぶ。
- (4.2) $(2^k \cdot x_k, 2^k \cdot y_k, 2^k \cdot \alpha_k, 2^k \cdot \beta_k, \theta_k)$ で定まるだ円 T を入力画像 I_0 上に描いてだ円度判定⁽⁵⁾を行う。

(a) 判定が合格の場合：だ円 T と重なる I_0 上のエッジ点集合に対して最小2乗法⁽⁵⁾を適用し、だ円パラメータを是正する。次に、この是正されただ円と重なる画像 I_0 上のエッジ点を削除し、上位層画像 I_k までの対応する画素値を修正する。除去された I_0 上のエッジ点集合に対して最小2乗法を再度適用し、その結果得られただ円パラメータ $(x, y, \alpha, \beta, \theta)$ を最終的な検出だ円パラメータとする。更に、候補だ円リストから $|x'_k - x_k| \leq 1, |y'_k - y_k| \leq 1, |\alpha'_k - \alpha_k| \leq 1, |\beta'_k - \beta_k| \leq 1$ となるすべての登録だ円パラメータ $(x'_k, y'_k, \alpha'_k, \beta'_k, \theta'_k)$ を削除して (θ'_k は任意), (4.1) に戻る。

(b) 判定が不合格の場合：(4.1) に戻る。
(手順5) 候補だ円リストが空になったら $k = k - 1$ とし、 $k \geq 0$ ならば手順3に戻り、 $k < 0$ ならば処理を終了する。
(手順完)

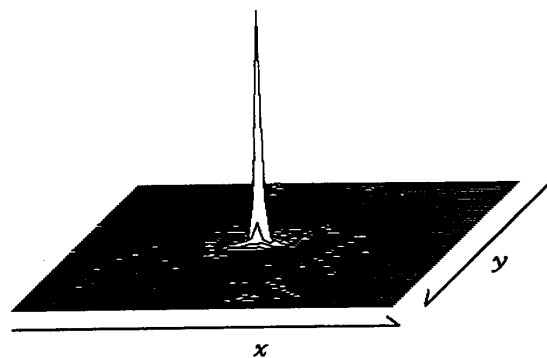


図3 CMF法の投票空間における分布
Fig. 3 Distribution in voting space of CMF method.

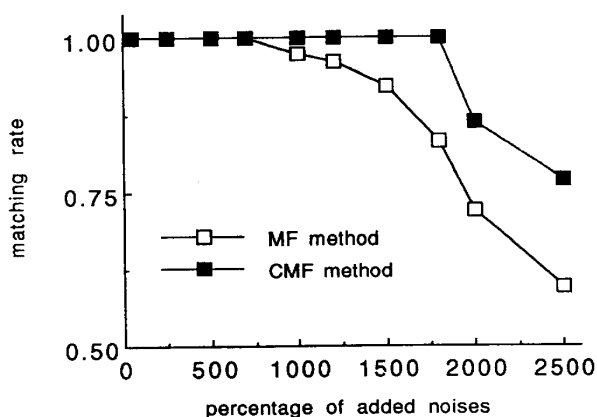


図4 雑音とだ円検出力の関係
Fig. 4 Detecting capability for ellipse patterns with different noises.

7. 実験と検討

提案手法の有効性を検証するために評価実験を行った。使用計算機は YHP HP9000/720CRX である。

(1) 人工画像での評価実験

まず、投票空間における CHT 導入の効果を見るために図1(a)に示す単一だ円について投票実験を行った。画像サイズは 64×64 画素である。だ円パラメータは $(x, y, \alpha, \beta, \theta) = (30, 30, 20, 15, 0^\circ)$ であり、その輪郭点数は 127 で、更にこれに約 40% の雑音エッジ点を付加している。 $(\alpha, \beta, \theta) = (20, 15, 0^\circ)$ における MF 法による投票結果を図2に、同じく CMF 法による投票結果を図3に示す。MF 法の最大投票値は 117 で、CMF 法の最大投票値は 2,856 である。これから、CHT の導入により投票空間におけるピーク点の SN 比が大幅に改善されたことがわかる。

次に、図1(b)に示す輪郭点を間引いた同一形状のだ円(輪郭点数は 25 点)に対して、雑音エッジ点を順次 2,500% まで付加した場合のだ円検出力の変化を測定し

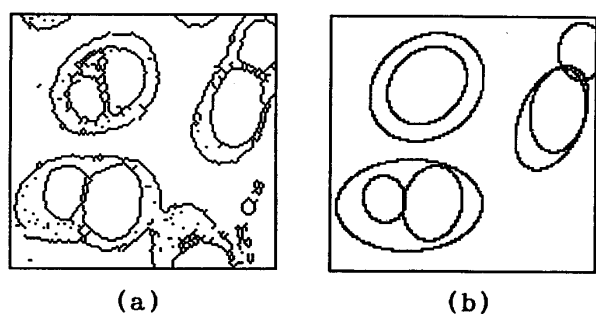


図5 細菌実画像におけるだ円検出

Fig. 5 Detection of ellipses in a real image of bacteria: (a) original image, (b) detected result.

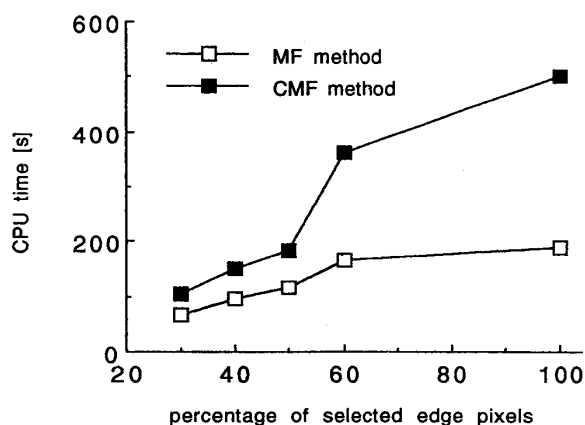


図6 CPU時間とエッジ点選択率

Fig. 6 CPU time under different percentages of selected edge pixels.

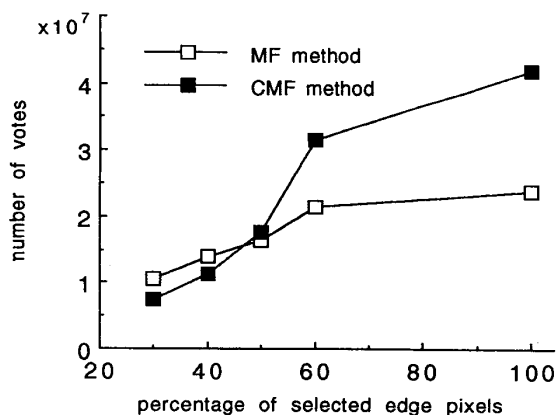


図7 投票回数とエッジ点選択率

Fig. 7 Number of votes under different percentages of selected edge pixels.

た. 図1(c)に雑音付加率が1,000%の場合を示す. だ円検出力の指標としては, 投票空間で最大投票値を与えるだ円パラメータについて, そのだ円輪郭点が真のだ円と重なる割合(マッチング率)を採用した. 結果を図4に示す. ここで, 一つの測定点は同一の雑音付加

率に対して30回の試行を行った結果の平均値である. これから, CMF法はMF法よりも安定した検出力を広い範囲で維持していることがわかる.

(2) 実画像での評価実験

図5(a)は細菌の顕微鏡画像に微分処理と2値化を行って得た輪郭線画像である. 画像サイズは128×128画素であり, エッジ点数は1,356である. 階層化画像は2階層($p=1$)とし, 使用したパラメータは $\alpha_{min}=8$ (画素), $\alpha_{max}=16$ (画素), $\Delta\alpha_k=\Delta\beta_k=2$ (画素), $\Delta\theta_k=10^\circ$, $s_0=s_1=0.8$ である. 図6に, 画像全体からエッジ点をランダムに選択した場合の処理時間の推移を示す. 同じく, 図7に投票回数(投票空間に1を加算した回数)の推移を示す. 選択率50%以下でCMF法の方がMF法よりも投票回数は少なくなるにもかかわらず, 処理時間はMF法の方が少ない. その原因としては, CMF法においてはエッジ点对の選択とだ円の交点計算に意外と時間がかかり, 処理時間もエッジ点の分布に依存する, などが考えられる. これに対してMF法では, 投票位置がテンプレートだ円の輪郭点座標を表参照するだけで算出でき, しかも処理時間がエッジ点の分布に依存しない. CMF法の処理時間の改善には画像の分割が有効であるが, これについては後で論じる. 一方, 検出精度についてはそれほど大きな違いは生じなかったが, 選択率40%以下ではCMF法の方が好ましい結果を与えた. CMF法による検出結果の例を図5(b)に示す. 但し, 選択率は50%の場合で, 検出対象だ円はその中心が画像内にあるものに限定している.

(3) 検討

CHTの導入で改善が期待された事項は検出精度と処理時間である. まず, 前者については一応の効果は認められたと言えよう. 特に, 雑音等で悪条件下にある画像に対しては有効と言える. 一方, 後者についてはそのままではそれほど効果が上がらなかったが, 画像の分割を行うことで処理時間をかなり改善できる. 以下, これについて説明しよう.

議論を簡単にするために, 以下では画像の階層化は考えずに($p=0$), 式(4)によるエッジ点对の選別も行わないものとする. そして, 固定した一つの (α, β, θ) に対する投票処理時間について考える. 今, エッジ点(雑音点も含む)は画像全体にほぼ一様に分布しているとする. 画像サイズを $N \times N$ (画素), 分割画像のサイズを $N_d \times N_d$ (画素)とすると, 分割画像の数は $q=(N/N_d)^2$ である. 画像中の全エッジ点数を M とすると, 分割画像1枚当りのエッジ点数は $m=M/q$ となる. このとき,

エッジ点対の全組合せ数は

$$f = qm(m-1)/2 \doteq M^2/2q \quad (13)$$

である。1エッジ点対当り、だ円の交点計算と投票の処理時間に τ_1 を要するとすると、CMF法における全投票処理時間は

$$T_{CMF} = f\tau_1 \doteq M^2\tau_1/2q \quad (14)$$

となる。一方、テンプレートだ円のエッジ点数を n とすると、MF法の全投票回数は

$$g = Mn \quad (15)$$

となる。MF法の投票1回当りの処理時間を τ_0 とすると、MF法における全投票処理時間は

$$T_{MF} = g\tau_0 = Mn\tau_0 \quad (16)$$

となる(こちらは q に依存しない)。従って、

$$T_{CMF}/T_{MF} \doteq (1/2q)(M/n)\tau_1/\tau_0 \quad (17)$$

を得る。式(14)または式(17)から、画像を q 個に分割すると、CMF法の処理時間は $1/q$ になることがわかる[†]。よって、CMF法において画像の分割はかなり効果があると言える。

最後に、CMF法の考え方はだ円以外にも適用可能なことを指摘しておこう。特に、方程式で記述される図形に対しては、その交点計算が簡単なものであれば、そのまま適用できる。任意の曲線図形については交点計算に工夫が必要となるが、図形を線分近似することでその簡易化を実現できる可能性がある。

8. む す び

本論文では、MF法にCHTを導入しただ円検出法

(CMF法)を新たに提案し、評価実験を行ってその有効性について検討を行った。CMF法は検出精度の改善に効果があり、処理時間についても画像を分割することで高速化が可能である。また、CMF法は一般図形の検出問題にも拡張可能であるが、それらの検討は今後の課題としたい。

謝辞 本研究に対して貴重な御意見を頂いた本学情報工学科丹波澄雄助手、ならびに計算機実験に御協力を頂いた吉田功技官と相馬孝志技官に感謝する。

文 献

- (1) Illingworth J. and Kittler J.: "A survey of the Hough transform", *Comput. Vision, Graphics & Image Process.*, **44**, pp. 87-116 (1988).
- (2) Tsuji S. and Matsumoto F.: "Detection of ellipses by modified Hough transformation", *IEEE Trans. Comput.*, **C-27**, 8, pp. 777-781 (1978).
- (3) 大和淳二, 入澤和義, 石井邦夫, 牧野秀夫: "重み付け中点図形を用いただ円抽出アルゴリズム", *信学論(D-II)*, **J72-D-II**, 7, pp. 1009-1016 (1989-07).
- (4) 恩田邦夫, 渡並 智, 青木由直: "Hough変換平面からのだ円パラメータ決定法", *信学論(D-II)*, **J72-D-II**, 10, pp. 1760-1764 (1989-10).
- (5) 渡辺孝志, 柴田俊浩: "Hough変換と階層化画像を用いた欠損だ円の検出", *信学論(D-II)*, **J73-D-II**, 2, pp. 159-166 (1990-02).
- (6) Merlin P. M. and Farber D. J.: "A parallel mechanism for detecting curves in pictures", *IEEE Trans. Comput.*, **24**, 1, pp. 96-98 (1975).
- (7) Ben-Tzvi D. and Sandler M. B.: "A combinatorial Hough transform", *Pattern Recognition Letters*, **11**, 3, pp. 167-174 (1990).

(平成6年2月15日受付, 6月29日再受付)

[†] 実際には、分割画像のサイズ N_d は少なくとも

$$N_d \geq \max\{2\alpha, 2\beta\}$$

を満たす必要があり、 q はむやみに大きくできない。