

最小 2 乗法による重なり合うだ円状パターンの分離計測

正 員 渡辺 孝志[†] 非会員 高橋 渉[†]Separation and Measurement of Overlapping Ellipse-Like Patterns
by Least-Squares MethodTakashi WATANABE[†], *Member* and Wataru TAKAHASHI[†], *Nonmember*

あらまし 画像解析において、重なり合う粒子状物体の画像から個々に粒子を分離し形状を計測する問題は基本的であるが、まだ十分に解明されていない。一般に、この種の問題は与えられた粒子塊パターンの輪郭情報と粒子の形状に関する制約条件を組み合わせて解くことが必要である。粒子が円状パターンの場合には有効な手法が与えられているが、その一般化であるだ円状パターンの場合に有効な手法はまだ確立されていない。本論文では、重なり合うだ円状粒子画像に対して粒子を個々に分離計測するための一つの解法を与えた。これは、重なり合う粒子塊パターンの輪郭線から個々のだ円状粒子に属する部分曲線の組を分離し、これに最小 2 乗法を適用して各だ円状粒子の形状パラメータを決定しようとするものである。本手法の有効性を確認するために行っただ円状粒子画像に対する適用実験では、良好な分離計測結果を得ることができた。

1. ま え が き

画像解析では、多数の粒子状物体を含む画像(粒子画像)から個々の粒子を識別し形状を計測する処理は粒子解析と呼ばれており、その自動化が多くの分野で要望されている。最近、実用レベルの粒子解析システムが市販されるようになってきたが、粒子が相互に重なり合うような複雑な粒子画像を処理することはまだ困難である。そのような画像では同じ濃度レベルの特徴をもつ粒子同士が重なるために、濃度変換処理などの手段では粒子を個々に分離することはできない。重なり合う粒子に対しては、粒子塊の輪郭情報と粒子の形状に関する制約条件を組み合わせて各粒子を分離することが必要である。

重なり合う粒子塊のパターンから粒子を個々に分離する手法として、反復演算によるもの⁽¹⁾、パターンマッチングによるもの⁽²⁾、輪郭の凹凸情報に着目するもの^{(3),(4)}などが提案されている。粒子形状が円状パターンである場合には前の二つの手法により良好な結果が得られているが、だ円状パターンの場合に有効な方法はまだ確立されていない。筆者らの知る限りでは Hough 変換

を用いるだ円状パターンの検出法⁽⁵⁾が検討されているのみであるが、この方法も大きさの異なるだ円状パターンが多数混在する粒子画像に対しては適用が困難であると考えられる。

粒子画像では円状パターンよりだ円状パターンの方が一般的である。筆者らは鮑の稚貝を自動計測する画像処理システムの開発に関連して、パターン形状がだ円である対象物の分離計測手法を確立する必要がある(鮑の稚貝のパターン形状は近似的にだ円であり、しかも稚貝は重なり合って成育する)⁽⁶⁾。だ円は円の一般化であり、円よりも形状を記述するパラメータの数が増すため、だ円状パターンの分離問題は円状パターンの場合と比べて一段と複雑になっている。

本論文では、複雑に重なり合うだ円状粒子画像から個々のだ円状粒子を分離計測するための新しい手法を提案する。これは、重なり合う粒子塊パターンの輪郭線から個々のだ円状パターンに属する部分曲線の組を分離し、次に最小 2 乗法を適用して各だ円方程式を推定し、最後に方程式の係数からだ円状パターンの各パラメータを決定するものである。

以下、2.ではだ円の幾何学的性質を述べ、3.では最小 2 乗法によるだ円方程式の推定法を述べる。4.では重なり合う粒子塊パターンからだ円状パターンを個々に分離する方法を述べる。5.では本手法のだ円状粒子画像に

[†] 岩手大学工学部情報工学科, 盛岡市
Faculty of Engineering, Iwate University, Morioka-shi, 020 Japan

対する適用実験結果について述べる。

2. だ円状パターンの幾何学的性質

本章では、だ円状パターンの計測で必要とするだ円の幾何学的性質について簡単に述べる。

2.1 円とだ円の違い

だ円状パターンの幾何学的特徴を円状パターンと比較しながら考えてみる。円の場合、形状の記述に必要なパラメータは中心座標 (x_c, y_c) と半径 r の三つである。円はその幾何学的特徴として、中心に関する回転に対して不変であり、外周上の任意の点で曲率が同じであるということが挙げられる。従って、円弧はその曲率を測定することで属する円の中心座標と半径が簡単に決定でき、これにより重なり合う円状パターンも個々に分離し計測することができる^{(1),(2)}。

一方、だ円の場合は、形状記述に必要なパラメータは中心座標 (x_c, y_c) 、長軸と短軸の長さ $2\alpha, 2\beta$ 、傾きの角度 θ の五つが必要である。円と比較した場合、その幾何学的特徴の違いは

- (1) 曲率が一定でない、
- (2) 傾きの角度 θ を指定する必要がある、

この2点である(図1)。従って、だ円状パターンが重なり合う場合の分離計測問題は、円状パターンの場合のように曲率という輪郭の局所的情報のみに着目するのでは解決が困難であり、輪郭線の全体的変化、すなわち大域的情報までも含めて考えることが必要となっている。

2.2 だ円方程式とだ円パラメータ

だ円のパラメータは、その輪郭線を定めるだ円方程式によって決定されるはずである。このことは2次曲線の分類論⁽³⁾から、次のように説明される。

いま、平面上の直交座標系においてだ円曲線が次の一般の2次方程式

$$ax^2 + 2hxy + by^2 + 2gx + 2fy + c = 0 \quad (1)$$

で与えられているとする。但し、 a, b, c, f, g, h は実係数である。ここで、次の二つの行列式

$$\zeta = \begin{vmatrix} a & h \\ h & b \end{vmatrix} \quad \eta = \begin{vmatrix} a & h & g \\ h & b & f \\ g & f & c \end{vmatrix} \quad (2)$$

を考える。だ円は有心2次曲線であるので

$$\zeta = ab - h^2 \neq 0 \quad (3)$$

が成立し、次の連立方程式

$$ax + hy + g = 0$$

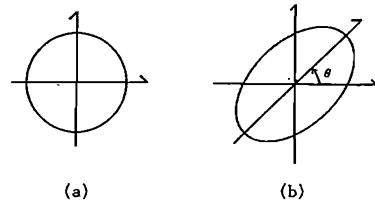


図1 円とだ円
Fig. 1 Circle and ellipse.

$$hx + by + f = 0$$

の解 (x_c, y_c) がただ一通り定まる。点 (x_c, y_c) はだ円の中心座標であり、次式で与えられる。

$$x_c = \frac{hf - bg}{ab - h^2} \quad (4)$$

$$y_c = \frac{hg - af}{ab - h^2} \quad (5)$$

中心 (x_c, y_c) に座標の原点を移せば、新しい座標系でだ円方程式(1)は

$$ax'^2 + 2hx'y' + by'^2 = C \quad (6)$$

となる。ここで

$$C = -\eta \zeta^{-1} \quad (7)$$

である。更に、座標軸を角度 θ だけ回転して

$$x' = X \cos \theta - Y \sin \theta$$

$$y' = X \sin \theta + Y \cos \theta$$

なる座標変換を施すと、新座標系では式(6)は

$$AX^2 + 2HXY + BY^2 = C \quad (8)$$

となる。ここで、係数 A, B, H は

$$A = a \cos^2 \theta + h \sin 2\theta + b \sin^2 \theta \quad (9)$$

$$2H = 2h \cos 2\theta + (b - a) \sin 2\theta \quad (10)$$

$$B = a \sin^2 \theta - h \sin 2\theta + b \cos^2 \theta \quad (11)$$

であるが、これらの間には次の関係

$$A + B = a + b, \quad AB - H^2 = ab - h^2 \quad (12)$$

が成立している。そこで、 $H=0$ となるように新しい座標系を選ぶものとする。このためには、

$$\tan 2\theta = 2h / (a - b) \quad (13)$$

となるように θ を選ばばよい。この θ がだ円の傾きの角度である。但し、 θ の範囲は $0 \leq \theta < \pi/2$ とし、 $a=b$ のときは $\theta = \pi/4$ とする。このとき、式(8)は

$$AX^2 + BY^2 = C \quad (14)$$

の形になる。なお、式(12)と $H=0$ とから、 A, B は

$$t^2 - (a+b)t + ab - h^2 = 0 \quad (15)$$

の根としても定め得る。 $h > 0$ ならば根の大きい方を A に、 $h < 0$ ならば根の小さい方を A に選ばばよい。

最後に、式(7)より、

$$\alpha^2 = -\eta(A\xi)^{-1} \tag{16}$$

$$\beta^2 = -\eta(B\xi)^{-1} \tag{17}$$

となるよう正数 α, β を選べば

$$\frac{X^2}{\alpha^2} + \frac{Y^2}{\beta^2} = 1 \tag{18}$$

となり、だ円の長軸と短軸の長さが 2α と 2β で与えられる。以上により、だ円の各パラメータ (中心座標, 長軸の長さ, 短軸の長さ, 傾きの角度) はそのだ円方程式の係数から算出できることが示された。

3. 最小2乗法によるだ円方程式の推定

前章で、だ円の各パラメータはその輪郭線を定める2次方程式の係数から算出できることが判明した。そこで、だ円状パターンの輪郭線から対応するだ円方程式が推定できれば、だ円のパラメータはすべて求まることとなる。これは曲線当てはめの問題であるが、2次項を含む重回帰分析⁽⁶⁾の特別な場合と考えてもよい。すなわち、だ円方程式の係数は最小2乗法を用いることによりだ円状パターンの輪郭画素から次のようにして推定できる。

だ円の2次方程式における係数の自由度は5であるので、式(1)で $c=1$ とおいて

$$ax^2 + 2hxy + by^2 + 2gx + 2fy + 1 = 0 \tag{19}$$

で考えよう。いま、画像から得られるだ円状パターンの輪郭画素の座標を $\{(x_i, y_i)\}$ で表すものとする。未知の係数 a, b, f, g, h は、輪郭画素の座標 (x_i, y_i) に対する誤差の2乗和

$$\varepsilon^2 = \sum_i (ax_i^2 + 2hx_iy_i + by_i^2 + 2gx_i + 2fy_i + 1)^2 \tag{20}$$

を最小とするよう決定する。そこで、各係数ごとに偏微分を行い、次の正規方程式を得る。

$$-\sum_i x_i^2 = \sum_i x_i^2 (ax_i^2 + 2hx_iy_i + by_i^2 + 2gx_i + 2fy_i)$$

$$-\sum_i x_i y_i = \sum_i x_i y_i (ax_i^2 + 2hx_iy_i + by_i^2 + 2gx_i + 2fy_i)$$

$$-\sum_i y_i^2 = \sum_i y_i^2 (ax_i^2 + 2hx_iy_i + by_i^2 + 2gx_i + 2fy_i)$$

$$-\sum_i x_i = \sum_i x_i (ax_i^2 + 2hx_iy_i + by_i^2 + 2gx_i + 2fy_i)$$

$$-\sum_i y_i = \sum_i y_i (ax_i^2 + 2hx_iy_i + by_i^2 + 2gx_i + 2fy_i)$$

この5元連立1次方程式を a, b, f, g, h について解くことによって、だ円方程式が決定できる。

4. 重なり合うだ円状パターンの分離

単一のだ円状パターンについては2.と3.で述べた方法により問題なくパラメータを決定できるが、図2に示すように、複数のだ円状パターンが互いに重なり合

うような場合にはそのままでは適用できない(図で実線が観測できる輪郭線であり、破線が個々のだ円の見えない弧に相当する部分曲線である)。そのため、重なり合ったパターンの輪郭線から個々のだ円状パターンに属する部分曲線の組を分離する必要がある。分離が成功すれば、この分離した部分曲線の各組について前章で述べた最小2乗法を適用することによりだ円パラメータを決定することができる。

以下にだ円状パターンを個々に分離するアルゴリズムについて述べるが、説明を簡単にするため、パターン全体の連結成分は一つとし、重なり合うパターンの輪郭線は既に抽出されているものとする。

〈だ円分離アルゴリズム〉

重なり合うだ円状パターンの輪郭線からだ円を個々に分離するためのアルゴリズムは、次の五つのフェーズよりなる。第1のフェーズで、重なり合うパターンの輪郭線をだ円の弧に対応する部分曲線に分割し、第2のフェーズで、同一のだ円を形成する可能性をもつ部分曲線対のリスト(両立対表)を生成する。第3のフェーズでは、両立対表を見直して表から適合しない部分曲線対を除去する。第4のフェーズでは、部分曲線対を矛盾のないように統合し、各だ円を構成する部分曲線の組(両立部分曲線組)を作成する。第5のフェーズでは、各両立部分曲線組に対して2.と3.で述べた手法を適用してだ円パラメータを決定する。

以下に、各フェーズの詳細を述べる。

[フェーズ1] 部分曲線への分割

だ円は凸図形であるので、図2に示すように重なり合うだ円状パターンの輪郭には曲率が非連続的に大きく変化する点 P_i が存在する。この点 P_i を輪郭線の分割点に選び、分割点を端点とする輪郭の部分曲線 C_i を生成する。各部分曲線はだ円の弧に相当している。

[フェーズ2] 両立対表の作成

異なる二つの部分曲線 C_i と C_j が同一だ円に属する

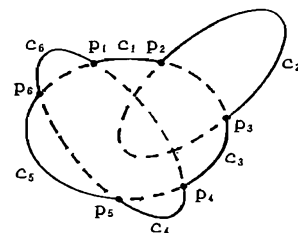


図2 重なり合うだ円状パターン
Fig. 2 Overlapping ellipse-like patterns.

と判定される場合、両立するという。各部分曲線ごとに両立するすべての部分曲線名を登録した両立対表を作成する。このためには、隣接する部分曲線同士、すなわち同一分割点を共有する部分曲線同士が両立しないことに着目して、最初に、隣り合うことのない部分曲線同士をすべて両立対表に登録し、次に、これから不適当な部分曲線対を除去する。除去は、両立する二つの部分曲線の関係が凸でなければならないという要請に基づいて、次の手順で行われる。

(step 1) 両立対表から一つの部分曲線対を選んで、その部分曲線の端点(分割点)同士を交差しないように結び二つの線分を作成する(図 3(a)).

(step 2) 端点から連続した k 個の画素を用いて最小 2 乗法により近似直線を求め、この直線を端点における接線とする(図 3(b)).

(step 3) step 1 で得た線分と step 2 で得た接線との位置関係を調べ、

条件 A : 4 本の接線は、2 本の線分と二つの部分曲線で囲まれる閉領域の内部を通過しない。

を満足した場合(図 3(c))に同一のだ円を形成する可能性があるかと判断して両立対表に残し、満足しない場合(図 3(d))は両立対表から削除する。また、条件を満足する場合は、後の処理のために接線と線分のずれ角 θ を計算しておく。

以上の step 1 から step 3 の処理を両立対表中のすべての部分曲線対に対して行う。

なお、条件 A の判定はずれ角 θ の正負のみで判定可能であることに注意する。

[フェーズ 3] 両立対表の精製

フェーズ 2 の処理では凸であるか否かの単純な判定を用いていたので、両立対表はまだ誤った両立部分曲線対を含むことが考えられる。そこで、両立部分曲線対に対して更に判定条件を厳しくしてふるいにかける。ここではだ円の幾何学的特徴を利用し、端点を結ぶ 2 本の線分の長さ、端点における接線と線分のずれ角 θ の二つのデータを利用して、次の二つの条件による適合性の判定を行う。

条件 B₁ : 2 本の線分の長さが異なる場合、長い方の線分側に最小のずれ角 θ がくるならば適合しない(図 4(a)).

条件 B₂ : 極端に小さなずれ角 θ がある場合は適合しない(図 4(b)).

両立対表のすべての両立部分曲線対について、条件 B₁ と B₂ の適合性判定を行い、適合しないものを両立対

表から削除する。

[フェーズ 4] 両立部分曲線組の作成

前の二つの処理では部分曲線の対で考えているために、三つ以上の部分曲線の組を作成できない。そこで両立部分曲線対を矛盾のないように統合して、各だ円ごとに部分曲線の組としてまとめ直す必要がある。この組を両立部分曲線組という。両立部分曲線組は両立対表を用いて次の二つの処理で作成される。

(4-1) 孤立している部分曲線に対する処理

両立する部分曲線をもたないで孤立している部分曲線は、それだけで部分曲線組を形成し、両立対表より削除する。

(4-2) 両立部分曲線対に対する処理

この場合の処理手順は以下の通りである。

(step 1) 両立対表の一つの部分曲線 C_i に着目し、これとこれに両立するすべての部分曲線とから構成される集合(候補集合)を作る。

(step 2) 候補集合の各部分曲線を頂点とし、両立する頂点間に枝を引いたグラフを考える。求める両立部分曲線組はこのグラフの部分完全グラフで頂点数が最大となるものに対応する。そこで、グラフの要素数を N とした場合、各頂点の次数(その点に連結する枝数)が

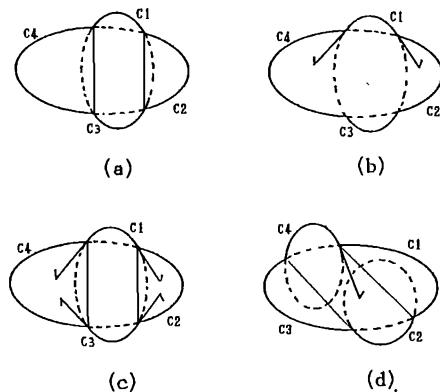


図 3 部分曲線対と凸性の関係
Fig. 3 Pairs of subcurves and convexity.

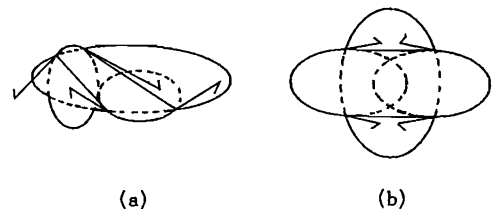


図 4 条件 B₁ と B₂ を満足しない例
Fig. 4 Examples which do not satisfy the condition B₁ or B₂.

$N-1$ ならば完全グラフである。そうでなければ、次数が最小の頂点を除去したグラフで考えて完全グラフかどうかを調べる(着目した部分曲線 C_i は除去されないで必ず残る)。これを繰り返して行けば完全グラフが得られ、その頂点对応する部分曲線の集合が求める両立部分曲線組である。

(step 3) 以後の処理の重複を避けるために、得られた両立部分曲線組に含まれる部分曲線対をすべて両立対表から削除する。

以上の step 1 から step 3 までの処理を両立対表が空になるまで繰り返す。

[フェーズ 5] だ円パラメータの決定

両立部分曲線組内のすべての部分曲線は同一のだ円状パターンの輪郭線に属するので、3.で述べた最小2乗法による手法を各両立部分曲線組ごとに適用してだ円方程式の係数を推定し、2.の方法によりだ円のパラメータを決定する。

5. 実験と結果

5.1 実験の手順

本手法の有効性を確認するために評価実験を行った。実験は単一のだ円状パターンからなる画像と複数のだ円状パターンが互いに重なり合う画像とについて行った。実験に用いた画像は人工的に作成した2値画像であり、原理的面からの手法の評価には適しているものと思われる。また、実験には筆者らが開発したマイクロプロセッサ MC 68000 による会話型画像処理システム MIPS/I⁽⁶⁾を用いた。

最初に、単一のだ円状パターン画像について、最小2乗法により推定できるだ円パラメータの精度を評価した実験の結果を述べる。次に、複数のだ円状パターンが互いに重なり合う画像について、だ円分離アルゴリズムの有効性を検証するために行った実験結果を述べる。

5.2 単一だ円状パターン画像での実験

この実験の目的は、次のような事項を確認することにある。すなわち、パラメータが正確に推定できるだ円の大きさの下限はどれくらいか、パラメータが推定できるためには部分曲線は全周の何%ぐらいあればよいか、断片的に与えられた複数の部分曲線により推定されるパラメータの精度はどうか、などである。以下これらについて述べるが、座標の単位は画素とし、角度はラジアンで表すものとする。

(1) だ円の大きさとパラメータの推定精度

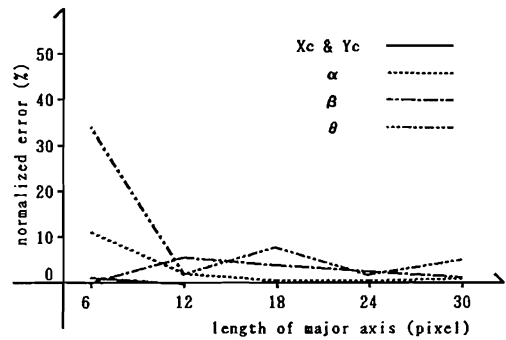


図5 全輪郭画素によるパラメータの推定誤差
Fig. 5 Normalized parameter errors estimated by all the pixels on the contour.

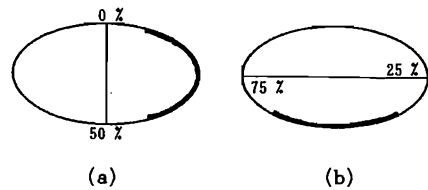


図6 部分曲線の二つのタイプ
Fig. 6 Two types of subcurves.

2値画像の計測処理では標準化による誤差が問題となるが、これは測定対象物のサイズが小さいほど顕著である。そこで、最小2乗法で推定可能なだ円状パターンの最小サイズを求める測定実験を行った。これには、最小2乗法のデータとしてだ円の全輪郭画素を与えて推定できるだ円パラメータの精度を測定した。測定に使用したパターンは、長軸と短軸の比率が3対2のものを使用した。図5にその結果を示すが、長軸が12画素、短軸が8画素、全輪郭が32画素ではほぼ正しいパラメータが得られた。ここで、縦軸は誤差を正規化した数値で示す。その他、円についても同様な実験を行ったが、直径が12画素ではほぼ正しいパラメータが得られた。従って、単一だ円状パターンのパラメータは最小2乗法により十分に計測可能である。

(2) 部分曲線の長ささとパラメータの推定精度

だ円分離アルゴリズムを用いて得られる両立部分曲線組には、一つの部分曲線のみからなるものが考えられる。この場合、輪郭画素数が少なくなるので、正確にだ円のパラメータが求められるかどうかの問題となる。そこで、部分曲線の長さが全周に対してどの程度の割合であればだ円パラメータが正確に推定できるかを調べる実験を行った。

だ円はその外周上の各点で曲率が違っているの、

表1 部分曲線によるだ円パラメータの推定精度
(部分曲線が1本の場合)
($x_c=y_c=150$, $\alpha=20$, $\beta=15$, $\theta=0$,
総輪郭画素数=100)

(a) 最遠点付近を通る場合

曲線の長さ	x_c	y_c	α	β	θ
30 %	154.23	149.78	15.84	14.02	0.073
40 %	151.73	149.99	18.35	14.85	-0.003
50 %	151.06	150.02	19.04	15.01	-0.010

(b) 最近点付近を通る場合

曲線の長さ	x_c	y_c	α	β	θ
30 %	150.21	162.01	13.55	2.73	-0.093
40 %	150.07	154.24	18.28	10.78	-0.051
50 %	150.10	150.95	19.91	14.17	-0.015

表2 部分曲線によるだ円パラメータの推定精度
(部分曲線が複数の場合)
($x_c=y_c=200$, $\alpha=20$, $\beta=15$, $\theta=0$, 総輪郭画素数 = 100)

(a) 部分曲線が2本の場合(各部分曲線はともに20%長)

2曲線の位置	x_c	y_c	α	β	θ
5, 50%	200.1	200.1	19.78	15.00	-0.078
15, 65%	200.0	200.0	20.17	15.11	0.000

(b) 部分曲線が3本の場合(各部分曲線はともに10%長)

3曲線の位置	x_c	y_c	α	β	θ
0, 20, 40%	201.3	200.0	18.81	15.00	-0.028
20, 60, 80%	200.1	200.0	20.10	15.35	-0.004

(c) 部分曲線が4本の場合(各部分曲線はともに5%長)

4曲線の位置	x_c	y_c	α	β	θ
5, 30, 60, 80%	200.1	199.9	20.00	15.36	0.026

同じ画素数の部分曲線であっても推定するパラメータの精度は同じではない。ここでは部分曲線のパターンを大まかに網羅する意味で、(a)中心から最遠点の付近を通過する曲線、(b)最近点付近を通過する曲線、の二つのタイプに分けて実験を行った(図6)。

表1に、部分曲線の全周に占める割合が30%、40%、50%の場合について、最小2乗法で推定されただ円パラメータの値を示す。これから、部分曲線の割合が40%以上あればある程度の精度でパラメータが求まり、正確に求めるためには50%程度の画素数を必要とすることがわかる。これらの結果は他のだ円パター

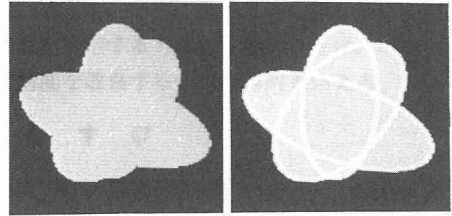


図7 分離に成功した例
Fig. 7 Successful result of separation.

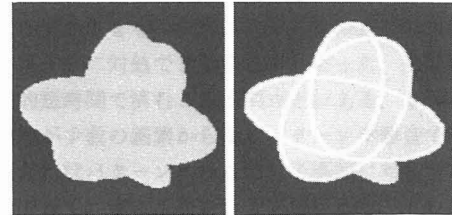


図8 分離に失敗した例
Fig. 8 Unsuccessful result of separation.

ンについても同様であった。従って、部分曲線によるだ円パラメータの推定精度は画素数に依存するのではなく、全体に占める割合に依存することがわかる。

(3) 複数の部分曲線とパラメータの推定精度

両立部分曲線組が複数の部分曲線からなる場合を考えよう。この場合、部分曲線の与えられ方がだ円パラメータの推定精度にどのような影響を及ぼすかが問題となる。ここでは、部分曲線が2本、3本、4本の場合について得られるパラメータ精度の測定実験を行った。その結果を表2に示す。ここで、だ円の輪郭画素位置を最近点の位置を0として時計回りに輪郭線長の100分率で表し(図6)、各部分曲線の位置をその始点の輪郭画素位置で表す。これから、部分曲線が4本で与えられる場合には部分曲線の総長は全周のわずか20%で良いことがわかる。従って、部分曲線が適度に分布していれば、部分曲線の全長が短くてもパラメータの推定が可能である。

5.3 重なり合うだ円状パターン画像での実験

複数のだ円状パターンが互いに重なり合う画像に対して、だ円分離アルゴリズムの有効性を検証する実験を行った。本実験では分割点での接線生成に要する隣接画素数 k を4~8の範囲で可変とした。これは k を固定すると曲率の変化が大きい場合に対応できず、接線の生成に大きな誤差を生ずるからである。そこで、曲率の変化が大きい場合に少ない画素数を、変化が小さい場合には多くの画素数を割り当てるものとした。結

表3 中心を固定した場合のだ円パラメータの推定精度
(部分曲線が1本の場合)
($x_c=y_c=150$, $\alpha=20$, $\beta=15$, $\theta=0$,
総輪郭画素数=100)

(a) 最遠点付近を通る場合

曲線の長さ	α	β	θ
10 %	20.26	19.12	0.418
20 %	20.15	15.22	0.006
30 %	20.12	15.31	0.002

(b) 最近点付近を通る場合

曲線の長さ	α	β	θ
10 %	18.16	15.12	0.057
20 %	20.65	15.11	0.011
30 %	20.38	15.15	0.006

果を図7に示す。この画像に含まれる重なりパターンのサイズは77×83画素である。結果から明らかなように、互いに重なり合うだ円状パターンにおいても、各部分曲線がある程度の割合の画素数をもてば各だ円を分離して計測できることがわかる。図7での処理時間は約30秒である。

部分曲線の長さが十分でない場合にはだ円は正しく推定されない。このための判定は得られただ円が重なりパターンに含まれるか否かで行える。通常、この判定はだ円の輪郭のみについて行えば十分であるので、処理時間はあまりかからない。推定しただ円が重なりパターンからはみだす場合にはその両立部分曲線組は無視される。そのような例を図8に示す。図の右下に推定に失敗しただ円状パターンの一部が見える。

部分曲線の長さは、分割点での接線の精度とだ円方程式の精度に大きな影響を与える。分割点のまわりで曲率の変化が大きく、接線を推定するのに十分な輪郭画素数を確保できない場合は、ずれ角 θ の精度がかなり悪くなるので条件 B_1 と B_2 による適合性の判定は意味をもたなくなってしまう。本研究では、接線生成に用いる画素数 k を曲率により可変とすることで対処したが、より正確に接線を求めるためには部分曲線の全画素を利用して大域的に接線を求める工夫が必要である。また、孤立している部分曲線で全周に対する長さの割合が小さいものに対しては、5.2で述べたように、最小2乗法によるだ円方程式の推定誤差が無視できなくなるので対策が求められる。表3に中心位置を既知とした場合のパラメータ推定結果を示す。これを表1と比較するならば、中心位置が定まると画素数が半分以下の20%程度でもパラメータが精度よく求まることが

わかる。従って、だ円の幾何学的性質を用いてだ円の中心位置を推定する方法を見出すことは、パラメータの推定精度を改良する一つの方向といえる。

6. む す び

本論文では、複数のだ円状パターンが相互に重なり合う複雑な粒子画像から個々のだ円状パターンを分離計測するための新しい手法を提案した。提案した手法は最小2乗法を基本とするものであり、これによりある程度の大きさをもつだ円状パターンの重なり画像に対しては十分に対処できることがわかった。処理時間が比較的短時間で済むことも利点といえる。しかし、部分曲線が少数の画素からなるパターンや雑音で変形されただ円状パターンからなる粒子画像に対してはまだ十分でなく、更に工夫を行う必要がある。これらの問題については現在検討を進めており、その結果については別の機会に報告したいと考えている。

謝辞 日頃ご指導をいただき本学工学部情報工学科横山隆三教授、ならびに実験にご協力をいただいた同学科相馬孝志技官に感謝する。

文 献

- (1) 坂上, 高木: “反復演算による重なり合った粒子像の分離”, 情報学論, 24, 5, pp. 561-567 (昭58-05).
- (2) 木村, 田辺, 山本, 荒井: “分散の難しい粉体の画像解析による粒度分布測定へのアプローチ”, 粉体工学誌, 22, 12, pp. 820-826 (昭60).
- (3) M. J. Eccles, M. P. C. McQueen and D. Rosen: “Analysis of the digitized boundaries of planar objects”, Pattern Recognition, 9, 1, pp. 31-41 (1977).
- (4) 久保, 坂上, 田村: “DIA-Expert システム意味処理部の試作(2)一粒子画像の解析手法とその知識の体系化一”, 情報学会コンピュータビジョン研究会, 43, 3 (昭61).
- (5) D. H. Ballard: “Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes”, Pattern Recognition, 13, 2, pp. 111-122 (1981).
- (6) 渡辺, 相馬, 高橋, 太田, 大御堂, 矢部, 横山: “マイクロプロセッサを用いた画像処理システム MIPS/I の開発 (I) 一開発方針とシステム機能一”, 岩手大学工学部研究報告, 39, pp. 57-66 (昭61).
- (7) 和田, 寺田: “代数学および幾何学”, 廣川 (昭38).
- (8) 奥野, 久米, 芳賀, 吉沢: “多変量解析法”, p. 152, 日科技連 (昭46).

(昭和61年12月18日受付)

渡辺 孝志



昭44 東北大・工・通信卒、昭46 同大大学院修士課程了、昭47 株式会社日立製作所入社、昭55 東北大・大学院博士課程了、工博、同年岩手大・工・情報助手、現在、同助教授、この間、パターン学習認識、集積回路のCADシステム、セル構造オートマトン、画像処理の研究に従事、情報処理学会、計測自動制御学会、日本リモートセンシング学会各会員、

高橋 渉



昭60 岩手大・工・情報卒、現在、同大大学院修士課程在学中、この間、画像処理の研究に従事、情報処理学会会員、