

# 反復画像演算による 重なり合った棒状パターンの解析 坂上勝彦・高木幹雄 (東大生研)

## 1. はじめに

複数個の棒状(細長い長方形)物体が集まった画像は、いろいろな分野、特に工業的な分野においてしばしば研究の対象となっている。この場合、互いに重なり合ったそれぞれの物体を分離・同定し、特に長さ・向きを測定する必要があり、多い。図1、図2にこのような画像の例を示す。どちらもスキャナを使って写真もデジタル化したものである。

図1は、鋼繊維補強コンクリートX線画像である。鋼繊維補強コンクリートとは、強度改善を図るために短い鋼繊維をランダムに分散させたコンクリートである。この場合、コンクリートの性質に影の影響も及ぼす重要な要因の一つである配向係数を測定する必要があり、<sup>[1]</sup> 各棒状鋼繊維の長さ及び向きが、たとえ重なり合っていたとしても測定できなくてはならない。

図2は、直径4mmの発泡スチロール球をトレーサ粒子として表面浮遊法で円柱まわりの流れ場を可視化したものである。流れのベクトルを求めるためには棒状のトレーサ像の長さ及び向きを測定する必要があり、

どちらの例でも1枚の画像を処理するだけでは人間がマニュアルで測定すればよいが、大量の画像を扱う有意味なデータを得るためには計算機による自動計測が必要となる。また、流れの可視化の例ではトレーサ数を少なくすることによってほとんど重なり合っていない画像を作ることもできる。<sup>[2]</sup> しかしここでは2次元的に非常に粗いベクトルデータしか得ることができず、ある程度の重なりがあっても個々のトレーサ像(棒状物体)を分離して測定することのできる手法の開発が望まれる。

この種の画像に対する計算機処理例は極めて少なく、その手法はほとんど確立されていない。解析の手法としては、従来以下のようなものが考えられている。

- (1) 2値画像を作り、細線化することによって端点・交差点などを求めたり、細線に沿って追跡を行ったりする方法。<sup>[3]</sup>
- (2) 線強調オペレータを施し、出力画像の尾根をまっすぐに追跡する方法。<sup>[4]</sup>
- (3) Hough変換<sup>[5]</sup>などの直線検出オペレータを使う方法。
- (4) グラフ理論を使う方法。<sup>[6]</sup>

(1)に関しては、バルフ・細線化(まっすぐとは限らない)画像を細線化し、得られた線図形を曲率のなめらかな方向に追跡する方法が文献<sup>[3]</sup>で報告されている。図3に鋼繊維像に対する細線化(Hilditchの方法<sup>[7]</sup>)を採用した結果を示す。この像は3本の鋼繊維が集まったものであるが、細線化によって細かい情報が失

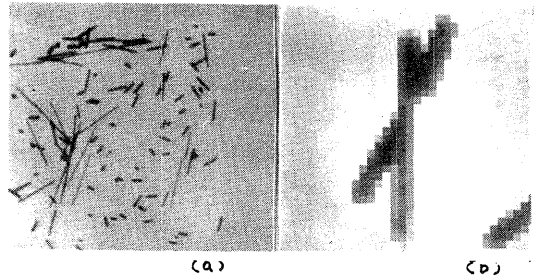


図1. 重なり合った棒状物体像の例。(鋼繊維補強コンクリートX線像)

(a): 全体(256×256, 8bit), (b): (a)の一部を切り出したもの。

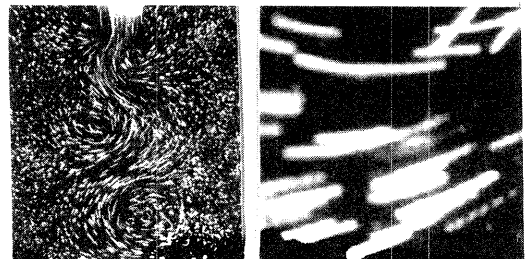


図2. 重なり合った棒状物体像の例。(流れの可視化画像)

(a): 全体像, (b): 拡大像(128×128, 8bit)

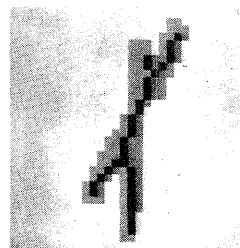


図3. 細線化画像の例。

- 灰色部は図1(b)の値を1値200で2値化(200以下を"1")し、切り出したもの。
- 黒色部は初2値画像を細線化したもの。

れてはっており、この手法は棒状物体像に対しては有効でないと思われる。

(2)の手法は鋼繊維像に対して実際に応用されている。<sup>[4]</sup> しかし、デジタル画像において尾根を「まっすぐに」追跡するという操作は容易ではなく、複雑なロジックを必要とする。

(1)、(2)とも棒の心線を追跡する手法であるが、どちらにおいても追跡を終了するか続けるかの判定が難しく、微妙なしきい値の調節が必要となり、複雑な重なり方をした場合に安定した処理結果が得られないと考えられる。

(3)のHough変換は十分に長い直線が、しかもパラメータ空間( $\rho$ ,  $\theta$ )にて十分に離れて何本も存在する場合(たとえば円錐の境界

線のように)にのみ有効な手法である。図1のように線分が複雑に重なり合った画像に対して効力がないことは明らかであろう。

(4)は輪郭点同士を線で結び、その線分が図形の外部に出るかどうかを調べ、グラフ理論を使って単純な形状の物体に分割する手法である。<sup>[6]</sup>しかしこれは細い棒状物体という特徴を利用していないため、図1や図2に適用しても成功しないであろう。

本稿では、線返し演算(あるいは反復画像演算)を利用した手法を提案する。各輪郭点に割当てた棒状物体についてのモデル(輪郭上にある画素の座標、心線の方程式、棒の両端の座標)の初期値を線返し演算によって更新していき、収束した時点でグラスタクリングして分離するのである。初期値に存在していた「おまじ性」は線返しを繰り返すにつれて次第に取除かれ、大局的につつまの合うモデルに収束する。よって図1(a)のように線幅が2画素しかないような量子化誤差の大きいデータに対しても良好な結果を得ることができると期待できる。また、同じしきい値やパラメータでいろいろな重なり方のデータに対し処理が可能であると思われる。

重なり合った「柱状像」の分離に対する線返し演算の適用についてはすでに報告した<sup>[8]</sup>。これは本稿で用いる線返し演算と全く同様のものであり、モデルが円か長方形かの違いだけである。

## 2. 処理手順

処理手順は次の3つの段階から成り立っている。

- ① 微分処理
- ② 初期値の割当て
- ③ 線返しプロセス

本章ではそれぞれの段階について、図1(b)の塊に対する処理結果を示しながら解説する。

### 2-1. 微分処理

まず原画像から棒状物体の輪郭点と思われる画素を抽出する。処理は次のような手順で行なわれる。

#### (1) マスクの作成

対象物を完全に包含し、しかも不要な部分は処理しないためのマスクを準備する。マスクは原画像を2値化し、注目している塊に近接した領域を選び出し、さらに膨張処理(dilation)を2回施すことにより作成した。図4は、図1(b)の塊を処理するためのマスクである。

#### (2) マスク内微分

マスク内で微分処理を行なう。微分オペレータ<sup>[9]</sup>を使つた。これは図5のような方向

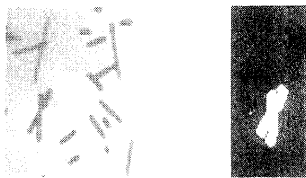


図4. マスクの例

性を持った8種

類の3x3オペレータ

を使い、最大値を

出力の値を得たパ

ターンの方向をグラ

ジェントの方向、そ

の出力値を振幅

とするものである。

ただし細線画像

のように対象物が背

景より暗い場合は、

パターン1のグラジ

エントの方向は左、パ

ターン2は左上として

常に対象物の内部

を何方向にグラジェントの方向と考えることにする。

#### (3) 輪郭点抽出

微分出力が最大値の半分以上の値を持つ画素を輪郭点として図6から抽出する。つまり次第で述べる初期確率が0.5以上のものを選んだことになる。図7が抽出された輪郭点である。#15については2-3節で触れる。

|        |         |          |         |
|--------|---------|----------|---------|
| -1 0 1 | -2 -1 0 | -1 -2 -1 | 0 -1 -2 |
| -2 0 2 | -1 0 1  | 0 0 0    | 1 0 -1  |
| -1 0 1 | 0 1 2   | 1 2 1    | 2 1 0   |

|        |         |          |         |
|--------|---------|----------|---------|
| 1 0 -1 | 2 1 0   | 1 2 1    | 0 1 2   |
| 2 0 -2 | 1 0 -1  | 0 0 0    | -1 0 1  |
| 1 0 -1 | 0 -1 -2 | -1 -2 -1 | -2 -1 0 |

図5. Robinsonのオペレータ

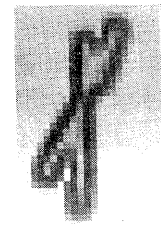


図6. 微分オペレータ出力



図7. 抽出した輪郭点

### 2-2. 初期値の割当て

各輪郭点は、それら属する棒状物体についてのモデルとして次のようなパラメータを持つ。

- (1)  $(X_i, Y_i)$ : 輪郭点iの座標、
- (2)  $(P_i, \theta_i)$ : 輪郭点iが属していると思われる棒状物体の心線の方程式、
- (3)  $(X_{li}, Y_{li}), (X_{ri}, Y_{ri})$ : 輪郭点iが属していると思われる棒状物体の両端の座標、

付随するパラメータとして  $D_i, (X_{si}, Y_{si})$  も以下のように定義する。

$D_i$ :  $(X_i, Y_i)$  と直線  $(P_i, \theta_i)$  との距離、

$(X_{si}, Y_{si})$ :  $(X_i, Y_i)$  が直線  $(P_i, \theta_i)$  へ下した垂線の足、

さらに確率  $P_i$  を持つ。

$P_i$ : 輪郭点iに割当てられたモデルが正しいものである確率  $(0 \leq P_i \leq 1)$ 、

本段階ではこれらのパラメータの初期値が計算され割当てられる。以下、上つき添字(0)は初期値を示すものとする。 $(X_i^{(0)}, Y_i^{(0)})$ は抽出した輪郭点の座標そのものである。

$D_i^{(0)}$ は対象に関する知識を使って人間が設定するようにした。最も細い棒状物体像の幅の半分程度の値を使えばよい。他の各初期値は次のようにして求める。

$(P_i^{(0)}, \theta_i^{(0)})$ : 心線の方法はiの近傍画素の微分値を調べることによって決定される。図8にその手順を示す。⊙印は、i画素に

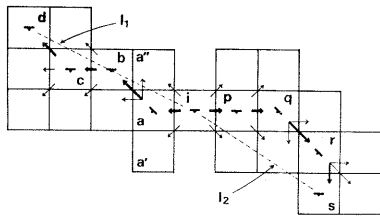


図8. 心線の方角の求め方

おけるグラジエントの方角(物体の内部の方角)である。図8の輪郭点*i*では下を向いている。点*d*, *s*は注目している点*i*を始点として微分画像(振幅方向)上でエッジを4画素分リンクすることによって得た点である。左側にリンクする場合は点*i*から始めてまずエッジがつながっていると思われる3点*a*, *a'*, *a''*を調べる。3点のうちグラジエントの振幅値が*i*の値に最も近いものを選び(同じ値の場合は*a*, *a'*, *a''*の順に選ぶ)。図8の場合は*a*である。さらに*a*を始点として同じ処理によって*b*にリンクし、最終的に*d*に達する。同様にも右方向へ*i*→*p*→*q*→*r*→*s*とリンクする。

次に、それぞれリンクした各点の直線*l*<sub>1</sub>, *l*<sub>2</sub> (*l*<sub>1</sub>は*i*と*d*, *l*<sub>2</sub>は*i*と*s*をそれぞれ結ぶ直線)に対する分散を調べる。すなわち*l*<sub>1</sub>については*a*, *b*, *c*との距離の二乗の和、*l*<sub>2</sub>については*p*, *q*, *r*との距離の二乗の和を計算する。この値の小さい方が正しく棒状物体の長辺に沿った点列であると考えられるから、分散の小さくなる直線と*i*が属する棒状物体の心線とは平行であるとみなすことができる。図8の例では、*l*<sub>1</sub>が選ばれる。この直線も*D<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*だから*i*から棒状物体の内部方向へ平行移動させた直線が(*P<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*, *θ<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*)である。

(*X<sub>i1</sub><sup>(0)</sup>*, *Y<sub>i1</sub><sup>(0)</sup>*), (*X<sub>i2</sub><sup>(0)</sup>*, *Y<sub>i2</sub><sup>(0)</sup>*): 棒の両端座標の初期値は図9のようにして求める。*S*は*i*から心線(*P<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*, *θ<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*)に下した垂線の足, *A*, *B*は*S*から心線と垂直の方向に*D<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*だけ離れた2点である。この点*A*, *B*を直線(*P<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*, *θ<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*)に沿って動かし、1点でも輪郭を定めるしきい値*B<sub>th</sub>*にひきあがれば、そのときの*S*の位置も棒の端の座標とする。ただし鋼繊維像では濃淡レベルが*B<sub>th</sub>*以下なら、トレーサ像では*B<sub>th</sub>*以上なら棒状物体の内部であるとする。*D<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*, *e*, *B<sub>th</sub>*は以下のように定めた。

|                                    | 鋼繊維像 | トレーサ像  |
|------------------------------------|------|--------|
| <i>D<sub>i</sub><sup>(0)</sup></i> | 1    | 2 (画素) |
| <i>e</i>                           | 0.5  | 1 (画素) |
| <i>B<sub>th</sub></i>              | 200  | 100    |

なお、点*A*, *S*, *B*の座標は一般には実数値となる。この場合は近傍4点の濃淡レベルから線形補間を求める。

*P<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*: 確率は、初期値の段階では画素*i*におけるグラジエントの振幅*Mag(i)*に比例すると考えられるよって次式を使って*P<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*を

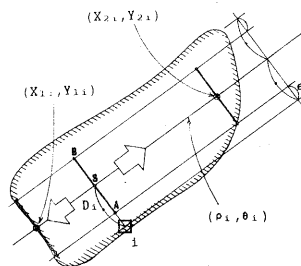


図9. (*X<sub>i1</sub>*, *Y<sub>i1</sub>*), (*X<sub>i2</sub>*, *Y<sub>i2</sub>*)の求め方

定義する。

$$P_i^{(0)} = \text{Mag}(i) / \text{Max}\{\text{Mag}(j)\} \quad (1)$$

なお図9で点*ASB*のどれかが心線に沿って動かし前に棒状物体の内部からはずれてしまうようなことがあれば"*P<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*=0"とする。

図10に初期値の分布を示す。しきい値*B<sub>th</sub>*によって定まる鋼繊維の形状は灰色で表示した。これを見ると特に下の鋼繊維に関する初期値はかなり大きくはついている。また逆に、下に伸びている繊維の初期値は正しくない位置にそろってしまっている。本きならやや傾かなくてはいけないはずである。

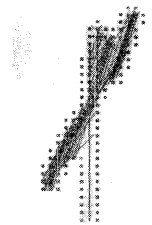


図10. 初期値の分布

■: (*X<sub>i1</sub>*, *Y<sub>i1</sub>*)  
—: 線分(*X<sub>i1</sub>*, *Y<sub>i1</sub>*), (*X<sub>i2</sub>*, *Y<sub>i2</sub>*)  
それぞれ*P<sub>i</sub><sup>(0)</sup>*が大きいほど濃くするように表示してある。

## 2-3. 繰返しプロセス

本段階では前段階で準備された初期値が繰返し演算によって収束する。以下、*R<sub>ij</sub>*の定義、*Q<sub>th</sub>*の決定法、更新手順、収束の様子、クラスティングと傾を巡って解説する。

### 2-3-1. *R<sub>ij</sub>*の定義

まず適合係数*R<sub>ij</sub>*を図11で定義される*R<sub>dij</sub>*, *R<sub>sij</sub>*によって式(2)のように定義する。

$$R_{ij} = R_{dij} \times R_{sij} \quad (2)$$

*R<sub>ij</sub>*は0から1までの実数値を持ち、大きいほど*i*と*j*は同じ棒状物体上にある可能性が強く、小さいほど可能性が少なし。ただし*i*と*j*が図12(a)(b)(c)の位置関係にあるときのみ*R<sub>sij</sub>*は値を持ち、それ以外の場合は*R<sub>sij</sub>*=0である。図11(c)の*δ<sub>th</sub>*は図12の3つの場合でそれぞれ異なる値が使われる。

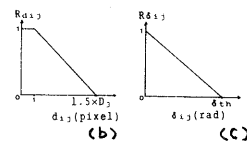
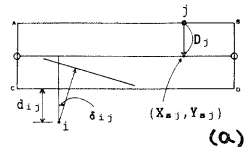


図11. 係数*R<sub>dij</sub>*, *R<sub>sij</sub>*  
(a): *d<sub>ij</sub>* < *δ<sub>ij</sub>*  
(b): *R<sub>dij</sub>*, (c): *R<sub>sij</sub>*

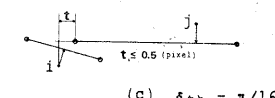
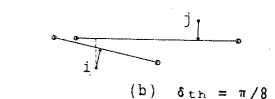
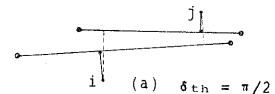


図12. *δ<sub>th</sub>*

*δ<sub>th</sub>*は*j*に割当てられた棒の両端座標を結ぶ線分。

線より下した重線と、 $i$ から $j$ に割当てられた心線へ下した重線は同じ方向を向いているであろう。このような状態からの誤差を図11のように  $d_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$  で表す。

$d_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$ が図11(b)(c)のようにして  $R_{dij}$ ,  $R_{\delta ij}$ を求める。 $R_{dij}$ は  $i \times j$ の位置に関する適合係数、 $R_{\delta ij}$ は心線の向きに関する適合係数と言える。位置の誤差はかなり広く許容するようにしてある。量子化誤差を考慮して  $d_{ij}$ が1以下ならば  $R_{dij} = 1$  となるようにした。また、 $d_{ij}$ が  $1.5 \times D_j$ 以上にならないと  $R_{dij}$ は0にならない。

$\delta_{ij}$ に関するしきい値  $\delta_{th}$ は図12に示すように  $i \times j$ の位置関係によってランク付けした。(a)は  $i \times j$ が互いに相手の心線に下した重線の足が、それぞれ両端の内側に収まる場合である。このときは、 $i \times j$ が同じ棒状物体上にある可能性が極めて高い。よって  $\delta_{th} = \pi/2$  として条件を緩くした。(b),(c)ではこの可能性が薄れると考えられるから、これに応じて  $\delta_{th}$ を厳しくしたのである。これ以外の場合には  $R_{\delta ij} = 0$  となり、 $i \times j$ は同じ棒状物体に含まれる可能性はないとみなされる。

棒状物体という細長い物体が対象であるため、距離的に近い  $i \times j$ 間の相互関係だけでは  $i$ のモデルを正確な形に更新することは不可能である。よって、より広い範囲から  $i$ の同族を探してくる必要がある。しかし反面、不必要に同族を集めて更新を行なうと間違いが生じる。そこで図12のように位置関係によってランク付けを行ない、位置的に同族性の可能性が低い場合は条件が厳しくするようにしたのである。

### 2-3-2. $Q_{th}$ の決定法

$P_j$ も考慮に入れて次式の  $Q_{ij}$ を定義する。

$$Q_{ij} = P_j \times R_{ij} \quad (3)$$

注目している点  $i$ に対し  $Q_{ij}$ があるしきい値  $Q_{th}$ より大きくなる  $j$ を選び出し、それらを使って  $i$ に割当てられたモデルを更新すれば、そのモデルは大局的に見てよりつじまの合う形に変わることになる。このような  $j$ の集合を  $J$ とする。すなわち  $J = \{j \mid Q_{ij} > Q_{th}\}$ 。もちろん  $J$ は  $i$ によって異なる。 $Q_{th}$ はすべての  $j$ について  $Q_{ij}$ を計算し、そのヒストグラムを使って決定される。このヒストグラムは図13のような形になると思われる。自分  $i$ と同じ棒状物体に属する  $j$ によるピークが  $Q_{ij} = 1$ に近い部分にでき、他の物体によるピークがそれと並んで存在するの

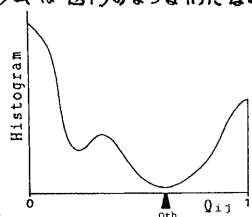


図13. 典型的な  $Q_{ij}$ のヒストグラム

である。 $J$ としては  $i$ と同じ棒状物体に属するものを選び出さなくてはならないから、 $Q_{th}$ は図13のように  $Q_{ij} = 1$ に近いピークだけを切り出すものでなくてはならない。

$Q_{th}$ は図14のようにしてヒストグラムから自動的に決定される。方法は、 $Q_{ij} = 1$ を含むスロットから順に調べて、1度谷になってから再び山に登り始める直前のスロットの中央値を谷の底とみなし、そこを  $Q_{th}$ とする。ただし図14でスロット  $a$ とスロット  $b$ の間のような局所的な谷につかまらないように頻度の累積が5に達するまでは何もしないようにしてある。図14の例ではスロット  $c$ で初めて累積が5に達するため、そこから始めて最初に見つかった谷の底  $f$ の位置がしきい値  $Q_{th}$ となるのである。一番左のスロット ( $Q_{ij} = 0$ を含むスロット) 以外の累積が5に達しない場合は、左から2番目のスロットの中央値を  $Q_{th}$ とする。なおスロット数は50とした。

### 2-3-3. 更新手順

こうして選び出された  $J$ を使って  $i$ についてのモデルを更新する。手順を図15に示す。図16はその一部を明示したものである。

- ①  $(X_{sj}^{(k)}, Y_{sj}^{(k)})$  ( $j \in J$ ) に対し  $Q_{ij}$ を重みとして主成分分析を行ない主軸を算出する。この主軸の方程式を  $i$ に対応する心線方程式の更新値  $(P_i^{(k+1)}, \theta_i^{(k+1)})$  とする。(図16(a)参照)
- ②  $j$ の位置と①で求めた主軸との距離を  $Q_{ij}$ を重みとして加重平均し、これを  $i$ から心線までの距離の更新値  $D_i^{(k+1)}$  とする。(図16(b)参照)

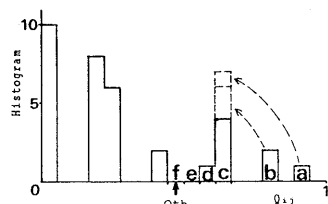


図14.  $Q_{th}$ の決定法

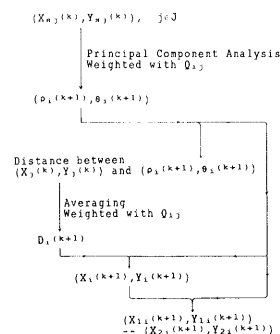


図15. モデルの更新手順(その1)

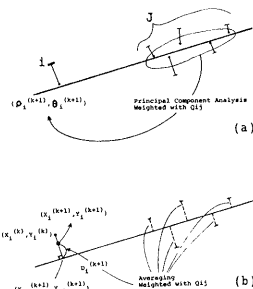


図16. モデルの更新手順(その2)

(a):  $(P_i, \theta_i)$ , (b):  $D_i, (X_{sj}, Y_{sj}), (X_i, Y_i)$

③  $(P_i^{(k+1)}, \theta_i^{(k+1)}, D_i^{(k+1)})$  としつつ次の場合のように  $i$  の位置を動かす。すなわち  $(X_i^{(k)}, Y_i^{(k)})$  から主軸に下した垂線の足  $(X_{2i}^{(k+1)}, Y_{2i}^{(k+1)})$  から  $(X_i^{(k)}, Y_i^{(k)})$  の方向へ  $D_i^{(k+1)}$  だけ伸ばした点を  $(X_i^{(k+1)}, Y_i^{(k+1)})$  とする。(図16(b)参照)

④ 棒状物体の両端座標の更新値  $(X_{1i}^{(k+1)}, Y_{1i}^{(k+1)})$ ,  $(X_{2i}^{(k+1)}, Y_{2i}^{(k+1)})$  は原画に戻って計算しなおす。方法は初期値を割当てたときと同じである。(図9) ただし  $D_i$ ,  $(P_i, \theta_i)$  としては  $D_i^{(k+1)}$ ,  $(P_i^{(k+1)}, \theta_i^{(k+1)})$  を用いる。

J を使って主成分分析で算出した心線方程式はかなり信頼のできるものである。よって図15のように他のすべてのパラメータを更新する際必ず  $(P_i^{(k+1)}, \theta_i^{(k+1)})$  も参照するようにしたのである。

注目している  $i$  に対して選り出された J の要素数  $(N_i)$  が多いほど更新された  $i$  のモデルは信頼できるはずである。よって  $P_i$  は次式で更新する。

$$P_i^{(k+1)} = \text{Min} \left\{ 1, \text{Max} \left( 0, \frac{N_i - 1}{N_{th} - 1} \right) \right\} \quad (4)$$

$N_i$  が  $N_{th}$  以上になればモデルは十分信頼できるとみなされ  $P_i^{(k+1)} = 1$  となる。本実験では  $N_{th} = 10$  とした。

場合によっては 2-3-2 節の方法では  $N_i$  が 1 以下ということも起こり得る。これでは正しい更新は行なわれないため、この場合は  $P_j > 0$  となる  $j$  について  $i$  に最も距離の近いものとその次のものを探し出し、その2つを自身も J の要素として本節の②③④に従ってモデルの更新を行なう。このとき  $Q_{ij} = 1$  とし重みは均等にした。 $P_i^{(k+1)}$  は 0 とする。

以上の更新操作をすべての  $i$  について行ない、それを繰返すのである。

#### 2-3-4. 収束の様子

図17, 図18に収束の様子を示す。図17は、図7の輪郭点 #15 に関する  $Q_{ij}$  のヒストグラムの変化の様子とそれぞれで自動的に決定された  $Q_{th}$  を示したものである。繰返しを進めるにつれて3本の鋼繊維(図1(b)参照)に相当する鋭いピークにまとまっていく様子がよくわかる。 $Q_{th}$  も図13のように最初のピークを切り出すようにうまく設定されている。

図18はモデルの収束の様子を示したものである。輪郭点  $(X_i^{(k)}, Y_i^{(k)})$  と線分  $(X_{1i}^{(k)}, Y_{1i}^{(k)}), (X_{2i}^{(k)}, Y_{2i}^{(k)})$  を、 $P_i^{(k)}$  が大きいほど黒くなるように表示した。輪郭点、心線とも繰返しを進めるにつれて極めて正確に本来の場所に収束していく様子がよくわかる。初期値が正しくない位置にそろってしまっている繊維に伸びた繊維が、やや傾いた形に正しく収束し、また初期値のばらつきが大

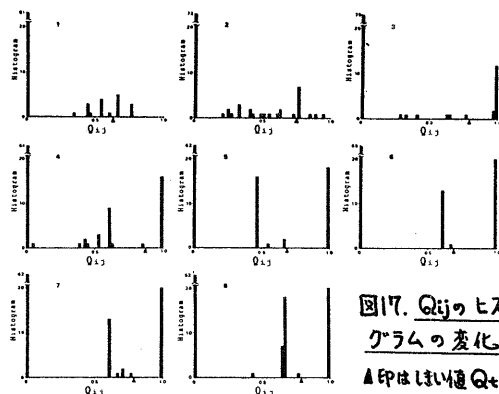


図17.  $Q_{ij}$  のヒストグラムの変化  
▲印はしきい値  $Q_{th}$

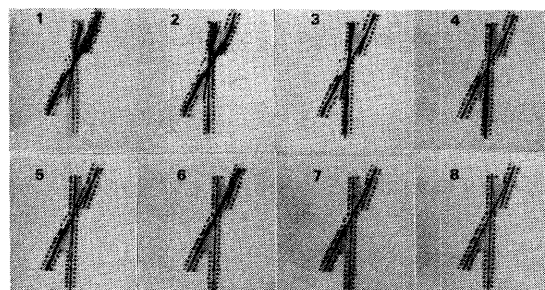


図18. モデルの収束の様子

■:  $(X_i^{(k)}, Y_i^{(k)})$ , —: 線分  $(X_{1i}^{(k)}, Y_{1i}^{(k)}), (X_{2i}^{(k)}, Y_{2i}^{(k)})$

きかった左下の鋼繊維も右上の繊維とは分離して正しく収束した。

収束特性は極めて良好であり、繰返し8回以降はモデルの値にほとんど変化が見られない。そこで輪郭点の位置の変化が更新前後である範囲に収まった時点で収束終了と判定するようにした。具体的には次式の  $\text{ERR}(i)$  がすべての  $i$  について 0.1 画素以下になったときをもって収束終了と判定した。

$$\text{ERR}(i) = |X_i^{(k+1)} - X_i^{(k)}| + |Y_i^{(k+1)} - Y_i^{(k)}| \quad (5)$$

図18の例では繰返し8回後に収束終了と判定された。

#### 2-3-5. クラスタリング

収束の終了したモデルもクラスタリングすることによって重なり合った棒状物体も分離することができ。モデルは既に鋭く本来の値に収束しているためクラスタリングは簡単な方法で行なえばよい。ここでは、座標  $(P_i \cos \theta_i, P_i \sin \theta_i)$  間の距離が1画素以内にあるものはすべて同じクラスとする方法を使った。以下  $P_i, \theta_i, X_i, Y_i, X_{1i}, Y_{1i}, P_i$  はすべて収束終了後の値とする。

クラスタリングされたそれぞれの棒状物体の心線の方程式は  $(X_{1i}, Y_{1i})$  を  $P_i$  を重みとして主成分分析して算出した。また、 $(X_i, Y_i)$  からこの心線への距離を  $P_i$  を重みとして加

重平均した値の2倍を  
棒状物体の幅とする。  
棒状物体の両端座  
標としては  $(X_{1i}, Y_{1i})$   
 $(X_{2i}, Y_{2i})$  を使って

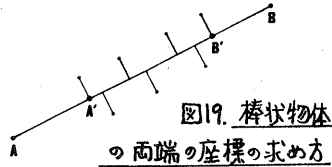


図19. 棒状物体  
の両端の座標の求め方

もよいが、輪郭点の存在する部分までしか物体は伸びて  
いないと考えた方が妥当であろう。そこで 図19のように  
 $(X_i, Y_i)$  から心線 AB に垂線を引いて  $A'B'$  を求め、そ  
れを両端座標とする。

図20が最終的な分離結果である。局所的に2個程度の  
輪郭点で収束してしまったものは信頼できないため表示してい  
ない。長さ、幅、向きのいずれもほぼ正しく求まっている。

図21は、図7  
の輪郭点で最終  
的にどう分割さ  
れたかを示すもので  
ある。3本の鋼  
繊維それぞれ  
に相対する記号  
で表示した。こ  
れを見てもほぼ

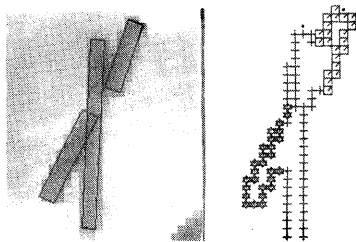


図20. 分離結果 図21. 輪郭点の分割

妥当な分離結果であると言える。なお、この場合2点だけ  
3本のいずれにも属さない輪郭点があった。これはこの2点  
だけで1つの棒状物体として局所的に収束してしま  
ったものである。(■で表示した。)

### 3. 全画面に対する処理

全画面(今回の実験では  $128 \times 128$  画素)に散らばって  
いる棒状物体を処理する場合にも 2-1節(i)と同じ  
手順でまずマスクを作成してデータも抽出する領域を限  
定する。このマスク内で2章と同じ処理を行えばよい。し  
かし、アルゴリズムの性格上、データ数が多い場合はそれ  
を1度に処理するのは能率が悪い。また、計算機(HP21  
12ミニコンを使用)の容量からくる制限により128点を超  
える輪郭点を主記憶の中に収めて処理することはできない。

よって、輪郭点を100点程度のサブクラスタに分割してか  
らそれぞれについて2章の処理を行なうようにする。個々の  
マスク内で抽出した輪郭点数が少なければ、それをサブ  
クラスタとすればよいし、場合によっては2つ以上の  
マスクの輪郭点を合わせてもよいであろう。問題と  
なるのは連結した1つのマスク内の輪郭点数が128を超  
えてしまう場合である。(ex. 図1(a)の左の塊) このとき  
には何らかの方法で輪郭点を100点前後のサブクラスタ

に分割しなくては処理することができない。しかもその  
際、同じ棒状の輪郭点ではできるだけ同じサブクラスタ  
に属するようにしてはならない。細長い対象物である  
ため粒子的場合<sup>[8]</sup>と比べてはるかに難しいということは容  
易に想像できる。単に輪郭点の位置や、心線に下した垂線  
の足の位置の初期値を使ってサブクラスタ分割を行なうだけ  
では同じ物体の輪郭点が、違うサブクラスタに別れてしま  
うことが頻繁に発生した。そこで以下の手順でサブクラスタ  
分割を行なった。

- ①  $(X_{si}^{(0)}, Y_{si}^{(0)})$  が近いものを順にまとめ、輪郭点を100  
点程度のサブクラスタに分割する。
- ② 各サブクラスタに対し更新プロセスを6回実行する。
- ③ 棒状物体の中心座標  $((X_{1i}^{(0)} + X_{2i}^{(0)})/2, (Y_{1i}^{(0)} + Y_{2i}^{(0)})/2)$  の近いものをまとめることにより再び輪  
郭点を100点程度のサブクラスタに分割する。
- ④ パラメータを初期値に戻す。

ある程度繰返しが進んだ段階では、中心の座標が各  
棒状物体でほぼ近い場所に来るものを利用した手  
法である。このようにして分割された各サブクラスタに対し最  
最終的に繰返しプロセスを収束終了まで繰返すのである。  
実験結果については次章で述べる。

### 4. 実験結果及び考察

まずいろいろな重なり方の鋼繊維像に対し2章と同じ  
処理を試みた。結果を図22～図26に示す。それぞれ原画  
像、分離結果、輪郭点の分割結果の順に表示した。しきい  
値等のパラメータは、鋼繊維に対する実験ではすべての場  
合で2章で用いたのと同じ値を使った。すなわち、

- ・抽出した輪郭点は  $P_i^{(0)} = 0.5$
- ・  $D_i^{(0)} = 1$  (画素)
- ・  $e = 0.5$  (画素)
- ・  $B_{th} = 200$  2-2 節参照
- ・  $N_{th} = 10$  式(4)参照
- ・ 収束終了判定しきい値 = 0.1 (画素)
- ・ 輪郭点数が5以上の棒状物体のみを表示。

図22と図23はどちらも比較的簡単な重なり方の例であ  
る。これらの場合は極めて正確にモデルは収束し、輪郭点も  
完璧に分割されている。図24は非常に細く濃淡のは  
っきりしない繊維の例である。縦の繊維は細く、しかも  
輪郭点はとぎれとぎれにしか抽出されていない。それで  
もモデルは正確に収束している。ただし先端付近ま  
で十分に輪郭点が抽出できなかったため、やや短めの分離  
結果となっている。図25は、ほぼ平行に近い2本が重な  
っている場合である。この場合も、ほぼ正確な分離結果が  
得られている。図26は、やや太い繊維の先端に短

い繊維がくっついてる例である。この場合は他の例と比べて非常に接近の回数が多かった。それでも最終的には太い繊維をうまく検出し、短い繊維と分離することができた。

どの例も画像としては極めて分解能の低いデータである。それにもかかわらず良好な結果が得られた。

図27は輪郭点数が多く(600以上)、3章で述べたようにしてサブクラスタ分割処理を行わなくてはならなかった例である。図27の右側に分離結果を示す。細くて長い繊維もかなり正確に検出している。この画像は繊維像の濃淡レベルにかなりの差があり、細長くやや明るい繊維をうまく切り出せるようなしきい値を使うと、つながってはいけない部分がつながってしまう。それが原因となって誤ったモデルに収束している部分もある。

本実験では棒状物体の両端座標を求めるときに使うしきい値Bchを全画面で一様にしてしまったため、濃淡レベルのばらつきが大きい画像に対しては誤りが起こりやすい。この点については改善の余地がある。

最後に流れの可視化画像に対する処理例を示す。この画像(図24に参照)は鋼繊維像より分解能の高い画像である。よって鋼繊維の場合と同じ方法で輪郭

点を抽出するとデータ数が多くなりすぎてしまい、場合によっては1つの棒状物体像(トレサ像)の輪郭点ですら128点に収まらないこともあり得る。そこで微分オペレータ出力画像からその尾根点を抽出し、さらに $P_i^{(0)}$

より0.5のものを選び出して輪郭点とする。

図28, 図29, 図30に分離結果を示す。画像の性質が異なるため、主に初期値設定段階におけるしきい値のいくつかは鋼繊維のときとは違っている。すなわち、

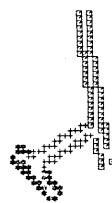
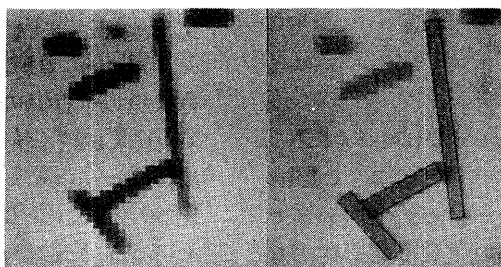


図22. 鋼繊維像(例1)

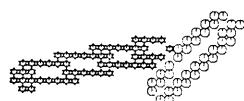
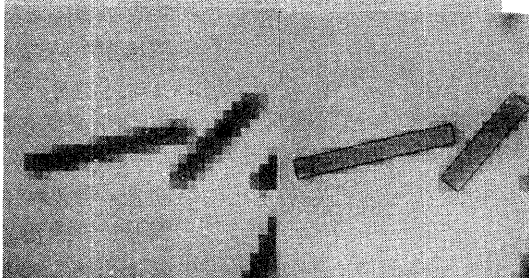


図23. 鋼繊維像(例2)

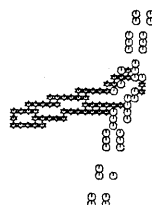
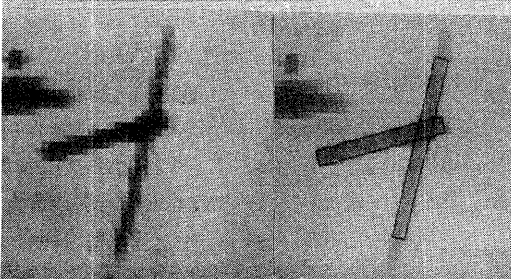


図24. 鋼繊維像(例3)

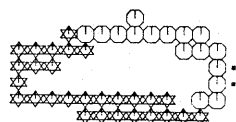
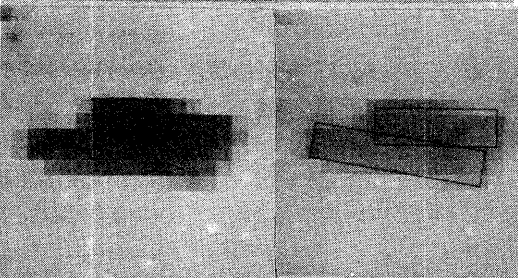


図25. 鋼繊維像(例4)

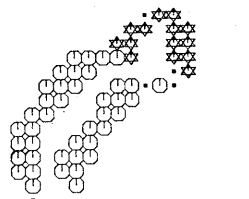
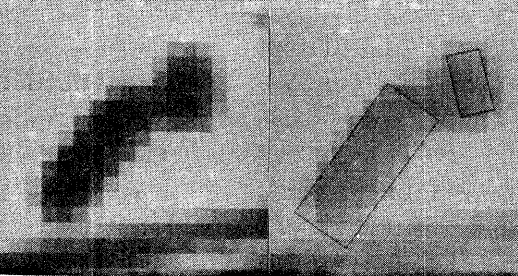


図26. 鋼繊維像(例5)

- $D_i^{(0)} = 2$  (画素)
- $e = 1$  (画素)
- $B_{th} = 100$
- 輪郭点数が10点以上の棒状物体を表示。

他は鋼繊維のときと全く同じである。ただし画面の端にかかっている物体は長さを測定する意味がないので処理を行っていない。かなり良好な結果が得られている。

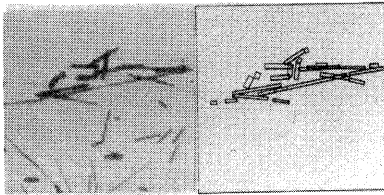


図27. 鋼繊維像 (例6)

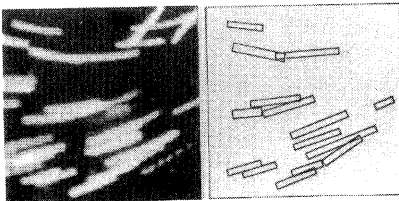


図28. 流れの可視化画像 (例1)

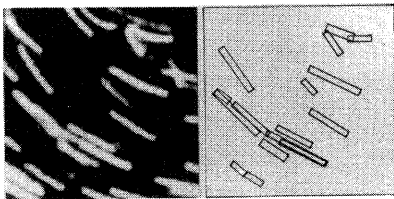


図29. 流れの可視化画像 (例2)

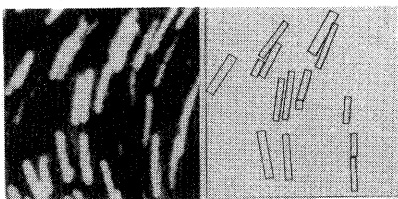


図30. 流れの可視化画像 (例3)

## 5. おわりに

互いに重なり合った複数個の棒状物体像を線返し演算によって分離し、それぞれの長さ、幅、向きを計測する手法について述べた。棒状物体像の例としては鋼繊維像、流れの可視化画像におけるトレース像を取り上げ、いろいろなタイプの重なり合った塊に対して実験を行なったところ良好な結果を得ることができた。データ数が、処理装置の能力を超える場合でも、線返し演算をデータの大きな分割のために利用することによりある程度解

決できることも示した。

本稿では、収束しクラスタリングした後のデータをさらに処理することは行なわなかった。収束したモデル、輪郭点の分割結果を重要な情報として考慮しつつ、さらに原画に戻ったり、対象についての先験的知識（たとえばトレース像の向きは局所的にはランダム様）を利用したりすることによってより正確な結果を得ることができると考えらる。

計算時間はかなりかかる。100点ほどのデータに対しモデルの更新を行なうのに30～40秒かかった。(HP2112ミニコン使用、データはすべて主記憶に収め、ディスクなどの補助記憶装置は一切線返しプロセス内では用いていない。)これについてはソフトウェア的にも改良の余地があると考えられる。

最後に日頃御指導頂く尾上教授、坂内助教授、石塚助教授に感謝致します。

## 参考文献

- [1] 高木, 小林, 山王, 畠田, "鋼繊維補強コンクリートのX線画像による解析 (配向係数の測定)", 1976年TV学会全国大会, 1976年7月。
- [2] 小林, 石原, 岩崎, "円柱まわりの流れの画像処理の一例", 第8回流れの可視化シンポジウム, pp.115-118, 1980年7月。
- [3] T. Kasvand, "Experiments on automatic extraction of paper pulp fibers," 4th IJ CPR, pp.958-960, November 1978.
- [4] 高木, 畠田, "鋼繊維補強コンクリート画像の配向分布の測定", 79年TV学会全国大会14-9, 1979年7月。
- [5] R.O. Duda and P.E. Hart, "Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures," CACM vol.15, pp.11-15, 1972.
- [6] L.G. Shapiro and R.M. Haralick, "Decomposition of two-dimensional shapes by graph-theoretic clustering," IEEE Trans. vol. PAMI-1, No.1, pp.10-20, January 1979.
- [7] C.J. Hilditch, "Linear skeletons from square cupboards," In Machine Intelligence VI, B. Mertzger & D. Michie, Eds., University Press, Edinburgh, pp.403-420, 1969.
- [8] 坂上, 高木, "重なり合った粒子像の計測", 第11回画像工学コンファレンス 9-7, 1980年12月。
- [9] G. Robinson, "Edge detection by compass gradient masks," CG&IP, vol.6, No.5, pp.492-501, 1977.