

JAERI-M
8783

N T A フィルムの抽出線分要素の合成法

1980年3月

熊澤 彬

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所がJAERI-Mレポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

目 次

1. まえがき	1
2. 合成処理の方法	1
2.1 飛跡と抽出線分要素の集まり	1
2.2 飛跡線分要素の合成法	3
2.2.1 合成処理の全体の流れ	3
2.2.2 抽出画素の呼出し順序	5
2.2.3 3つの登録処理	6
3. 合成処理の具体的手法	8
3.1 抽出処理とデータ格納形式	8
3.1.1 抽出処理法	8
3.1.2 配列NP, NQのデータ格納形式	9
3.1.3 呼出し順序と登録処理	9
3.2 同一方向性の判定法	13
3.3 連結性の判定法	15
3.4 大きなデジタル画像に対する合成処理法	18
3.4.1 始点要素の判定を行う行範囲	19
3.4.2 追跡処理を行う行範囲	20
3.4.3 全小画像に対する合成処理の流れ	21
3.4.4 登録データの格納形式	23
3.4.5 終端登録処理	26
4. 実際の検討	28
4.1 デジタル画像	28
4.2 線分要素の抽出処理	30
4.3 線分要素の合成処理	30
4.4 抽出処理と合成処理の効果	32
5. あとがき	37
謝 辞	38
参考文献	38

Contents

1. Introduction	1
2. Track Segment Synthesis Method	1
2.1 Track and a Set of its Extracted Segments	1
2.2 A Principle of Track Segment Synthesis Method	3
2.2.1 A Flow Synthesizing Track Segments	3
2.2.2 Calling Order of Extracted Segments for the Synthesis ..	5
2.2.3 Three Registration Processing for a Set of Track Segments	6
3. Techniques of the Method	8
3.1 Segment Extraction and the Data Forms	8
3.1.1 Segment Extraction Method	8
3.1.2 Data Forms of Extracted Segments in Arrays NP and NQ ...	9
3.1.3 Calling Order and Registration Processings	9
3.2 A Criterion for the Similarity of Direction	13
3.3 A Criterion for the Concatenation between Track Segments	15
3.4 Techniques of the Method Applied to Large Digital Pictures ..	18
3.4.1 Region of Subpicture for Searching Head Segments	19
3.4.2 Region of Subpicture for Tracing Successive Segments ...	20
3.4.3 A Flow Synthesizing Track Segments over Subpictures	21
3.4.4 Data Forms of Track segments in Arrays ITRK, NTRK and NTK	23
3.4.5 Terminal Registration Processing at Each Subpicture	26
4. Experiments and Results	28
4.1 Digital Picture for Analysis	28
4.2 Segment Extraction Processing	30
4.3 Segment Synthesis Processing	30
4.4 Effects of Both Processings	32
5. Conclusions	37
Acknowledgements	38
References	38

N T A フィルムの抽出線分要素の合成法

日本原子力研究所東海研究所保健物理部

熊 澤 蕃

(1 9 8 0 年 2 月 1 3 日 受 理)

N T A フィルムの自動測定法として、多値レベルのデジタル画像から抽出した飛跡線分要素の合成法を示した。この方法の特徴は、飛跡の向きや断点に依存せず、飛跡を飛跡線分要素の集まりとして検出するように、飛跡方向との類似性や線分要素間の連結性を調べ、飛跡に沿った抽出線分要素を次々と連結していくことにある。大きなデジタル画像では、小画像ごとの合成処理と小画像間の結合処理を行って、各飛跡の全長にわたる線分要素の集まりを求める。

N T A フィルムの顕微鏡写真から得た、濃度値 1 2 7 の 3 6 4 × 3 2 3 画素のデジタル画像を、8 個の小画像に分割して本方法を適用した結果、どの方向の飛跡も抽出線分要素から正しく合成できることが知られた。

Track Segment Synthesis Method for NTA Film

Shigeru KUMAZAWA

Division of Health Physics, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received February 13, 1980)

A method is presented for synthesizing track segments extracted from a gray-level digital picture of NTA film in automatic counting system. In order to detect each track in an arbitrary direction, even if it has some gaps, as a set of the track segments, the method links extracted segments along the track, in succession, to the linked track segments, according to whether each extracted segment bears a similarity of direction to the track or not and whether it is connected with the linked track segments or not. In the case of a large digital picture, the method is applied to each subpicture, which is a strip of the picture, and then concatenates subsets of track segments linked at each subpicture as a set of track segments belonging to a track.

The method was applied to detecting tracks in various directions over the eight 364x40-pixel subpictures with the gray scale of 127/pixel (picture element) of the microphotograph of NTA film. It was proved to be able to synthesize track segments correctly for every track in the picture.

Keywords: NTA Film, Recoil Proton Track, Automatic Counting, Segment Synthesis, Digital Picture, Gray scale, Microphotograph, Nuclear Emulsion Plate

Notations

y	quantity of feature of track segments
δ	threshold of y
s_k	the k -th track segment of a track T
S	a set of track segments, $\{s_k k=1, 2, \dots, N\}$
$\theta(s_k)$	direction of the segment s_k
θ_T	direction of a track T
$\overline{s_k s_{k+1}}$	segment between s_k and s_{k+1}
$\Delta\eta$	threshold of angle between θ_T and $\eta(\overline{s_k s_{k+1}})$, which is a direction of $\overline{s_k s_{k+1}}$
Δg	threshold of gap, $g(s_k s_{k+1})$, between s_k and s_{k+1}
$\Delta\theta$	threshold of angle between θ_T and $\theta(s_k)$
N_0, N_∞	lower and upper limits of N , potency of a set S
MSC	mode of synthesis condition for extracted segments s'_α
I, J	row and column numbers of s_k in a digital picture
$\Delta I, \Delta J$	coordinate differences between s_k and s'_α
θ_M	statistical mode of $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$, where $\theta_k = \theta(s_k)$
LS1, LS2	1st and 2nd directions of extracted segments s'_α
LT1, LT2	1st and 2nd directions of a track T
NP, NQ	directory and text arrays of extracted segments
N, M	addresses of NP and NQ for searching head segments
IN, IM	addresses of NP and NQ for tracing next segments
ISGN, JSGN	trends of track directions
$JL(\Delta I), JU(\Delta I)$	lower and upper limits of ΔJ at ΔI within connected region
NMAX	maximum address of IN
IUMX	maximum gap of ΔI
NDRC	LS1 or LS2 for recalculation of ISGN and JSGN
IDAN	parameter of a similarity of direction
I_k, J_k	coordinates of s_k in a digital picture
I', J'	coordinates of s'_α in a digital picture
s_{k-r}	the $k-r$ -th registered segment
$(\Delta I, \Delta J)_{k-r}$	difference coordinates between s_{k-r} and s'_α
Λ_{LT1}	region of registered segments for LT1 connected with s'_α
Λ	union of all Λ_{LT1} 's
MROD	number of rows per subpicture
LR	subpicture number
NLP	number of rows in lap region of a subpicture

Notations

$\{I, M_i\}$	data form of directory regions of NP, NTRK and NTK
$\{I^*, M_i^*\}$	$\{I, M_i\}$ for the first row of next subpicture
S_a	the a-th subset of track segments, $a=1, 2, \dots, A$
s_{ab}	the b-th segment of the a-th subset of a track T
B_a	number of track segments of S_a
s_{aB_a}	the last segment of S_a
NE	series number of registered segments of a track T
ITRK	array to form subsets of track segments
IT	address of ITRK
NEO	initial value of NE set in ITRK(5)
s_{NE}^+	the latest registered segment under registration
I^+, J^+	coordinates of s_{NE}^+ in a digital picture
IN^+, IM^+	addresses of NP and NQ for s_{NE}^+
NTRK	array to transfer data of subsets from ITRK
NTK	array to form sets of track segments
FM_a	forward margin of S_a in text region of NTRK
BM_a	backward margin of S_a in text region of NTRK
NOT	track number
NCON	track number for taking over it between subpictures
IR_a	address of FM_a in text region of NTRK
IQ_a	address of track number for S_a in directory region of NTRK
NS_a	address of s_{aB_a} in text region of NTRK
IM4	address of s_{α}^+ in NQ at next subpicture, $MSC^+ = NQ(IM4)$
s_{α}^+	extracted segment corresponding to s_{aB_a}
MSC^+	MSC of s_{α}^+
I^+, J^+	coordinates of s_{α}^+ in a digital picture
PF	preface of sets in text region of NTK

1. ま え が き

N T A フィルム中の反跳陽子飛跡を検出するのに、背景画像の明るさが変動しても飛跡検出の可能な方法を先に示した¹⁾。この方法は、多値レベルのデジタル画像から飛跡線分要素を統計的に抽出した後、それらの飛跡線分要素を合成して飛跡が形作られるか否かを調べることにより、飛跡の検出を行うものである。

先の報告では飛跡線分要素の抽出法を中心に検討し、その合成法については飛跡自身の検出過程を簡単に示しただけで、その具体的な処理の方法は示さなかった。

飛跡を検出するには、抽出した飛跡線分要素が一定の範囲の長さだけほぼ連続して続き、さらにこれらの線分の方向が類似しているか否かを調べることが必要である。

これに関連する方法として、“0, 1”の2値レベルのデジタル画像から飛跡画素“1”が直線的に連結しているか否かを調べる Paretti らの飛跡検出法がある²⁾。この方法で直線的な連結性を調べる点は、上記の飛跡線分要素の合成を行き問題と似ている。しかし、彼らの方法は、飛跡部分に断点のある場合の処理法が明らかでなく、さらに水平方向からわずかに左下に傾いた場合の飛跡の追跡が難しいという面がある。

そこで、本報ではどのような方向を向いた飛跡に対しても、また仮りに、一定幅以内の断点がある場合にも、抽出した飛跡線分要素の直線的な連結性をたどることができる方法を検討する。このような連結性を飛跡の全長にわたり追跡する方法を、飛跡線分要素の合成法と呼ぶことにする。具体的な方法として、4つの線分方向をとって抽出した飛跡線分要素の合成法を検討する。大きなデジタル画像では小画像に分けて合成処理を行う方法を検討する。また、本方法により、N T A フィルムの顕微鏡写真中にある飛跡の検出を行ったので、この結果についても述べる。以下では、合成処理の方法、その具体的手法、実際の検討、まとめの順に述べる。具体的手法は抽出処理データの格納形式、同一方向性や連結性の判定法、小画像ごとの合成処理と小画像間の結合処理などである。

2. 合成処理の方法

飛跡と飛跡線分要素の集まりの関係を述べ、抽出処理後のデータから飛跡線分要素を合成する方法を述べる。

2.1 飛跡と抽出線分要素の集まり

飛跡を含むデジタル画像に対して統計的細線抽出処理を行うと、各画素における飛跡線分要素の特徴量 y とその線分の方向が計算される¹⁾。飛跡は細くて直線的な形状をしているので、

飛跡上にある画素では y の値が大きくなり、さらにこの画素を通ると推定される線分の方も、飛跡の方向に一致することが多くなる。そこで、正の定数 δ 以上の y 値を有する画素だけを抽出すると、飛跡上の画素は空間的に連なって抽出される。しかも、これらの線分の方は、飛跡と同じ方向になることが多い。これに対して、飛跡上にはない画素は、仮りに抽出されても、空間的に孤立的であり、さらに、たとえ空間的に連なって抽出されても、それらの線分が同一方向であることは極くまれである。この点を考慮すると、抽出処理後の画像で、線分の方に沿って連なるように抽出された画素の集まり S は、元のデジタル画像中にある飛跡に対応する確率が高いといえる。

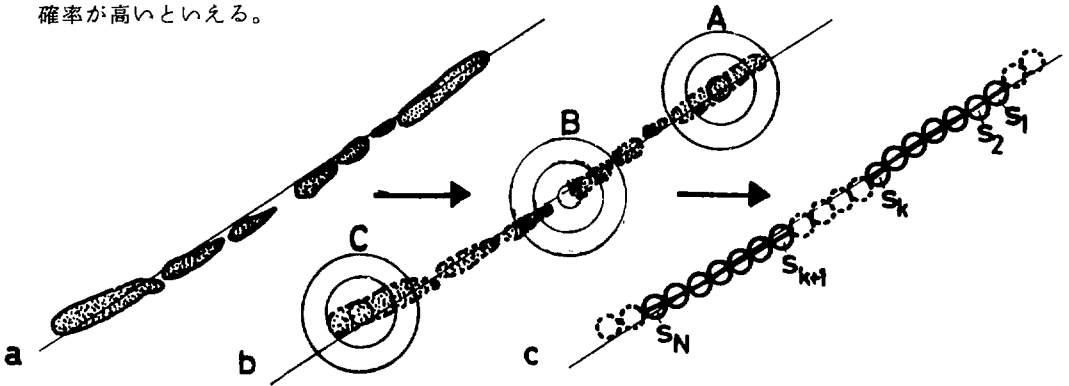


Fig.1 An example of track segment extraction. a. a recoil proton track b. extraction of track segments c. the results; bold and broken circles represent extracted and not-extracted picture elements.

例えば、Fig. 1 の a に示す飛跡 T に対し、同図 b に示す円環で統計的細線抽出処理を行うと、同図 c に実線丸で示す抽出結果が得られるものとする。同図 c の実線丸で示した画素を中心とする円環には、同図 b の円環 A に示されるように、円環を 2 等分する線分が見られる。このような画素には線分要素の特徴があるので、統計的細線抽出処理の結果、これらの画素は抽出される。これに対して、同図 c の破線丸で示した画素を中心とする円環には、同図 b の円環 B、C に示されるように、円環を 2 等分する線分に大きな欠落部分が見られる。このような画素には線分要素の特徴が十分でないので、統計的細線抽出処理の結果、これらの画素は抽出されない。

抽出された画素を s_k その線分の方を $\theta(s_k)$ と表わすと、Fig. 1 の c に示されるいずれの画素 s_k も飛跡 T の方向 θ_T に沿って並んでおり、さらに各線分の方 $\theta(s_k)$ も θ_T に極めて近い。従って、同図 c に見られる程度の抽出画素の欠けた不連続幅を連結していると見なすと、これらの抽出画素の集まり $\{s_k | k=1, 2, \dots, N\}$ は、飛跡 T の存在を推定し得るような抽出画素の集まり S になる。

一般に、抽出画素の集まり S を、

$$\{s_k | k=1, 2, \dots, N\}, \quad (1)$$

と表わすとき、 S が方向 θ_T を向いた飛跡 T の存在を推定し得るような抽出画素の集まりとな

る条件を求める。

隣接する抽出画素 s_k と s_{k+1} を結ぶ線分 $\overline{s_k s_{k+1}}$ の方向を $\eta(\overline{s_k s_{k+1}})$ 、大きさを $g(\overline{s_k s_{k+1}})$ と表わすとき、方向 $\eta(\overline{s_k s_{k+1}})$ は θ_T から $\pm \Delta\eta$ 以内、大きさ $g(\overline{s_k s_{k+1}})$ は Δg 以内になければならない。すなわち、抽出画素 s_k と s_{k+1} が連結しているためには次の条件が必要である。

$$\left. \begin{aligned} |\eta(\overline{s_k s_{k+1}}) - \theta_T| &\leq \Delta\eta \\ g(\overline{s_k s_{k+1}}) &\leq \Delta g \end{aligned} \right\}, \quad (k=1, 2, \dots, N-1) \quad (2)$$

次に、抽出画素 s_k を通る線分方向 $\theta(s_k)$ は θ_T から $\Delta\theta$ 以内になければならない。すなわち、各抽出線分の向きが θ_T と同一方向であるためには次の条件が必要である。

$$|\theta(s_k) - \theta_T| \leq \Delta\theta, \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

さらに、飛跡の大きさの分布に応じて決められる最小と最大の抽出画素数を、それぞれ N_0 、 N_∞ とするとき、抽出画素の集まり S の濃度 $|S| = N$ はこの範囲になければならない。

$$N_0 \leq N \leq N_\infty \quad (4)$$

以上のように、式(1)の抽出画素の集まり S が、式(2)の連結性条件、式(3)の同一方向性条件および式(4)の飛跡サイズ条件を満たすとき、この集まり S は方向 θ_T を向いた飛跡 T の存在を示すと判断する。

2.2 飛跡線分要素の合成法

デジタル画像から線分要素を抽出した後、これらの抽出処理データから、連結性や同一方向性を満たすような要素の集まりを求める方法を示す。この方法は、前述の抽出処理が飛跡を線分要素に分解するのに対して、逆に線分要素を合成して飛跡を組立てるためのものである。従って、これを飛跡線分要素の合成法と呼ぶことにする。

飛跡線分要素の合成処理は次の手順で行う。

- 1) 飛跡の始点要素 s_1 を見つけること、
- 2) 連結性、同一方向性を満たす限り、距離の最も近い座標を持つ次の飛跡線分要素を追跡すること、
- 4) 以上から得られる飛跡線分要素の集まり S の濃度 $|S|$ 、すなわちこの飛跡線分要素の数 N を求め、 $N_0 \leq N \leq N_\infty$ であることを確認すること。

この合成処理を次にさらに詳しく述べる。

2.2.1 合成処理の全体の流れ

合成処理の手順を流れ図で示すと Fig. 2 のようになる。すべての抽出画素に合成処理状態値 MSC を与え、これが飛跡の始点要素になり得るときは $MSC = 1$ 、なり得ないときは

MSC≠1とする。先ず、すべての抽出画素のMSCの初期値は1とする。

Fig. 2 で抽出画素 (segment data) を呼出し、MSC=1なら、この始点要素の後に続く飛跡線分要素の追跡処理を行う。このとき、飛跡線分要素として登録される抽出画素のMSC値は負に変わる。これより、一度飛跡線分要素として登録した抽出画素はMSC≠1となるので、これらの抽出画素は後で始点要素として選ばれないようにできる。また、飛跡線分要素の追跡処理でもMSCを用い、MSC=1の抽出画素だけを登録の対象にする。

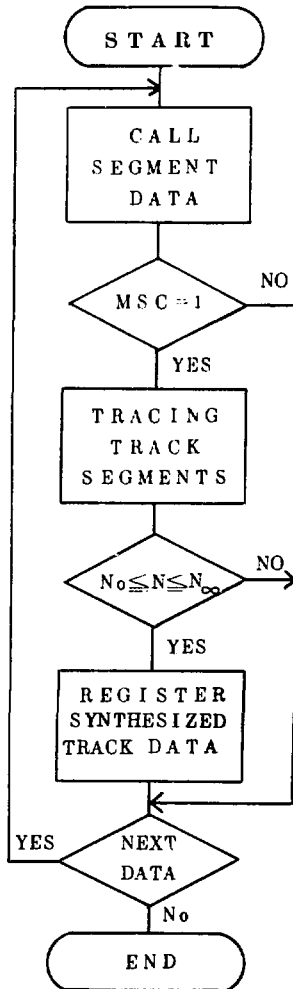


Fig.2 A flow diagram for synthesizing track segments.

追跡処理で後続する飛跡線分要素がなくなると、登録した要素数 N が $N_0 \leq N \leq N_\infty$ の条件を満たすか否かを判定する。この条件を満たすとき、合成した飛跡データ(すなわち、飛跡線分要素の集まり S)を登録する。この条件を満たさないとき、合成した飛跡データを無視し、直接次のステップに進み、抽出画素の次の呼出しを行って、MSC=1かどうかの判定を行う。MSC=1ならば、この始点要素から始まる追跡処理を前と同様に行う。MSC≠1ならば、直ちに抽出画素の次の呼出しを行い、新たな始点要素の判定を行う。このような操作を抽出画素の呼

出しができる限り行り。

Fig. 2 の合成処理は呼出すべき抽出画素がなくなった時点で終了する。このとき、合成した飛跡データの登録回数は抽出処理データの中にある飛跡線分要素の集まり S の個数に相当するので、この回数は元のデジタル画像中にある飛跡数の推定値を与える。

2.2.2 抽出画素の呼出し順序

合成処理を行う上で、呼出しを行う抽出画素の座標の順序は重要である。行番号は小さい順に取るとして、同一行番号内の列番号の取り方を考える

Fig. 3 に示す例で、始点要素 s_1 のある I 行で始点要素とそれに後続する要素の列番号 J を比較すると、右下向きの飛跡では列番号 J の小さい方に始点要素があるのに対し、左下向きの飛跡では列番号 J の大きい方に始点要素がある。従って、同一行番号内の列番号を右下向きの飛跡では小さい順に、左下向きの飛跡では大きい順に取って抽出画素を呼出すと、飛跡の始点要素はいずれも他の飛跡線分要素よりも先に呼出される。また、この呼出し順に従うと、いずれの飛跡の線分要素も Fig. 3 に示す番号順に呼出される。

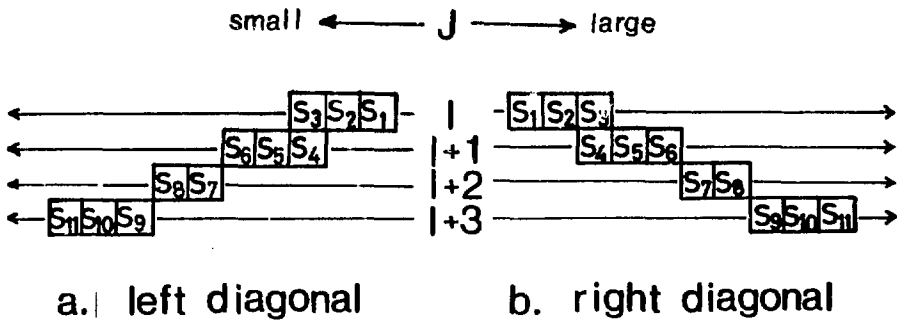


Fig.3 Arrays of track segments in left and right diagonal directions.

上記の呼出し順の下では、「 α 番目に呼出される抽出画素 s'_α が、これ以前に呼出されるいかなる抽出画素とも連結性を持たないか、または同一方向性を持たないならば、抽出画素 s'_α を飛跡 T の始点要素 s_1 と定義する」ことができる。

この呼出し順序は飛跡の向きに応じて同一行番号内の列番号の取り方を変えるが、始点要素を探す呼出し段階では飛跡の向きは不明である。すなわち、始点要素を探す呼出し順序は飛跡の向きに応じてとることはできない。従って、始点要素を探す呼出し順序は飛跡の向きに依らず同一行番号内で列番号の小さい順に取ることにする。

始点要素を探す呼出し順序をこのようにとると、左下向きの飛跡では Fig. 3 に示すように、始点要素 s_1 のある I 行で最初に呼出される飛跡線分要素は s_3 である。そこで、 s_3 を仮の始点要素として選び、これに後続する要素として s_2, s_1 を仮登録する。この行での仮登録終了後、要素 s_3, s_2, s_1 の登録順序を入れ替え、 s_1 を始点要素として、この方向 $\theta_1 = \theta(s_1)$ を飛跡の方向 θ_T とする。 s_1, s_2, s_3 を登録するとき、抽出画素に割当てたこれらの MSC 値を負にする。このような一連の登録処理を初期登録処理と呼ぶことにする。初期登録処理後

は、飛跡の左右の向きが既知であるので、最初の呼出し順序に従って追跡処理を行う。

以上から、抽出画素を呼出す順序は、行番号を小さい順にとるものとして、同一行番号内の列番号を次のようにとる。抽出画素が始点要素か否かを判定する呼出し、および始点要素のある行ですべての関連する飛跡線分要素を追跡する初期登録処理の呼出しでは、飛跡の向きに関係なく、列番号の小さい順にとる。これ以外の飛跡線分要素の追跡処理の呼出しでは、飛跡が右下向きのおき列番号の小さい順に、左下向きのおき列番号の大きい順にとる。

2.2.3 3つの登録処理

Fig. 2 の追跡処理の部分はさらに Fig. 4 のように表わされる。すなわち、この処理は始点要素または仮の始点要素の後に続く同一行での要素の追跡処理などを行う初期登録処理、その後の追跡処理にともなう中間登録処理および終端登録処理から成る。

初期登録処理は抽出画素の呼出し順序のところで述べた通りである。左下向きの飛跡では登録順序を入替え、新たな始点要素の線分方向 θ_1 を飛跡の方向 θ_T と初期推定し、 $\theta_T = \theta_1$ とする。

中間登録処理は、Fig. 3 の例で見ると、 s_1 以降の飛跡線分要素を登録する処理である。この処理は必ず初期登録処理を行った次の行以降で行う。行番号を次に進め、この行に抽出画素がある場合は、これらが“後続する次の飛跡線分要素”となり得るか否かを判定する。もしもなり得るならば、この要素の登録と“必要に応じた飛跡方向の再計算”を行う。この処理を中間登録処理と呼ぶことにする。逆になり得ないならば、同一行の次の抽出画素を呼出し、同じ判定を行う。この行に次の呼出しデータがないときは次の行に移り、同じ判定を繰り返す。

改行するたびに、この行の番号と追跡中の飛跡 T の最も新しい登録画素の行番号との開き ΔI を計算する。 ΔI が連結性の条件を満たさない程度に大きくなると、Fig. 4 に示すように、この最新登録画素を終点要素 s_N として、終端登録処理を行う。

終端登録処理は追跡中の飛跡 T の登録画素数 N を求め、飛跡線分要素の追跡処理を終了する。この後、Fig. 2 の登録画素数 N の判定 $N_0 \leq N \leq N_\infty$ を行って次に進む。

ここで、“後続する次の飛跡線分要素”とは、「 α 番目に呼出される抽出画素 s'_α が飛跡 T の k 番目の線分要素 s_k であるとき、要素 s_k と連結性および同一方向性の条件を満たす抽出画素のうち、 α 番目以降の呼出しで最も早く呼出される抽出画素を、要素 s_k に後続する次の飛跡線分要素 s_{k+1} 」と定義することができる。また、“終点要素”とは、「 α 番目に呼出される抽出画素 s'_α が、これ以降に呼出されるいかなる抽出画素とも連結性を持たないか、または同一方向性を持たないならば、抽出画素 s'_α を飛跡 T の終点要素 s_N 」と定義することができる。

“必要に応じた飛跡方向の再計算”とは次のように行う。飛跡 T の方向 θ_T は追跡して登録した全抽出画素から推定すべきである。しかし、合成処理を行う上では、飛跡の直線的形状から、最初の q 個の登録画素 s_1, s_2, \dots, s_q のそれぞれの線分方向を用いて θ_T を推定すれば十分である。それゆえ、 q 番目までの登録画素の最頻線分方向を θ_M として、 $k = q$ ならば飛跡方向の再計算を行い、 $\theta_T = \theta_M$ とする。これを必要に応じた飛跡方向の再計算という。すなわち、飛跡方向 θ_T は次のように表わされる、

$$\theta_T = \begin{cases} \theta_1 & k < q \quad (\text{初期推定}) \\ \theta_M & k \geq q \quad (\text{最終推定}) \end{cases} \quad (5)$$

以上のように、飛跡線分要素の集まりSは初期登録処理、中間登録処理、終端登録処理を行って抽出画像データから合成する。

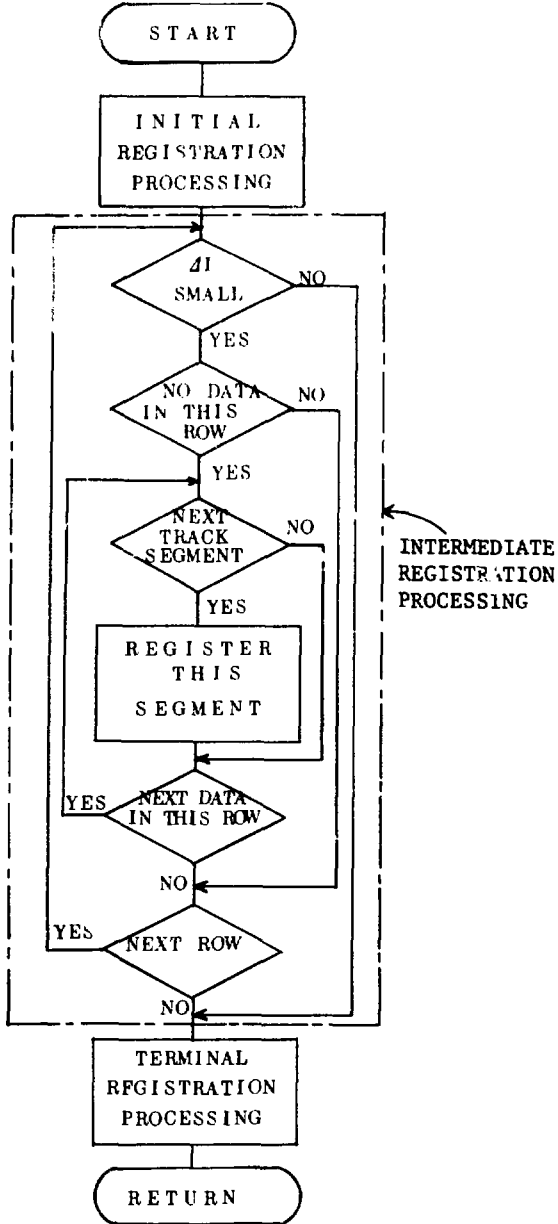


Fig.4 A flow diagram for tracing track segments.

3 合成処理の具体的手法

飛跡線分要素の方向を4つの離散方向にとり、さらに抽出処理データを一定行幅ごとに分割して、飛跡線分要素の合成処理を行う具体的な方法を検討する。まず、離散的な4つの線分方向で行う抽出処理とそのデータ格納形式およびその登録処理との関係を示す。次に、合成処理の基本的な条件である連結性や同一方向性の有無を、4つの離散方向で判定する方法を示す。その後、複数の行領域に分けて、行領域間の引継処理も行う形式の合成処理法を示す。

3.1 抽出処理とデータ格納形式

3.1.1 抽出処理法

飛跡線分要素の方向を Fig. 5 に示すように、左斜め下、垂直、右斜め下、水平の離散的な4方向にとって、統計的細線抽出処理を行う³⁾。すなわち、I 行、J 列にある画素の濃度値を x_0 、その周辺にある Fig. 5 に示す画素の濃度値を x_i 、 x_{-i} 、($i=1,2,3,4$)として、

$$\left. \begin{aligned} d_i &= |x_i - x_0| + |x_{-i} - x_0| \\ u_i &= |x_i - x_{-i}| \end{aligned} \right\}, \quad (i=1,2,3,4) \quad (6)$$

を計算し、線分要素の特徴量 y を次式で計算する。

$$y = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 d_i - \frac{4}{3} d_{min} - u_{max} \quad (7)$$

ここで、 d_{min} は d_i の最小値、 u_{max} は u_i の最大値である。

y が閾値 δ 以上であれば、座標 (I, J) の画素を飛跡の線分要素として抽出する。 d_i が最小になる i 方向を LS1、次に小さい d_i の i 方向を LS2 として、このときの線分の主方向を LS1、副方向を LS2 と定める。線分の副方向を考慮するのは、離散的にとった線分方向の粗さを補うためである。

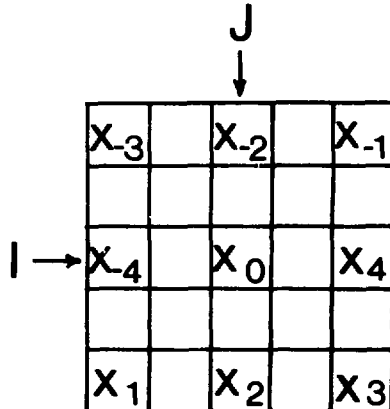


Fig.5 Four pairs of the surrounding elements of a picture element (I,J) with the gray level x_0 .

3.1.2 配列 NP, NQ のデータ格納形式

合成処理を行う上で必要な抽出画素の基本情報は、1) 座標 (I, J), 2) 線分の主, 副方向 LS 1, LS 2, 3) 線分の特徴量 y, 4) 合成処理の状態を指定する変数 MSC, である。この情報の格納形式は、前述の抽出画素の呼出し順序に対応させて、次のようにとる。

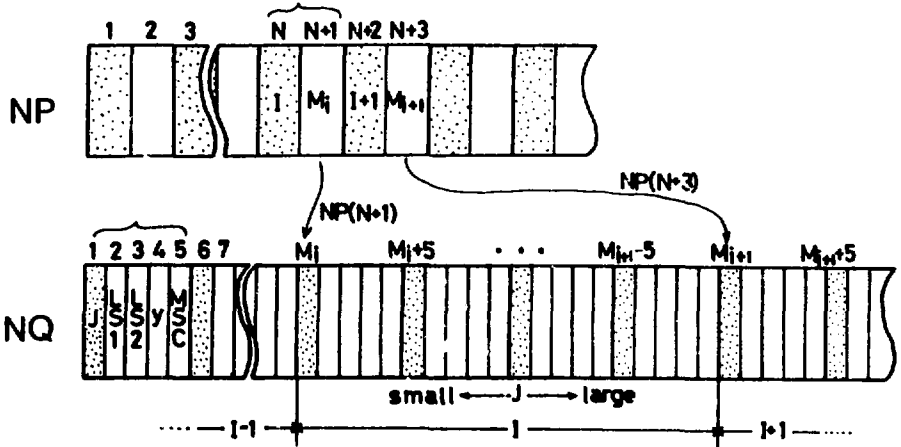


Fig.6 Data forms of extracted segments in arrays NP and NQ.

配列 NP, NQ を用意し、Fig. 6 に示すように、前者には 2 個ずつ、後者には 5 個ずつのデータを格納する。すなわち、配列 NP には 1) 行番号 I, 2) I 行の抽出処理データの、配列 NQ における先頭番地 M_i の 2 つをこの順に格納する。配列 NQ には 1) 列番号 J, 2) 線分の主方向 LS 1, 3) 副方向 LS 2, 4) 線分の特徴量 y, 5) 合成処理の状態指定変数 MSC, の 5 つをこの順に格納する。これらを次のように表わす。

$$NP = \{ I, M_i \} \tag{8}$$

$$NQ = \{ J, LS 1, LS 2, y, MSC \} \tag{9}$$

配列 NP の N 番地に行番号 I が格納してあるとき、I 行の抽出処理データは配列 NQ の $M_i = NP(N+1)$ 番地から、I+1 行では配列 NQ の $M_{i+1} = NP(N+3)$ 番地から Fig. 6 に示すように格納される。I 行に抽出処理データがないときは、 $NP(N+1) = NP(N+3)$ とする。 $NP(N+1) < NP(N+3)$ ならば、I 行には $(M_{i+1} - M_i) \div 5$ 個の抽出画素があり、これらの抽出処理データは配列 NQ の M_i 番地から $M_{i+1} - 1$ 番地までに格納されている。

3.1.3 呼出し順序と登録処理

抽出画素の呼出し順序を示すと、始点要素の判定と初期登録処理では Fig. 7, 中間登録処理では Fig. 8 のような流れ図で表わされる。

Fig. 7 の流れ図では、配列 NP の番地 N を 2 つつ進めることにより改行を行う。同一行内では配列 NQ の番地 M を $M = NP(N+1) - 5$ と初期設定し、番地 M を 5 つつ進めること

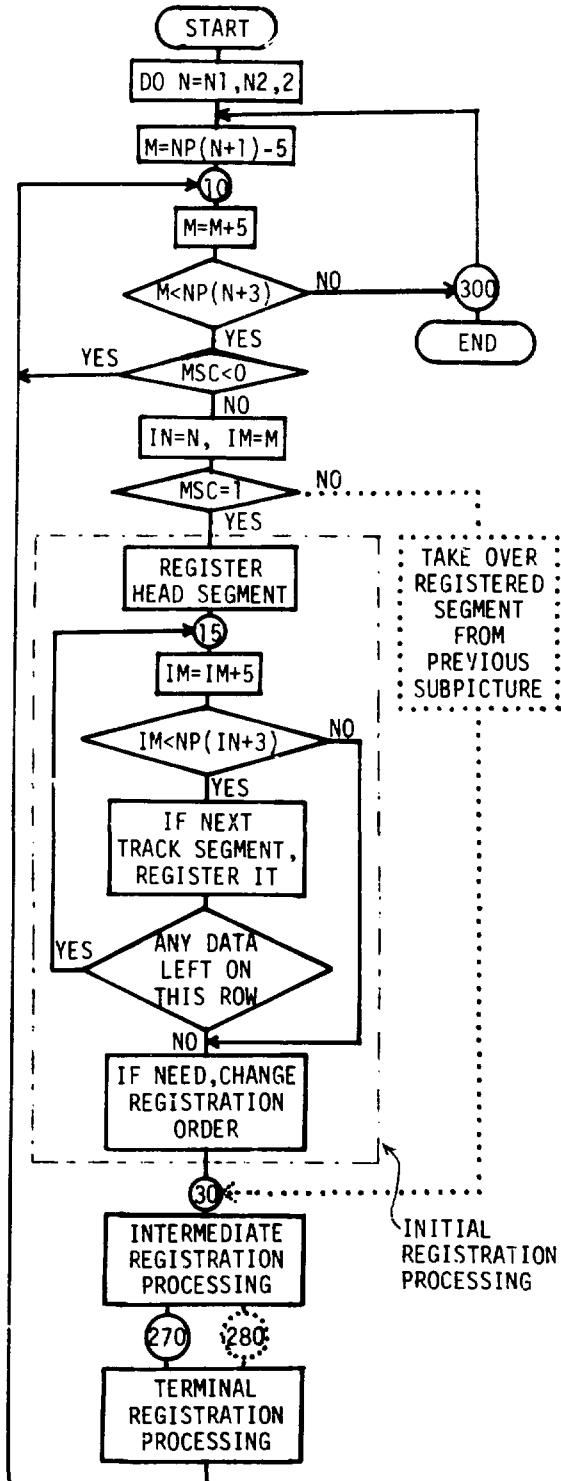


Fig.7 A flow diagram of head segment searching and initial registration processing.

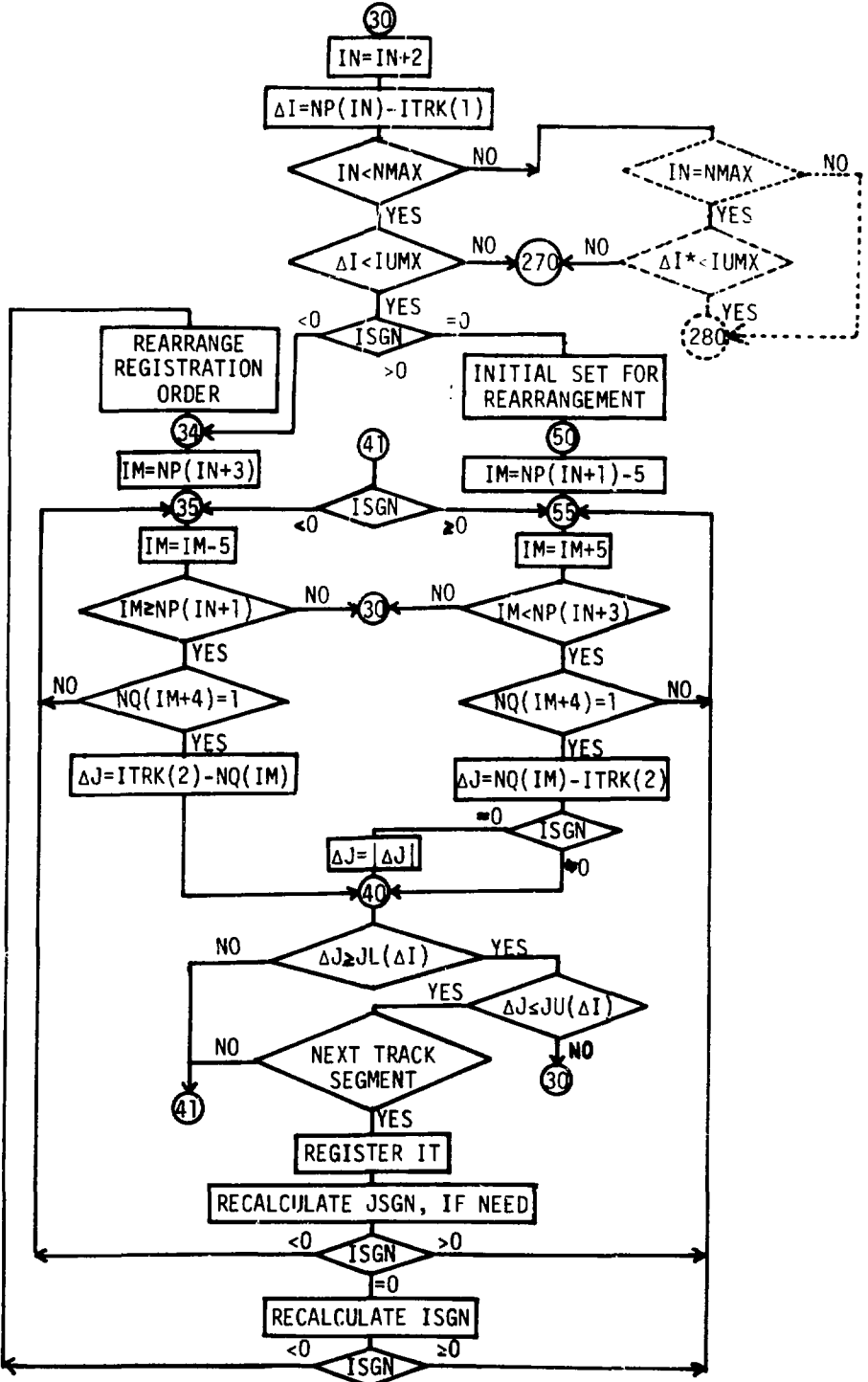


Fig.8 A flow diagram of intermediate registration processing.

により列番号のより大きな抽出画面を呼出して、始点要素の判定を行う。 $M = NP(N + 3)$ に達すると、番地 N を 2 つ進めて改行し、同様にして始点要素を判定するための呼出しを行う。すべての行の抽出処理データを出して始点要素の判定を終えると、この処理は終了する。

Fig. 7 で、 $MSC = 1$ の抽出画面が見つかり、これを始点要素として初期登録処理を行う。このため、番地 N 、 M を追跡処理用の番地 IN 、 IM にそれぞれ置換える。行番号 $NP(IN)$ でこの始点要素の後に続く要素を追跡するには、番地 IM を 5 つつ進めることにより列番号のより大きな抽出画面を呼出して、初期登録処理を行う。 $IM = NP(IN + 3)$ に達するか、行番号 $NP(IN)$ に後続する要素がなくなると、必要に応じて登録画面の順序の入換えを行った後、番号 30 へ進み、改行して、中間および終端登録処理を行う。この後、番号 10 へ飛び、次の始点要素を探す。

Fig. 8 の流れ図では、初期登録処理後の追跡処理を行う抽出画面の呼出し方を示してある。すなわち、配列 NP の追跡番地 IN を 2 つつ進めることにより、中間登録処理の改行を行う。同一行内では、飛跡が右下向きの場合、配列 NQ の追跡番地 IM を、 $IM = NP(IN + 1) - 5$ と初期設定した後、追跡番地 IM を 5 つつ進めることにより、列番号のより大きな抽出画面を呼出して中間登録処理を行う。 $IM = NP(IN + 3)$ に達すると、番号 30 へ飛び、追跡番地 IN を 2 つ進めて改行し、同様な呼出しを行う。また、飛跡が左下向きの場合は、同一行内における抽出画面の追跡番地 IM を 5 つつ後退させることにより、列番号のより小さな抽出画面を呼出して中間登録処理を行う。 $IM < NP(IN + 1)$ に達すると、番号 30 へ飛び、追跡番地 IN を 2 つ進めて改行し、同様な呼出しを行う。

Fig. 8 で $ISGN$ は飛跡の左右の向きを指定する変数で、次のような内容を持つ。

$$ISGN \begin{cases} < 0 & \text{左下向き} \\ = 0 & \text{向き不定} \\ > 0 & \text{右下向き} \end{cases} \quad (10)$$

$ISGN = 0$ のときは右下向きの飛跡と同様な呼出し方を行う。中間登録処理中、この飛跡が左下向きと判明すれば、登録画面の格納順序を替えるなどの必要な処理を行った後、Fig. 8 の番号 34 へ飛び、この行の最初の抽出データから追跡処理を続ける。

配列 $ITRK$ を用意し、最新登録画面の座標を ($ITRK(1)$, $ITRK(2)$) とするよう格納して、追跡中の抽出画面の座標 ($NP(IN)$, $NQ(IM)$) との差を Fig. 8 のように計算する。 $NP(IN)$ 行における列番号の差 ΔJ が、このときの行番号の差 ΔI の大きさに応じて決まる列番号差の下限 $JL(\Delta I)$ より小さくなく、かつ上限 $JU(\Delta I)$ より大きくないときは、次の飛跡線分要素となり得るか否かを判定する。この条件を満たさないときは番号 41 へ飛び、 $ISGN$ の値に応じて追跡番地 IM を 5 つつ変化して追跡を続ける。ただし、 $\Delta J > JU(\Delta I)$ のときはこの行に後続する飛跡線分要素はないとして、Fig. 8 の番号 30 へ飛び、改行を行う。また、登録の後、 $ISGN$ を -1 に変更した場合は番号 34 へ飛び。

このような操作を繰返して、追跡番地 IN がその最大値 $NMAX$ に達するか、行番号の差 ΔI がその最大値 $IUMX$ に達するとき、中間登録処理を終えて終端登録処理を行う。これは Fig. 4 に示すように、行間の開き ΔI が大きくなると終端登録処理を行うことに対応する。終端登録処理の後、Fig. 7 の番号 10 へ飛び、そこから新たな始点要素を見つけて、同様

な処理を繰返す。

Fig. 7 と 8 で点線で示した部分は、複数の行領域に分けて合成処理を行う場合を考慮したもので、これについては後で述べる。

以上から、配列 NP 、 NQ の抽出処理データの格納形式を式(8)、(9)のようにとると、Fig. 2, 4 に対する抽出画素の具体的な呼出し方法は、Fig. 7, 8 に示すように行われる。これより、このデータの格納形式は合成処理に適していることが分る。

3.2 同一方向性の判定法

4つの離散方向で線分の方向を定めるとき、式(3)の同一方向性の判定条件は次のように定式化することができる。

抽出処理データから推定した飛跡 T の主方向を $LT1$ 、副方向を $LT2$ とし、 I 行、 J 列の抽出画素の線分方向を主方向 $LS1 = NQ(IM+1)$ 、副方向 $LS2 = NQ(IM+2)$ とするとき、これらが、

$$\left. \begin{aligned} NQ(IM+1) &= LT1, \quad \text{または} \\ NQ(IM+2) &= LT1 \quad \text{かつ} \quad NQ(IM+1) = LT2 \end{aligned} \right\} \quad (II)$$

を満たすならば、この抽出画素の線分方向は飛跡 T と同一方向性を有すると判断する。ただし、飛跡の主方向と副方向の差の絶対値が 90° のときは、Fig. 9 に示すように $NQ(IM+2) = LT1$ の条件だけで同一方向性を判定する。

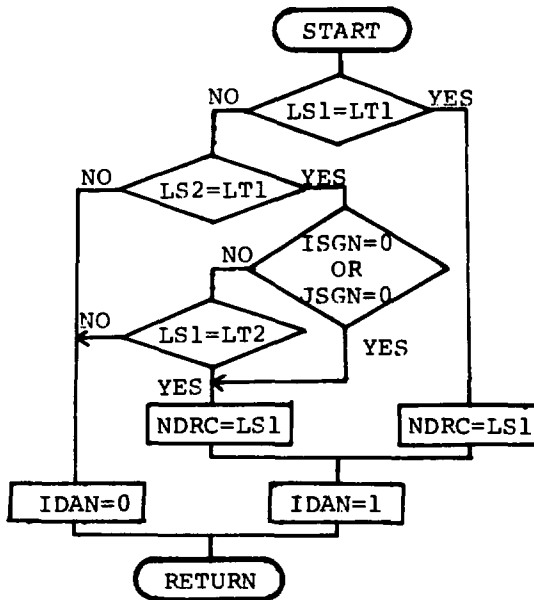


Fig. 9 A flow diagram for examining a similarity of direction between a track and its segments.

Fig. 9 で $ISGN=0$ または $JSGN=0$ は飛跡の主方向と副方向の差の絶対値が 90° となる場合に相当する。 $ISGN$ は式(12)に示すように飛跡の左右の向きを指定するものであり、次のように計算する。

$$ISGN = \begin{cases} LT1-2, & LT1: \text{奇数} \\ LT2-2, & LT1: \text{偶数} \end{cases} \quad (12)$$

ただし、 $ISGN \neq \pm 1$ のときは $ISGN=0$ とする。 $ISGN=0$ となるのは、飛跡の主、副方向の組合せが 2, 4 か 4, 2 のいずれかであり、この方向の差は $\pm 90^\circ$ となる。

$LT1$ が奇数のとき、 $LT2$ が主方向から $\pm 45^\circ$ 以内にあるか否かを判定するため、 $JSGN$ を次のように定める。

$$JSGN = \begin{cases} 3-LT2, & LT1: \text{奇数} \\ 3-LT1, & LT1: \text{偶数} \end{cases} \quad (13)$$

ただし、 $JSGN \neq \pm 1$ のときは $JSGN=0$ とする。 $JSGN=0$ となるのは、飛跡の主、副方向の組合せが 1, 3 か 3, 1 のいずれかであり、この方向の差も $\pm 90^\circ$ となる。

飛跡の方向は $ISGN, JSGN$ がいずれも ± 1 となるまで、Fig. 9 で計算される $NDRC$ を用いて、

$$\left. \begin{aligned} ISGN &= NDRC - 2 \\ JSGN &= 3 - NDRC \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

と再計算する。そして、このときの副方向を $LT2 = NDRC$ と置く。ただし、再計算した結果、 ± 1 にならないときは、計算した $ISGN$ か $JSGN$ の方の値を 0 にする。

このように、飛跡方向を定めながら、同一方向性を判定するには、Fig. 9 の流れ図に従い、この結果を、

$$IDAN = \begin{cases} 1, & \text{同一方向性あり} \\ 0, & \text{なし} \end{cases} \quad (15)$$

と置く。

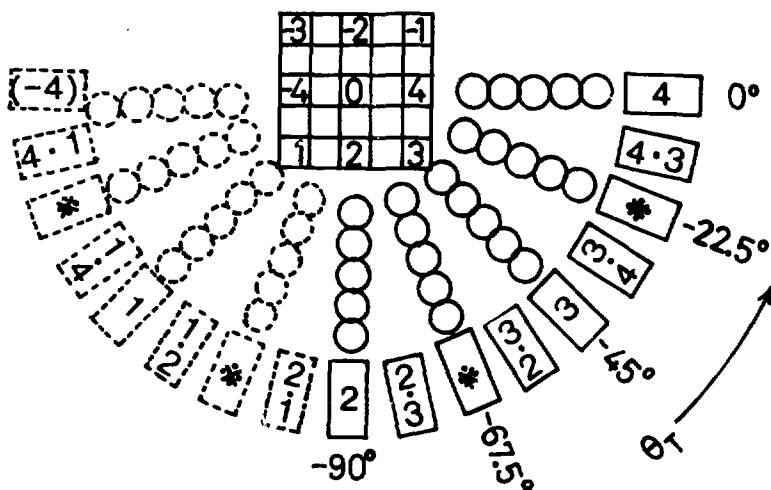


Fig.10 Track direction θ_T and its relationship to four discrete directions.

飛跡Tの方向 θ_T と4つの離散方向の関係を図示するとFig. 10のように表わされる。例えば、 θ_T が -10° 前後のとき、飛跡Tの方向は離散方向4に近いが、いくぶん離散方向3の側に傾いている。この場合、推定される飛跡Tの主、副方向は、Fig. 9の四角枠に示されるようにそれぞれ4、3となり、飛跡Tの線分要素として抽出された各画素の主、副方向もそれぞれ4、3となることが多い。従って、この場合は $NQ(IM+1)=LT1$ 、 $NQ(IM+2)=LT2$ となることが多い。

θ_T が 0° 近辺であるとき、飛跡Tの方向はほとんど離散方向4に一致する。この場合、飛跡Tの線分要素として抽出される各画素の主方向はほとんど4になるのに対して、副方向はいずれにもなり得る。このようなき、追跡処理で副方向が最終的に1か3のいずれかになるまで、すなわち $ISGN=\pm 1$ になるまで再計算を行う。しかし、このように θ_T が離散方向とよく一致する場合は、 $NQ(IM+1)=LT1$ だけが成立し、 $NQ(IM+2)=LT2$ は必ずしも成立しないことが多い。

これとは対照的に、 θ_T が -23° 前後であるとき、Fig. 9に・印で示すように、飛跡Tの方向は離散方向4と3の間にある。この場合、飛跡Tの線分要素として抽出された各画素の主、副方向は4、3であったり、3、4であったりする。それゆえ、推定される飛跡Tの主、副方向も4、3か3、4のいずれかになるが、例えばこれらを4、3とする。この場合に成立する同一方向性の条件は、 $NQ(IM+1)=LT1$ 、または $NQ(IM+1)=LT2$ のいずれかである。

離散方向4における以上の検討例から知られるように、同一方向性の条件を判定するには、飛跡の実際の方向が離散方向と一致する程度に応じて、一致するときは主方向に重点を置き、大きくずれるときは副方向にも重点を置いて行うことが必要である。他の離散方向に関しても、Fig. 10から同様な結果を示すことができる。従って、4つの離散方向で同一方向性を判定するには式(11)の条件、すなわちFig. 9の流れ図に従って行えばよいことが分る。

3.3 連結性の判定法

4つの離散方向で線分方向を定めるとき、式(2)の連結性の判定条件は次のように定式化できる。

飛跡Tの線分要素の合成処理で、 $k+1$ 番目の線分要素の登録時を考える。 k 番目に登録した線分要素 s_k の座標を (I_k, J_k) 、 $k+1$ 番目の登録画素として候補に上げられる抽出画素 s'_α の座標を (I', J') とする。抽出画素 s'_α と $k-r$ 番目の登録画素 s_{k-r} との差座標を、

$$(4I, 4J)_{k-r}, (r=0, 1, \dots, k-1) \tag{16}$$

と表わす。ここで、 $4I, 4J$ は次のように計算する。

$$4I = I' - I_{k-r} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} J' - J_{k-r}, ISGN > 0 \\ |J' - J_{k-r}|, ISGN = 0 \\ J_{k-r} - J', ISGN < 0 \end{array} \tag{17}$$

他方、飛跡Tの主方向LTIに応じて連結性を認める差座標の範囲を A_{LTI} と表わして、これをFig.11のように定める。ただし、 A_1 は A_3 と同じ範囲を指定するものとする。さらに、 A_2, A_3, A_4 の和集合を A とする。このとき、抽出画素 s'_α が登録画素 s_1, s_2, \dots, s_k との間で、

$$(\Delta I, \Delta J)_{k-r} \begin{cases} \in A_{LTI}, & r \leq r_0 \\ \notin A, & r > r_0 \end{cases} \quad (0 \leq r_0 \leq k-1) \quad (18)$$

を満たす正の整数 r_0 を持つならば、抽出画素 s'_α は $k+1$ 番目の登録画素として、それ以前の登録画素の集まり $\{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ と連結性があると判断する。

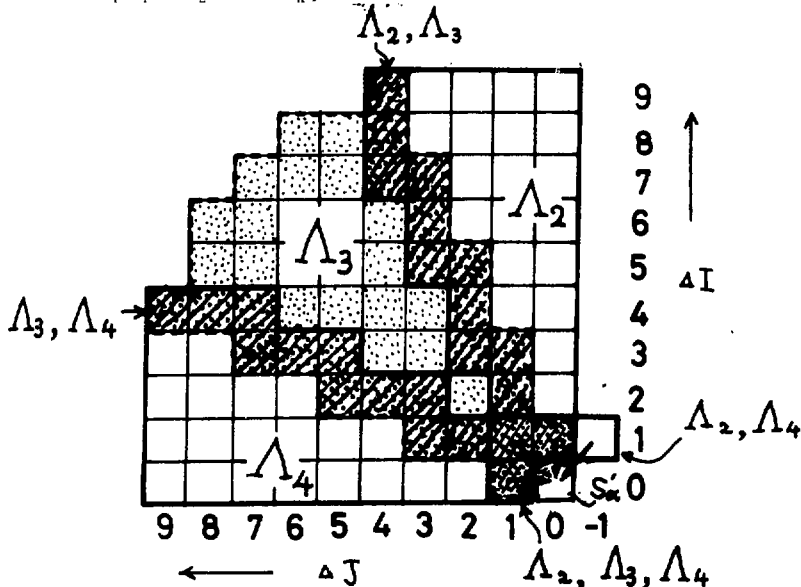


Fig.11 Relative regions Λ_{LTI} of the $k-r$ -th registered segment of a track in the direction of LTI, connected with an extracted segment s'_α .

例えば、主方向4、副方向3の飛跡を合成する場合、 $k+1$ 番目の登録画素として候補に上げた抽出画素 s'_α が実際に登録されるとすれば、それ以前の登録画素 s_k, s_{k-1}, \dots, s_1 は抽出画素 s'_α から見て左上側の-4の方向に直線的に伸びているはずである。従って、Fig.11の原点(0,0)を抽出画素 s'_α の座標に一致させると、登録画素 $s_k, s_{k-1}, \dots, s_{k-r_0}$ の座標はすべて A_4 の範囲を直線的に通る、それ以前の登録画素 $s_{k-r_0-1}, s_{k-r_0-2}, \dots, s_1$ の座標はすべて A_4 の範囲を通過して同一方向に直線的に伸びている、と考えられる。それゆえ、登録画素 $s_{k-r_0-1}, s_{k-r_0-2}, \dots, s_1$ の座標は A の範囲(すなわち、 A_2, A_3, A_4 のすべての範囲)にもないはずである。これより、抽出画素 s'_α が $k+1$ 番目の登録画素となるときは式18が成立する。

これ以外の飛跡方向についても同じことが示せる。とくに、左下向きの飛跡の場合は、 ΔJ の計算を式18のように左右反対にして行うことにより、垂直方向に関して対称な右下向きの飛跡に還元して取扱えばよい。このことはFig.10の方向1と方向3の垂直方向に関する対称

性を見れば明らかである。ただし、向き不定、すなわち、 $ISGN=0$ のときだけ式(17)に示すように $4J$ の計算は絶対値を用いる。

抽出画素 s'_α の連結性を調べる差座標の範囲は、抽出処理に用いる円環の大きさと飛跡上の不連続幅の大きさから決められる。すなわち、Fig. 11に見られるような抽出画素の不連続部分を連結できる程度に差座標の範囲をとる必要があるが、それと同時にこれらの範囲はできるだけ小さくとる方がよい。Fig. 11に示す連結範囲 A_{LT1} は、抽出処理に用いる円環を Fig. 5 のようにとり、飛跡上の不連続幅を3画素とした場合のものである。

Fig. 11の連結範囲 A_{LT1} のうち、ある差座標 $(4j, 4j)_{k-r}$ に複数の連結範囲を割当ててある例がいくつか見られる。このような重複した割当ては2つの理由による。その一つは飛跡の方向が離散的にとった方向の境界方向にある場合に対するものである。 A_2 と A_3 および A_3 と A_4 の境界部分の重複がこれに相当する。もう一つは実際の抽出画素が Fig. 12に示すように飛跡幅の方向に重なる場合のあることを考慮したものである。Fig. 11の原点 $(0, 0)$ に隣接する4つの差座標 $(0, 1)_{k-r}$ 、 $(1, 1)_{k-r}$ 、 $(1, 0)_{k-r}$ および $(1, -1)_{k-r}$ がこれに相当する。 $(1, 1)_{k-r}$ は A_2 と A_4 の範囲だけに含めるが、残りの3つはすべての範囲に含める。

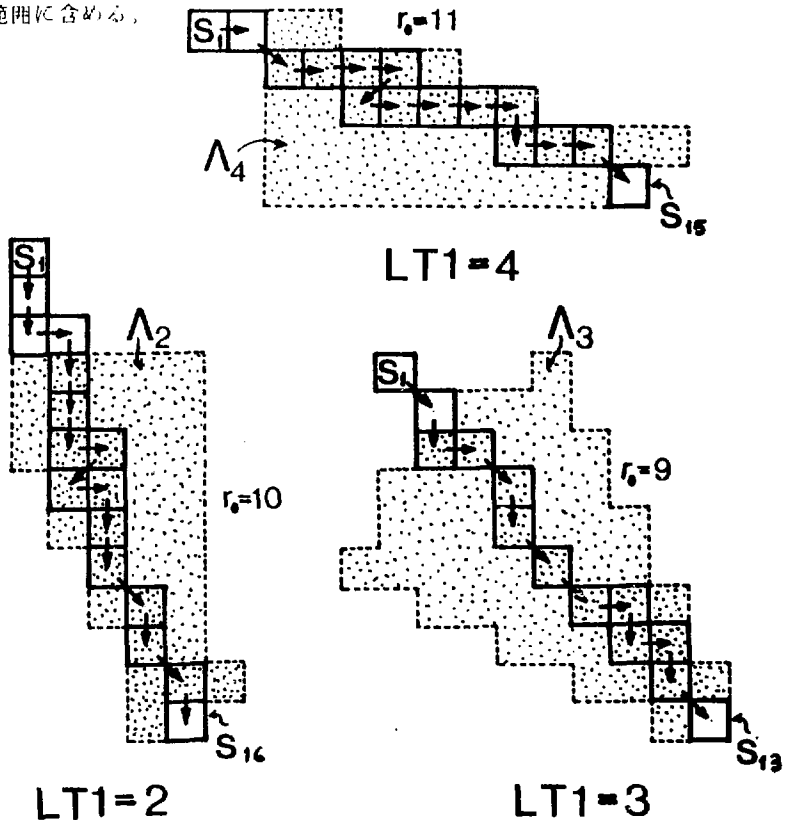


Fig.12 Examples of concatenation of adjacent track segments. Dotted regions represent connected regions with respect to tail segments $s_N=s_{16}$ (LT1=2), s_{13} (LT1=3) and s_{15} (LT1=4).

例えば、Fig. 12の $LT1=2$ の飛跡で隣接する抽出画素を矢印のようにたどると、それらの連結関係は方向2に一致した方向の' \downarrow '以外に、' \swarrow 、 \searrow 、 \rightarrow 'という方向2に一致しない方向の連結関係が見られる。また、 $LT1=3$ の場合には方向3に一致した方向の' \searrow '以外に、それに一致しない方向の' \downarrow 、 \rightarrow 'という連結関係があり、 $LT1=4$ の場合には方向4に一致した方向の' \rightarrow '以外に、それに一致しない方向の' \swarrow 、 \downarrow 、 \searrow 'という連結関係がある。

これらの連結関係が式(2)の連結性の判定条件を満たすには、 $LT1=2$ のときの' \rightarrow 'または $LT1=4$ のときの' \downarrow 'に見られる $LT1$ と直交した連結関係を考慮すると、 $\Delta\eta=90^\circ$ にとらなければならない。しかし、 $\Delta\eta$ を 90° にとることは無理である。他方、Fig. 12の抽出画素の配列例を見ると、いずれの $LT1$ に対しても、それぞれの全体的な抽出画素の配列傾向はその主方向 $LT1$ と矛盾しない範囲にある。さらに、Fig. 12に示す抽出画素はどれもそれぞれの飛跡の線分要素として登録したとしても不合理ではない。

このように局所的な範囲において式(2)の $\Delta\eta$ 以内という条件を満たさない抽出画素に連結性を認めるため、Fig. 11の原点 $(0,0)$ のまわりの差座標にはすべての範囲 A が割当ててある。すなわち、 $LT1=2$ および 4 では' \rightarrow 、 \swarrow 、 \downarrow 、 \searrow '、 $LT1=3$ では' \rightarrow 、 \downarrow 、 \searrow 'である。これらの連結関係の中には前述のように、 $LT1$ と矛盾するものが含まれる。しかし、Fig. 11の連結範囲 A_{LT1} を見ると、 ΔI 、 ΔJ の大きいときは $(\Delta I, \Delta J)_{k-r}$ と $(0,0)$ を結ぶ線分方向はその主方向である $LT1$ に近いことが分る。従って、 r の小さいとき、 $(\Delta I, \Delta J)_{k-r}$ は $(0,0)$ の近傍にきて、 $(\Delta I, \Delta J)_{k-r}$ と $(0,0)$ を結ぶ線分方向は、 $LT1$ と矛盾する可能性もある一方、 r の大きいときは、 ΔI 、 ΔJ も大きくなるので、 $(\Delta I, \Delta J)_{k-r}$ と $(0,0)$ を結ぶ線分方向も $LT1$ と矛盾しないようになる。このように、式(8)による連結性の判定条件は局所的な範囲では式(2)の $\Delta\eta$ 以内という条件と矛盾するが、大局的な範囲ではこの条件と矛盾しない形になっている。

Fig. 12の例に式(8)の判定条件を適用すると、次のようになる。それぞれの $LT1$ で最後の抽出画素を s'_a として、 s'_a と連結性を持つ画素をFig. 11に示す A_{LT1} から求めると、これらの画素はFig. 12の点線枠内の部分にある。ここで、 $LT1=2, 3, 4$ に対し、それぞれ $r_0=10, 9, 11$ にとると、いずれの $LT1$ に対しても画素 $s_1, s_2, \dots, s_{k-r_0-1}$ は点線枠外でかつ A の範囲外に、画素 $s_{k-r_0}, s_{k-r_0+1}, \dots, s_k$ は点線枠内にある。従って、Fig. 12のいずれの $LT1$ に対しても最後の抽出画素 s'_a は式(8)の条件を満たす。他の抽出画素についても同じようにして連結性を調べることができる。

以上の検討例から知られるように、主方向 $LT1$ の飛跡 T の $k+1$ 番目の要素として、抽出画素 s'_a が連結性を有するか否かを調べるには、式(8)、(7)で差座標 $(\Delta I, \Delta J)_{k-r}$ を計算し、式(8)の条件を用いて判定すればよい。

3.4 大きなデジタル画像に対する合成処理法

計算機の記憶容量の点から、大きなデジタル画像に対しては、抽出処理データをいくつかに分割して合成処理を行うと良いことが多い。そこで行範囲を一定幅にとって行領域ごとに抽出

処理データを分割して合成処理を行う一方、行領域間にまたがる飛跡に対しては引継処理も行う方式を検討する。

3.4.1 始点要素の判定を行う行範囲

抽出処理データをMROD行幅に分割することは、抽出処理画像を小画像に分割することに対応する。Fig. 13に太い実線枠でこのような小画像を示す。これより、MROD行ごとの抽出処理データの合成処理は、Fig. 13の小画像ごとの合成処理に対応する。

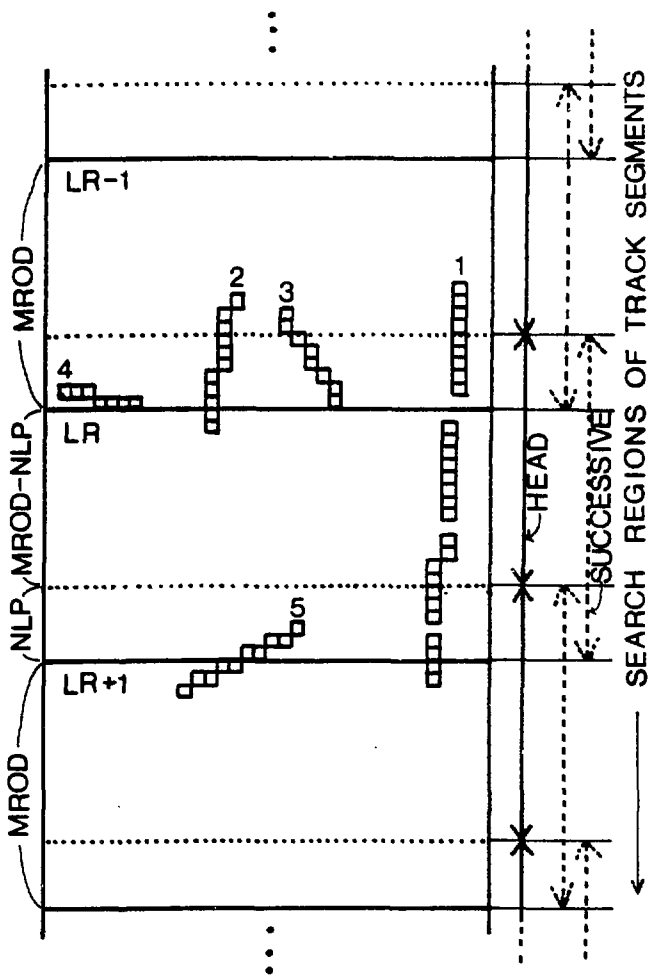


Fig.13 An example of appearance of various tracks in subpictures.

Fig. 13でLR-1, LR, LR+1の小画像にある各飛跡の抽出画素を見ると、複数の小画像にまたがる飛跡や、次の小画像に近い行にある飛跡などが示されている。これらの飛跡の抽出画素を合成するには引継処理が必要である。引継処理に必要な重複した行数をNLPとすると、これは、Fig. 11の連結性を判定する座標範囲 $A_{LT1=2}$ 内で、 ΔI の最大となる値に等しくとる。すなわち、 $NLP=9$ にとる。この重複行はFig. 13に点線で示すように各

小画像の最後のNLP 行にとる(ただし、図ではNLP=6)。

各小画像での始点要素の判定を点線以前の行までに止めると、垂直方向(LT1=2)の飛跡で不連続幅が最大のときでも、この始点要素の後に続く次の飛跡線分要素は必ずこの小画像の中にある。従って、重複行以外の行にある始点要素が、同じ小画像の中にある抽出画素を後続する次の飛跡線分要素としないならば、この始点要素は、孤立的であるので、飛跡線分要素でないと判断する。このように各小画像で点線以前の行で始点要素の判定をする限り、始点要素がこの小画像の中に後続する次の要素を有するか否かを決定することができる。

各小画像の重複行にある始点要素は、次の小画像における抽出画素を、後続する次の飛跡線分要素とする場合がある。このような事例は飛跡の主方向に依存して現われる。例えば、垂直方向の飛跡では重複行の最初の行に始点要素がある場合から、また、水平方向の飛跡では重複行の終り近くの行に始点要素がある場合からこのような事例が見られる。しかし、始点要素の判定を行う行範囲を飛跡の主方向に依存させるのは、抽出画素の呼出し順序を検討した場合と同じく、事前に飛跡の方向が知られないという理由で好ましくない。そこで、重複行における始点要素の判定は、飛跡の主方向にかかわらず、すべて次の小画像の合成処理に回すことにする。ただし、最後の小画像には重複行を考えないことにする。

以上から、番号LRの小画像で始点要素の判定を行うには、前の小画像の重複行であるNLP行と、この小画像の重複行以外のMROD-NLP行との、合計MROD行の行範囲を対象にとればよい。このような行範囲をFig. 13に実線の矢印の区間で示す。

3.4.2 追跡処理を行う行範囲

始点要素以外の後続する次の飛跡線分要素を追跡する段階では、飛跡の方向は既知である。この場合、小画像間にまたがる飛跡の継続性の判定は、飛跡の主方向に依存させることができる。従って、各小画像における追跡処理はその小画像の重複行の最後の行まで完全に行うことにする。

追跡処理を行う行範囲を示すと、Fig. 13の破線の矢印の区間になる。この行領域のとり方を始点要素の判定を行う場合のとり方と比べると、追跡処理を行う行範囲は重複行の部分だけ多くなっている。追跡処理を行う行範囲は各小画像につきMROD+NLP行である。

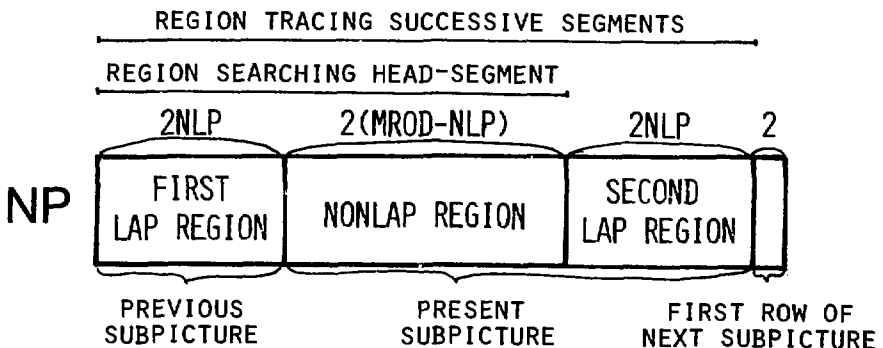


Fig.14 Three regions of array NP

MROD+NLP 行からなる行領域の抽出処理データの格納形式は、式(8), (9)に示す配列NP, NQを用いる。これらはFig. 6に示す通りであるが、この場合の配列NPは、Fig. 14に示すような3つの領域に分けられる。初めの重複領域には前の小画像における重複行の $\{I, M_i\}$ を格納する。次の非重複領域には現段階の小画像における最初のMROD-NLP行部分の $\{I, M_i\}$ を格納し、次の重複領域にはこの小画像の残りのNLP行部分の $\{I, M_i\}$ を格納する。さらに、この後に次の小画像の最初の行番号 I^* とそれに対する M_i^* を格納する。 $\{I^*, M_i^*\}$ は現段階の小画像の最後の行に対する抽出処理データの配列NQにおける終りの格納番地を指定するために用いられる。従って、配列NPで行番号を格納する最大の番地は、 $NMAX=2(MROD+NLP)+1$ となる。

3.4.3 全小画像に対する合成処理の流れ

小画像ごとに行う合成処理と、その結果得られる合成処理データの小画像間におたる結合処理を行う全体的な処理の流れを示す。

各小画像ごとに始点要素の判定を行う範囲は、Fig. 14に示す配列NPの1番地から $2MROD-1$ 番地に格納した行番号における抽出処理データだけである。従って、この場合における始点要素の判定は $N_1=1, N_2=2MROD-1$ と置き、Fig. 7の流れ図に従って抽出画素を呼出せばよい。ただし、最初の小画像では先行する小画像がないので、 $N_1=2NLP+1$ とし、最後の小画像ではその最後の行番号の次の行番号を格納する番地を N_2 とする。

各小画像で追跡処理を行う範囲は、最大限、配列NPの $2(MROD+NLP)-1$ 番地に格納した行番号における抽出処理データまでなので、 $NMAX=2(MROD+NLP)+1$ と置き、Fig. 8の流れ図に従って抽出画素を呼出し、追跡処理を行えばよい。追跡処理の結果、この小画像内で各飛跡ごとの最後の登録画素となる抽出画素 s_a^+ の行番号 I^+ が、この小画像の重複行部分に達している場合、飛跡の主方向によってこの飛跡の追跡処理を次の小画像でも継続するように引継ぐ必要がある場合がある。Fig. 8の点線で示した流れはこのような場合に対するものである。

上記の行番号 I^+ と配列NPのNMAX番地に格納した次の小画像の最初の行番号 $I^*=NP(NMAX)$ の差を、

$$\Delta I^* = I^* - I^+ \quad (9)$$

とする。この差 ΔI^* がFig. 11の各連結範囲 A_{LT1} 内における ΔI の最大値IUMXに比べ、

$$\Delta I^* < IUMX \quad (10)$$

ならば、この飛跡の線分要素は次の小画像にもあり得ると判断して、上記の抽出画素 s_a^+ は次の小画像に追跡処理を引継ぐように指定する。ここで、Fig. 11から $LT1 \neq 4$ では $IUMX=9$ 、 $LT1=4$ では $IUMX=4$ である。

引継ぎの指定は抽出画素 s_a^+ のMSCを1より大きくとることにより行う。逆に、次の小画像で呼出された抽出画素 s_a^+ で $MSC > 1$ ならば、これは前の小画像で追跡処理が行われ、この小画像でも追跡処理を再開するべき引継要素であると判断する。 $MSC > 1$ とされるのは、

抽出要素 s_a^+ の行番号 I^+ が配列 NP の第2の重複領域に格納されているときである。また、始点要素の呼出し時に $MSC > 1$ の抽出要素 s_a' が呼出されるのは、この行番号 I' が第1の重複領域に格納されているときである。すなわち、第1の重複領域に行番号のある抽出要素は、

$$MSC \begin{cases} > 1 & \text{引継要素} \\ = 1 & \text{始点要素} \\ < 0 & \text{登録済み要素} \end{cases} \quad (2)$$

の合成処理状態が指定される。

Fig. 7 の点線で示した流れは式(2)の条件を考慮している。 $MSC < 0$ でなく、かつ $MSC \neq 1$ である抽出要素 s_a' は引継要素なので 前の小画像で合成した飛跡 T の登録要素の情報を引継いだ後、Fig. 7 の番号 30 へ直接に飛び、そこから追跡処理を再開する。

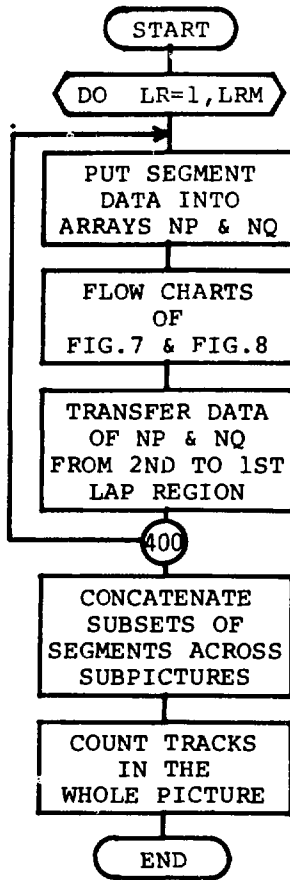


Fig.15 A flow diagram for synthesizing track segments over subpictures.

以上の小画像に分割した合成処理の全体の流れの検討結果を整理すると Fig. 15 の流れ図で表わせる。すなわち、小画像 LR での抽出処理データを式(8)、(9)の形式で、配列 NP の $2NLP + 1$ 番地から $NMAX + 1$ 番地と、配列 NQ の NP($2NLP + 2$) 番地から NP($NMAX + 1$) - 1 番地に格納する。配列 NP, NQ に格納された抽出処理データを Fig. 13 に示す行領域について、Fig. 7 と Fig. 8 の点線の流れも含めた流れ図に従って合成処理を行う。この場合、終端登録処理では、飛跡ごとに登録した線分要素の終端が次の小画像へ継続していると判断されるとき、この引継ぎ処理を行う。始点要素の呼出しが配列 NP の第 2 の重複領域に達すると、この小画像の合成処理を終了する。そして、重複領域のデータを第 2 から第 1 へ転送した後、新たな小画像の抽出処理データを前と同様に格納する。そして、新たな小画像について合成処理を前と同様に行う。すべての小画像に対する合成処理が終ると、小画像ごとに合成された飛跡のうち、複数の小画像にまたがる飛跡の登録画素の部分的な集まりを結合して、飛跡線分要素の各飛跡全長にわたる集まり S を求める。このような集まり S の個数から飛跡数が求められる。

3.4.4 登録データの格納形式

飛跡線分要素の登録データを格納する 3 種類の配列、ITRK, NTRK および NTK の格納形式を検討する。ITRK は各小画像における特定の飛跡を追跡する過程で、その線分要素として抽出画素を次々と登録するための格納領域である。NTRK は配列 ITRK に格納された登録画素データのうち、飛跡合成に適するものだけを転送するのに用いる格納領域である。NTK は配列 NTRK に格納された小画像単位の部分的な線分要素の集まりをつなぎ合せて、飛跡全長にわたる集まりにまとめて、格納し直すのに用いる格納領域である。

飛跡 T が Fig. 13 に示す飛跡 1 のように複数の小画像にまたがっているとき、小画像ごとに合成処理を行うと、飛跡 T の線分要素は、小画像ごとの集まりに分割される。すなわち、分割された a 番目の部分集合を S_a とすると、飛跡 T の線分要素の集まり S は、一般に、

$$S = S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_A \tag{22}$$

と表わせる。ただし、 \cup は集合の和を意味する。部分集合 S_a を、

$$s_a = \{ S_{a,b} \mid b=1, 2, \dots, B_a \} \tag{23}$$

と表わすと、飛跡 T の始点要素 s_1 は s_{11} 、終点要素 s_N は s_{AB_A} である。また、小画像ごとの合成処理の結果得られた部分集合 s_a で $a \in A$ のとき、要素 s_{a,B_a} は次の小画像への引継要素 s_k で、これに対応する抽出画素 s_a^+ は重複領域にあって、 $MSC > 1$ である。 $a \in A$ のとき、要素 $s_{a,1}$ は前の小画像における引継要素 s_k の次に続く要素で、 s_{k+1} である。

$A = 1$ のときは、 $S = S_1$ である。これは飛跡 T の線分要素の集まり S がひとつの行領域内の合成処理で完結し、他の行領域にまたがらないことを示している。

配列 ITRK の格納形式

各行域内における飛跡ごとの抽出画素を次々と登録して、部分集合 S_a を求めるための配列

ITRK の格納形式を示す。

配列 ITRK には 5 個単位のデータを格納する。登録データは 6 番地から、式(8)、(9)と同じ記号を用いて、

$$\{ I, J, LT1, y, NE \} \quad (24)$$

の順に格納する。ただし、NEは部分集合 S_1 の最初の要素 s_{11} から通し番号を付けた場合の登録要素番号を表わす。また、NEを格納する配列 ITRK の番地を IT と表わす。

配列 ITRK の 1 番地から 5 番地には、登録処理中の飛跡の最新登録要素 s_{NE}^+ の座標 (I^+ , J^+) と、それに対応する抽出画素 s_a^+ の IM^+ , IN^+ および登録要素番号の初期値 NEO を格納する。すなわち、

$$(I^+, J^+, IM^+, IN^+, NEO) \quad (25)$$

最新登録画素の行番号 I^+ , 列番号 J^+ は Fig. 8 に示すように連結性を判定するための差座標 ($\Delta I, \Delta J$) の計算に用いられる。 IM^+ は最新登録画素に対応する抽出データを式(9)の順序に格納するための配列 NQ の先頭番地である。この画素 s_{NE}^+ が引継要素 s_{aB_a} であるとき、抽出画素 s_a^+ (または s_a^+) の MSC^+ を終端登録処理で 1 以上に指定するため、 IM^+ は MSC^+ の格納番地 $IM^+ + 4$ を計算するのに用いる。 IN^+ は $\{ I^+, IM^+ \}$ を格納する配列 NP の先頭番地である。これは、Fig. 8 の追跡処理を主方向などの変更を行って再開する場合に用いる。NEO は、登録要素番号の計算に必要な初期値を与える。配列 ITRK で部分集合 S_a を求める場合、

$$NEO = \begin{cases} 0 & (a = 1) \\ k-1 & (a \neq 1) \end{cases} \quad (26)$$

とする。ここで、 k は通し番号で数えた部分集合 S_{a-1} の終端要素の登録要素番号を表わす。 $NEO \neq 0$ のとき、配列 ITRK に引継要素 s_k を登録した後、新規の登録を行う。

配列 NTRK の格納形式

配列 ITRK に格納した部分集合 S_a は、さらに配列 NTRK へ次々と転送して行く。この場合、同一の飛跡 T に属する部分集合 S_1, S_2, \dots, S_A を続けて配列 ITRK から配列 NTRK に転送できるとは限らない。配列 NTRK に転送された飛跡 T の部分集合 S_a と S_{a+1} の間には一般に異なる飛跡の部分集合 S'_a, S''_a, \dots が混入し、配列 NTRK では、

$$\dots, S_a, S'_a, S''_a, \dots, S_{a+1}, \dots \quad (27)$$

という配列順になる。

式(27)の配列順において、各部分集合 S_a のデータ格納領域の前と後に、1 画素分のデータ余白を設ける。すなわち、前の余白を前端部 FM_a 、後の余白を後端部 BM_a とすると、式(27)は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \dots, FM_a \cdot S_a \cdot BM_a, FM'_a \cdot S'_a \cdot BM'_a, \\ FM''_a \cdot S''_a \cdot BM''_a, \dots, FM_{a+1} \cdot S_{a+1} \cdot BM_{a+1}, \dots \end{aligned} \quad (28)$$

他方、配列 NTRK のデータ格納領域の前に番地指定領域をとり、この領域で飛跡番号 NOT

の部分集合 S_a を格納する配列 $NTRK$ の番地 IR_a を指定する。 IR_a は部分集合 S_a の前端部 FM_a の先頭番地とする。

部分集合 S_a の前端部 FM_a と後端部 BM_a には、この飛跡 T の方向情報 $LT1, LT2, ISGN, JSGN$ 、飛跡番号 NOT とその番地指定領域における格納番地 IQ_a 、部分集合 S_a の終端要素 s_{aB} のデータ格納領域における先頭番地 NS_a およびこの終端要素に対応する抽出要素 s_a^+ の MSC を格納する次の行領域における配列 NQ の格納番地 $IM4$ が次のような配列順に格納されている。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} FM_a &= (IQ_{a-1}, ISGN, JSGN, NOT, NS_a) \\ BM_a &= (IQ_a, IM4, LT1, LT2, IQ_{a+1}) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

以上の格納形式の下で、部分集合 S_a は、前端部 FM_a の IQ_{a-1} の値から $IR_{a-1} = NTRK(IQ_{a-1} + 1)$ を求めることにより、前の部分集合 S_{a-1} と連結でき、後端部 BM_a の IQ_{a+1} の値から $IR_{a+1} = NTRK(IQ_{a+1} + 1)$ を求めることにより、次の部分集合 S_{a+1} と連結できる。ただし、 $a=1$ では先行する部分集合はなく、 $IQ_0=0$ とする。また、 $a=A$ では後続する部分集合はなく、 $IQ_{A+1}=-99$ とする。逆に、前端部 FM_a で $IQ_{a-1}=0$ ならば、この部分集合は S_1 であり、後端部 BM_a で $IQ_{a+1}=-99$ ならば、この部分集合は S_A である。

配列 $NTRK$ における部分集合 S_a の各要素のデータ形式は配列 $ITRK$ の登録要素のデータ形式と同じく式(24)の配列順にとる。これは、 NS_a を先頭番地とする終端要素 s_{aB} が引継要素であるとき、次の小画像で部分集合 S_{a+1} を求めるのに、配列 $ITRK$ への引継要素を転送するためである。

他方、引継要素の判定は配列 NQ に格納された抽出要素の MSC の値により判定する。従って、要素 s_{aB} が引継要素であるとき、式(24)から $MSC = NQ(IM4) > 1$ でなければならない。また、 $MSC > 1$ のとき、先行する部分集合の配列 $NTRK$ における格納領域を知る必要がある。それゆえ、このときの MSC は NS_a に等しくとる。

$MSC > 1$ のとき、Fig. 7 に点線で示すように引継処理を行う。 MSC の値から NS_a を知り、 $IQ_a = NTRK(NS_a + 5)$ から $IR_a = NTRK(IQ_a + 1)$ を知って、この部分集合 S_a の配列 $NTRK$ の格納領域を明らかにする。これより、この飛跡の方向情報、登録要素番号などを引継ぐ。

配列 $NTRK$ の格納形式

式(24)の飛跡 T の線分要素の集まり S は、前端部の最初のデータが 0 の部分集合 S_1 から、後端部の最後のデータが -99 の部分集合 S_A までを連結すればよい。この連結には、前にも述べたように、後端部の最後のデータ IQ_{a+1} から、次の部分集合 S_{a+1} のデータ格納番地 $IR_{a+1} = NTRK(IQ_{a+1} + 1)$ を探して行けばよい。

このような部分集合間の連結処理を終了したデータは配列 $NTRK$ に格納する。配列 $NTRK$ は番地指定領域とデータ格納領域からなる。前者の領域は配列 $NTRK$ と同じように飛跡番号 NOT の集まり S のデータを格納する前端部 PF の番地 IR を指定する。後者の領域は、各集まり S, S', S'', \dots の前に、それらの前端部 PF, PF', PF'', \dots を付けた並びで、次のよ

りに表わされる。

$$\dots PF \cdot S, PF' \cdot S', PF'' \cdot S'', \dots$$

(30)

ここで、前端部PFのデータの配列順は、

$$PF = (IQ, ISGN, LT1, LT2, NS)$$

(31)

である。また、ここで、IQは飛跡番号NOTを格納する配列NTKの番地指定領域における番地、NSはこの飛跡の終点要素 s_N のデータを格納する配列NTKのデータ格納領域における先頭番地を表わす。

これより、 $NOT = NTK(IQ)$ 、 $IR = NTK(IQ+1)$ ゆえ、集まりSの前端部PFの最初のデータから、この番地指定場所が知られる。逆に、 $IQ = NTK(IR)$ からこの前端部PFの先頭番地が知られる。

以上のように、飛跡Tの線分要素を行領域ごとに配列ITRKに格納して部分集合 S_a を求め、終端要素が見つかるごとに、 S_a に前端部 FM_a 、後端部 BM_a を付けて、これを配列NTRKに次々と転送する。終端要素が引継要素のとき、これに対応する抽出画素のMSCを、配列NTRKの終端要素の格納番地に等しいと置く。最後に、飛跡番号の同一の部分集合 S_a を連結し、式(28)の集まりSを求め、これを配列NTKに格納する。このときのデータの格納形式は次の通りである。配列ITRKの5番地までは式(29)、それ以降は式(24)の格納形式である。配列NTRKの番地指定領域は $\{NOT, IR_a\}$ 、データ格納領域は式(28)、(29)および式(24)の格納形式である。配列NTKの番地指定領域は $\{NOT, IR\}$ 、データ格納領域は式(30)、(31)および式(24)の格納形式である。

3.4.5 終端登録処理

行領域ごとの合成処理を行う場合、Fig. 7の終端登録処理はいくぶん複雑になる。この処理は3.4.4登録データの格納形式においても一部述べてある。ここでは、この処理をさらに具体的に示す。

行領域ごとの合成処理を行う場合の終端登録処理は、Fig. 16の流れ図で示される。終端要素が引継要素となる可能性がある場合は、番号280から始まる流れに従って処理を行う。終端要素が終点要素の場合は、番号270から始まる流れに従って処理を行う。いずれの場合も番号273以後の処理は共通である。

番号280からの処理で、この行領域が最後の小画像でない場合、終端要素 s_{NE} は引継要素である。このとき、配列NTRKにおける要素 s_{NE} の先頭番地 NS_a は次の行領域の引継処理で参照されるので、要素 s_{NE} に対応する抽出画素 s_a^+ の MSC^+ を NS_a に等しくとる。すなわち、配列NQの $IM^+ + 4$ 番地に NS_a を格納する。さらに、このときの部分集合 S_a の配列NTRKにおける後端部 BM_a の IM_4 と IQ_{a+1} を与えて、図の番号273へ進む。 IM_4 は次の行領域での配列NQにおける MSC^+ の格納番地を表わす。

ここで、 NS_a の計算は、前端部 FM_a の先頭番地 IR_a と配列ITRKの最後のデータの格納番地ITから、図のように計算する。ただし、 $NEO=0$ の場合は5、 $NEO \neq 0$ の場合は10

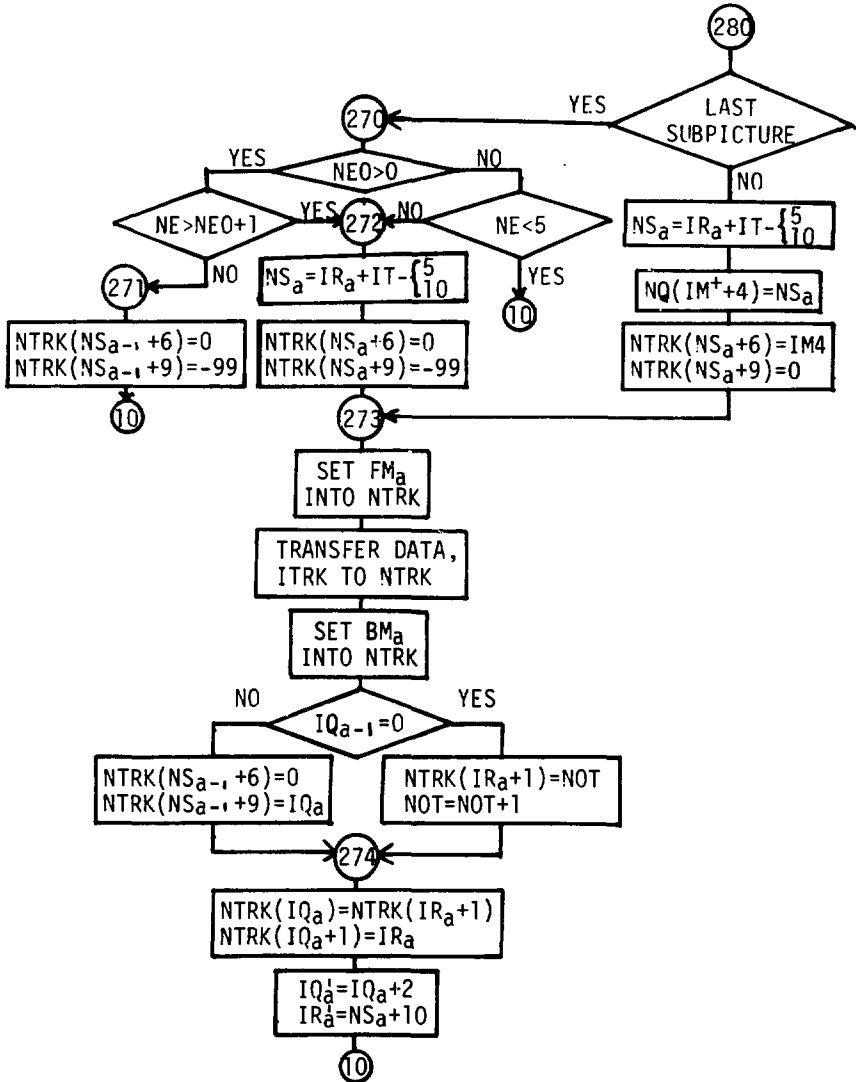


Fig.16 A flow diagram of terminal registration processing.

を用いる。これは式(8)の後にあるように、前の小画像からの引継要素で始まる登録では新規の登録番地 IT が 5 だけ遅れて始められるからである。番号 272 の後の NS_a の計算も、まったく同じように行う。

番号 280 からの処理で、この行領域が最後の小画像であるときは、当然、次の小画像がないので、すぐに番号 270 に進む。

番号 270 からの処理では、まず先行する部分集合 S_{a-1} の有無を $NEO > 0$ か否かで判断する。 $NEO > 0$ で、かつ終端要素の登録要素番号 NE が $NEO + 1$ に等しいとき、式(8)の後にあるように、この場合は新規登録の線分要素は一つもない。このような場合は番号 271 へ進み、部分集合 S_{a-1} の後端部 BM_{a-1} の最後に -99 を入れ、Fig. 7 の番号 10 へ飛ぶ。また、

$NEO=0$ で、かつ $NE<5$ のとき、線分要素の数が少ないため、これらの登録データは配列 $NTRK$ に転送せずに無視して、Fig. 7 の番号10へ飛ぶ。これ以外の場合は番号272に進み、前述のように NS_a を計算し、この部分集合 S_a の後端部の最後に-99を入れる。そして、番号273に進む。

番号273からの処理は、部分集合 S_a の前端部 FM_a 、本体 S_a 、およびその後端部 BM_a を配列 $NTRK$ のデータ格納領域に格納すること、番地指定領域に飛跡番号と IR_a を格納すること、 IQ'_a 、 IR'_a を計算すること、および先行する部分集合 S_{a-1} がある場合は、その後端部 BM_{a-1} の最後に IQ_a を格納すること、などを行う。

前端部 FM_a は配列 $NTRK$ の IR_a 番地から式(4)の形式で格納する。本体 S_a は配列 $NTRK$ の IR_a+5 番地から NS_a 番地に式(4)の形式で、またこの後端部 BM_a は配列 $NTRK$ の NS_a+5 番地から式(4)の形式で格納する。飛跡番号は $IQ_{a-1}=NTRK(IR_a)$ が0でないときは、前の部分集合 S_{a-1} から引継いだ飛跡番号 $NCON$ とし、 $IQ_{a-1}=0$ のときは、新規の飛跡番号 NOT とする。このようにして決めた飛跡番号 $NTRK(IR_{a+1})$ と IR_a を配列 $NTRK$ の番地指定領域に格納する。さらに、 NS_a から次に格納する部分集合 S'_a の配列 $NTRK$ における番地指定領域とデータ格納領域のそれぞれの先頭番地 IQ'_a 、 IR'_a を計算した後、Fig. 7 の番号10へ飛び、この終端登録処理を終了する。

4. 実際の検討

濃淡のあるデジタル画像から抽出した線分要素データを用いて、前述の飛跡線分要素の合成処理の効果を実際に検討する。

4.1 デジタル画像

解析に用いるデジタル画像は文献1)と同じものである。これはNTAフィルムの顕微鏡写真から作成した大きさ 364×323 画素のデジタル画像で、各画素の濃度値は127段階に分けられている。これをFig. 17に示す。

Fig. 17の画像の中には5個の飛跡があり、それらを番号で示す。図の格子の大きさは 40×40 画素で、これをNTAフィルム面の実際の大きさに換算すると、 $14.9 \times 14.9 \mu m$ に相当する。これより、各飛跡の実際の大きさが知られる。

Fig. 17の画像で粒子状のパターンは銀粒子の塊りかごみである。図の下側の黒い部分は密着写真の黒い縁である。これは顕微鏡像によるものではないが、線分要素の抽出処理や合成処理により黒い部分との境界線がどのように処理されるかを検討するために、このような部分も含めておく。

Fig. 17の画像の濃度値の統計分布を局所的に調べると、平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ で表わすことができる。この分布は、飛跡部分では $N(50, 10^2)$ から $N(72, 16^2)$

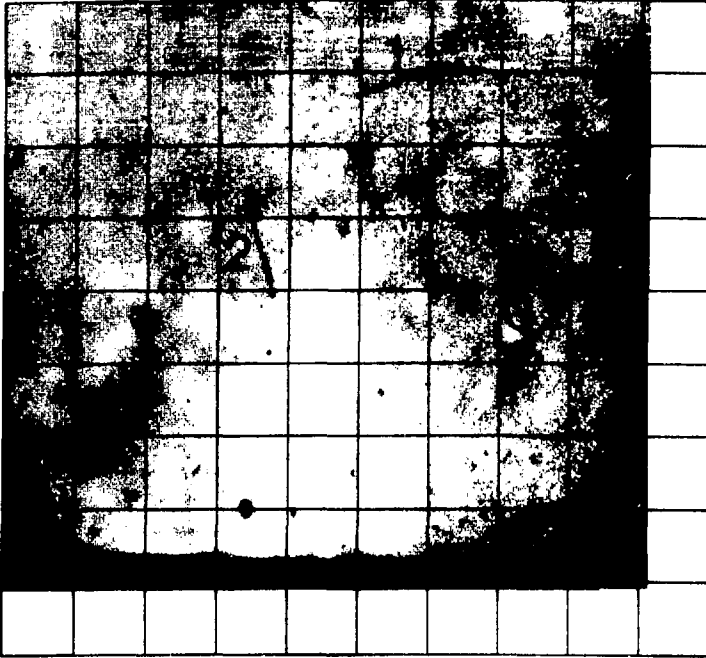
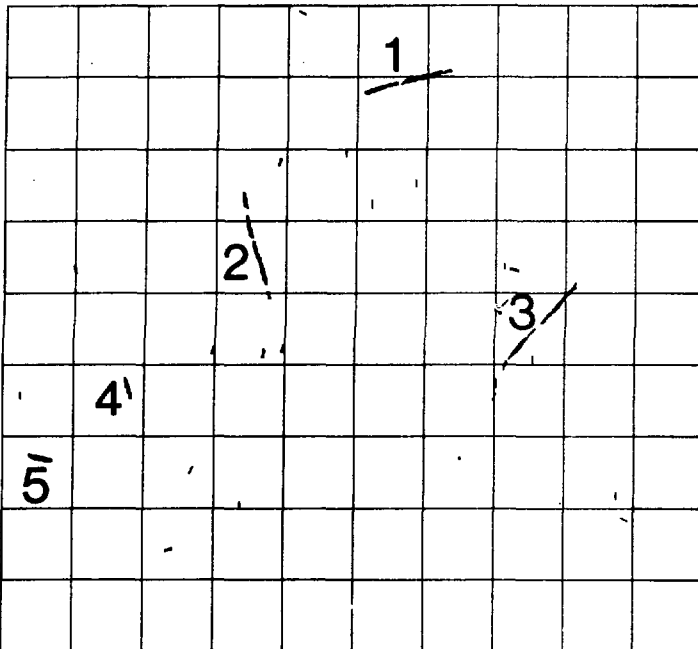


Fig.17 A digital picture of microphotograph of recoil proton tracks.



MODE 9
 SMTH 2X2
 FLTR 5X5
 DRCT 8
 YA > 0.0
 YAH> 4.0

COMMENT

-5	-4	-3	-2	-1
-6				8
-7	0			7
-8				6
1	2	3	4	5

Fig.18 Results of segment extraction processing for the digital picture shown in Fig.17, using the method of ref.1. The number of segment direction is 8. Each segment plotted has the value of $y \geq 4$.

と変化している。また、背景部分では $N(30, 2^2)$ から $N(49, 3^2)$ と変化している。すなわち、飛跡部分と背景部分の濃度値が重なり合う場合がある。このため、ある濃度値で画像を2値化すると、この2値画像上では飛跡の消失する例が現われる。従って、このような2値画像の処理によっては飛跡を正しく検出することができない。

4.2 線分要素の抽出処理

飛跡を精度よく検出するには、各画素で飛跡線分要素の特徴量 y とその線分方向を計算すればよい¹⁾。文献1)では線分の離散方向を8として y を計算し、Fig. 18の抽出結果を得ている。この場合の画像の平滑処理は各画素の濃度値をこの画素を含む右下 2×2 画素の平均値で置換える方式とした。また、各画素の周辺 π とる円環上の画素はFig. 18に示す番号のます目にあたる画素とする。この円環上の画素で飛跡方向に相当する幅は最大2画素として y を計算した(詳細は文献1)参照)。

Fig. 18は $y \geq 4$ となる線分要素を表示したものである。各飛跡に相当する位置にはFig. 17に対応する飛跡番号を付けてある。線分要素は主に飛跡部分で抽出され、粒子状のパターンや黒い部分との境界線のある部分ではほとんど抽出されていない。

線分の離散方向数を半減して、式(7)により y を計算し、 $y \geq 6$ で抽出処理した結果を図示すると、Fig. 19のようになる。この場合の画像の平滑処理はFig. 18と同じである。円環上の画素の取り方はFig. 5 またはFig. 19のようにとる。この場合の y の計算法はFig. 18の場合に比べ簡単化されている。

Fig. 18, 19 を比較すると、番号3の飛跡を除いて、飛跡の方向と飛跡線分要素の方向の一致具合はFig. 19の方が悪い。これは線分の離散方向の取り方をFig. 19ではFig. 18よりも粗くしてあるためである。しかし、Fig. 19から、この場合も、線分要素は主に飛跡部分で抽出され、粒子状のパターンや黒い部分との境界線のある部分ではほとんど抽出されていない。

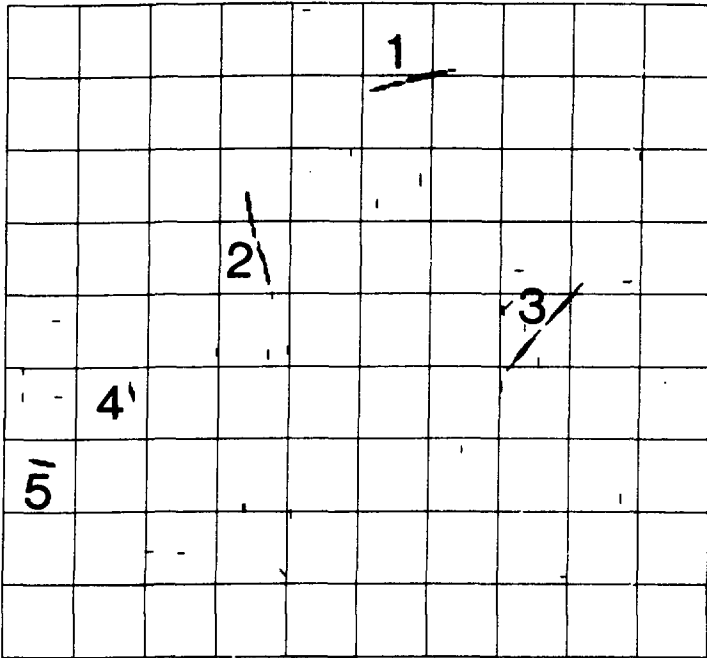
Fig. 18, 19 のいずれにおいても、長い飛跡には断点がある。この断点の間隙が大き過ぎると、一つの飛跡が複数個に数えられてしまう。また、どこからどこまでが一つのまとまった飛跡であるか分らない。そこで、抽出された線分要素のうち、合成して飛跡となる線分要素の集まりを見つける処理を次に行う。

4.3 線分要素の合成処理

前述の方法により抽出した線分要素データを用いて、線分要素の合成処理を行う。これにはFig. 19に示す線分の離散方向数4の場合の抽出データを用いる。

線分要素を合成するのに、同一方向性の判定はFig. 9 と式(8)で行い、連結性の判定はFig. 11と式(10)で行う。飛跡の線分要素の集まり S の濃度 $|S|$ の範囲を定める式(4)で、下限を $N_0=5$ 、上限を $N_\infty=100$ とする。これはFig. 19の抽出データに対しては飛跡の大きさが $3 \sim 40 \mu\text{m}$ くらいに相当する。

各小画像を40行幅にとり、重複行幅を9行として、行領域ごとに抽出線分要素の合成処理

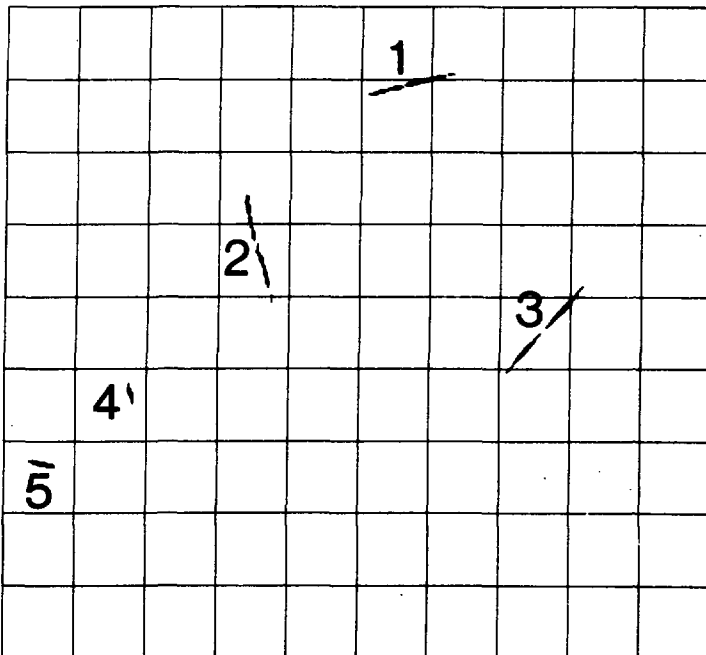


MODE 1
 SMTH 2X2
 FLTR 5X5
 DRCT 4
 TL1 ≥ 0.0
 TL2 ≥ 6.0

COMMENT

-3	-2	-1
-4	0	4
1	2	3

Fig.19 Results of segment extraction processing for the digital picture shown in Fig.17, using the present method. The number of segment direction is 4. Each segment plotted has the value of $y \geq 6$.



MODE 1
 SMTH 2X2
 FLTR 5X5
 DRCT 4
 TL1 ≥ 0.0
 TL2 ≥ 6.0

COMMENT

-3	-2	-1
-4	0	4
1	2	3

Fig.20 Results of segment synthesis processing for the processed picture shown in Fig.19.

を行うと Fig. 20 の結果が得られる。これを Fig. 19 の抽出処理の結果と比較すると、飛跡部分以外で抽出された線分要素の除去されていることが知られる。

行領域ごとに飛跡線分要素を合成して、配列 NTRK に格納した部分集合 S_a を Fig. 21 に示す。配列 NTRK は一次元配列であるが、この番地指定領域は $\{NOT, IR_a\}$ の 2 個単位で、またこのデータ格納領域は式 44 や 45 の 5 個単位で示してある。番地指定領域で各部分集合の前端部の先頭番地 IR_a の下に示した () 中の数字は 5 個単位のデータに付けた通し番号 K である。例えば、番号 1 の部分集合の前端部の先頭番地 IR_a は 101 番地であるが、データ格納領域における 5 個単位の通し番号 K は () 中に示すように 1 である。

番地指定領域に示すように、Fig. 19 の抽出処理データを合成すると、7 つの部分集合が得られる。このうち、 $NOT=2$ の飛跡だけが、番号 2, 3, 4 の複数の部分集合から成っている。残りの $NOT=1, 3, 4, 5$ の飛跡はそれぞれ番号 1, 5, 6, 7 の単独の部分集合から構成されている。

データ格納領域の各部分集合 S_a の前端部 FM_a は実線枠で、また後端部 BM_a は点線枠で Fig. 21 に示す。部分集合 1 は $K=1$ の前端部から飛跡番号 NOT が 1, $K=3, 7$ の後端部から飛跡の主方向 $LT1$ が 4, 副方向 $LT2$ が 1 であることが知られる。また、この前端部の最初 IQ_{a-1} が 0 で、後端部の最後 IQ_{a+1} が -99 ゆえ、飛跡 1 は部分集合 1 だけで構成されていることが知られる。部分集合 2, 3, 4 はそれぞれの前端部、後端部からいずれも飛跡番号は 2 で、飛跡の主方向は 2, 副方向は 3 である。これらの後端部の最後には $IQ_{a+1}=5, 7, -99$ が格納されている。従って、配列 $NTRK(IQ_{a+1}+1)$ の内容から次の部分集合 3 および 4 をたどることができる。

Fig. 21 から飛跡線分要素の集まり S を求めると、Fig. 22 のようになる。これより最終的には 5 個の集まり S が検出され、これらは Fig. 20 に示すようにいずれも飛跡に一对一に対応している。各飛跡の要素数(または濃度 $|S|$) は飛跡番号順にそれぞれ 35, 37, 31, 7, 15 である。このように飛跡はいずれも正しく検出できることが知られる。

4.4 抽出処理と合成処理の効果

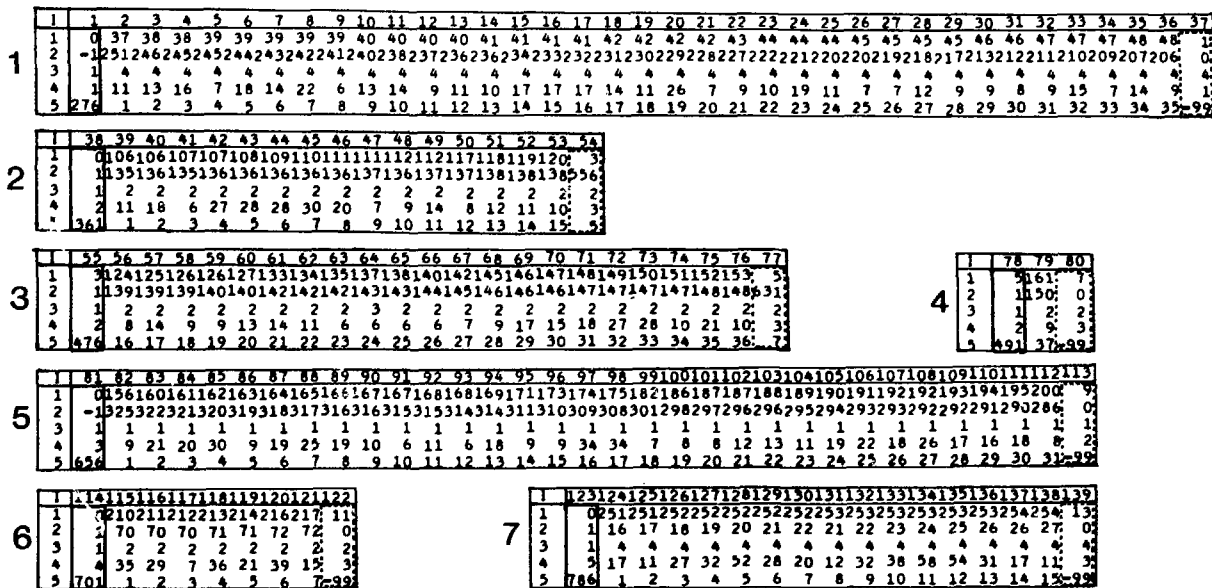
飛跡検出上、線分要素の抽出と合成のいずれの処理に重点を置くべきかを検討する。

抽出処理条件のうち、線分要素と見なす閾値を $y \geq 1$ と小さく設定すると、Fig. 23 に示す抽出結果が得られる。この図を Fig. 19 と比較すると、飛跡部分以外にも多くの線分要素の抽出されていることが知られる。しかし、抽出線分がその方向に直線的に並んでいるのは、Fig. 19 と同様に主として飛跡部分である。ただ、図の下側に水平方向を向いた線分の直線的な列が見られるが、これは飛跡に相当しない。

Fig. 23 の抽出処理画像をさらに合成処理すると、各行領域ごとに得られる部分集合 S_a は全部で 12 個であり、この場合の飛跡番号は 9 に達する。しかし、部分集合 S_a から飛跡線分要素の集まり S を求める過程で、単独の部分 $S_{A=1}$ が 2 つ除去されて、7 個の集まり S が得られる。このときの合成処理の結果を Fig. 24 に示す。

Fig. 24 で、2 つの集まり S が飛跡に正しく対応していない。ひとつは飛跡 3 の下側の部

DATA REGIONS OF NTRK FOR SUBSETS OF TRACK SEGMENTS



DIRECTORY REGION OF NTRK FOR SUBSETS OF TRACK SEGMENTS

SUBSET NUMBER	1	2	3	4	5	6	7
NTR	1	2	2	2	3	4	5
IR _n	101	280	371	486	501	666	716
((IR _n -96)/5)	(1)	(38)	(55)	(78)	(81)	(114)	(124)

Fig.21 An example of resultant segment data in array NTRK.

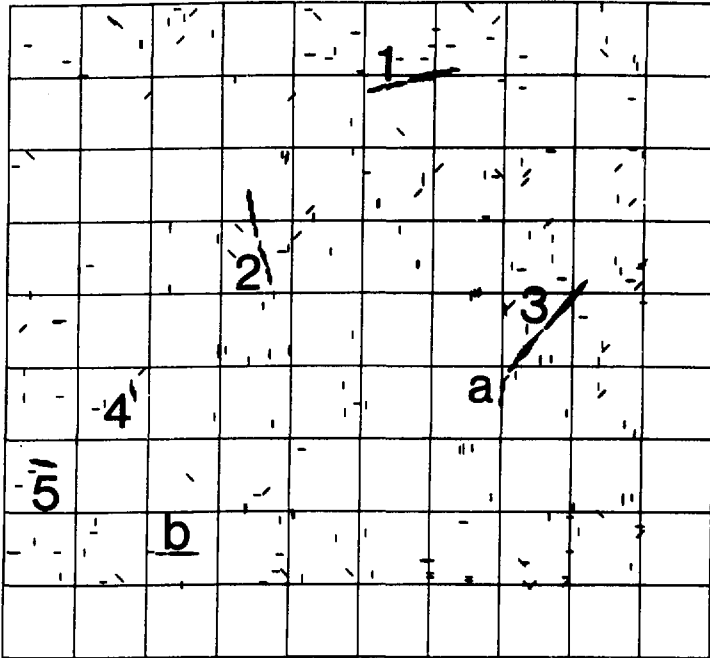
DATA REGION OF NTK FOR SETS OF TRACK SEGMENTS

1																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	1	37	38	38	39	39	39	39	39	40	40	40	40	41	41	41	41	42	42	42	42	43	44	44	44
2	-1	251	246	245	244	244	245	247	241	240	238	237	236	236	234	233	232	231	230	229	228	227	222	221	220
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	1	11	13	16	7	16	14	22	6	13	14	9	11	10	17	17	17	14	11	26	7	9	10	19	11
5	276	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2																									
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
1	45	45	45	45	46	46	47	47	47	48	48	3	106	106	107	107	108	109	110	111	111	112	112	117	118
2	220	219	218	217	213	212	211	210	209	207	206	1	135	136	135	136	136	136	136	136	137	136	137	137	138
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	7	7	12	9	9	8	9	15	7	14	9	3	11	18	6	27	28	28	30	20	7	9	14	8	12
5	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	466	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3																									
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
1	119	120	124	125	126	126	127	133	134	135	137	138	140	142	145	146	147	148	149	150	151	152	153	161	9
2	138	138	139	139	139	140	140	142	142	142	143	143	144	145	146	146	146	147	147	147	147	148	148	150	-1
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
4	11	10	8	14	9	9	13	14	11	6	6	6	6	7	9	17	15	18	27	28	10	21	10	9	2
5	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	626
4																									
	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	156	160	161	162	163	164	165	166	167	167	168	168	169	171	173	174	175	182	186	187	187	188	189	190	191
2	325	322	321	320	319	318	317	316	316	315	315	314	314	311	310	309	308	301	298	297	296	296	295	294	293
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	9	21	20	30	9	19	25	19	10	6	11	6	18	9	34	34	7	8	8	12	13	11	19	22	
5	1	2	3	4	5	6	7	6	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
5																									
	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125
1	142	142	143	144	145	145	147	210	211	212	213	214	216	217	9	251	251	252	252	252	252	252	253	253	253
2	293	292	292	291	290	286	1	70	70	70	71	71	72	72	11	16	17	18	19	20	21	22	21	22	23
3	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	18	26	17	16	18	8	3	35	29	7	36	21	39	15	3	17	11	27	32	52	28	20	12	32	36
5	26	27	28	29	30	31	666	1	2	3	4	5	6	7	746	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6																									
	126	127	128	129	130																				
1	253	253	253	254	254																				
2	24	25	26	26	27																				
3	4	4	4	4	4																				
4	58	54	31	17	11																				
5	11	12	13	14	15																				

DIRECTORY REGION OF NTK FOR SETS OF TRACK SEGMENTS

SET NUMBER	1	2	3	4	5
NOT	1	2	3	4	5
IR, ((IR-96)/5)	101 (1)	281 (37)	471 (75)	631 (107)	671 (115)

Fig.22 An example of resultant segment data in array NTK.

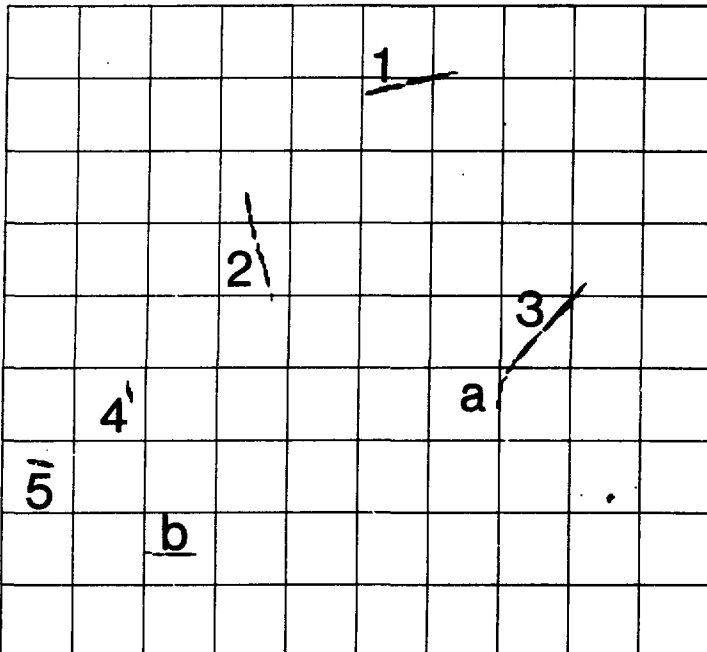


MODE 1
 SMTH 2X2
 FLTR 5X5
 DRCT 4
 TL1 ≥ 0.0
 TL2 ≥ 1.0

COMMENT

-3	-2	-1
-4	0	4
1	2	3

Fig.23 Results of segment extraction processing for the digital picture shown in Fig.17, using the present method. The number of segment direction is 4. Each segment plotted, however, has the value of $y \geq 1$.



MODE 1
 SMTH 2X2
 FLTR 5X5
 DRCT 4
 TL1 ≥ 0.0
 TL2 ≥ 1.0

COMMENT

-3	-2	-1
-4	0	4
1	2	3

Fig.24 Results of segment synthesis processing for the processed picture shown in Fig.23.

分で抽出される、方向2（垂直方向）を向いた線分要素の集まりであり、図には記号aで示してある。これは飛跡3の一部であるが、方向が大きく変化しているため、別の飛跡線分要素の集まりと判断されている。もう1つはFig. 17の下側に見られる黒い部分との境界線に相当する方向4（水平方向）を向いた線分要素の集まりであり、Fig. 24には記号bで示してある。このような境界線の画素は本来抽出しないように工夫してある。しかし、黒い部分にもいくぶん濃度値の変化があることにより、閾値を小さくすると、記号bで示す集まりが生ずる。他方、この集まりが境界線の全体に及んでいない点から判断すると、境界線の画素は一般に抽出されないと見られる。

飛跡検出上、閾値の設定は重要である。この値が小さいと偽の飛跡線分要素数が多くなり、それだけ合成処理の手間がかかるばかりでなく、飛跡に対応しない集まりSまで現われる。また、逆にこの値を大きくすると、長い飛跡である番号1, 2, 3の飛跡では、それぞれ途中が分断されて、複数に数えられる場合も生ずる。

しかし、Fig. 22に示したように、 $y \geq 6$ とすると、5個の飛跡は正しく検出される。このように線分抽出の閾値を適切に定めることが重要である。

合成処理では、孤立点の除去、飛跡上にある断点の接続が主な機能である。これらは、線分方向と飛跡方向との同一方向性、線分要素間の連結性および飛跡サイズの条件に依存する。飛跡方向の推定は式(5)の方法による方が好ましい。しかし、実際の処理では3.2で述べたように飛跡の主方向LT1と副方向LT2を考え、LT1は最初の登録線分要素の主方向LS1から、またLT2は飛跡方向の傾き $1SGN, JSGN$ が±1となるような最も早い登録線分要素の副方向LS2から推定した。この方法は線分方向を離散的に粗くとる場合に有効である。離散方向を4つにとったFig. 20に示す解析結果からは、このような飛跡方向の決定でも飛跡線分要素の合成を十分に行い得るといえる。ただ、LT1の決定を式(5)の方式で行う方がより適確になるのも事実である。

別の問題として、Fig. 24の記号aで示すように飛跡方向が急激に変化するという問題がある。このような変化は一つの飛跡について高々1度しかなく、かつそのような変化点で区切られる2つの飛跡部分は、いずれも直線的である。この場合、一つの飛跡が2つに数えられてしまう。この対策として、飛跡線分の終点要素が見つかった時点で、飛跡の副方向LT2を主方向LT1として、この終点要素を新たな引継要素にとりFig. 8の中間登録処理を行うとよい。この場合の配列NQにおける再開番地 IN^+ はITRK(4)の値とする。この方法を適用すると、Fig. 24の記号aで示した飛跡線分要素の集まりSは飛跡番号3に含まれるようになる。

次に、Fig. 11に示す連結性のある座標範囲 A_{LT1} の取り方を検討する。これは、3.3にも述べてあるように、この範囲の定め方が重要な意味をもつ。実際の検討結果では、Fig. 11の斜線で示した A_2 と A_3 、 A_3 と A_4 の共通部分をさらに少なくとも、飛跡線分要素の合成処理上、問題は生じない。差座標 $\Delta I, \Delta J$ の大きい方で、座標範囲が狭く指定されると、それだけ連結性の判定の手間も小さくなる。

もう1つの問題は、飛跡サイズをどう取るかである。これは前にも述べたように、飛跡の長さそのものを表わすより、飛跡を構成する線分要素の数（または集まりSの濃度 $|S|$ ）の範囲

を指定するものである。このうち、下限 N_0 がとくに重要である。Fig. 20やFig. 24では $N_0 = 5$ としてある。 $N_0 = 4$ とすると、 $y \geq 6$ のFig. 20の場合にもFig. 24の記号aに相当する集まりSが現われる。この場合、飛跡の主方向を変更して終点要素を引継要素として中間登録処理を再開すれば、この集まりSは飛跡番号3の集まりの一部として含めるもできる。ただ、いろいろ検討した結果、 $N_0 = 5$ とするのがよいことが知られた。

以上の点から、飛跡検出を行う上で、抽出処理の閾値の設定は後の合成処理に決定的な影響を与える。また、合成処理では、飛跡の方向の決定法、同一方向性の判定法、連結座標範囲の設定法、飛跡サイズの取り方が重要である。従って、両方の処理の組合せを十分に考慮して各条件を設定する必要がある。Fig. 20の結果はこれらの条件を考慮するといずれの飛跡も正しく検出できることを示している。

5. あ と が き

NTAフィルム中の反跳陽子飛跡の検出法として、飛跡を線分要素に分解した後、再びその線分要素を合成する方法を示した。これは多値レベルのデジタル画像から各画素点で局所的に線分要素を抽出する処理と、その抽出線分要素を一つの飛跡に対する線分要素の集まりに合成する処理、の2つから成る。本報では後者の合成処理の考え方やその具体的手法を中心に検討を行った。また、本方法の実際の適用例として、NTAフィルムの顕微鏡写真から作成した濃度値127段階、大きさ 364×323 画素のデジタル画像を8個の小画像に分けて処理した結果も示した。

この結果、以下のことが知られた。

1. 線分要素を抽出する閾値を小さく設定し過ぎると、合成処理の段階で偽の飛跡線分要素の集まりを除くことができない。反対に、これを大きく設定し過ぎると、途中に断点のあるような飛跡は複数個の集まりとして合成される。しかし、本報で示した抽出処理法に従うと、閾値を6にすれば、上記のデジタル画像中の飛跡は、いずれも正しく検出できることが知られた。
2. 線分の方向は左斜め、垂直、右斜め、水平の4つにとり、さらに各抽出線分要素には主方向と副方向を割当てると、合成処理に必要な飛跡と各線分要素間の同一方向性の判定ができることが知られた。
3. 一つの飛跡に属する線分要素間の連結性を判定する方法として、局所的には飛跡方向と垂直方向の追跡も認める一方、大局的には飛跡方向に一致した要素配列にするFig. 11と式(8)の方式が有効であることが知られた。
4. 飛跡サイズの下限は飛跡に対応するのに必要な最小の線分要素数として5をとればよいことが知られた。

本報で述べた合成処理は画像を行領域で小画像に分割し、各小画像にまたがる飛跡について

は、その引継処理を行う機能を有している。従って、相当大きな画像に対しても適用することができる。しかし、さらに一般的には、列領域でも分割して、ブロック単位の小画像に対する合成処理法も検討する方が良い。これは稿を改めて報告する予定である。

謝 辞

解析に使用したデジタル画像の作成は東京大学生産技術研究所の高木研究室の御厚意によるものである。

本研究に関し有益な助言を頂きました線量計測課・沼宮内弼雄課長および御協力を頂いた課員の皆様に感謝致します。

参考文献

- 1) 熊沢 著：JAERI-M 8085(1979)。
- 2) C.Paretti and A.Ricci : Nucl. Instrum. Methods, 122, p389-397(1974)。
- 3) 熊沢 著：“飛跡検出の簡単化した処理法”，昭54信学全大，1366(1973.3.31)。