

JAERI-M
8085

NTAフィルムの飛跡線分要素の抽出法

1979年2月

熊澤 啓

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.

NTAフィルムの飛跡線分要素の抽出法

日本原子力研究所東海研究所保健物理部

熊 沢 蕃

(1979年1月17日受理)

NTAフィルムの測定を自動化する一環として、濃淡レベルのあるデジタル画像から飛跡の線分要素を抽出する方法を示した。この方法の特徴は背景部分の画素の濃淡レベルが移動しても、飛跡の細線要素を抽出できるように、各画素でその周辺の画素と比較しながら細い線分要素があるか否かを判定していくことにある。

飛跡のある顕微鏡写真を7ビット/画素で364×323画素のデジタル画像にした後、ここで述べる方法でこの画像データを処理した結果、この方法は飛跡画素のみを主として抽出することが知られた。また、この方法は暗い背景にある飛跡でも明るい背景にある飛跡でも、いずれの飛跡画素をも抽出することが知られた。

Track segmentation method for NTA film

Shigeru KUMAZAWA

Division of Health Physics, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 17, 1979)

A method is presented for extracting thin segments of tracks from a gray-level digital picture of NTA film in automatic counting system. To extract thin segments of tracks despite drifting gray level of pixels (picture elements) in the background, the method performs a sequence of local operations involving every element and its 16 neighbors except those immediately outside, determining the class of the element concerning segment and non-segment.

The method is able to extract pixels in the track, scarcely those in the background, in a digitized picture (364x323 pixels with 7 bits/pixel) of the microphotograph. It extracts pixels of tracks embedded both in the dark and bright backgrounds.

Keywords: NTA Film, Recoil Proton Track, Automatic Counting, Digitized Picture, Gray Level, Segmentation, Pixel Classification, Microphotograph

目 次

1. まえがき	1
2. 従来の飛跡検出法	1
2.1 アナログ信号処理による識別方法	1
2.2 デジタル信号処理による識別方法	3
3. 本識別方式	4
3.1 NTAフィルム中の反跳陽子飛跡	4
3.2 統計的細線抽出処理の原理	5
3.3 統計的細線抽出処理の具体的手法	7
3.3.1 デジタル画像上での“円環”の取り方	8
3.3.2 d_{ℓ} , u_{ℓ} の計算の仕方	8
3.3.3 r の決定	9
3.3.4 u の計算の仕方	10
4. 実際の検討	11
4.1 デジタル画像の作成	11
4.2 画素値レベルの検討	12
4.3 円環上にある画素値の頻度分布	14
4.4 円環サイズと平滑化処理による d 値と y 値	15
4.5 円環サイズの選択	17
4.6 顕微鏡写真全体の統計的細線抽出処理	19
4.7 Rosenfeld の微分処理との比較	22
5. あとがき	22
謝 辞	23
参考文献	24

Contents

1	Introduction -----	1
2	Conventional track detection methods -----	1
2.1	Analog processing methods -----	1
2.2	Digital processing methods -----	3
3	Track recognition method -----	4
3.1	Recoil proton tracks in NTA film -----	4
3.2	Principles of a method for statistically extracting thin segments -	5
3.3	Techniques of the method -----	7
3.3.1	Selecting ringlike surroundings for a digital picture -----	8
3.3.2	Techniques of calculating d_{ℓ} and u_{ℓ} -----	8
3.3.3	Determination of the value r -----	9
3.3.4	Techniques of calculating u -----	10
4	Experiments and Results -----	11
4.1	Preparation of a digital picture -----	11
4.2	Gray level of pixels in the digitized picture -----	12
4.3	Frequency distributions of gray level in the ringlike or square surroundings -----	14
4.4	Values d and y for various sizes of the square surroundings and smoothings -----	15
4.5	Selecting size of the square surroundings -----	17
4.6	Results of processing the digitized picture by the method -----	19
4.7	Comparison with the results processed by Rosenfeld's sharpening ---	22
5	Conclusions -----	22
	Aknowledgements -----	23
	References -----	24

1. ま え が き

速中性子個人被曝線量計として広く利用されているのは、反跳陽子飛跡を記録するNTAフィルムである。このフィルムの測定には顕微鏡を用いた飛跡計数作業が必要である。しかし、飛跡像が鮮明でないため、目が疲れ易い上、計数値の個人差も考慮しなければならない。このため、NTAフィルムの測定を自動化する計画を進めている。その第1歩として飛跡の識別法の検討を行ったのでこれを報告する。

飛跡計数を自動化する試みは、現在までにいくつか報告されている^{1)~5)}。これらの試みはテレビカメラや光電子増倍管で顕微鏡像を電気信号に変換した後、アナログ信号のまま識別処理を行う方法と、さらにデジタル信号に変換してから識別処理を行う方法に大別される。前者には、2章で概観するように次のような特徴がある。すなわち、飛跡計数速度は早いが、精度は余り望めない。これと反対に、後者の方は飛跡計数速度は落ちるが、精度は良くできるという特徴がある。しかし、従来のデジタル処理は2章で概観するように固定した信号レベルで2値化したデジタル画像を処理するため、背景画像の濃淡レベルが移動すると飛跡の特徴がなくなり、飛跡の検出ができなくなる恐れがある。

本報では飛跡検出の精度が望めるデジタル画像処理のうち、背景の濃淡レベルが移動しても十分に飛跡を検出できる処理法を検討する。飛跡画像を濃淡レベルのあるデジタル画像に変換すると、飛跡画素はその周辺の背景画素と異なる濃淡レベルを持つ。この点を考慮して、飛跡線分の統計的な特徴量を局所的に計算して飛跡の線分要素を抽出する“統計的細線抽出処理法”⁶⁾を検討する。また、実際の飛跡顕微鏡写真を128レベルにデジタル化した画像で本処理法の結果を得たのでこれについても述べる。以下では、従来の飛跡検出法、本識別方式、実際の検討、まとめの順に述べる。

2. 従来の飛跡検出法

個人被曝管理用のNTAフィルムの反跳陽子飛跡を自動的に検出する方法は文献5)に整理されて紹介されている。そこではエマルジョン面の走査方式の違いで従来の方法を整理しているのに対し、ここでは飛跡の識別法の違いに焦点を合して従来の方法を概観する。

2.1 アナログ信号処理による識別方法

顕微鏡像をアナログ電気信号に変換し、その段階で飛跡の検出を行う方法で、次のようなものがある。

- ① Becker¹⁾は、テレビカメラの連続する三走査線上の電気信号に着眼して、“中央の走査線上に一定幅以上のパルスがあり、かつその前後の走査線上にはパルスがないとき、中央走査線

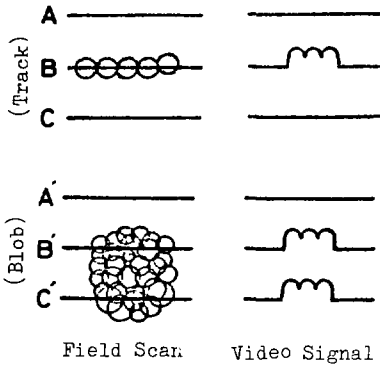


Fig.1 Track detection principles (Becker, ref.1).

上のパルスを飛跡に起因するもの”として、飛跡の識別を行っている。この方法により飛跡と Blob (銀粒子の塊り) を区別する原理を Fig. 1 に示す。飛跡は直径 10 分の数 μm の銀粒子が直線状に 3 個以上並んだ列である。この銀粒子を白丸で示すと、飛跡や Blob は図のように表わされる。Fig. 1 で Blob は走査線 B', C' にパルスを出すのに対し、飛跡は走査線 B だけにパルスを出す。従って、前記の識別方法が適用できる。

この方法はテレビ走査速度で飛跡を識別することができる反面、飛跡の方向が走査線方向から大きくずれると、飛跡に起因するパルス幅が小さくなり、飛跡検出ができなくなるという欠点がある。

② Koeppe²⁾ は、3 個の光電子増倍管の先端に、Fig. 2 に示すライトガイドを組み合わせ、

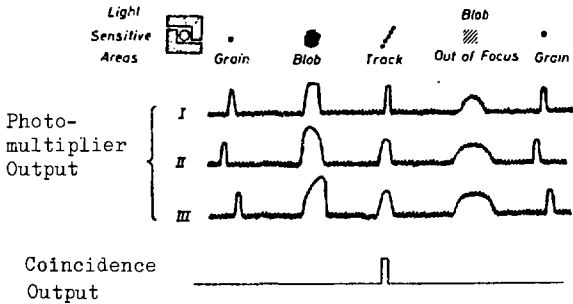


Fig.2 Track detection principles (Koeppe, ref.2).

各出力電気信号上のパルスを同時計数することにより、飛跡の識別を行っている。

Fig. 2 で飛跡は中央のライトガイド上に来たときだけいずれの出力にもパルスを出し、単なる銀粒子と区別される。他方、Blob もいずれの出力にも同時にパルスを出し得るが、この場合のパルス幅は飛跡よりも大きいことを利用して飛跡の検出が行われる。

この方法は走査方向に依存せず飛跡を検出できる反面、走査速度はテレビ走査よりも遅くなる。また、この方法は識別のための回路調整が難しい。

③ Heard³⁾ は、フィルタ上に設けた 3 スリットの通過光を 1 個の光電子増倍管で受け、“電気出力上でスリット間隔に対応した間隔で続く 3 つのパルスを飛跡に起因するもの”として、飛跡の識別を行っている。

Fig. 3 にこの例を示す。すなわち、飛跡と Blob がスリットを横切るとき、飛跡に対してはパルス幅の小さい 3 つのパルスが相続くようにする一方、Blob に対してはパルス幅は大きい 2 つのパルスしか相続かないようにする。そうして、このパルスの組合せの特徴から飛跡を検出する。

この方法は②よりも識別のための回路調整が難しく、さらに、飛跡の方向によっては飛跡

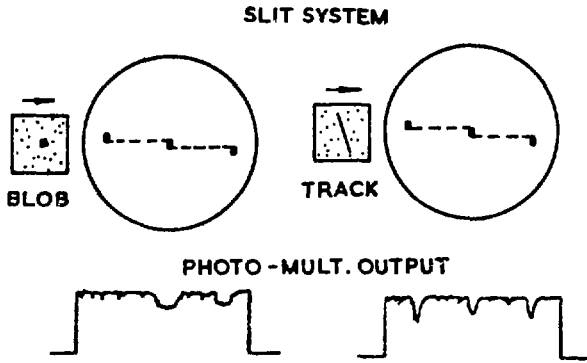


Fig.3 Track recognition principles (Heard, et al., ref.3).

の検出が行えない欠点がある。しかし、これも飛跡識別法の一つの考え方を示している。

2.2 デジタル信号処理による識別方法

顕微鏡画像をデジタル画像に変換した後、飛跡の検出を行う方法で、これはさらに2つに分けられる。すなわち、2値化画像処理と濃淡レベルを持ったデジタル画像処理である。後者の方法で個人被曝管理用の飛跡識別を行っている例はないが、前者については次のものがある。

④ Paretto and Ricci⁴⁾は、テレビカメラ信号から2値化画像を作り、この画像を三走査線一つシフトレジスタと論理回路から成る回路で次々に処理して、画像上に論理“1”の画素が直線的に連結しているか否かを調べるにより、飛跡の識別を行っている。

論理“1”の画素が直線的に連結しているか否かの判定は、Fig.4に示すように右、下、

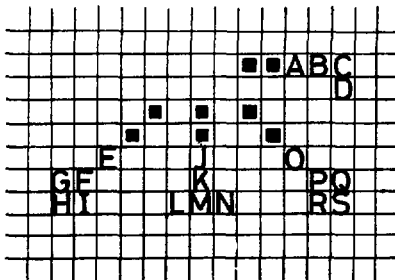


Fig.4 Continuity along fundamental directions (Peretti & Ricci, ref.4).

左下、右下の4方向で行われる。例えば、右向きの飛跡では画素A, Bの論理積が“1”のとき、画素C, Dの論理和が“1”であれば、連結と判断する。この操作を続けて、連結画素数が一定数以上であれば飛跡として判断する。その他の向きの飛跡に対しても同様である。すなわち、それぞれの方向の2つの画素の論理積が“1”のとき、左下では画素G, H, I, 真下では画素L, M, N, 右下では画素Q, R, Sの論理和が“1”であれば、連結と判断する。

この方法はデジタル処理でもハードウェアに重点を置いて行い得るので、処理速度を早くしたり、特別なプログラムも不用にできる利点がある。しかし、顕微鏡像の各点を論理“1”か“0”に変換する弁別レベルが固定されるため、背景画像に比べコントラストの弱い飛跡画像が画素“1”に変換されないことがある。また、2値化レベルの設定次第では、背景画像が画素“1”に変換されることもある。このため、この方法により飛跡を検出できなくなる場合がある。

- ⑤ 現在、各種の画像解析装置が商品として出ている。これらの大半は基本的に2値化画像処理技術を利用して、画像中の粒子や飛跡などの数、長さ、面積、その他の各々の計測を行うことを目的としている。このような装置で反跳陽子飛跡を計数することもできる。識別方法は装置ごとに設けられた基本画像処理の組み合わせにより、飛跡画素だけを論理“1”に変換するようにして行う。

反跳陽子飛跡は背景画像とのコントラストが弱いため、シェーディング補正や顕微鏡像の光むら補正を厳しく行わないと、飛跡画素だけを論理“1”に変換するのはかなり難しい。事実、核分裂片飛跡などのエッチピットのようにコントラストの十分なものに対しては有効である。また、これらの装置は各種の画像計測を目的とするため高価でもあり、個人被曝管理用として直接利用することもできない。すなわち、特別な検討が必要である。

3. 本 識 別 方 式

NTAフィルム中の飛跡は雑音の多い顕微鏡画像の中から検出しなければならず、しかもフィルムの位置によっては画像全体の濃淡レベル(明るさ)が変化する。飛跡は背景よりも相対的に濃淡レベルが高く、その形状は“細くてかつ直線的”である。従って、固定した濃淡レベルで飛跡信号を抽出する代りに、局所的に統計量を評価して“細くてかつ直線的”な飛跡信号を抽出することに重点を置いた画像処理法を検討する。

3.1 NTAフィルム中の反跳陽子飛跡

反跳陽子飛跡は幅10分の数 μm 、長さ数~数十 μm の直線的な銀粒子の列で、NTAフィルムの乳剤面に対して斜めに走っていることが多い。このため、飛跡全体は連続的に黒くなってはおらず、銀粒子と銀粒子の間に黒さの断点がある。また、倍率50くらい対物レンズを用いるため、乳剤面を斜めに走る長い飛跡では飛跡の端部が扇状にぼけ拡がる。中には、乳剤面に垂直に走る飛跡も極くわずかはある。このような飛跡はぼけた銀粒子の中央にははっきりした銀粒子が1個あるように見える。

顕微鏡の焦点を変えると、“垂直”な飛跡は、焦点の合った銀粒子がぼけ拡がると同時に、その中央に焦点の合った新たな銀粒子が現われるという現象が続く。単一の銀粒子では一度しか焦点が合わないで、この現象は“垂直”な飛跡に特有である。

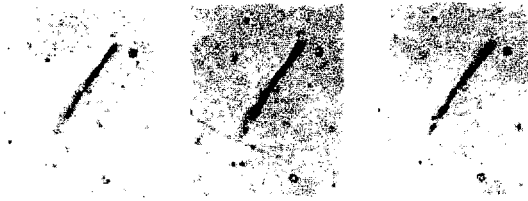


Fig.5 Examples of fanning-out appearance of recoil proton tracks.

“斜め”の飛跡は、
Fig 5 に示すように、顕微鏡の焦点を変えると、焦点の合った飛跡の位置が一端から他端へと移動する。これに対し、フィルム面の直線上のキズは焦点が全体的に合う一方、ぼけるときも全体的にぼ

ける。従って、焦点を変えた場合の飛跡端部における扇状ぼけの動きは“斜め”の飛跡に特有である。

発生頻度の少ない“垂直”な飛跡を別にすると、飛跡画像の黒い部分は“細くてかつ直線的”である。“斜め”および“垂直”な飛跡の特徴を利用するには、焦点を少なくとも3段階だけ変える必要がある。これに対して、“細くてかつ直線的”という特徴を利用するだけなら焦点を変える必要はないので、この特徴を用いた飛跡信号の抽出法を考える。“斜め”や“垂直”な飛跡の特徴を用いた飛跡信号の抽出法は、より精度の高い飛跡検出システムを作る上で重要であるけれども、後者の抽出法と比べると、ずっとその利用頻度は少ない。したがって、ここでは後者の抽出法を検討する。

3.2 統計的細線抽出処理の原理

顕微鏡画像の i 行、 j 列にある画素 (picture element) の濃淡レベル (gray level) を x_{ij} とする。この点 (i, j) の画素が、①飛跡の線分要素か否か、②そうであるならばその方向はどちらか、を決定する方法を示す。

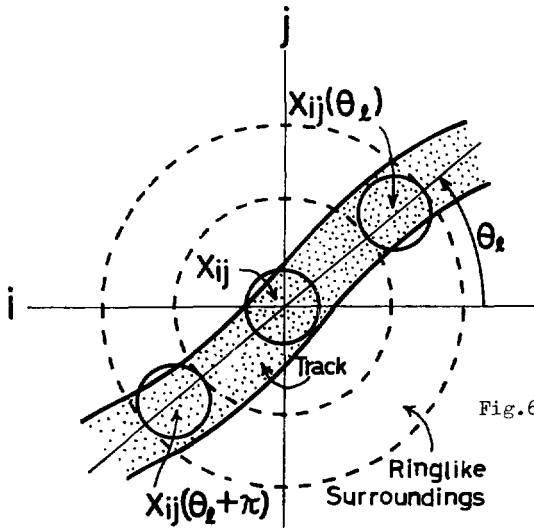


Fig.6 A principle of a method for statistically extracting thin segments.

点 (i, j) を中心に半径 ρ 、幅 $\Delta\rho$ の円環を Fig. 6 のように設定するとき、この円環は $2n$ 個の画素で埋め込まれ、幅 $\Delta\rho$ は 1 画素程度の大きさであるとする。円環上の画素が等間隔であれば、 $2n$ 個の周辺画素はいずれも中心画素に関して対称な位置にある n 個の対をなす。従って、 $2n$ 個の周辺画素の値は、

$$\theta_\ell = \pi \ell / n, (\ell = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

として、 $x_{ij}(\theta_\ell)$ 、 $x_{ij}(\theta_\ell + \pi)$ と表される。

中心画素が飛跡上にあるとき、飛跡の方向に相当する円環上の画素は飛跡上にある確率が高い。このような周辺画素の値は中心画素の値に近いことが多い。これに対して、飛跡上にある中心画素から見て、飛跡の方向に相当しない円環上の画素は飛跡上にない確率が高い。このような周辺画素の値は中心画素の値と大きく相違することが多い。従って、同一直線上にある 2 つの周辺画素の値 $x_{ij}(\theta_\ell)$ 、 $x_{ij}(\theta_\ell + \pi)$ が中心画素の値 x_{ij} とどの程度相違しているかを計算する。すなわち、この値を

$$d_\ell = |x_{ij}(\theta_\ell) - x_{ij}| + |x_{ij}(\theta_\ell + \pi) - x_{ij}| \quad (2)$$

と定義すると、飛跡の線分方向に相当する d_ℓ は小さくなる一方、これ以外の方向に対しては大きくなる傾向がある。

中心画素が飛跡上にあるときの式(2)の値 d_1, d_2, \dots, d_n を小さい順位に並べ換え、添字の番号 k を

$$d_{(1)} \leq d_{(2)} \leq \dots \leq d_{(n)} \quad (3)$$

と付ける。このとき、飛跡の線分方向にある d_ℓ は $d_{(1)}, d_{(2)}, \dots, d_{(r)}$ を占め、それ以外の方向にある d_ℓ は $d_{(r+1)}, \dots, d_{(n)}$ を占める確率が高い。ここで、 r は適当に選ばれた 1 に近い正の整数である。

中心画素が背景画像上にあり、しかもその値 x_{ij} が周辺画素の値に近いとしても、このときの d_ℓ も式(3)のような順位に並べ換えられる。この場合、 $d_{(1)}, \dots, d_{(r)}$ を占めるのは飛跡の線分方向に関連しない d_ℓ である。そこで

$$\bar{d}_t = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r d_{(k)}, \quad \bar{d}_b = \frac{1}{n-r} \sum_{k=r+1}^n d_{(k)}, \quad (4)$$

から、次のような差 d を計算する。

$$d = \bar{d}_b - \bar{d}_t \quad (5)$$

この場合の d の値は、中心画素が飛跡上にある場合に比べ、小さくなる。従って、 d の値から 2 つの場合を区別することができる。しかし、背景画像の濃淡レベルがステップ状あるいは坂状に急激に変化していると、この場合の d の値は大きくなる。

例えば、Fig. 7 に示すように背景画像の画素の値が坂状に変化しているとする。この場合、中心画素と円環を図のようにとると、坂の方向では d_ℓ が大きいのに対し、その垂直方向では d_ℓ が小さくなる。この結果、式(5)の d の値は大きくなる。

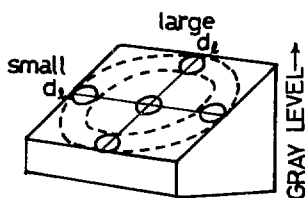


Fig. 7 An example of slanting gray level of picture elements.

Fig. 6 と 7 を比べると、 ℓ 方向にある 1 対の周辺画素の値の差 u_ℓ は前者では小さいのに対して、後者では大きくなる。すなわち、 ℓ 方向の画素値の勾配、

$$u_\ell = |x_{ij}(\theta_\ell) - x_{ij}(\theta_\ell + \pi)| \quad (6)$$

を計算し、 u_ℓ を大きい順位に並べ換え、添字の番号 k を、

$$u_{\langle 1 \rangle} \geq u_{\langle 2 \rangle} \geq \dots \geq u_{\langle n \rangle} \quad (7)$$

と付ける。このとき、Fig. 7 に示す坂の方向の u_ℓ

は $u_{\langle 1 \rangle}, u_{\langle 2 \rangle}, \dots, u_{\langle p \rangle}$ を占める確率が高い。

ここで、 p は適当に選ばれた 1 に近い正の整数

である。これに対して、Fig. 6 では ℓ 方向にある 1 対の周辺画素はいずれも飛跡上にあるか、または背景画像上にあることが多いので、この場合の $u_{\langle 1 \rangle}, u_{\langle 2 \rangle}, \dots, u_{\langle p \rangle}$ を占める u_ℓ は Fig. 7 の場合に比べ小さい。そこで、最大勾配方向の勾配 u を

$$u = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p u_{\langle k \rangle} \quad (8)$$

とすると、この値は Fig. 6 では小さいが、Fig. 7 では大きい。そこで、式(5)の d からこの勾配 u を引いた値

$$y = d - u \quad (9)$$

を計算すると、Fig. 6 の場合に比べ Fig. 7 の場合の y の値は小さくなる。

このように坂状に画素値の変化した背景画像上に中心画素がある場合でも、式(9)の y を用いれば、飛跡上に中心画素がある場合と区別できる。ステップ状に画素値が変化した背景画像についても同様である。

結局、適当な定数 δ を定めると、飛跡の線分要素の抽出は、

$$\left. \begin{array}{l} y \geq \delta \text{ ならば、線分要素} \\ y < \delta \text{ ならば、背景要素} \end{array} \right\} \quad (10)$$

と決定することにより行うことができる。このときの線分要素の方向は $d_{(1)}, d_{(2)}, \dots, d_{(r)}$ に対応する ℓ 方向から決定する。

飛跡自身を検出するには、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ほぼ同じ方向であるか否かを調べればよい。

3.3 統計的細線抽出処理の具体的手法

デジタル画像上で Fig. 6 のような円環をどのように設定するか、または方向の数 n や正の整数 r, p などをどのように定めるとかという問題がある。これらの問題を実際にデジタル画像の処理を行う立場から検討する。

3.3.1 デジタル画像上での“円環”の取り方

デジタル画像上では Fig. 6 に示す円環を“口の字”形に取ると便利である。すなわち, Fig. 8 の画素 0 を中心とすると 3×3 , 5×5 , 7×7 , 9×9 画素のそれぞれの最外周がこれに相当する。これらを今後, 例えば 5×5 画素の円環と呼ぶことにする。

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

Fig.8 Four square surroundings's of element 0 and numbers of its directions on each surroundings.

円環の大きさは飛跡幅に応じて決められる。例えば, 飛跡幅が 3 画素分以上になるようにデジタル画像化されると, 5×5 画素の円環では大部分の周辺画素や中心画素が飛跡上に同時にあることになるため, このような場合は線分要素を抽出することができない。線分要素を抽出するには, もっと大きな円環を用いて処理するか, あるいは飛跡幅をもっと小さく

くする必要がある。

飛跡幅を太くしたまま, 大きな円環を用いて処理すると, 線分要素として抽出される飛跡幅方向の画素数もそれだけ多くなる。このように飛跡幅方向に幾重も線分要素を抽出するのは有効ではないばかりか, 飛跡検出のために行う線分要素のグルーピング化の上でも都合が悪い。

反対に, 飛跡幅を 1 画素分以下に細くし過ぎると, 各画素に投影される飛跡部分の割合が小さくなる。このため, 飛跡画素の値は背景画素の値と変わらなくなってしまう。とくに反跡陽子飛跡はコントラストが弱いので, 飛跡部分が少なくとも 1 画素全体を占めるようにデジタル化されることが望ましい。

以上の点から, 飛跡幅は約 2 画素分とする。これより円環としては 5×5 画素の最外周がよい。これには 8 対の周辺画素があるので, $n=8$ とする。8 方向の方位番号 ℓ はその方位にある周辺画素の座標を計算する都合上, Fig. 8 のように取る。 3×3 , 7×7 , 9×9 画素の円環での方位番号 ℓ は後で行う検討のために図のように取る。

3.3.2 d_ℓ , u_ℓ の計算の仕方

Fig. 8 の中心画素の値を x_0 , ℓ 方向にある対の周辺画素の値を x_ℓ , $x_{-\ell}$ とすると, 式(2)の d_ℓ , 式(6)の u_ℓ は,

$$\left. \begin{aligned} d_\ell &= |x_\ell - x_0| + |x_{-\ell} - x_0| \\ u_\ell &= |x_\ell - x_{-\ell}| \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

具体的には、平滑化サイズをFig. 9に示すように、中心画素0を含め右下に2×2画素、または画素0を中心に3×3画素とする。各画素の値をFig. 9のようにとると、画素0の平滑化した値 \bar{x}_0 は次のように計算される。

x_0	x_0^1
x_0^2	x_0^3

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_0 &= \frac{1}{4} (x_0 + \sum_{i=1}^3 x_0^i) \\ \bar{x}_0 &= \frac{1}{9} (x_0 + \sum_{i=1}^8 x_0^i) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

x_0^3	x_0^2	x_0^1
x_0^4	x_0	x_0^8
x_0^5	x_0^6	x_0^7

画素0の周辺画素 ℓ , $-\ell$ に対する平滑化も同じように行うものとする。周辺画素 ℓ , $-\ell$ の平滑化した値をそれぞれ \bar{x}_ℓ , $\bar{x}_{-\ell}$ とする。このとき、平滑化した画像に対する d_ℓ , u_ℓ は次のように計算される。

$$\left. \begin{aligned} d_\ell &= | \bar{x}_\ell - \bar{x}_0 | + | \bar{x}_{-\ell} - \bar{x}_0 | \\ u_\ell &= | \bar{x}_\ell - \bar{x}_{-\ell} | \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Fig.9 Two-by-two and three-by-three neighborhoods of element 0 for smoothing a picture.

3.3.3 r の決定

式(4)の平均 \bar{d}_1 を計算するのに用いる標本数 r を 1, 2 のいずれにするかを次のように決定する。

d_ℓ , ($\ell = 1, 2, \dots, n$) のうち背景方向の d_ℓ は正規分布に従うものとする。そして、式(3)のうち、 $d_{(1)}$ を飛跡方向、 $d_{(2)}$, $d_{(3)}$, \dots , $d_{(8)}$ を背景方向と仮定して、 $d_{(2)}$ が有意に背景方向の平均値から外れているか否かを検出する。

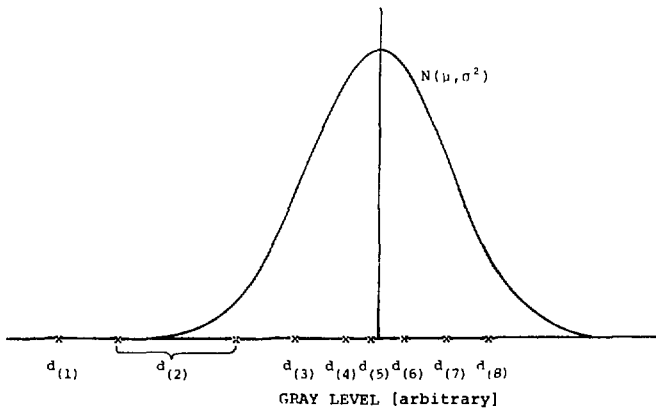


Fig.10 An example of order statistics taken from normal distribution.

仮定によると、Fig. 10に示すように背景方向の $d_{(6)}$ は平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ からの順序統計量である。従って、統計数値表から標本数を7として

$$E[d_{(6)}] = \mu + 1.3522\sigma, \quad D[d_{(6)}] = 0.6260\sigma,$$

$$E[\bar{d}] = \mu, \quad D[\bar{d}] = 0.4654\sigma,$$

従って、

$$E[d_{(6)} - \bar{d}] = 1.3522\sigma, \quad D[d_{(6)} - \bar{d}] = 0.7801\sigma \quad (15)$$

となる。ここで、 $E[x]$ 、 $D[x]$ はそれぞれ x の期待値と標準偏差を表わす。また、 \bar{d} は次のように計算する。

$$\bar{d} = (d_{(4)} + d_{(5)} + d_{(6)}) / 3 \quad (16)$$

他方、仮定から $\bar{d} - d_{(2)}$ の期待値と標準偏差は式(15)に一致する。そこで、危険率を α として、

$$\text{Prob} \{ \bar{d} - d_{(2)} \geq \lambda (d_{(6)} - \bar{d}) \} = \alpha \quad (17)$$

を満たす λ を定める。このとき、 d は、

$$\left. \begin{aligned} \bar{d} - d_{(2)} < \lambda (d_{(6)} - \bar{d}) & \text{ ならば背景方向で } r=1 \\ \bar{d} - d_{(2)} \geq \lambda (d_{(6)} - \bar{d}) & \text{ ならば飛跡方向で } r=2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

と判定する。

式(17)で5%以下の危険率にするには $\lambda = 1.946$ であるが、これを切り上げて、 $\lambda = 2.0$ とする。

3.3.4 u の計算の仕方

式(8)の平均 u を計算するのに用いる標本数 p は1として、次の点を考慮するようにする。

飛跡部分の濃淡レベルは変動が大きければかりではなく、ところどころに不連続な断点がある。このため、勾配が最大になる方向は飛跡方向に一致することがある。これを避けるため、次のようにする。

$r=1$ のとき、 $d_{(1)}$ の方向 $u_{<1>}$ の方向が同じならば $u = u_{<2>}$ とする。 $r=2$ のとき、 $d_{(1)}$ 、 $d_{(2)}$ の方向が $u_{<1>} u_{<2>}$ の方向と同じならば $u = u_{<3>}$ とする。すなわち

$$u = \begin{cases} u_{<1>}, & u_{<1>} \text{ 背景方向} \\ u_{<2>}, & u_{<1>} \text{ 飛跡方向で、かつ } u_{<2>} \text{ 背景方向} \\ u_{<3>}, & r=2 \text{ で、かつ } u_{<1>}, u_{<2>} \text{ 飛跡方向} \end{cases} \quad (19)$$

4. 実際の検討

NTAフィルムの顕微鏡写真からデジタル画像を作成し、この画像データを用いて統計的細線抽出処理の効果を実際に検討する。

4.1 デジタル画像の作成

NTAフィルムを顕微鏡（対物×45，接眼×10）で拡大して35mmフィルムに撮り、この密着ポジフィルムを作る。このポジフィルムを Fig. 11 に示す画像情報処理用簡易入力装置（東

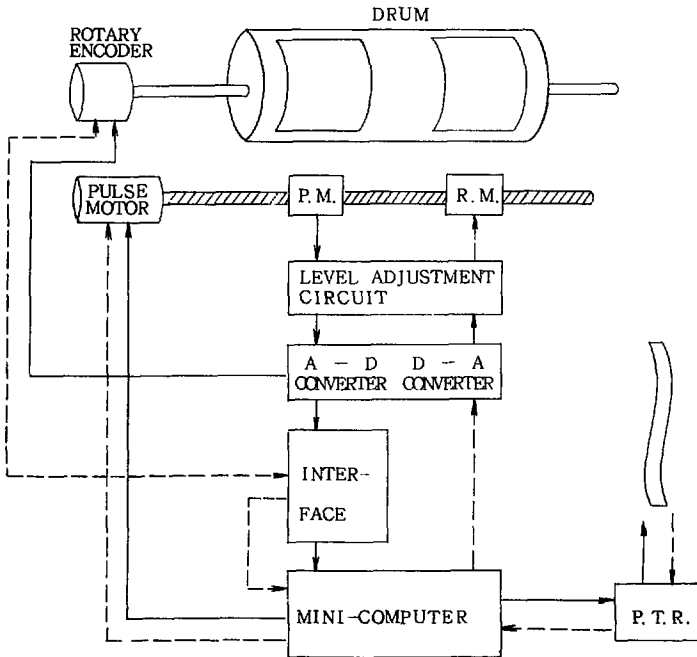


Fig.11 Block diagram of simple input/output unit for a picture processing (Onoue, et al., ref.8).

京大学生産技術研究所高木研究室所属)で測定して、デジタル画像データにする。測定条件はフィルムを巻き付けたドラムの回転方向とその垂直方向にいずれも13本/mmの分解能で反射光を光電子増倍管(PM)で測定する。この電気出力を7ビットにデジタル化して紙テープで出力する。紙テープデータは磁気テープまたは磁気ディスクに書き込み、画像データファイルとする。

Fig. 12 に上記の顕微鏡写真を示す。の中には5個の飛跡があり、それぞれに番号が付け



Fig.12 A microscope picture of recoil proton tracks for a digital picture processing.

である。楕円や円形の粒は銀粒子やその他のゴミである。

これに対するデジタル画像を画素の値が40～70は“・”，70～127は“*”としてプロットした例をFig. 13に示す。このデジタル画像の大きさは364×323画素である。図に示された格子の中には40×40画素が入り、この大きさをNTAフィルム面に換算すると14.9×14.9 μm に相当する。図中の数字は飛跡を指し、アルファベットは四角で囲った特定の背景部分を指す。図の下側の黒い部分は密着写真の黒い縁である。この部分は統計的細線抽出処理で境界線を線分要素として抽出しないことを確めるのに用いる。

4.2 画素値レベルの検討

画像の背景部分と飛跡部分に相当する画素の値がそれぞれどのような統計分布をするかを検討する。

5個の飛跡の内、大半の飛跡は正規確率紙上での直線性がいいので、飛跡部分の画素の値は正規分布をすると考えてよい。ただし、分布の両端では直線から外れる場合もある。

平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布を $N(\mu, \sigma^2)$ と表わすと、各飛跡の分布はFig. 13の番号順にそれぞれ $N(50, 10^2)$ 、 $N(55, 10^2)$ 、 $N(64, 10^2)$ 、 $N(72, 16^2)$ 、 $N(74, 16^2)$ となる。NTAフィルム面に対して比較的平行に走っている飛跡1, 2, 3はいずれも標準偏差10である。これに対して、幾分斜めに傾いて走っている飛跡4, 5はより大きな標準偏差で16となっている。飛跡画素の平均値は50～74の範囲にある。

Fig. 13に示された特定の背景部分A, B, C, Dについてもそれぞれ確率紙上での直線性がいいので、背景部分の画素の値も局所的には正規分布をすると考えてよい。ただし、背景部分Cは画素の値が大きくなると直線から外れる。

背景部分の分布はFig. 13のアルファベット順にそれぞれ $N(30, 2^2)$ 、 $N(36, 2^2)$ 、 $N(42, 3^2)$ 、 $N(49, 3^2)$ となる。背景部分A, Bは明るい部分に、C, Dは暗い部分に相当する。これらの標準偏差は飛跡の場合に比べ5分の1程度である。しかし、Fig. 13の最上段にある格子全体に及ぶような大きな背景部分に対する標準偏差は5と幾分か大きくなる。

Fig. 13に示すデジタル画像のプロット例は明るい方の背景画素をプロットしないように画素値レベルを40以上に設定してある。これに対して、暗い背景画素も出来るだけプロットしないようにする一方、濃さの一番薄い飛跡1は出来るだけプロットするようにして、画素値レベルを50以上に設定しプロットするとFig. 14'のようになる。

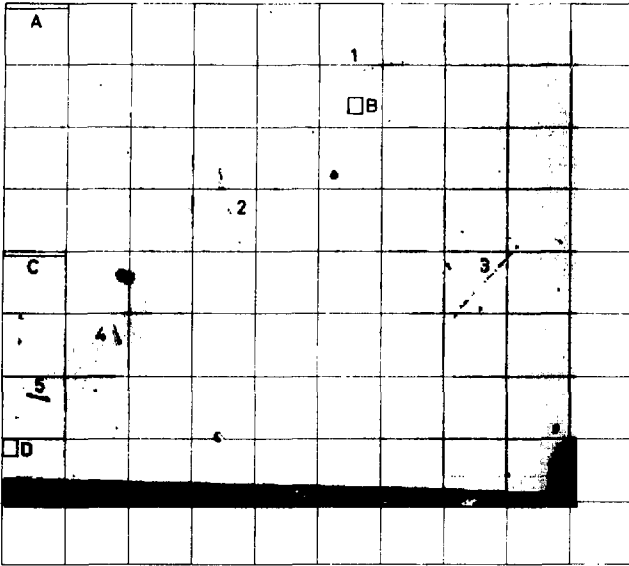


Fig.13 A digitized picture of the picture shown in Fig.12. '.' and '*' represent gray level between 40 and 70 and greater than 70, respectively.

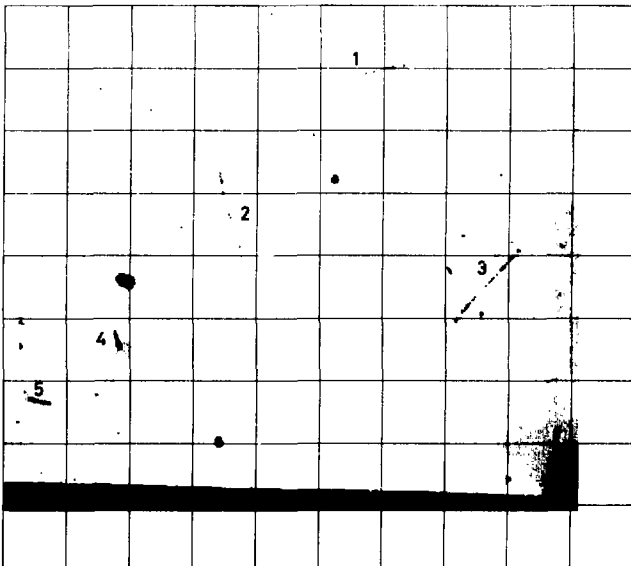


Fig.14 A digitized picture of the picture shown in Fig.12. '.' and '*' represent gray level between 50 and 70 and greater than 70, respectively.

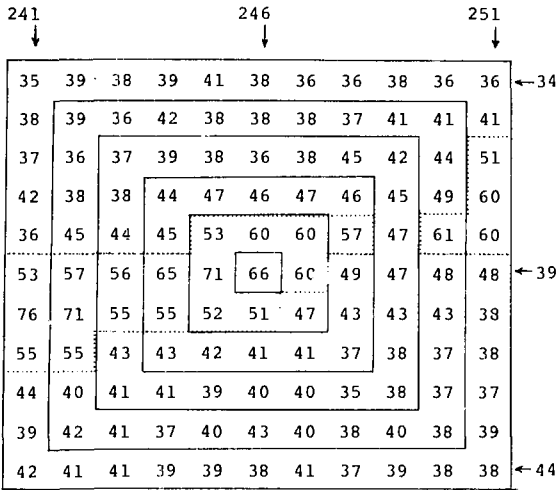


Fig.15 Gray level of element (39,246) of track 1 and its eleven-by-eleven neighborhood.

Fig. 14 で飛跡 1, 2, 3 は細い線状としてプロットされているのに対して、飛跡 4, 5 はそのまわりの背景画素の値が高いため線状としてプロットされていない。従って、画素値レベル 50 以上を黒くプロットした画像、すなわち 2 値化画像上で飛跡 4, 5 は線状にはならない。

この 2 つの飛跡が 2 値化画像上で線状となるようにするには画素値レベル 50 をさらに高い値に設定する必要がある。しかし、このレベルを上げると飛跡 1 や 2 が部分的にプロットされず、だんだん飛々になってしまう。

このように、画像の部分により飛跡や背景の平均画素値に偏りがあると、画素値レベルで 2 値化した画像からはすべての飛跡を十分に検出することはできない。

4.3 円環上にある画素値の頻度分布

中心画素を飛跡上にとり、Fig. 8 に示す 4 種類の半径の円環上にある画素値の頻度分布を調べる。さらに、Fig. 9 に示す平滑化処理後の円環上の画素値分布についても検討を行う。

Fig. 15 に示すように飛跡 1 上の点 (39, 246) に中心画素をとると、飛跡の方向は 7, 8 となる。この点を中心とする円環上の画素値の頻度分布を Fig. 16 に示す。

この図で縦棒、右下りおよび左下りの斜め棒はそれぞれ 1×1, 2×2, 3×3 画素で平滑化した画素を表す。太い棒線は飛跡方向、細い棒線はそれ以外の方向を表す。円環の半径が大きいものでは Fig. 8 に示すように方位番号の付いていないものがある。これらのうち、飛跡方向に相当するものは太い破線状の棒線で示し、それ以外の方向のものは細い棒線で示してある。

Fig 16 の 5×5 画素の円環で縦棒を見ると、太い棒線はいずれもすべての細い棒線よりも画素値が大きくなっている。すなわち、飛跡方向では中心画素の値 66 に近く、それ以外では値が小さい。 2×2 画素で平滑化処理した場合も、右下りの棒線で示すように、飛跡方向では中心画素の値 61.5 に近く。それ以外では値が小さい。 3×3 画素で平滑化処理した場合も中心画素の値が 58 であるので同じ傾向がある。ただ、平滑化処理により画素値の範囲は小さくなると同時に、平滑化する大きさを円環の半径に近づけると飛跡方向とそれ以外の方向との画素値の分離性は悪くなる。

5×5 画素以外の円環についても、飛跡方向にある円環上の画素の値は大きくて中心画素の値に近く、それ以外の方向では値が小さくて中心画素の値から離れているという傾向がある。 Fig. 16 から、この傾向は円環の半径が大きいくほど明白である。

中心画素を別の飛跡部分にとっても円環上の画素値の頻度分布は似た傾向を持つ。

4.4 円環サイズと平滑化処理による d 値と y 値

Fig. 15 に示す飛跡部分を例にとり、円環の半径の大きさや平滑化処理などが線分要素らしさを表わす d 値や y 値にどのような効果を与えるかを検討する。

式(1)または(2)から d_L を計算すると、飛跡方向の d_L は小さく、それ以外の方向の d_L は大きくなる事が確かめられる。この程度は d 値の大きさから判断する。

Fig. 15 の例では、飛跡方向は方位番号 7, 8 である。従って、飛跡方向の標本数 r は 2 となる。

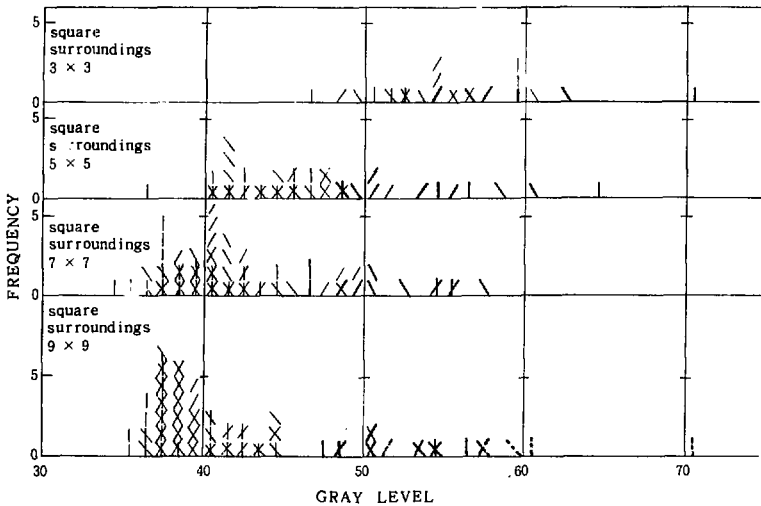


Fig.16 Frequency distributions of gray level of elements on each square surroundings of element (39,246) shown in Fig.15. Left and right diagonals represent smoothing data using two-by-two and three-by-three neighborhood's, respectively. Bold bars represent elements of the same direction as the track 1.

d の飛跡方向の平均 \bar{d}_t とそれ以外の方向の平均 \bar{d}_b から $d = \bar{d}_b - \bar{d}_t$ を計算し、これらを Table 1 に示す。ただし、 3×3 画素の円環では、方位番号 1, 3, 5, 7 のうち、7 を飛跡方向として計算する。また、 7×7 や 9×9 画素の円環では Fig. 8 に示すように方位番号のない画素がある。これらの画素も加えて計算した d 値を Table 1 の () 内に示す。

Table 1 で、 d 値は円環の半径が大きいくほど大きくなっている。このことは、Fig. 16 に示す円環上の画素値分布に見られたように、大きな円環ほど飛跡方向の画素値はそれ以外の方向の画素値よりも中心画素の値に近いという傾向に対応している。

平滑化処理により d 値は全体的に小さくなる傾向が見られる。この傾向は小さな円環ほど顕著であるのに対して、大きな円環ではそれほどの変化は見られない。また、大きな円環で、 1×1 と 2×2 画素の平滑化処理による d 値を比較すると、Table 1 に見られるように後者の d 値の方が大きくなっている。これは Fig. 15 に点線で示すように飛跡部分に断点があるためである。

Table 1 で 7×7 と 9×9 画素の円環の行を見ると、() 中の数字はそのすぐ上の数字とほとんど変わらない。このことは d 値を計算するのに円環上のすべての画素を用いた場合と 8 方向だけの画素を用いた場合でその値にそれほど差はないことを示している。ただ、 9×9 画素の円環ではわずかの差が見られ、この差は平滑化処理により小さくなっている。

式(11)または(12)から勾配 u_g を計算し、式(13)からこの最大勾配 u を求め、さらに $y = d - u$ を計

Table 1 The value d for four square surroundings's of element (39,246).

SMOOTHING SIZE RING SIZE	1 x 1	2 x 2	3 x 3
	3 x 3	13	9
5 x 5	26	21	14
7 x 7	23 (23)	25 (24)	11 (10)
9 x 9	26 (31)	28 (31)	25 (25)

算し、これらを Table 2 に示す。この表で () 中の数字は円環上のすべての画素から計算した y 値を示す。

Table 2 The value y for four square surroundings's of element (39,246).

SMOOTHING SIZE RING SIZE	1 x 1	2 x 2	3 x 3
3 x 3	4	2	-2
5 x 5	19	18	10
7 x 7	19 (19)	22 (20)	6 (5)
9 x 9	21 (26)	25 (27)	21 (19)

Table 2を見ると、線分要素の特徴量を表わす y 値は円環の半径が大きいかほど大きい。また、平滑化処理のサイズが大きいかほど y 値は小さいという傾向も見られる。これらの傾向はTable 1で見た d 値の傾向と似ている。さらに、()中に示された y 値はそのすぐ上に示される y 値と大差ないので、 d 値の場合と同様に大きな円環では8方向にある画素だけから y 値を計算すれば十分である。とくに、平滑化処理のある場合の両者の差はごくわずかである。

4.5 円環サイズの選択

統計的細線抽出処理により線分要素として抽出できる飛跡上の範囲は、飛跡端部から円環の半径に相当する分だけ内側の部分となる。平滑化処理を行う場合にはこのサイズ分だけ中心画素をさらに内側に取らなければならない。従って、大きな円環で統計的細線抽出処理を行うと、それだけ長い飛跡しか検出できなくなる。このため円環のサイズは小さい方がよい。

Table 2で線分要素の特徴量である y 値を見ると、 5×5 画素の円環で平滑化処理が 2×2 画素までの y 値は、 7×7 や 9×9 画素の円環の y 値と比べてそれ程の差は見られない。そこで、これと同じ条件で飛跡1全体にわたり y 値を計算して見る。この結果を、 $y \geq 0$ となる飛跡部分の画素について示すとFig. 17のようになる。この図で太い実線の枠は画素値レベル45以上の部分を表わす。

Fig. 17の上の枠内に示された y 値は右下の 2×2 画素で平滑化しているため、線分要素として抽出される画素はすべて左上に片寄っている。 1×1 や 3×3 画素平滑ではこのようなことは起らない。飛跡1の向きでは右上の 2×2 画素で平滑化するとこの片寄りも小さくなる。従って、Fig. 16やTable 1, 2では右上の 2×2 画素平滑とした。このため、点(39, 246)の画素の y 値はTable 2とFig. 17で一致しよい。

飛跡検出の観点からすると、前述の片寄りよりも線分要素の連続性の方が重要である。従って、 2×2 画素の取り方は4通りあるが、これを右下に取っても不都合を生じない。

Fig. 17で抽出された線分要素の連続性を検討する。図の下の枠内に計算された線分要素の方向が示されている。これらは2つの例外を除いて7か8の方向にある。線分要素を抽出する閾値 δ を4として、図の上の枠内で $y \geq 4$ の画素を見ると、ところどころに不連続部分がある。この最大の不連続幅は4画素分で、これをNTAフィルム上の長さに換算すると約 $1.5 \mu\text{m}$ である。従って、この程度の不連続幅は十分に連続化できる。

7×7 や 9×9 画素の円環の方が実際の解析結果では不連続箇所も少なく、その不連続幅も小さい。しかし、これより半径の小さい 5×5 画素の円環でも十分に飛跡1全体を連続化できるので、この円環サイズで十分である。

5×5 画素の円環で飛跡1全体を抽出するのに、実際の解析結果では、 1×1 や 3×3 画素平滑よりも 2×2 画素平滑の方が線分要素の連続性は優れている。

4.6 顕微鏡写真全体の統計的細線抽出処理

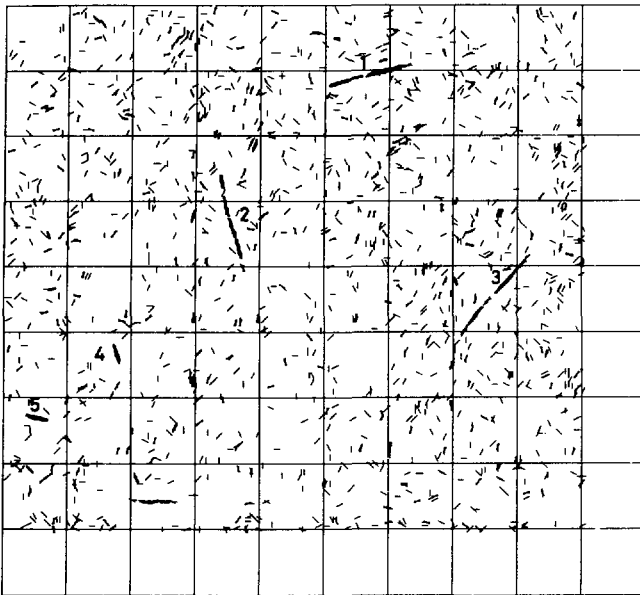
Fig. 12に示す写真のデジタル画像全体にわたり、 5×5 画素の円環で 2×2 画素の平滑化処理を含む統計的細線抽出処理を行い、この結果の検討を行う。

Fig. 18に $y \geq 1$ を線分要素として抽出した結果を示す。これは線分要素の方向にある周辺画素を線分で結ぶようにプロットしてある。その線分の太さも y 値により、 $y \geq 5$ は太く、それ未満は細く示してある。

Fig. 18で飛跡1～5に相当する部分で抽出された線分要素はそれぞれほぼ同じような方向を向き、かつ連続的である。これに対して、背景部分で抽出された線分要素は一般に様々な方向を向き、かつ孤立的である。ただし、Fig. 18の8行、3列の格子内に飛跡に似た抽出結果が見られる。これはFig. 13または14に見られる密着写真の黒い緑の境界部分に相当している。

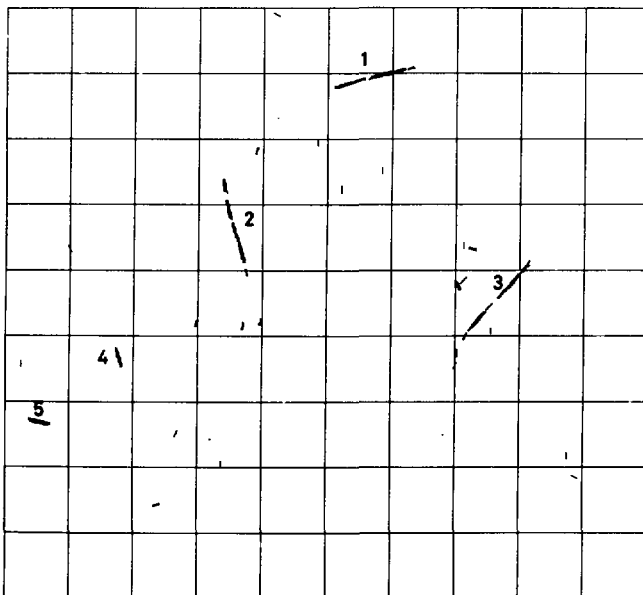
線分要素の特徴量 y に対する閾値レベル δ を大きくすると、背景部分で抽出される線分要素の数はだんだん少なくなる。 $\delta = 4$ とすると、Fig. 19に示すように、この数は極めて少なくなる。Fig. 18で見られた黒い緑の境界部分の飛跡に似た抽出結果もFig. 19では除去されている。これに対して、各飛跡部分で抽出される線分要素を比較すると、Fig. 18と19でほとんど同じである。

$\delta = 4$ とすると、背景部分で抽出される線分要素は孤立的であるのに対して、飛跡部分で抽出される線分要素は相当の長さにわたり連続的である。従って、統計的細線抽出処理を行うと、飛跡の検出が簡単になる。



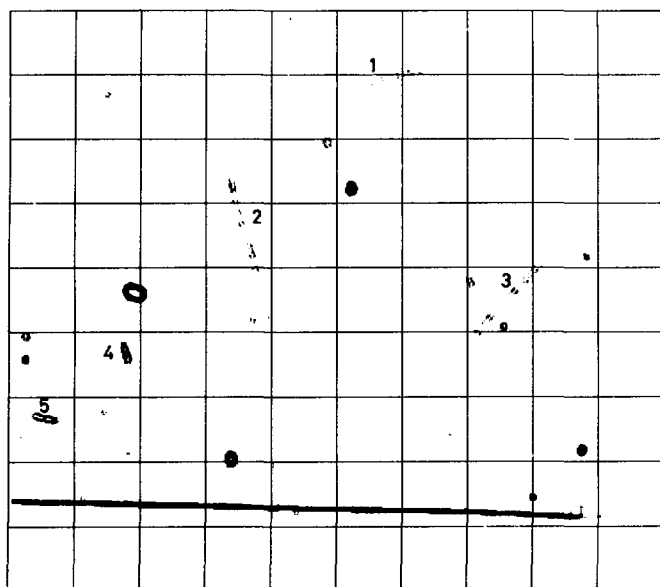
MODE 9
 SMTH 2X2
 FLTR 5X5
 DRCT 8
 YA ≥ 0.0
 YAH ≥ 1.0
 COMMENT

Fig.18 Results of thin segments extracted by the present method.
 Each segment has the value of y equal to or greater than 1.



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

Fig.19 Results of thin segments extracted by the present method.
 Each segment has the value of y equal to or greater than 4.



Rosenfeld's sharpening

$$z = \frac{1}{3} \sqrt{\{(A+B+C)-(G+H+I)\}^2 + \{(A+D+G)-(C+F+I)\}^2}$$

A	B	C
D	E	F
G	H	I

Fig.20 Results of a sharpened picture (cf. ref.9).

4.7 Rosenfeldの微分処理との比較

デジタル画像処理で広く利用されている2次元微分処理⁹⁾と統計的細線抽出処理の結果を比較し、飛跡検出上の長所、短所を検討する。

Rosenfeldの微分処理はFig. 8の中心画素の微分値を z とすると、 3×3 画素の周辺画素の値 x_i を用いて次のように z を計算する。すなわち、

$$z = \frac{1}{3} \sqrt{\{(x_1 + x_3 + x_5) - (x_{-1} + x_{-3} + x_{-5})\}^2 + \{(x_5 + x_7 + x_{-1}) - (x_1 + x_{-7} + x_{-5})\}^2}$$

両処理法を比較するため、各周辺画素の値は x_i の代りに右下 2×2 画素の平均値 \bar{x}_i を用いる。このような条件でFig. 12の写真のデジタル画像を微分処理した結果をFig. 20に示す。これは画素値が $40 \leq z < 70$ を“・”， $70 \leq z$ を“*”としてプロットしてある。

Fig. 20で飛跡1の部分を見ると上下に2本の線が緑として抽出されている。これは飛跡の両側に境界があるためである。他の飛跡2～5にも同じ傾向がある。ドーナツ状の抽出結果もいくつか見られる。これらは銀粒子かあるいはその魂りである。また、図の下の部分に見られる太い線状の抽出結果は、密着写真の黒い緑部分の境界線に相当する。

Fig. 19と20を比較すると、前者の方は飛跡部分だけを主に抽出しているのに対して、後者の方は飛跡部分以外のものも相当量抽出してしまうという傾向がある。

処理方法としては微分処理の方が簡単で処理速度も早い。しかし、飛跡にはところどころに不連続な部分があるため、線分要素の方向も計算した方が連続化し易い。

このような点から、飛跡を検出する前処理としては、Rosenfeldの微分処理よりも統計的細線抽出処理の方が適している。

5. あとがき

NTAフィルムの測定を自動化する第1歩として、デジタル化された飛跡画像から飛跡線分要素だけを主に抽出する方法を検討した。このような方法として、飛跡画素をそのまわりの飛跡画素や背景画素と比較することにより、濃淡レベルの関係を統計的に調べて行く“統計的細線抽出処理”の原理や具体的方法を示した。NTAフィルムの顕微鏡写真から実際に作った濃淡レベル127段階、大きさ 364×323 画素のデジタル画像を本処理法で処理した結果も示した。また、同じ画像データを用いて、利用の広いRosenfeldの微分処理を行い、両者の結果を比較した。

従来の飛跡識別方法と比べると、本方式は局所的に周辺の画素を含めながら各画素が飛跡の線分要素であるか否かを判定するため、濃淡レベルの移動があっても飛跡部分の画素をより確実に抽出できることが示された。

統計的細線抽出処理で計算される線分要素の特徴量 γ は周辺領域として採用する円環の大きさが飛跡幅に比べ十分に大きくないと小さくなる。しかし、円環を大きく取り過ぎると、短い飛跡が検出できなくなるので、 5×5 画素の最外周を円環として採用すればよいことが知られ

た。また、画像雑音を減らすための平滑化処理を行うと、平滑化サイズが大きいほど特徴量 Y は小さくなる。このため、平滑化サイズは 2×2 画素がよいことが知られた。

Rosenfeldの微分処理と比較すると、本処理法は主に飛跡部分の画素だけを抽出するのに対して、微分処理では銀粒子の塊りや、明るさがステップ状に変化する部分も抽出してしまうという結果が出た。したがって、飛跡画素の抽出には統計的細線抽出処理の方が適していることが知られた。

今後の問題としては、①統計的細線抽出処理をさらに単純化し、処理速度を上げること、②抽出された線分要素による飛跡の合成とその結果に基づく飛跡の検出を行うプログラムの開発③実際のNTAフィルムを自動測定する装置の開発、④NTAフィルムをオンライン測定処理するシステムプログラムの開発、などがある。このうち①～③まではすでに実施しているので、稿を改めて報告する。

謝 辞

画像のデジタル化に際し御協力下さいました東京大学生産技術研究所の尾上守夫教授、高木幹雄助教授および高木研究室の皆様へ感謝の意を表します。

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へ感謝致します。なお、元線量計測課長・立田初巳博士には本研究を始めるにあたり御指導を頂きましたことを感謝致します。

参 考 文 献

- 1) S. Becker and J. B. Franceschini : IRE National Convention Record, Pt. 9, p46-48(1957), or S. Becker : Health Phys., Vol. 4, p161-171(1960)。
- 2) P. Koepppe : Dissertation D83, T. U. Berlin(1961), A. Narath and P. Koepppe : " Proc. of the Symposium on Neutron Detection , Dosimetry and Standardisation " , held by IAEA, Harwell England, Vol. II, p259-268 (1963)。
- 3) M. J. Heard : AERE-M1371(1964), or G. H. Moss and J. B. Rae : AERE-R5876(1968)。
- 4) C. Paretto and A. Ricci : Nucl. Instrum. Methods , 122, p389-397 (1974)。
- 5) H. Kiefer and R. Maushart : " Radiation Protection Measurement " , translated by R. Friese, Pergamon Press, Oxford , p155-157(1972)。
- 6) 熊沢 蕃, H. Koch, 沼宮内弼雄 : " 反跳陽子飛跡に対する統計的細線抽出 " , 昭50信学全大, 1213。
- 7) 山内二郎編 : " 統計数值表, JSA-1972 " , 日本規格協会, 東京(1972)。
- 8) 尾上守夫, 高木幹雄, 増本武敏, 浜野巨男 : 東京大学生産技術研究所電気談話会報告, Vol. 21, No. 26, (1971)。
- 9) A. Rosenfeld : " Picture Processing by Computer " , Academic Press , New York (1969)。