

電子計算機による多次元画像情報処理について

Multi-dimensional Image Processing by Computer

尾上守夫* 高木幹雄*

Morio ONOE and Mikio TAKAGI

計算機により画像を処理して、画質の向上、計測、バタン認識などを行なう画像情報処理について、その手法と応用分野、入出力装置を中心としたハードウェア、医学関係を中心とした実例について紹介した。

1. はじめに

“百聞は一見にしかず”といわれるよう画像がもつ情報量は非常に豊富であり、また眼を介して人間に情報を伝達する速度も非常に早い。テレビがラジオを圧倒し、そして恐らくは漫画が小説よりも好まれてくるやうであろう。

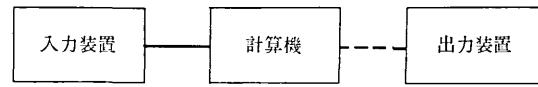
キャビニ程度の黑白写真は1,000点×1,000点位の画素の集まりと考えてよく、各画素は64あるいは128レベルの階調をもっている。したがってその最大情報量は通常の計算機の高速記憶容量を軽くこしてしまう。もちろん人間が画像から得ようとする情報はごく限られたものであって、ありある情報の洪水の中から必要とする情報をいかに能率よくとりだすかが画像情報処理の課題であろう。

すでに雑音やレンズのひずみの除去、コントラストの改善などによる画質の向上、画像伝送の際の帯域圧縮、バタン認識など広い分野で活発な研究が行なわれている。

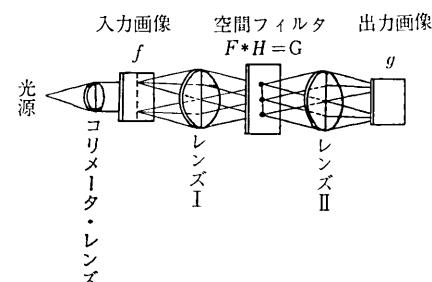
なおここで考えている画像は写真のように静止した2次元画像のみならず、テレビのように時間軸が加わったもの、ホログラムのように空間軸が3次元になったもの、あるいはカラーのように色度座標軸が加わったものもふくまれるので多次元画像情報処理とよぶことにする。

画像情報処理の方式は大別して図1に示すように計算機によるデジタル方式と光学方式とにわけることができる。前者は画像を細い画素の集合と考えて、各画素の濃淡、色度あるいはその時間変化などをデジタル信号に直して計算機に読みこむための入力装置とそれを処理する計算機とからなっている。さらに多くの場合、処理した結果も画像として表示する出力装置が必要である。これに対して光学方式はいろいろな形式のものがあるが、レンズを介して画像のフーリエ変換が簡単にできることを利用したものが多い。図では簡単な空間フィルタ処理を行なう系を示してある。

入力の2次元画像 $f(x, y)$ 、たとえば写真のスライドを一様な光で照らすと、レンズによる回折により共轭面にはそのフーリエ変換にあたる $F(u, v)$ なる像が



(a) デジタル方式



(b) 光学方式

図1 画像情報処理の方式

できる。ここに空間フィルタ $H(u, v)$ をおけば透過光 $G(u, v)$ はその積になるから今一度レンズでフーリエ変換を行なうと出力画像 $g(x, y)$ が得られる。 $H(u, v)$ のフーリエ変換を $h(x, y)$ とすれば、いうまでもなく次式が成立する。

$$G(u, v) = F(u, v) * H(u, v) \quad (1)$$

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) \quad (2)$$

②はコンボリューションをあらわしている。光学方式の特長はこのような処理が並列的に一瞬のうちに行なえることであって、その高速性に匹敵するものはない。その反面線形のフィルタ処理以外は行なうことが困難である。また大開口の装置は非常に高価になる。さらに高級な装置ほど単能的になり融通性に乏しくなる。

デジタル方式では画素ごとに上記の演算を直列的に行なっていかねばならない。この際(2)式の演算を直接行なうことも可能であるが、ちょうど光学方式がやっているように前後にフーリエ変換をはさんで(1)式の演算を行なうことも行なわれる。これは高速フーリエ変換(FFT)の登場によってはじめて実用的な方法であって、計算時間も大幅に短縮される。しかしそれでも 1000×1000 程度の画像を処理するのに大型計算機で数十分の処理時間を要することは珍しくない。しかし非

* 東京大学生産技術研究所 第3部

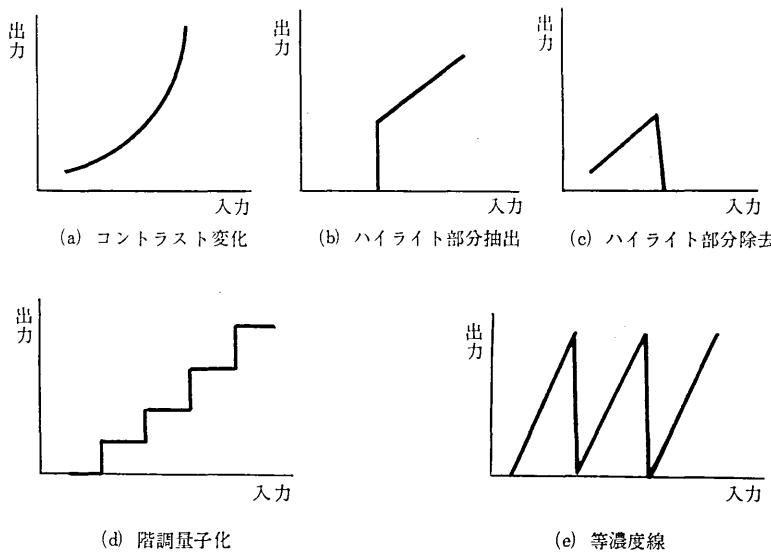


図2 階調の処理

線形な処理もできること、処理のパラメータを自由にかえることができること、しかも画像の部分部分に応じてパラメータをかえていくことができる、計算の精度が高いことはデジタル方式の大きな特長である。欠点としては大量の記憶容量が必要なこと、上述のように処理時間が長くなることである。光学方式はレーザの出現による可干渉光学(coherent optics)の進歩、デジタル方式はIC等の出現による計算機の大型化、高速化にささえられていれば急速な進歩をとげている。現在のところ線形処理のみでなく、また高速性が要求される場合は光学方式が、さらに複雑な処理を要する場合あるいは融通性に重きをおく場合はデジタル方式が有利といえよう。両者の特色を生かしたハイブリッド方式も考えられるが、将来の課題である。

われわれはデジタル方式による多次元画像情報処理の研究の第一歩として濃淡のある画像の処理とその医学、非破壊検査への応用、簡易な入出力装置の開発に着手している。ここではそれについて海外の研究情勢も含めて解説しよう。

2. 画像情報処理の手法と応用分野

画像情報処理の代表的手法をあげると次の通りである。

(1) 階調処理

これを画面全体に適用する場合はいわゆる γ 補正と同じであってフィルムや光学系の階調特性の補正が行なえる。入力階調と出力階調との関数関係は図2に示すように全く自由であるから、コントラストをかえるのみならず不連続的にハイライト部分の抽出あるいは除去なども行なえる。あるいは階調の量子化や等濃度線を描くこと

もできる。

入出力の関係は場所の関数としてかえることもできる。たとえばビジコンを使用する場合、いわゆるシェーディングにより管面の感度は一様でない。あらかじめ明るさを何段階かにかえた一様な明るさの面を走査してその特性を計算機に記憶しておけば、実際の画についてその補正が行なえるわけである。

以上は黒白の場合であったが、カラーの場合も階調の処理はきわめて有用である。カラー画像を処理する一番簡単な方法は印刷の場合と同じく3原色の画像にわけることである。各原板の階調をかえることにより色の補正是簡単に行なえる。あるいはとくに着目したい部分を色をかえてとくに目立つようにして出すこともできる。これは資源調査で特定の樹相の部分をぬき出したり、非破壊検査で傷の部分にのみ注意を喚起するのに利用できる。

(2) 変形処理

たとえば規則正しい格子をとっても光学系のひずみなどで図3(a)のようにゆがんでくる。これを変形させて(b)のように復原する処理である。簡単なものでは画像の縦横比をかえることからはじまって、レンズのひずみ補正、あるいは建築写真などにみられるあたりの補

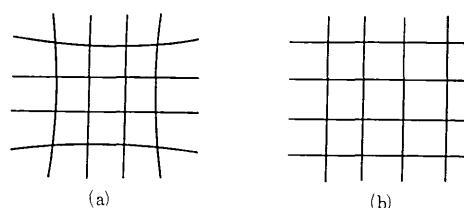


図3 変形処理

正なども行なえる。この場合変形は局所的に最適になるように行なうことができる。たとえばある時間間隔をへてとった2枚の写真を引算して変化分をぬき出したい場合など、対象物が生物のようにそれ自体のゆっくりした変化があると、完全に隅から隅まで重ね合せることはできない。このような場合局所的な相関をとって、それが一番高くなるように部分部分を変形していくことが可能である。

(3) 空間フィルタ処理

画像をフーリエ変換して、空間周波数軸上でいろいろな処理を行なうもので、図1(b)の光学系と同じ作用をもっているが、非線形フィルタも使える点、より一般的である。実際の演算は既述のように(1)式で行なうか、あるいは簡単なものでは(2)式のコンボリューションで行なう。

フライング・スポット管やビジコンでは有限な直径の点で走査するために、点より細かい変化は識別できない。この分解能はふつう走査方向に直角な無限小幅の理想的な直線に対する出力(line spread function)あるいはそのフーリエ変換の振幅(MTF, modulation transfer function)であらわされる。電気回路でいえば前者はインパルス・レスポンス、後者は伝送関数の振幅の周波数特性にあたる。

今系のMTFが図4(a)に示すような特性をもって

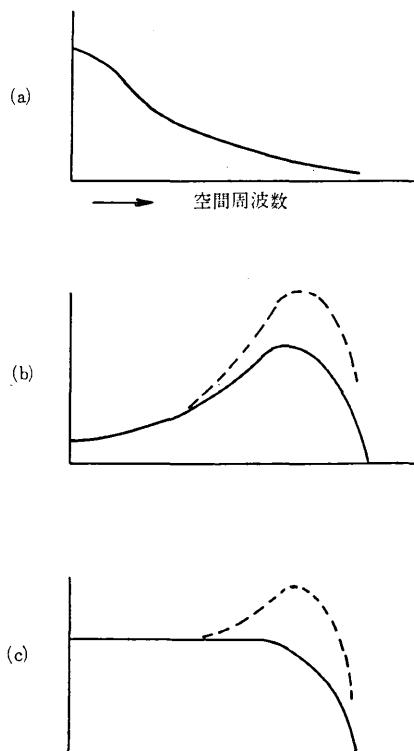


図4 MTFの補正

いた場合、(b)の実線に示すような特性をもつ空間フィルタ処理を行なうと(c)の実線のように特性が改善される。もしも空間フィルタの特性が点線のようであると合成された特性は高い空間周波数成分が強調された形になる。一般に画像の高い空間周波数成分は輪廓に由来するものが多いので、点線のような特性では輪廓線が強調された画像が得られ、それが適度であれば主観的に非常に分解能が上った印象を与える。

空間フィルタ処理の今一つの重要な応用は雑音の除去である。高倍率の引伸しで、乳剤の粒子性が目立つような場合は雑音のスペクトラムは高い周波数成分に集中しているので、それを除去するような低減通過型の空間フィルタをかけばよい。逆にハレーションのように広い面積が一様に光っているような場合は雑音のスペクトラムは低い周波数成分に集中しているので、高域通過型の空間フィルタを用いることになる。走査などに付随して画面に縞模様が入ることがあるが、これは單一周波数のまわりに集中したスペクトルをもっている。したがってノッチ型のフィルタで除去できる。

(4) 複数画像の処理

以上は大体単一の2次元画像に加えられる処理であったが、このような処理をほどこした画像相互間にいろいろな処理が行なえる。

時間的に前後した二つの画像の差をとればその間の変化が判る。地形変化の検出、病変部の検出、あるいは交通量の調査などによく使われる。

複数の画像の和をとれば平均化されて信号対雑音比をあげることができる。

2枚の画像の積をとることは、空間周波数領域で考えれば空間フィルタ処理を行なったことになる。また積をとって全面にわたって平均すれば相関をとったことになる。

ある画像を他の画像で正規化するにはその比をとればよい。

(5) 画像の編集

画像の一部分のみをぬきだしたり、それを他の画像の対応する部分にはめこんだり、ちょうど切抜き細工をするように自由に編集できる。後述の染色体のように多数の個体がばらばらに散っているのを、むきをそろえて大きさの順に並べなおすこともできるわけである。

(6) 画像の発生

入力画像などで計算機の内部だけで画像をつくることができる。幾何学的图形を主とするテスト・パターンやMTF測定用の正弦波チャートなどを作成するのに便利である。ただしこれは出力装置が優秀なものでなければならない。

(7) 画質の向上とパターン認識

画像処理によって何等かの有用な結果をうる場合、出

力がやはり画像の場合は広い意味で画質の向上をはかったことになる。これに対して画像の内容を分析し、いくつかの（画素の数に比べればはるかに少い）級に分類して記号としてとりだすものが広義のパターン認識であるといえよう。後者の例としては文字の認識、顔や指紋の同定などがあげられ、すでに多くの研究がなされている。しかしあくは黑白2値の图形に対してであり、濃淡のある画像に適用できるものは少い。またもっとも歴史のある文字の認識でさえ数字以外はまだ安心して実用できるほど誤り等が少いとはいがたい。したがってやや中途半端な感はあるにしても最終判定は人間の認識能力にゆだねる画質の向上が実用に大きな意味をもってくるわけである。

例として医学の分野を考えてみよう。

ここでは画像はX線写真、顕微鏡写真、シンチグラムなどの型で与えられ、有力な診断、検査の手段となっている。特に検査において化学的検査などは自動化が進みつつあるのに対して、画像は人間によって処理されておりネックとなっている。今後、定期検診などで正常な人間にに対する検査も行なわれ、処理を要する画像の数は激増していくのに対して熟練した検査技術者の数はふえるよりもへる傾向にさえある。したがって画像処理の自動化は焦眉の急となっている。たとえば、染色体の検査では、試料を作成して分類を行なうのに、10サンプルに対して16時間位を要している。しかも、1人の患者に対し100サンプル程度の検査が必要といわれている。同様の検査は新薬の開発に伴って遺伝に影響するような副作用がないことをたしかめるために行なわれており、これに要するサンプル数はさらに多い。染色体のパターン認識的処理は米国NIH(National Institute of Health)を中心とする多年の研究にもかかわらずまだ実用の域には遠い情況にある。したがって画質の向上的処理すなわち雑音をのぞき、ばらばらの染色体をそろえて大きさの順に並べることでもできれば検査技術者の労を非常に軽くし、また検査時間を大幅に短縮することが可能である。

同様の例は非破壊検査においてもみることができる。たとえば鋼の圧延など製造ラインの自動化は非常に進んでいるが、その検査はライン後方の広大な検査場で人海戦術で行なっているのが現状である。悪い環境条件の下で長時間緊張を要する単調な作業であるから検査員を集めることが困難になっている。傷のパターン認識的処理はまだ実用にはほど遠いので、画質の向上を行なって検査員がよい環境の下で、異常のある場所のみチェックして有害な

傷をみつけるようなシステムが強くのぞまれている。

このように人間の目の高度なパターン認識的能力は、現在の計算機の能力をまだはるかにこえている。現在すぐに実用になって効果があるのは画像情報処理によって、簡易な検査、寸法の計測、問題のある部分の抽出など、人間にとっては単純なしかも時間のかかる作業を計算機が行ない、人間は最後の判定を行なうようなおののおの得意なところを分担する人間と計算機との分業であると思われる。

(8) シミュレーション

計算機による画像情報処理の今一つの大きな応用分野は光学方式の処理装置あるいは画像伝送方式のシミュレーションである。

すでに述べたように大開口の光学方式の処理装置は高価であり、またパラメータを簡単にはかえられない。したがってその動作を計算機上でシミュレートして最適設計を行なうことが必要になる。

また画像にふくまれている情報量を相関等によって計測し、必要な伝送容量を求め、あるいは帯域圧縮技術によりどの程度画質が悪化するかを定めるなど、画像伝送方式の研究にも計算機によるシミュレーションは有力な武器である。

3. 画像情報処理のハードウェア

(1) 入力装置

これは画像を走査して画素に分け、その濃淡をデジタル化して計算機の入力とするものである。写真のような濃淡のある画像を考えたときこの装置に要求される機能は次のようなものである。

(1) 画像の走査

(2) 分解能：走査線およびそのスポット径が小さいほど分解能は上るが反面画素の数が多くなる。

(3) 濃淡のある情報を取り扱えること：これは連続

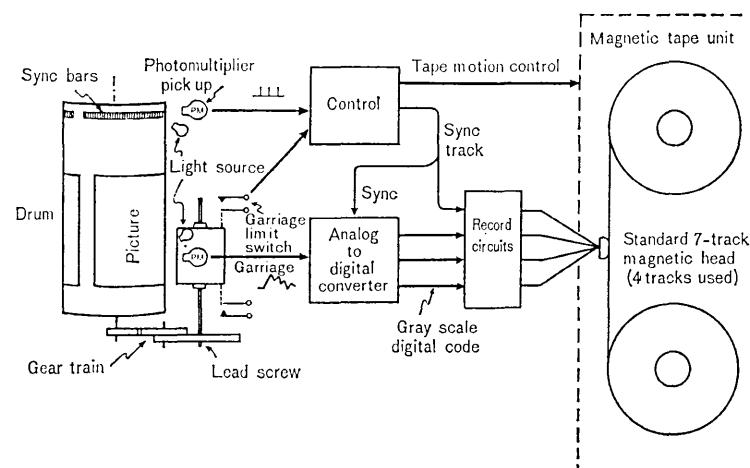


図5 機械的走査システム

的なアナログ量であるが、計算機で処理するためにはA/D変換器で量子化、ディジタル化する必要がある。

(4) インターフェース：オンラインの時には計算機とオフラインのときには記憶媒体(たとえば磁気テープ)との情報の受け渡しのために必要である。

画像の走査を行なう手段には

- (a) 機械的走査
- (b) 電子的走査

がありその走査モードとしては順次走査とランダム走査がある。前者は通常のテレビジョンのごとく、画面を一定の順序で走査する。ランダム走査は画面上で計算機により指定された任意の場所を走査できる。計算機と入力装置をオンラインで接続しないで、計算機の制御の下に局部的な情報を計算機に入力したり、境界に沿って走査して、その情報を計算機に入力したりする場合には、ランダム走査が行なえる必要がある。

機械的走査の代表的なものとして、図5のごとく写真伝送と同様に回転するドラムに巻かれた画像を機械的に走査する方法がある。画像を光源で照らし、その反射光を光電管で検出して電気信号に変換し、これをAD変換する。走査はドラムの回転とドラムの軸に沿った光電管の移動により行なわれる。この方式は装置が簡単であるがランダム走査は行なえない。オフライン方式の入力装置として用いられ、ディジタル化された画像情報の記録媒体として磁気テープを用いている例が多い。

機械的な走査方法として、このほかに鏡やプリズムを回転させることにより、光を偏向して走査を行なっているものやディジタルプロッタを用いて走査する方式もある。

電子的走査を行なうには2つの方式がある。1つは電子管上の輝点を画像上に投影して走査するフライング・スポット管による方式と、電子管上に画像を投影して、これを電子ビームで走査する撮像管による方式で、ビジコン、イメージ・ダイセクタなどがある。

フライング・スポット管を用いる方式は、フライング・スポット・スキャナとよばれ、フライング・スポット管上に輝点をつくり、この輝点をレンズ系により画像上に投影して走査を行なう。対象とする画像がフィルムの場合には透過光を、写真や図の場合には反射光を光電子倍増管で受けて光電変換して電気信号とする。輝点の直径が 15μ 程度のものも得られ、 2000×2000 以上の画素に分解できる。この方法はフライング・スポット管上の輝点を投影して走

査を行なうために、暗い所で行なわなければならないのが欠点である。

走査の速度は輝点の復帰時間によって定まり、速度を上げるために復帰時間の短い波長の短い光を出す螢光物質(たとえばP16)を用いる場合が多い。しかし、あまり走査を速くすると電気系の帯域を広くする必要が生じ、光電子倍増管はS/Nがあまり良くないので、多レベルで濃淡を量子化することはできなくなる。またフライング・スポット管上の微細な輝点を投影して走査を行なうので、螢光物質の細かいムラがそのまま濃淡の変化となり、多レベルで量子化するさいには問題となる。この対策として輝点を別の光電子倍増管で受けて、図6のごとくその出力をフィールドバックし、いつも一定の光量となるように制御を行なう。

フライング・スポット・スキャナの特長は高分解能でランダムな走査が行なえる点であり、電子計算機の制御の下にオンラインで用いれば、テレビのような順次走査のほかに、部分的に走査したり、走査をあらくしたり、細かくしたりすることもできる。しかし装置としては高価になる。

撮像管による方式は光学系により電子管上に画像を投影し、これを電子ビームによって走査して電気信号に変換するものである。この方式の特長は明るい所に置いて走査を行なえる点である。ビジコンは光導電物質を透明な導電膜上に蒸着して作ったターゲットに、画像を投影して、電荷によるパターンを蓄積し、ターゲットに電子ビームを当てて走査する蓄積型である。そのため感度は良いが、周期的に消去を行なわねばならないので走査速度を上げられず、ターゲットの電荷パターンは電子ビームによって破壊されるので、ランダムな走査は行えない。

ビジコンを用いた方式は、順次走査で良い場合には明るい場所で使えるためよく用いられる。一方、イメージ・ダイセクタはビジコンとは異なり非蓄積型であるが、走査が自由に行なえ、かつ明るい所で用いることが

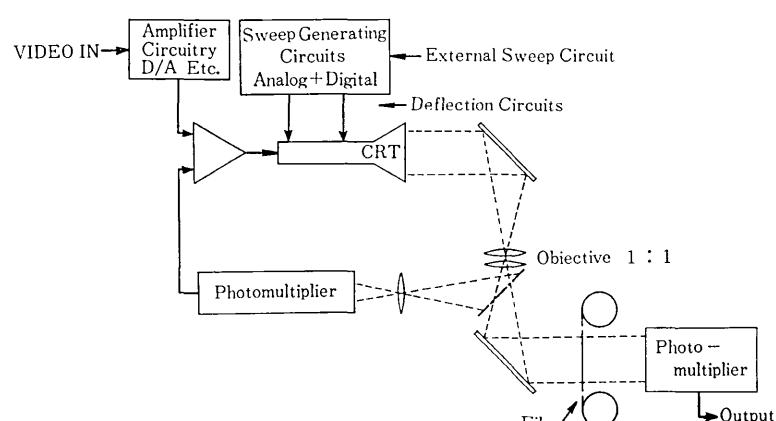
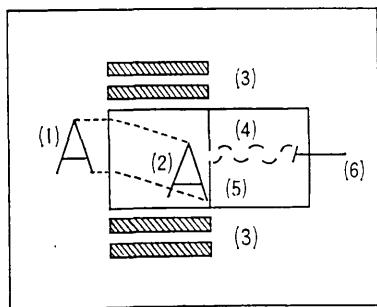


図6 フライング・スポット・スキャナ/レコーダ



(1) Optical image
 (2) Electro image
 (3) Focus and deflection coils
 (4) Multi-stage electron multiplier
 (5) Anode with aperture
 (6) Output

図7 イメージ・ダイセクタ

できるため注目されている。イメージ・ダイセクタの歴史は古いが、一般的な撮像管としてはあまり魅力がないため広く使われていなかった。しかし最近画像入力用として再登場してきた。図7のごとくフォトカソードから出る光量に比例した電子流を偏向して、小さい aperture plate へ導き、後段の二次電子増倍管で增幅して信号電流を取り出す。非蓄積型であるため、S/N はあまり良くない。

濃淡情報のデジタル化は、染色体のようにコントラストの強い画像は3ビット（8レベル）で行われているものもあるが、画像情報を処理する場合には少なくとも5ビット（32レベル）は必要とされている。特に画質の向上を行なうときには5ビット以上、8ビットくらいあるのが望ましいが、レベル数を多くするには、走査のさいの S/N を上げなければならず、走査速度を落したり、フライング・スポットの輝点の光量の制御もきびしくするなど配慮が必要となる。

すでに述べたように画像情報は膨大な情報量でもち、たとえば 1000×1000 の分解能のものでは $1000 k$ の情報量となり、計算機のコアメモリの容量を越えてしまう。したがって画像情報処理を行なう計算機には大容量の外部記憶装置（磁気ディスク、磁気テープなど）が不可欠である。

（2）出力装置

画像を出す出力装置としては、ラインプリンタ、XYプロッタ、蓄積型オシロスコープ、グラフィック・ディスプレイ、フライング・スポット・スキャナなどがある。

ラインプリンタを出力装置として用いる時には1画素に1文字、あるいは相隣る2文字を割り当て、階調を表現するためには、白から黒までの各レベルに対して異なる文字、あるいは異なる文字の組合せで表現し、必要に応じて重ね打ちして階調を出すようにしている。16レベル、あるいは32レベルまで現わすことができる。

通常の活字を用いているのでは、十分に黒を表現できない。そのために特に濃淡を表わす活字を作っている例もあるが、高価になる。

ラインプリンタの欠点は、以上のように濃淡を十分に表現しえないことのほかに、表現される1画素の縦横比が1対1でなく、画素の間に間隔があき、細かい画を表わせないこと、1画素が大きく、多くの画素から成る画像を表現しようとすると、何枚ものラインプリンタ用紙を貼り合わせて改めて写真に撮る必要があることなどである。このように欠点は多いが簡便であるので、画素の数があまり多くなく、粗い画でよい場合には用いられる。画像とデータとと一緒に表示できる点は利点である。

XYプロッタは線を描くものであるから、処理した画像の輪郭を示したり、輪郭上の特定の点を表示したりするのに用いられる。

蓄積型オシロスコープは分解能が低いこと、輝度変調して濃淡を表現しようとしても表示できるレベル数が少ないとから、品質の高い画像を表示することはできないが、手軽に表示できるため簡易型の表示装置としてモニタなどとして用いられている。

グラフィック・ディスプレイはオンラインで画像情報処理を行なうさいに、ライトペンで処理を行なう場所を表示したりするのに便利であるが、現在のものは濃淡がほとんど2値しか表わせず、また高価なためあまり用いられていない。しかし人間と対話型のシステムをつくる上には不可欠である。

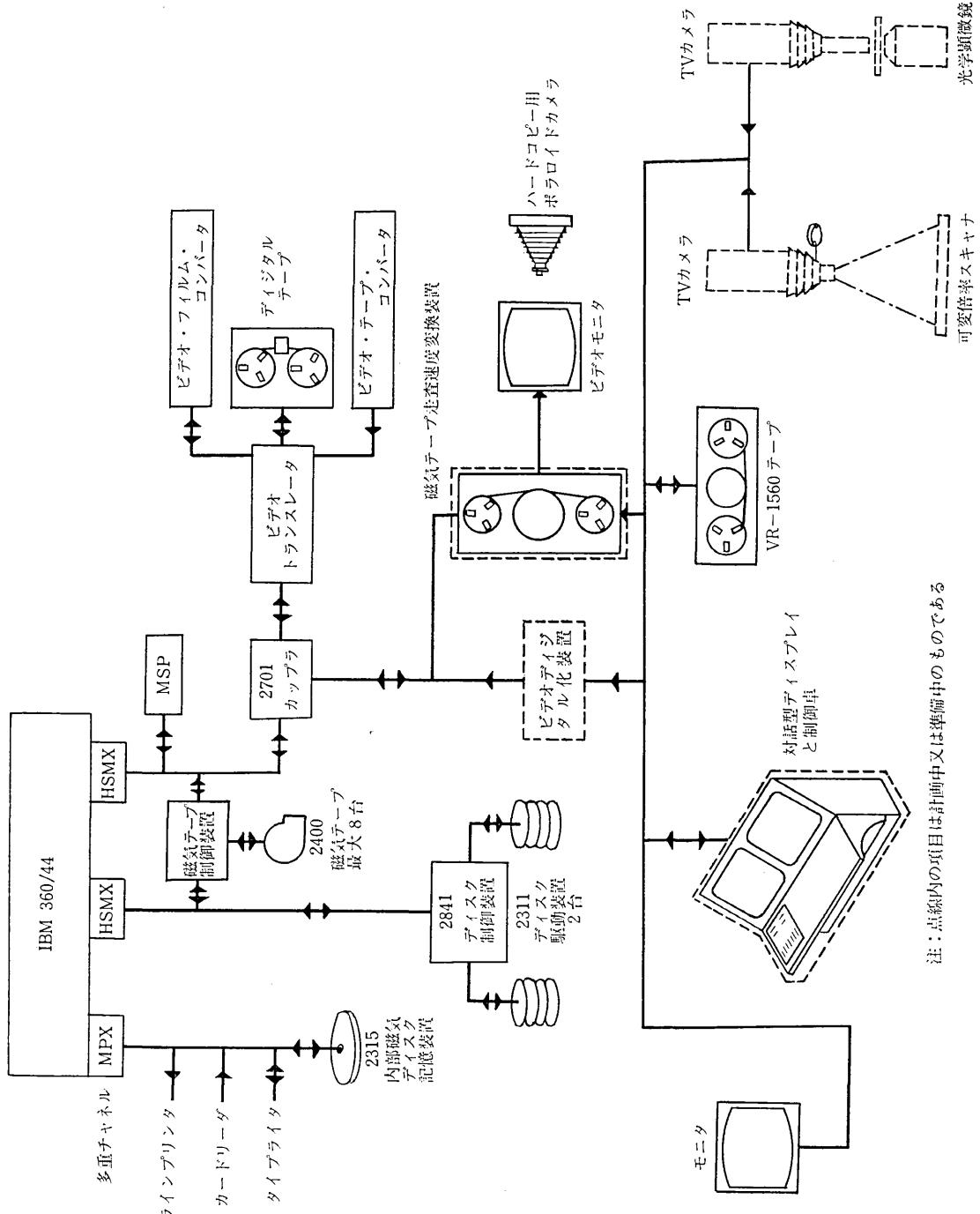
フライング・スポット・スキャナは入力装置と同じものを兼用できる。入力装置として用いるときには一定の明るさの輝点の像を画像またはフィルム上に投影して走査を行なうが、出力装置として用いるときには走査される画像の位置にフィルムを置き、輝度変調して画像を再現したり、ポラロイド・カメラで撮影する。現在のところ品質の良い画像出力を得るには、フライング・スポット・スキャナを用いるのが良い。

このほか、写真伝送装置、テレビジョンなども用いられるが、計算機の出力を走査方式に合せて変換しなければならないのがやっかいである。しかし磁気ディスクなど適当なアナログ記憶装置と組合せれば低価格にできる可能性があり、将来有望と思われる。

表1は筆者の一人尾上が昨年アメリカの画像情報処理関係の研究を調査した際にまとめた設備の一覧表である。日本の現状と比較すると計算機はわれわれの手にとどく範囲であるが、入出力装置とくにフライング・スポット関係の立遅れが目立っている。

図8はその中の代表的なJPLのシステムである。これには計画中の機器もふくまれているが、現在のところもっとも完備したシステムの一つである。

本体はIBM 360/44で4台のテープデッキと2台の



注:点線内の項目は計画中又は準備中のものである

図8 JPLの画像情報処理システム

表1

	入力装置	出力装置	計算機
南カリフォルニア大学 ジェット推進研究所 (U S C) (J P L)	F(製作中) V F M(顕微鏡スキャナ) F(カラーライド) F F(透過光) F(反射光) M M M(顕微鏡スキャナ) F M	CRT F(Film) F(Polaroid) F F F F F, LP ディスプレイ LP —	HP 2116 B (16 k) IBM 360/44 (64 k) IBM 1130(顕微鏡用) PDP 9 (32 k) IBM 1800 (32 k) U 1108 (MT 使用のオンライン) PDP 10 (ディスプレイ用) LINC 8 (顕微鏡スキャナ) IBM 360/44 (32 k) —
マサチューセット工科大学 (M I T)		V: ビデオコン	LP: ラインプリンタ
アイ・ビー・エム (I B M)			
メリーランド大学 公衆衛生局 (U M D) (N I H)			
バイオロジカル研究所 米国標準局 (N B R F) (N B S)			

M: メカニカルスキャナ F: フライングスポットスキャナ

2311 ディスクを持ち、プログラムは内部のディスクに記憶しておき、監視プログラムのみを磁心記憶装置においている。

画像はその濃淡は 8 ビット (256 レベル) で符号化されて、ディスクに入れる。画像に含まれている情報量は膨大なものであり、磁心記憶装置では容量が不足があるので、ディスクから画像の一部を磁心記憶装置に読み出して処理し、処理が終るとディスクに戻して処理を行なう。現在のディスクでは 1500×1500 の画像を処理するには不足であるので、2314 に変えることが計画されている。

MSP (multiply-summation processor) は乗算、加算を高速に行なうための装置で、画像の処理によく用いられる convolution 演算にむいており 360/44 の CPU を改造したものである。

ビデオ・フィルム・コンバータは 5" のフライング・スポット管を用いたフィルムのスキャナまたはレコーダで、 $60 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ の範囲のラスターを持っており、そのスポット径は 20μ である。 35 mm または 70 mm のロールフィルムを扱う。分解能は 1 フレーム当たり 100 ~ 2500 ライン(可変)、走査速度は毎秒 2 ~ 2000 ライン(可変)である。濃淡のある画像の処理には 6 ビットでは不足で 8 ビットで濃淡を表現しているが、そのためにはスポットの明るさおよび場所による明るさの補正など安定化を行なっている。この輝度の補正を行なわないところの変動があり、輝度の補正を行なうことにより 1% 以下に抑えることができる。

出力用には上記レコーダの他にモニタがあり 5" のフライング・スポット管で出力し、ポラロイドカメラで撮影する。

現在のシステムでは、ディスプレイやモニタが不足しているので、対話型のディスプレイを設置しようとしている。

JPL で行なわれている画像情報処理は、画質の向上が主であってパタン認識関係の比重が非常に小さい。こ

れは本来 NASA の無人衛星から送って来る画像の処理を目的として出発したからであろう。しかし宇宙計画の縮小とともに、ここで得られた技術を資源開発、環境調査、医学の分野の電子顕微鏡、光学顕微鏡、ラジオグラフの写真、工業用 X 線、交通量調査の写真、風洞モデルの写真、星団の写真の解釈などに応用しようとしている。すでに NIH による医学情報処理の委託研究は年間予算の約半分に達している。

4. 2, 3 の実例

筆者らの研究室においても画像情報処理に関する研究を行なっているので、その現状について紹介する。

研究分野としては、画質の向上、帯域圧縮、パタン認識関係の基礎的研究に、また応用としてはとくに需要が多い医学、非破壊検査関係に重点をおいている。

(1) 実験方法

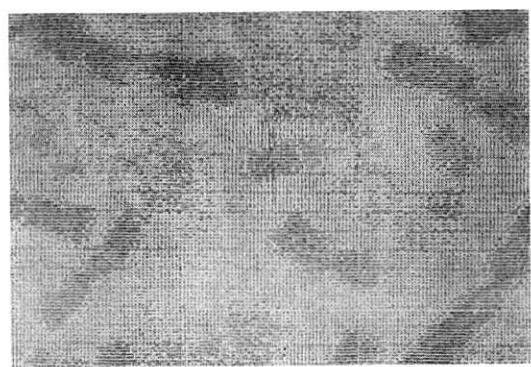
画像情報を計算機で処理するためには、画像を画素に分けてその濃淡を AD 変換して、計算機の入力とする入力整理と、処理された画像を表示するための出力装置が必要であることはすでに述べた。

入力装置については、まだ整備中であるので国際電気研究所のご好意により、同研究所で開発された「パタン読取装置」を借用させて頂いた。この装置は画像を ITV で撮り、ビデオ信号をエサキダイオードを用いた高速 AD 変換器で AD 変換する。その AD 変換の速度は 10 MHz で、白から黒までを 6 ビット 64 レベルに量子化する。AD 変換された結果は、1 フレームに 1 画素ずつ順次読み出されて、高速紙テープ穿孔機で穿孔テープとして出力される。この装置では 300×200 程度の画素のデータが得られるが、その中比較的直線性のよい 144×144 (約 21 k) をデータとして用いた。

このようにして原画像の情報を紙テープ上に記録し、この紙テープを本所の最適設計処理装置(FACOM 270-30, 32 k) の入力として、正規化、スライス、低域沪波、



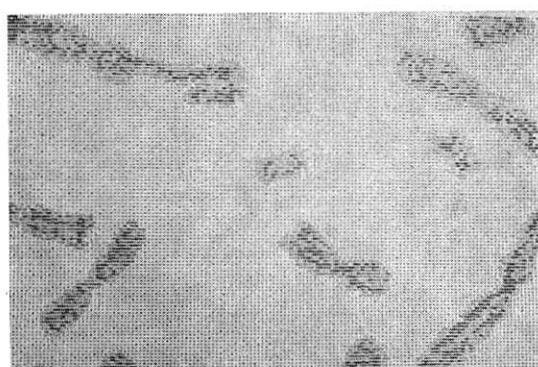
(a)



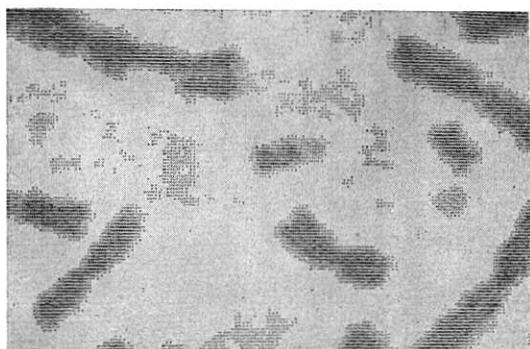
(b)



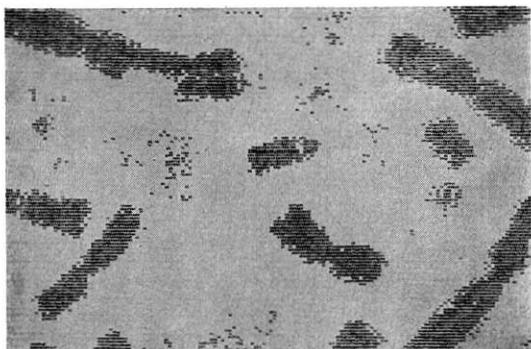
(c)



(d)



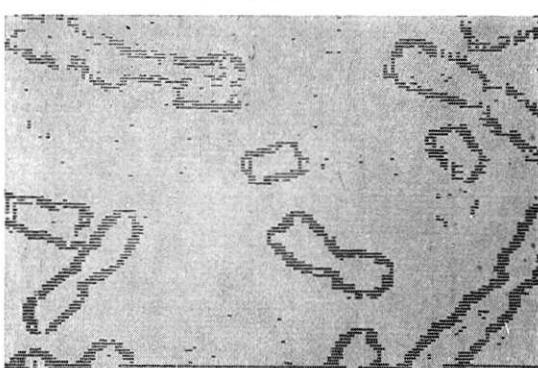
(e)



(f)



(g)



(h)

輪郭の抽出、ディジタルフィルタリングなどの種々の処理を行なった。

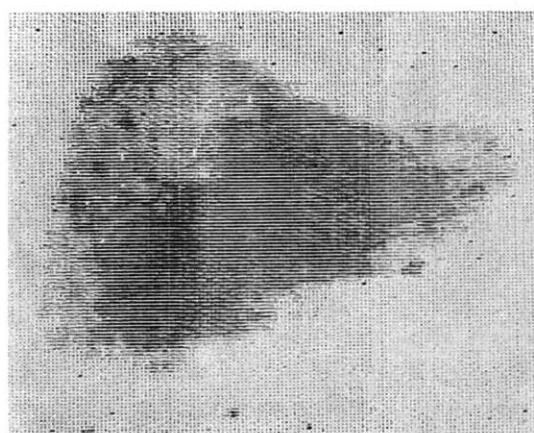
一方、処理された画像情報を表示するための出力装置も現在開発中であるので、とりあえずラインプリンタで代用した。1画素をラインプリンタの相隣る2文字で表し、その上に別の2文字を重ね打ちして、文字の組合せによって32レベルの階調を表示した。出力にラインプリンタを用いると 144×144 の画素から成る画像を一度のラインに表示することができず、1枚の画像を9分割し、1枚プリンタ用紙に 48×48 の画素を印字し、これを9枚貼り合せ、写真を撮らなければならない。

(2) 医学への画像情報処理の応用

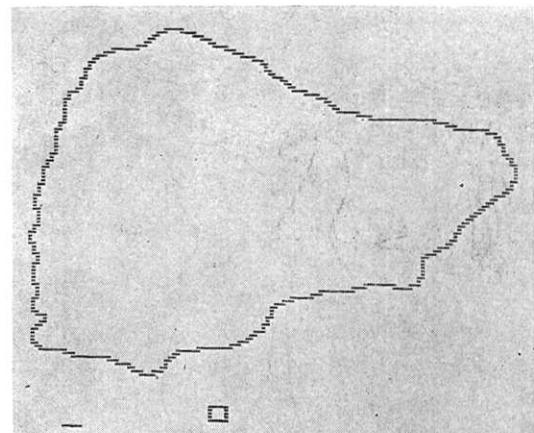
すでに述べたように医学の分野では画像情報処理に対する要求がとくに強い。ここでは次の3つの分野についてわれわれの行なった例を紹介する。

- a) 染色体、細胞などのパターン認識
- b) 面積、体積などの自動計測
- c) X線写真的画質向上

1) 前処理



(a)



(b)

前処理は医学的画像処理に限らずどの分野でも必要なものである。行なう処理としては正規化、スライス、低域渦波、輪郭の抽出などがある。

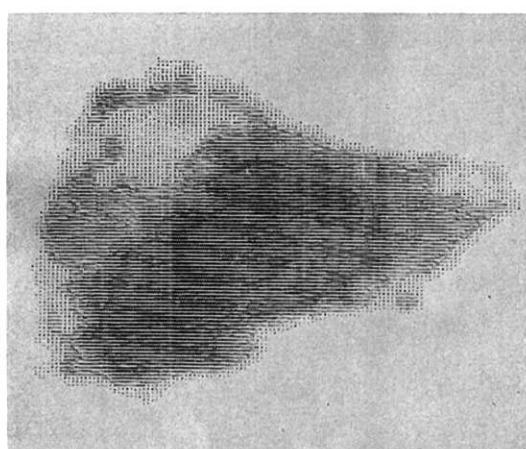
正規化は処理される画像のダイナミックレンジが狭い場合に正規のレベルに変換する。

スライスは雑音を消去する時に用いるが、あるレベル以下を空白とする。(図2(b))

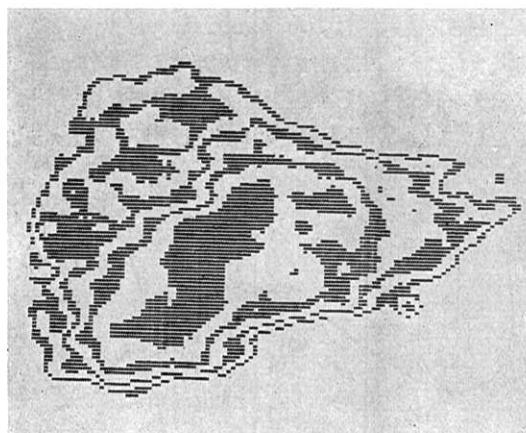
コントラストの強調はある濃度の部分を強調して見やすくしたりするのに用い、この操作を同図(e)のごとく周期的に行なうと等濃度の等高線を描くことができる。

上に述べたスライスと共に雑音を除去する有効な手段に低域渦波がある。最も簡単な低域渦波はその点を中心とする 3×3 の画素をとり、その点の濃度はその9点の画素の濃度の平均値とする方法である。これにより、画像としては鈍ったものとなるが、雑音は平均化される。同様にして高域渦波も行なえる。この場合にはある点の濃度からその点を中心として低域渦波した濃度を引けばよい。

輪郭の抽出は、ある点を中心とし相隣る8点との濃度



(c)



(d)

の差を用いる gradient 法や Laplacian を用いる方法、高域渦波による方法などいろいろとある。

以下、このような処理を行なった例について説明する。写真1(a)は染色体の写真である。この原画をデジタル化し、正規化して、32 レベルの階調をラインプリントで表現したものが写真1(b)である。この写真では背景の雑音が多く見にくくなっている。(c)は(b)をレベル 10 でスライスし、それ以下を空白としたものであるが、背景の雑音、輪郭の雑音が目立つ。(d)は 10 レベルでスライスし、正規化したものである。(e)は 3×3 の低域渦波を行ない、レベル 7 でスライスしたものである。背景の雑音は残っているが、低域渦波により輪郭部の雑音は減っている。(f)は正規化した後にレベル 5 でスライスし、これを再び正規化し直した後に、再びレベル 8 でスライスしたものであるが、背景の雑音はかなり減っている。(g)は正規化し、レベル 5 でスライスした後に正規化するまでは(f)と同じであるが、輪郭部の雑音除去のため、低域渦波を行なってから、(f)と同じレベル 8 でスライスしたもので、雑音が(f)よりも除去されていることがわかる。(h)は(b)から輪郭を抽出した例であるが、雑音の除去を行なっていないため輪郭が太くなっている。

写真2は肝シンチグラムに同様な処理を施した例である。(a)はデジタル化し、正規化した原画である。(b)はそれに低域渦波を施してスライスして背景を消去したものである。(c)はこれより輪郭を抽出した結果である。(d)は等濃度の等高線を引く操作を施した結果である。

2) 面積、体積などの自動計測

画像の中の対象、たとえば臓器の大小や長短が診断上重要な場合が多いが、現在のところ客観的に判定することは困難である。したがって、面積、体積など測定の行ない難いものを自動計測できれば非常に有効である。また、画像の中にあるものの個数、たとえば、染色体などを自動的に数えることができるだけでも有用と考えられる。さらに、この技術は、パターン認識を行なう際のパラメータを抽出する段階でも不可欠なものである。

ここでは面積、体積測定の1例として肝シンチグラム

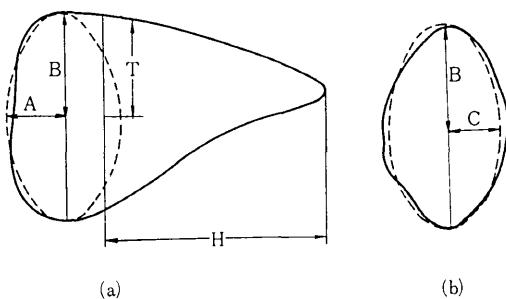


図 9 肝シンチグラム

を取り上げてみた。

肝シンチグラムを2方向から撮ると図9(a), (b)のような図となる。体積を求めるためにこれらの輪郭を抽出し、その輪郭に適合するような楕円体と円錐を求めてその体積で近似することを試みた。

まず、64 レベルに量子化された原画像のデータを電子計算機に読み込み、最大レベルと最小レベルの間を 32 に分け正規化し、その画を出力する。次に輪郭を抽出する際雑音を生ずるおそれのある不要部分を除去し、輪郭を抽出する。図9(a)における左側の部分を楕円で近似するが、Y 座標の最大最小の点より長径 B を求め、その左側の部分を最もよく近似できるような短径 A を求める。次に右側の部分を三角形で近似するが、その高さ H および底辺 T は底辺と楕円とで囲まれた面積と楕円の外側で底辺と輪郭とで囲まれた面積とが等しくなるように決める。

一方、図9(b)においてこの断面図も楕円で近似し、短径 C を求める。肝臓の体積を A, B, C で作られる楕円体と T と H で決まる円錐の体積の和で近似する。すなわち、体積 V は

$$V = \frac{4}{3}\pi ABC + \frac{\pi}{3}T^2H \quad (3)$$

と求められる。

写真3(a), (b)は肝シンチグラムの原図であり、これをデジタル化したものが(c), (d)である。これより輪郭を抽出して、それに適合する楕円を打たせたものが(e), (f)である。

この方法で原画像から輪郭を求めるプログラムを作成した。肝シンチグラムはあまり分解能のよいものではないので、この程度の分解能の装置を用いて画像を処理しても十分であることがわかった。

3) 染色体の自動計測の1例

正常な人間の染色体数は 46 個であり、長さの順に 1 対 2 つの組を作ると A 群から G 群まで 7 つのグループに分けて 22 番までの番号が付けられるもの 44 個と性染色体 X, Y の 2 個で構成されている。この分類を行なうことを核型 (Karyotype) と呼ぶが、人手と時間の要

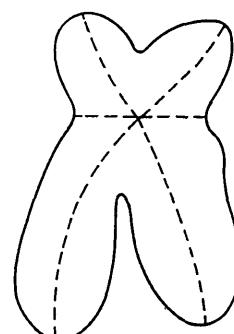
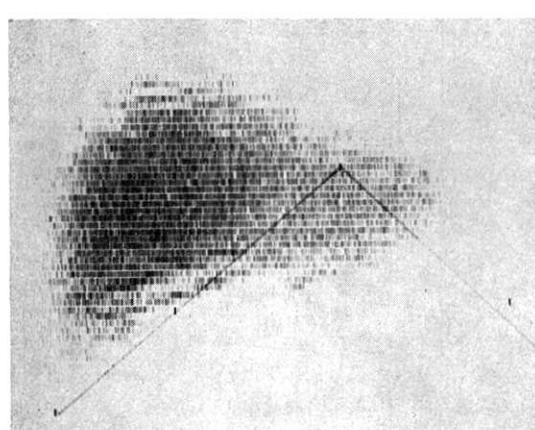
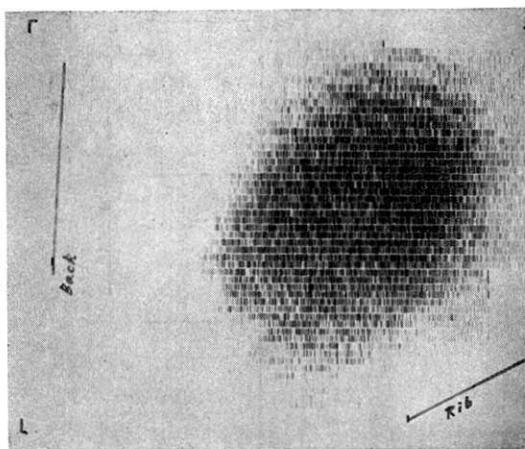


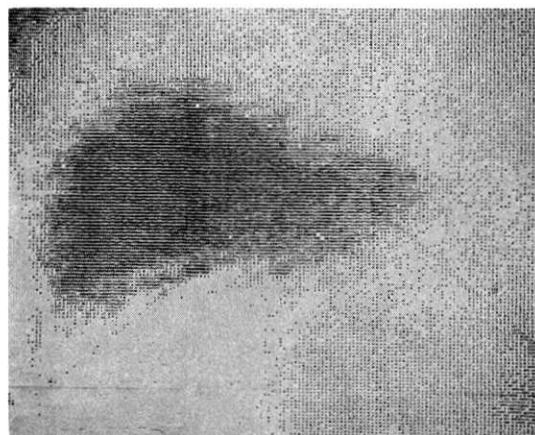
図 10 染色体



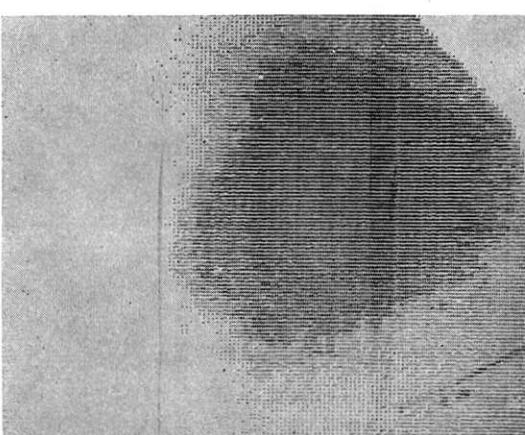
(a)



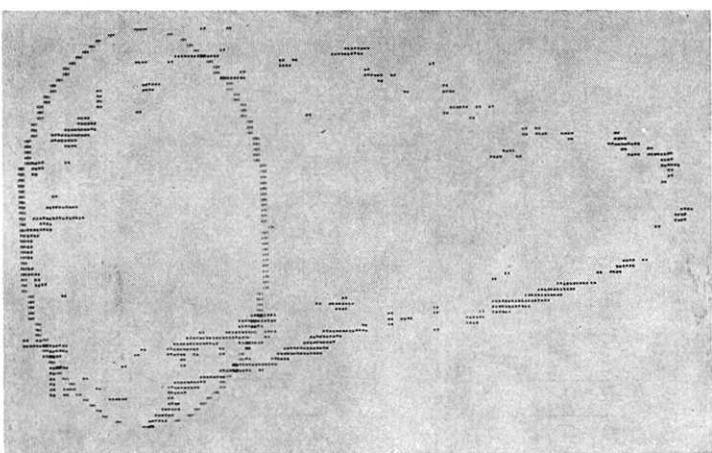
(b)



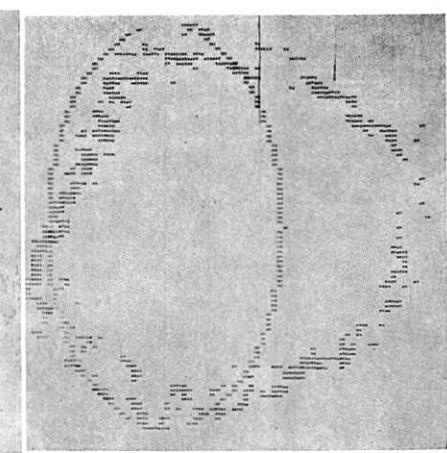
(c)



(d)



(e)



(f)

写真 3

する作業であり、20細胞の分析に十数時間要する。染色体の異常の検査は精薄Down症の診断、放射線や有害物質の遺伝への影響などを調べるのに重要である。1人当たり100細胞程度調べる必要があり、年々その検査の件数が増している。この自動化の研究はアメリカ、

イギリスなどで進められているが、完全自動化は困難のようである。

染色体の分類は図10のように中央部の幅(centromere)各腕の長さ(chromatid)を計測して行なう。それを行なうためここではまず顕微鏡写真を入力装置の関係で4つ

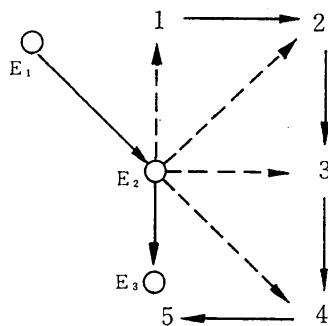


図 11 染色体の輪郭の自動追跡

のブロックに区切り、 144×144 の画素に分け、32 レベルに正規化し、さらに背景の雑音を除去し、8 レベルに変換した。

(i) 1 個の染色体の抽出:

画像の中の染色体の各々について個々に調べる必要があるので、画像の中から適当な 1 個の染色体を取り出し、別の記憶装置に格納する。取り出された後は、その染色体は画像の中から消されてしまう。以下同様にして画像の中から全部の染色体について、リスト・アップして行くが、ここでは 1 つについてのみ行なっている。

プログラムでは、1 以上のレベルにつき、座標と濃度を登録する。そのような点は図 11 のように前の点 E_1 と現在の点 E_2 より距離 1 をもつ周りの座標を $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$ と調べて、次の点を E_3 を見付ける。このようにして染色体を 1 周して原点にもどれば追跡は終了し、次の染色体へ移る。この処理段階で面積あるいは凹凸を調べて、染色体かどうか、大まかに調べることも可能である。

(ii) 輪郭の検出:

ここでは次の方法で行なった。染色体の場合には 3 つの大きな輪郭線に分けて考える。すなわち、直線、凹、凸の 3 つである。

任意の 1 点とその周りの適当な面積内の点の平均値との差を考える。この時、染色体から離れた所では双方とも零となり、境界付近では中心の方が大きくなる。また染色体の中で再び双方とも等しくなる。境界上では同じ濃度であっても凸の方が凹より差が大きくなる。このよ

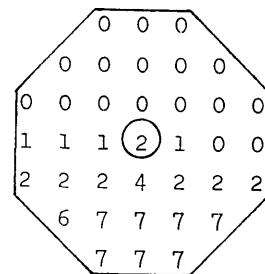


図 12 1点と 36 個の近傍

うにして境界線を直線、凹、凸に区別することができる。

図 12 に示したように、1 点と 36 個の近傍をとる。求められた差が 0 の場合には中心の点を 7 に、-1 なら 6 に、+1 なら 8 に置換える。このようにして書換えられた画像から輪郭を決める。8 以上は全部含め、7 については対角線上で両側の点の差が 2 以上ならば輪郭線上にあるとする。

(iii) 輪郭のコーディング:

直線、凹、凸の特徴は図 13 のようにもとの画像にかえって、境界線上の点でその点とその周囲の 16 点をとって比較する。(a) の直線部分では、境界上の点のレベルに対して、周りの 16 点で 2 以下のものが 8、2 より大きいもの 8 でほぼ同数になる。(b) の凸部分では、その点のレベルを越えないものが多く、(c) の凹部分では少くなる。このことから、いくつ越えないかをみつけてそれを図 13 のように重み付けする。

境界上で重み付けがなされると、図 14 の状態図に従って、直線、凸、凹、雑音の 4 つの状態を決める。プログラムでは表 2、表 3 および表 4 のサブルーチンを使って、次の状態を決めると同時に arm end, centromere を

表 2 次の状態の指定

STATE	重み付		
	1-6	7-8	9-16
1	2	1	1
2	2	3	4
3	2	3	4
4	2	5	4
5	2	3	4

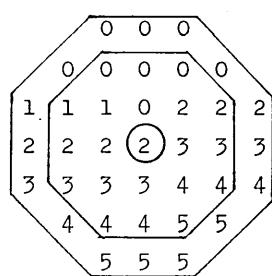
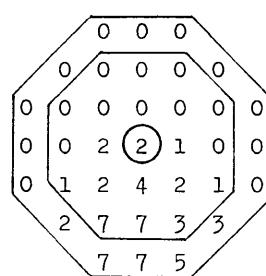
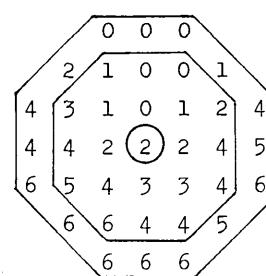
(a) 直線
重み付 8(b) 凸
重み付 12(c) 凹
重み付 5

図 13 輪郭の重み付の濃淡

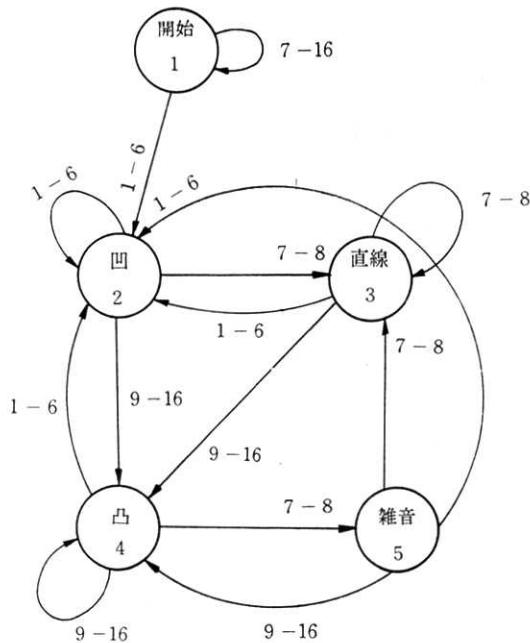


図 14 状態図

決める。表2は現在の状態と重み付けにより、次の状態を決めるためのマトリックスである。表3は現在の状態

表3 サブルーチンの指定

STATE	重み付		
	1-6	7-8	9-16
1	3+4	4+4	4+4
2	4+4	5+4	1+5
3	3+4	4+4	1+4
4	2+3	4+4	4+4
5	2+3	2+4	4+4

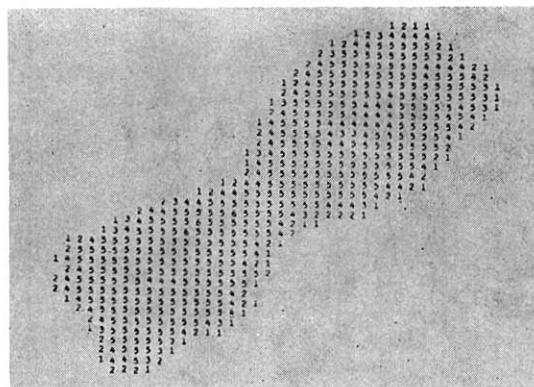
表4 サブルーチン

- 1 最初の凸部分の点を記録する。
- 2 凸部分の中心を arm end とする。
- 3 最初の凹部分の点を記録する。
- 4 不能
- 5 凹部分の中心を centromere とする。

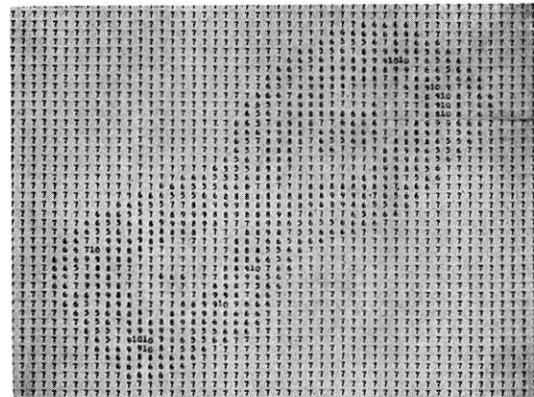
と重み付けにより arm end, centromere を決めるべき表4の1対のサブルーチンを指定する。

これらの処理を行なった結果を写真4に示す。

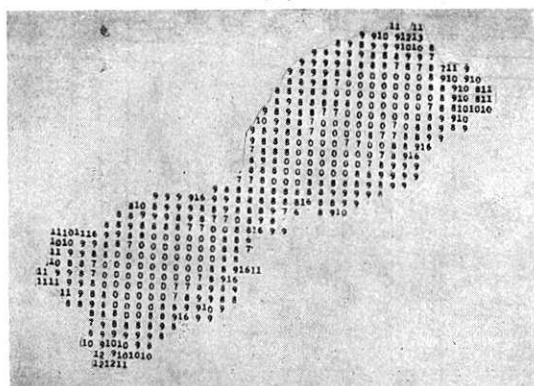
(a) は8レベルにした染色体を示す。(b) は(ii)の輪郭の抽出を行なうために周囲の濃度と比較した結果である。(c) は(iii)の輪郭のコーディングを行なうため重み付けを求めたもので、(d) はこれにより図14



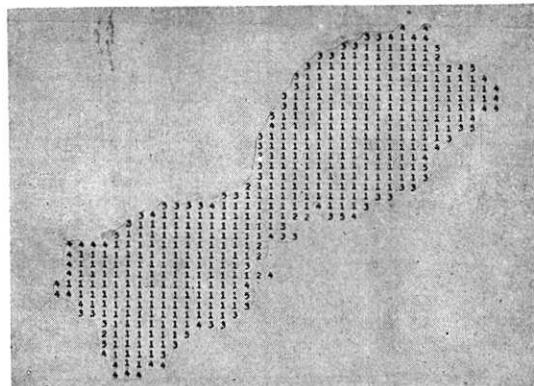
(a)



(b)



(c)



(d)

写真4

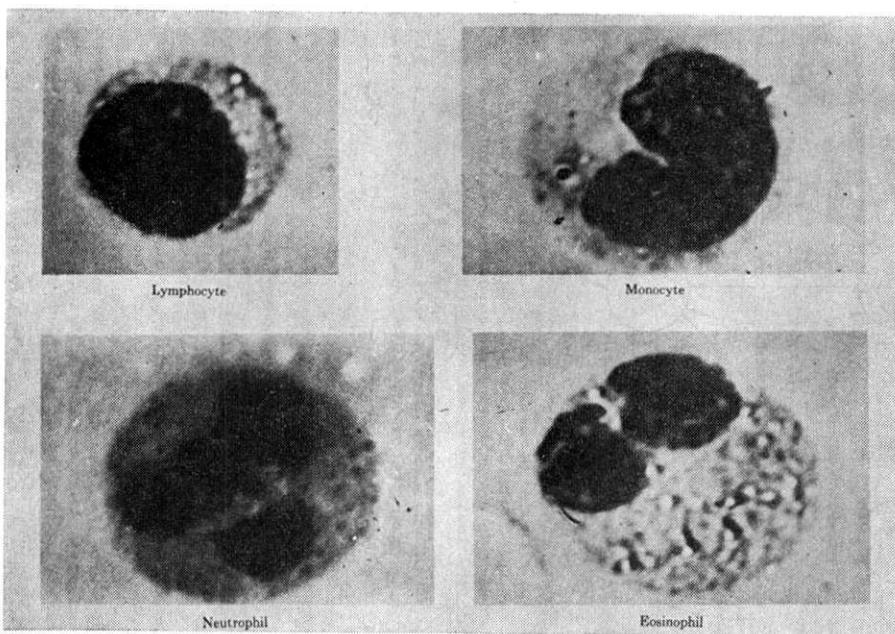


写真 5

の状態図に対応してプリントしたものである。これより arm end, centromere が求まる。

4) 白血球の分類

白血球には写真5に示すようにリンパ球 (Lymphocyte), 単核球 (Monocyte), 好中球 (Neutrophil), 好酸球 (Eosinophil) の4種類があり、病気によりこれらの数や割合が変るので、多くの患者について白血球の数や割合が検査され、診断に用いられている。現在は人間

が顕微鏡をのぞきながら、計数、分類を行なっており自動化が待たれている。

白血球の分類を行なうとすると、血液中に含まれる赤血球の存在が邪魔になる。白血球と赤血球の物理的分離は、血液を遠心分離機にかけ、比重の違いを利用して行なうことができる。このようにして分離した白血球について分類を行なっている例もある。しかしながら、この方法では手間が余分にかかるので、ここでは、赤血球

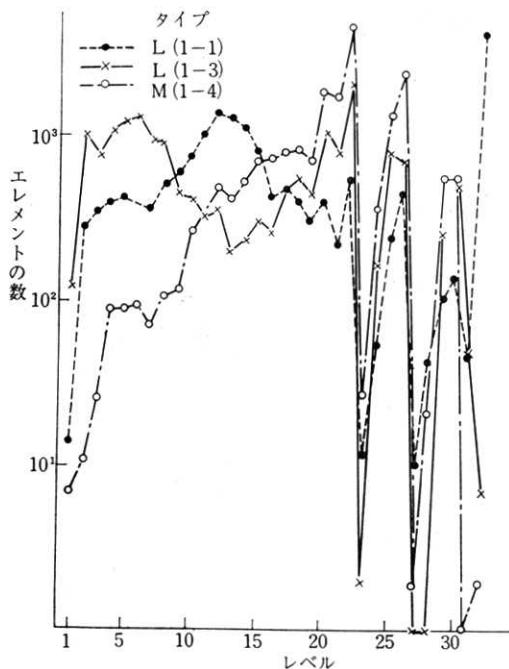


図 15 血液の濃淡の頻度分布 I

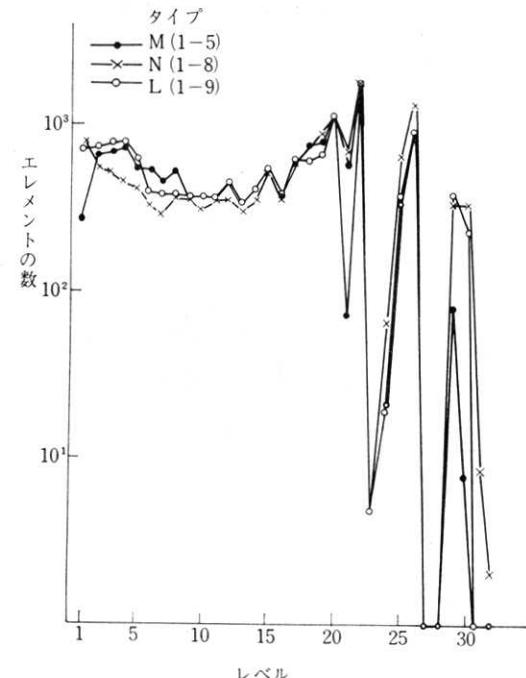


図 16 血液の濃淡の頻度分布 II

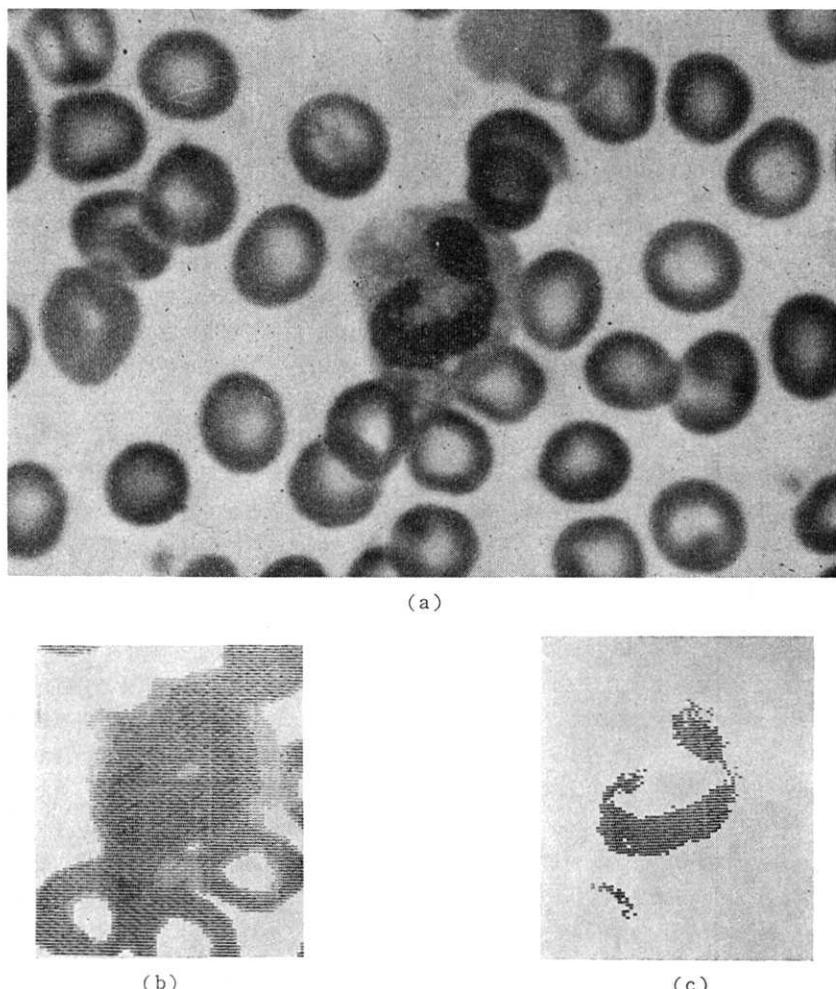


写真 6

と白血球が混在する画像から白血球のみを拾い出して分類することを考えた。

画像の中の赤血球と白血球の分離するために、色の情報を用いて、適当なフィルタにより画像の中から白血球のみを浮出させることはできないかを、血液のカラー・スライドについて調べた。そのため赤血球の部分、白血球の部分の周波数特性を分光計により調べてみたが、顕著な差はなかった。色の情報を利用するにはスライドをとる光源から変えてゆかねばならないようである。そこでとりあえず色の情報により分離することはやめ、黑白の写真の中から赤血球と白血球の濃度の違いを利用して分離することにした。

方針としては

(1) 赤血球と白血球の分離

(2) 白血球の分類

の順に行うこととした。

赤血球と白血球の分離を行なうために画像の濃度の分布を求めてみた。画像の中には、背景、赤血球、白血球

の細胞質、白血球の核の4つの性質の異なる部分があり、白血球の細胞質と核のみを抜き出したい。

血液の顕微鏡写真をパタン読取り装置でデジタル化し、32レベルに正規化したものの頻度分布を求めると図15、16のごとくなる。パタン読取装置の調整は、頻度分布I(図15)はコントラストが黒に強調されすぎた場合であり、頻度分布II(図16)は調整の良好な場合である。大体のレベル分布は次のごとくである。

背景	1~16
----	------

白血球の細胞質	17~22
---------	-------

赤血球	23~27
-----	-------

白血球の核	28~31
-------	-------

いずれの場合でも、白血球の核と赤血球とは、はっきりと分かれている。核は濃度のレベルを用いてとりだすことができそうである。

そこで、処理としては次の手順で行なうようにプログラムを作成している。

(1) 画像を全面走査し、頻度分布を求め、白血球の

核、赤血球のレベルを調べる。

(2) 白血球の核のみをレベルの情報を用いて抜き出す。ただし、赤血球が重り合わさっている所では、核と同じようなレベルになることもあり、雑音となるので、大きさなどの情報を用いて除く必要がある。

(3) 核と判定した部分の周囲を画像からとり出し、細胞質の部分をとり出す。これは、細胞質の部分は赤血球より濃度が低く、また、背景とのコントラストも弱い場合がありかなり難しい。白血球が孤立している場合には、比較的容易と思われるが、周囲の赤血球と接している場合には赤血球と分離するプログラムは複雑となる。

(4) 分離された白血球の分類 細胞質の面積、核の面積、核の型、細胞質の濃度分布、核の濃度分布、細胞質と核のコントラストなど適当なパラメータによって分類を行なう。これは多数のものについて、各種類の各パラメータ毎の平均と標準偏差を求めて、どのようなパラメータの組合せにより、最も処理が簡単でしかも分類の誤りが少なくできるかを検討しなければならない。

以上の手順につき検討するために40枚位の写真的データをパタン読取装置によってとり検討している。

写真6はその例である。(a)は顕微鏡写真的原図であり、(b)はデジタル化して出力したものである。上の手順の(2)の白血球の核を出すことを試みたのが(c)であり、この画像の中から28レベル以上の点のみを出力したものである。この例では赤血球が重なり合わさっている所が濃くなっているため、左下に核のレベルと見なされる部分が生じている。次の段階として、核の面積を1つのパラメータとして分類を行なうことを検討している。この際、赤血球の重なり合わさった部分の処理については、この部分の面積は核の面積が較べて小さいので無視する方法、あるいは、もっと複雑なプログラムでこの部分を除く方法を検討している。

5. おわりに

計算機を用いた多次元情報処理について、その手法、入出力装置を中心としたハードウェア、医学関係を中心とする実例を簡単に紹介した。

画像情報処理は比較的新しい技術であるが、広義の画質の向上については、スペース関係の必要性から急速な進歩がみられる。帯域圧縮の研究にも手段として活用されている。この2つの分野では、人間が関係するのは最後の処理結果を判定する時であり、処理の段階では機械的に行なうことができるので、計算機に向いている分野である。

パタン認識的処理については、自動化、省力化と関連して応用分野も広く、実用化が待たれている。それを阻んでいる要因として一番大きいのは、文字のパタン認識などと同様に人間のパタン認識能力に計算機が及ばない点である。

この点に関しては、人間を含めたシステムを早急に開発し、計算機と人間とが協力し、パタン認識のように複雑な判断を伴う人間の得意とする分野は人間が引受け、計算機の不得意な部分を補い、計算機は人間の不得意とする高速な演算を行なって人間の負担を減らす方向で進むべきであると思われる。このためには人間と機械とが対話しながら処理をする対話型システムの開発を早急に行なう必要があり、この方向の検討を行なっている。

最近ICの登場、ミニコンピュータの発展とともにあって、デジタル処理のコストは大幅に下がってきてている。しかし、画像情報処理の入出力装置は非常に高価であって、幅広い普及を阻んでいる。この点に関して簡易な入出力装置の開発にも力を注いでいる。

(1970年11月19日受理)

