

画像処理と天文学への応用 [I]

岡村 定矩*

I はじめに

1. 画像処理とは

最近画像処理という言葉が話題となっている。この言葉から各人が思い浮べるイメージはその専門分野によってさまざまであろう。それは、画像処理が横割りのな学問という性格をもっており種々の分野に固有の問題に対して色々と応用できるためである。天文学においても、電波望遠鏡の観測データから電波強度の分布図を書くことや、光学望遠鏡によるギャラクシーやガス星雲の直接写真のように、画像データを取り扱う分野も多い。そこで画像処理とはどのようなことを行うのか、また天文学の分野でどのように応用できそうかということをも例をまじえて紹介することにしたい。

画像処理とは image processing の訳語であるが、image processing というのはかなり広い概念であり、扱う対象や手段にもさまざまなものがある。対象については、写真のような静止した二次元画像を扱うものが主であるが、ステレオ写真やホログラムのように空間軸が加わったり、テレビのように時間軸が加わったりする三次元的な画像や、カラー写真のように色座標軸が加わったり、資源衛星の写真のように、多スペクトル領域で撮影された複数枚の黑白写真の組などの多次元的な画像を扱うものもある。二次元画像についても、濃淡のある画像、濃淡のない（黑白二値のみの）画像があり、更に撮影する波長で見ても、可視光線、赤外線、X線、マイクロ波、超音波と多種多様である。

これらの画像処理技術を利用する目的には、雑音や歪みを除いて画質の向上を目的とするもの、画像に含まれる情報を自動的に計測、解析することを意図するもの、文字読取機に見られるようにパターン認識を目的とするもの、電子計算機による画像発生などのシミュレーションを目的とするものなどがあり、多くの場合には、これらの目的が有機的に結びついて1つの作業がなされてゆく。

ここに1つの例を示してこれらの手法が実際にどのような用いられるかということを考えてみよう。高性能の電子計算機を内蔵し、テレビカメラのような人工の眼を持ったロボットが惑星表面におりたつたとしよう。最初

は周囲の風景を見まわすことから始めるだろう。テレビカメラにとらえられた画像は画面の感度むら（シェーディング）を補正しないと真の濃淡を表わさないし、更にカメラの高さや向きによる歪みを補正し、両方のカメラで見た視差を計算しなければ対象物の距離がわからない。これらの処理がいわば前処理的な画質の向上である。次に視野の中にどんなものがあるかを知らなければいけない。石ころがあるとかクレーターがあるとかいったことである。このためには視野の中で、石ころやクレータを、背景と区別して見分けなければならない。これはパターン認識の問題である。この時点でも、対象を見分け易くするための階調処理や、輪郭の抽出などの画質の向上が必要である。見分けがついたなら、これらを計測、記録することが必要である。石ころがいくつ、クレーターがいくつ、その大きさの分布はといったことである。更にテレビカメラに赤外線の探知器がついていれば、それを通して得られた画像から、表面温度の分布も調べられるであろう。これらが計測、解析の作業である。

このような例では画像処理のほとんど全ての技術が必要であるが、このようなことを可能にするシステムは現在のところ存在しない。画像処理の分野で現在実用化の段階に至っているといえるのは、NASAの惑星探査衛星からの電送写真を処理して画質の向上を図っているジェット推進研究所（JPL）のシステムだけである。

画像処理を行う方式には光電的な装置を用いるもの、光学的手段を用いるもの、写真や印刷の技術を用いるもの、電子計算機を用いる方式などがある。ここでは主として電子計算機を用いるデジタル方式を中心に話を進めてゆくつもりであるがその他の方式についても簡単に説明しその利点や欠点を考えてみたい。

まず初めに、画像処理の分野でしばしば用いられる、重要な概念について述べよう。

2. 基本的な概念

2-1 画像の表現

画像処理を行うためには、画像を数学的に取り扱える形で表現しなければならない。黑白写真やフィルムのような二次元画像に話を限れば、図1のa)に示すように画像の平面を xy 平面にとり、 z 軸を濃度を表わす軸とすると、 $z=f(x, y)$ という関数で画像を表わすことができる。しかし電子計算機で処理する場合には x, y, z のような連続的な量（アナログ量）では取り扱えないので、画像を細かい網目（画素）に分割しその各画素の中

* 東京大学理学部天文学教室

S. Okamura: Image Processing and Its Application to Astronomy

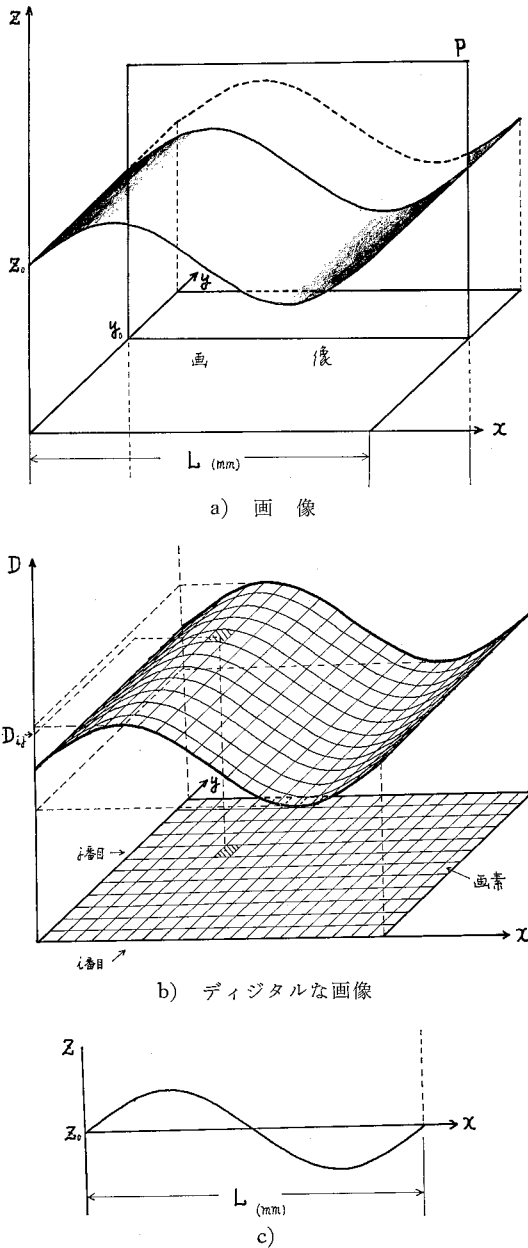


図1 画像の表現

での濃度の平均値を有限な段階で表わす。図1のb)に示すように、 x 軸、 y 軸方向にそれぞれ i 番目、 j 番目である画素の濃度を D_{ij} とし、 D_{ij} は例えば64段階の離散的な値しかとらないという制限をつける。そうすると画像は (D_{ij}) という数の組(行列)で表現することができる。つまり画像を離散的な量(デジタル量)である i, j, D によって表わすことができたわけである。このようなデジタルな表現 (D_{ij}) に対しても、アナログ的表現 $f(x, y)$ に対するのと同じような数学的操作(例

えば後述するフーリエ変換)ができることが示される。

2-2 空間周波数

ふつう周波数というのは、波が1秒間に何回振動するかという量であるが、画像処理ではこのように時間的な周波数ではなく、画像の単位長さの中に波が何波長分入っているかという空間周波数が重要な役割をもっている。図1のa)の画像を、 xy 平面に垂直でかつ x 軸に平行な平面 p で切ったとしよう。この $y=y_0$ での切り口が図1のc)に示すような正弦波であったとすると、画像の広がり L の中に1波長の波が含まれていることになるから、 $y=y_0$ での x 方向の空間周波数は $1/L$ (Hz/mm) である。すぐわかるように画面全体で一様な濃度をもつ画像の空間周波数は x 方向、 y 方向共に0である。

2-3 フーリエ変換

一般の画像は、上に述べたように、切り口が正弦波の形になっているわけではない。しかしよく知られているように、大抵の曲線は、いろいろな周期をもつ正弦波と余弦波を、適当な割合で重ね合わせることによって表現できる。図2には、5個までの正弦波で直線を近似した様子が示されている。そうすると一般の画像に対しては、どのような周期をもつ波を、どのような割合で重ね合わせたものであるかということが興味ある問題である。これを求める操作をフーリエ変換という。画像 $f(x, y)$ をフーリエ変換して得られた関数 $F(\omega_x, \omega_y)$ は、 x, y 方向の周期がそれぞれ ω_x, ω_y である波を重ね合わせる割合(その波の振幅)を表わしている。関数 $F(\omega_x, \omega_y)$ のこともフーリエ変換と呼ぶ。

フーリエ変換の振幅の2乗 $F^2(\omega_x, \omega_y)$ をパワースペクトルという。図3に二種の気象写真のパワースペクトルが示されている。容易にわかるように、高い周波数の成分は、画像の輪郭や微細構造に由来するものが多いので、図3の上の写真ではパワースペクトルは、中心(周波数0)から遠くの方(高周波)にまでわたっている。

フーリエ変換 $F(\omega_x, \omega_y)$ は、逆フーリエ変換という

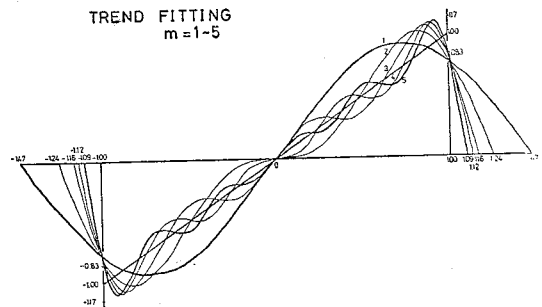


図2 正弦波の重ね合せ

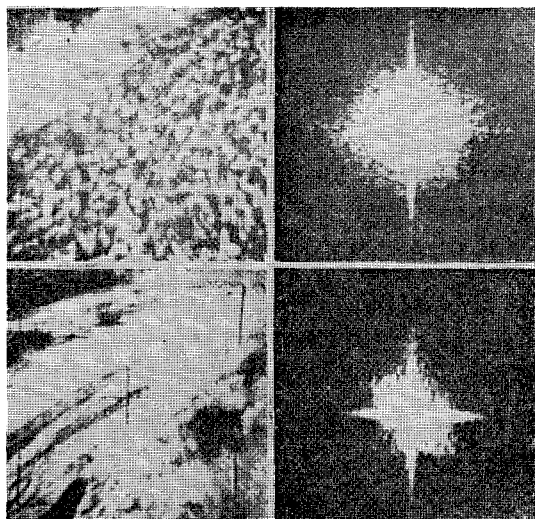


図 3 気象写真のパワースペクトル

操作によって、もとの画像 $f(x, y)$ にもどすことができる。したがって周波数フィルタを用いて、 $F(\omega_x, \omega_y)$ のうちからある特定の周波数成分を強調したり、除去したりしたものを、逆フーリエ変換によって画像にもどすということも可能である。

II 画像処理の方式

ここでは、色々な画像処理の方式を簡単に説明し、それぞれにどのような特徴があるかということ述べる。

1. 光学的な装置を用いる方式

この方式は、画像を何らかの方法で電圧や電荷のパターンに変換し、これに対して電気的な操作を施すことにより画像を処理するものである。

1つの例は、光導物質のスクリーンと、エレクトロミネッセンススクリーンを組合せたものである。光導物質は、光があたると電気抵抗が変化する性質をもっているが、この物質を含む小さな回路を作り、その回路の多数の配列をスクリーンに貼りつける。そうすると、その配列に投影された画像は、対応する電流のパターンに変換される。エレクトロミネッセンススクリーンは、電場がかかると光を発するので、これら2つのスクリーンをつなぐと画像の再現ができる。更に途中で電気的な操作を行うことによって、画像を処理することが可能である。

また他の例としては、光電子放出面に画像を投影し、放出された電子を電場によって平行束にし、これをグリッドを受けて電荷のパターンに変換するものもある。

この方式では、電気的な操作で画像処理を行うため、処理速度は速いが、その反面一般的な線形処理以外は困難である。また、シェーディングや安定度、解像力などの

面で高性能な装置を作ることは簡単ではない。

2. 光学的な装置を用いる方式

2-1 コヒーレント(可干渉)な光を必要としないもの

コヒーレントな光を必要としない方式には、2つの画像のある種の合成(たたみこみ)が、レンズを用いて簡単に出来ることを利用するものが多いが、この方法では、処理の柔軟性がないので、あまり実用には向いていない。

写真技術を用いるものも、この分類に入れることができる。2枚の画像(ここではフィルムの形態をとるものとする)の和と積は簡単に求まる。つまり2枚のフィルムを重ねて焼付ければ積になるし、1枚目のフィルムを焼付けたあとに、2枚目のフィルムを2重露出すれば和が求まる。更にハーシェル効果のような写真の反転効果を利用したり、ネガとポジを組合せたりすることによって、2枚の画像の差なども求めることができる。グラフィヤ写真①,②,③,④,⑤にこの例を示す。レリーフ写真の技術や、サバチエ効果として知られている現象法を用いると、画像の輪郭を抽出することができる。レリーフ写真というのは、ネガとポジをわずかにずらして重ね合せ、これを焼付けるものである(表紙参照)。サバチエ効果は、撮影ずみの感光フィルムを、ある程度まで現像した所で、現像中のフィルムに対して一様な露光を与えて、更に現像を続けると、画像の輪郭にそって境界線の現われる現象である。

2-2 コヒーレントな光を必要とするもの

この方式は、光の回折によって、レンズの焦点面で簡単にパワースペクトルを得ることができ、そのスペクトルに種々の演算ができることを利用したものが多い。このようなシステムの構成を図4に示す。

図4で、 S は波長 λ の単色光源、 L_0 はコリメータレンズ、 L_1, L_2 はフーリエ変換レンズ、 P_1, P_2, P_3 はそれぞれのレンズの焦点面である。 P_1 に入力画像 $f(x, y)$ をおくと、これを透過した光は L_1 の焦点面である P_2 に回折像を生じる。 P_2 面での光の振幅 $u(x', y')$ は、回折の式から

$$u(x', y') \propto F\left(\frac{x'}{\lambda f_0}, \frac{y'}{\lambda f_0}\right)$$

となる。但し F は f のフーリエ変換である。したがって P_2 面での座標 (x', y') は、空間周波数 ω_x, ω_y に λf_0 倍の縮尺が入ったものと考えてよい。またこの面での光の強さの分布は振幅の2乗、すなわち $f(x, y)$ の縮尺入りパワースペクトルとなる。図3に示したパワースペクトルはこのようにして得られるものである。更に、この P_2 面でのフーリエ変換を L_2 で逆変換することによって、 P_3 面でもとの画像(と原点对称なもの) $f(-x, -y)$ を得ることができる。

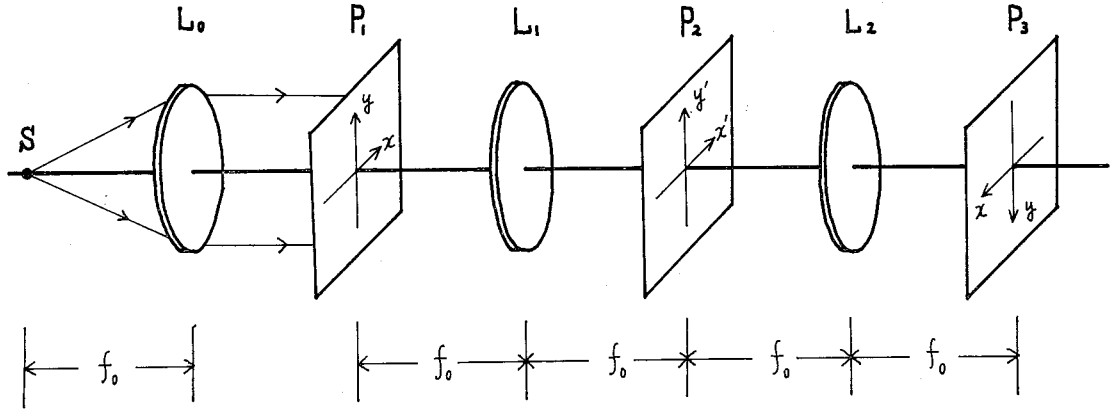


図 4 コヒーレントフィルタリングシステム

P_2 面に空間周波数フィルタを挿入することにより、画像に対して空間フィルタ処理を行う。例えば光軸を中心とする不透明な円板を置くと、低周波成分を除去することができるし、穴あきリングを置くと高周波成分を切ることができる。図 5 にこのような空間フィルタの効果を示す。図で (b) がもとの画像で、(a) がそのパワースペクトルである。(c) のようにパワースペクトルの低周波部分のみをとり出してこれを逆フーリエ変換すると、得られる画像 (d) は輪郭がボケてくる。また (e) のように、高周波成分のみで画像を再現すると、(f) に見られるように、もとの画像の輪郭だけが抽出される。

この方式では、処理時間が瞬間的であることが大きな利点であるが、線形フィルタ処理以外の処理を行うのが困難であること、大口径の装置を作るのが難しいことなどが欠点である。

3. 電子計算機を用いる方式

この方式は、画像を細かな画素の集合と考えて、それぞれの画素の位置と濃度の情報（前述した (D_{ij}) ）を計算機に読みませ、計算機によって色々の処理を行うものである。したがって、このシステムには、画像を画素に分割して、デジタル量からなる画像データ (D_{ij}) を計算機に入力するための入力装置と、画像データを処理するための電子計算機が最低必要であり、さらに多くの場合、処理結果を再び画像として見るための出力装置も必要である。これを図示したものが図 6 である。

この方式では、目的に応じて多種多様の処理ができるという柔軟性がある他に、高精度の処理ができるという利点がある。しかし一方では、計算時間がかなりかかること、大容量の記憶装置が必要であること、性能の良い入出力装置が手に入りにくいことなどの欠点がある。

ここに述べた以外にも色々な処理方式があるが、それぞれに一長一短をもっている。代表的なものは、電子計

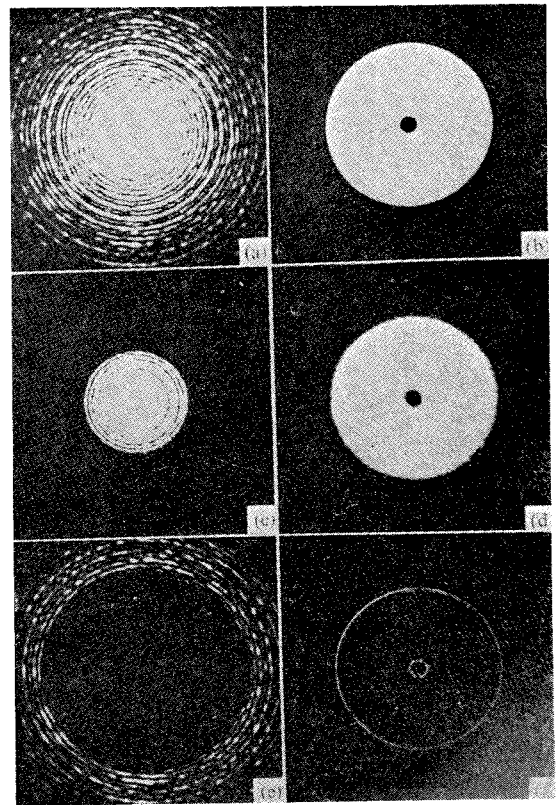


図 5 空間フィルタの効果

算機を用いるデジタル方式と、コヒーレントな光を用いる光学方式である。デジタル方式の方は、記憶装置の大型化、高速化に伴う計算機の進歩や、高速フーリエ変換 (FFT) のような計算方式の開発により、また一方光学方式の方は、レーザーの利用による可干渉光学の進歩により急速に発展している。

現在のところ、定性的な問題で、線形処理のみでよく、高速性が要求される場合には光学方式が、定量的な解析

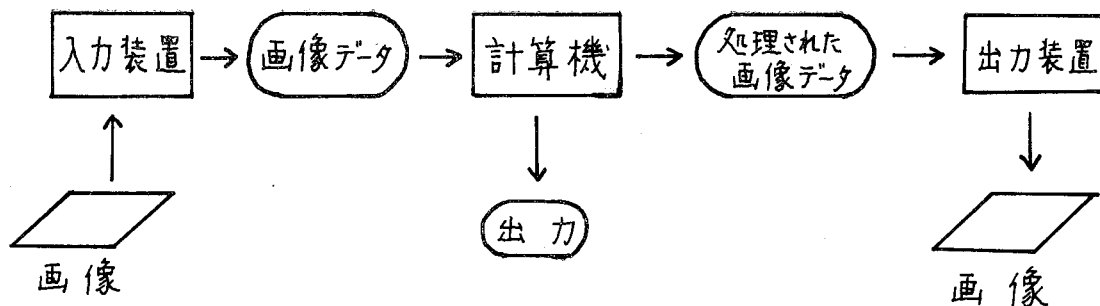


図 6 画像処理のデジタルシステム

と処理の柔軟性が要求される場合にはデジタル方式が優れているといえよう。最近では両者の特色を生かしたハイブリッド方式も注目されてきている。

以下ではデジタル方式に話を限って、入出力装置、実際の処理とその例、天文学への応用について紹介する。

III 入力装置

1. 分類

入力装置は、画像を走査して、細かな画素に対応する位置と濃度の情報を計算機に読込むためのものである。走査方法には、機械的に走査するものと、電子的に走査するものがあり、当然のことながら電子走査の方が速度は速い。また、走査の形式には、テレビジョンのように画像を一定の順序で走査してゆく順次走査と、任意の場所を走査できるランダム走査がある。入力装置と処理装置をオンラインにつないで、画像の輪郭に沿って走査したり、指定された領域内のデータを拾ってきたりする場合には、ランダム走査が行える必要がある。以下に代表的な入力装置の分類を示す。

機械走査——順次——メカニカルスキャナ
 電子走査——
 順次——撮像管（イメージオルシオン、ビジコン etc）
 ランダム——
 フライングスポット管
 イメージダイセクタ

2. 代表的な入力装置

メカニカルスキャナの例として図7に示されているものは、回転するドラムに巻かれた画像を機械的に走査するものである。画像を光源で照らし、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（アナログ量からデジタル量への変換）する。主としてオフライン方式の入力装置として用いられ、この装置によりデジタルな画像データを、磁気テープまたは紙テープといった媒体に作り出し、それを計算機の入力とする。

電子走査を行う方式には2通りあり、1つはブラウン管（CRT）上の輝点を画像上に投影して走査するフライ

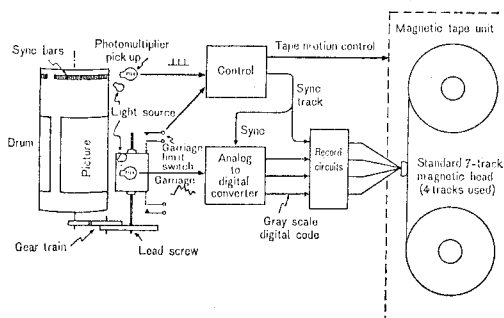


図 7 メカニカルスキャナ

ングスポット方式であり、もう一つは、画像をスクリーンに投影して、何らかの形でこれを電荷のパターンに変換し、電子ビームで走査する撮像管方式である。

前者の方式によるものは、フライングスポットスキャナ（FSS）と呼ばれ、図8に示すように、CRT上に小さな輝点を作り、この点の像をレンズ系で画像上に投影し、フィルムなら透過光を、写真なら反射光を光電管で受けてAD変換する。安定度をよくするために、図の例ではフィードバック機構がついている。オンライン入力装置として用いる場合には、輝点の位置は計算機により制御できるので、ランダム走査も可能である。輝点の直径は10ないし40ミクロン、画素の数は256×256個位から4000×4000個程度のものである。CRT上の輝点を投影して走査するために、暗い所で用いなければならないのが欠点であるが、高分解能でランダム走査がで

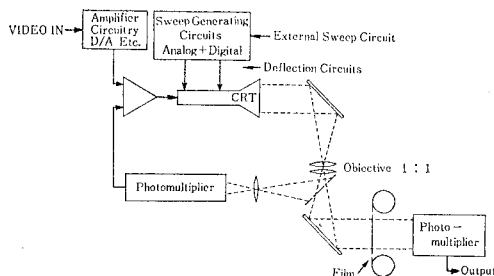


図 8 フライングスポットスキャナ

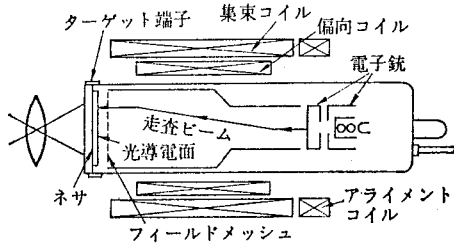


図9 ビジコン

きるのが利点である。

後者の撮像管方式には、光電子放出面に画像を投影し、そこから放出される電子を電荷蓄積ターゲットに導き、このターゲットを電子ビームで走査するイメージ形撮像管と、光導電物質で作られたスクリーンで感光と電荷蓄積を同時に行い、これを電子ビームで走査する光導電形撮像管とがある。

図9に示すビジコンは、光導電形撮像管の代表的なものである。ネサと呼ばれる透明導電膜が信号取出し電極であり、その上に光導電物質が蒸着されてターゲットを構成している。電子ビームの走査で、面電位が0ボルトになった時に、ターゲット面上に電荷が蓄積され、次のビームが来るまでの間に、放電によって面電位が上昇し、ビームによって再び0ボルトに充電される際に信号電流をとり出す。ビジコンは感度は良いが、あまり走査速度を上げられず、オンライン入力装置とするには、適当な記憶装置で速度変換をすることが必要である。また電荷パターンは電子ビームによって破壊されるので、ランダム走査は行えない。

一方、イメージダイセクタは、非蓄積型であるが、走査が自由に行なえ、明るい所でも用いることができるので注目されている。図10に示すように、光電子放出面に画像を投影し、そこから放出される電子流を偏向して電子による像を作り、この像の各点からの電子をとり出して増幅し、信号電流に変換するものである。最近ではこれらの入力装置の他に、電子ビームを用いない、いわゆる固体撮影装置も何種か開発されてきている。

IV 出力装置

出力装置は、コンピュータによって処理された画像データ

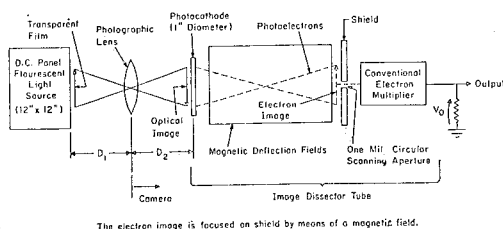


図10 イメージダイセクタ

を、再び画像として我々の目に見える形に出力するものである。出力装置には、行印字機(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、FSS、テレビジョンなどがある。

ラインプリンタで画像を出力する場合は、1文字または2文字分のスペースを1画素に割当てる。ラインプリンタの活字には様々なものがあり、その濃淡も色々である。例えば英文字のOとWでは、Wの方が濃く見えるし、OとWを重ねると更に濃くなる。こうして活字と活字の重ね合せにより濃淡の変化をつけて画像を表現する。この方法で16レベル位の濃淡は表現できるが、階調特性はあまりよくない。また1画素が大きく、間隔が粗いこと、1画素の縦横比が1対1でないことなどがあるために、良質の画像は得られないし、画素の数が多いと、何枚ものラインプリンタ用紙を貼り合せなければならないという欠点がある。しかし何と云っても、最も手軽に使えるものであるだけに、現在でもかなり活用されている。

XYプロッタは、元来、線を表示するものであるから、画像の輪郭を示したりするのに用いられるが、1画素あたりに打つ点の数の多少によって、濃淡を表現することも可能である。

蓄積型オシロスコープは、分解能が低いこと、濃淡の階調があまり出ないことから良質の画像が得られない。しかし手軽に使えるので、モニタ用などの簡易的な出力装置としては良く用いられている。

グラフィックディスプレイは、計算機とオンラインにつないで、対話型のシステムを作る際には不可欠のものであり、ライトペンを用いた処理もできる。しかし高価であるために手軽に利用できないこと、濃淡のレベルが普通2値しか表わせないことなどもあって、あまり一般的ではない。

FSSは、入力装置と同じもので良く、出力装置として用いる場合には、未露光フィルム上に輝点を投影して感光させる。濃淡を表わす方式には、輝点に対して輝度変調するものと、輝点の滞在時間を制御するものと、輝点の露光回数を制御するものがある。ポーラロイドカメラで撮影する方法が良く用いられている。

テレビジョンは、そのまま用いると走査速度が速すぎるので、計算機の出力を、適当な記憶装置を用いて、走査方式に合わせて変換しなければならないのが難点であるが、最近開発されたシリコンビジコンのように、画像を蓄積した後、任意の速度で読出しができるようなものと組合せれば、低価格であるだけに、有効な出力装置である。

現在のところ、品質の良い画像出力を得るには、高価ではあるが、FSSが最も優れた出力装置といえる。

(以下次号につづく)