

コンピュータ・グラフィックス* [1]

大須賀 節雄**

1. ま え が き

電子計算機への期待は、最初はおもにその数値演算の高速性と無誤謬性に寄せられており、従来の利用方法は、もっぱらこの特徴を十分にいかすことが心がけられていた。この結果、次第に計算機向きの問題とそれ以外の問題が区別されるようになり、同じ組織の中ですら、一方では事務処理部門のように電算化が積極的に進められる反面、設計部門のように従来とあまり変わらない方法で仕事が行なわれるという現象が生じてきた。

従来計算機向きでないと言われていた多くの分野の仕事にも、計算機の利用しようとする努力がこれまでも重ねられてきた。しかし、その最大の障害となっていたのは、人間と計算機間のコミュニケーションの問題であった。従来、人間-計算機間のインタフェースはカードリーダー、紙テープリーダー、タイプライタおよびラインプリンタ程度に限定され、両者間の自由な情報のやりとりをむずかしくし、ひいては計算機の利用範囲を限定してしまっていた。

オンライン・ディスプレイ装置の開発はこの障壁を大きく打ち破り、人と計算機間の意志疎通の道をひろげるものであった。そしてこの新しい手段を背景に、マン・マシン・インタラクション・システムとか、対話形処理システムといわれる技術が急速に発展してきている。

コンピュータ・グラフィックスはこのようなマン・マシン・システムの中でも特に重要な、注目すべき技術である。それはコミュニケーションの媒体として、文字や数字のほか図形の利用を可能にしたからである。文字や数字のみを扱うものであるなら、ディスプレイ装置をまつまでもなく、たとえ、性能的には劣るとしても、従来のタイプライタで機能的には事足りるのであろうが、図形をも扱うとなると事情は著しく変わってくる。人は情報伝達の媒介として図形を非常に多

く用いているから、計算機でその処理を行なうということは、計算機利用の範囲を著しく拡大することになる。しかしそのためにはハードウェアおよびソフトウェアの両面にわたって、従来と異なる新しい多くの技術を開発してゆかなければならない。

コンピュータ・グラフィックスはこのように図形を介して、主としてオンライン・インタラクティブに計算機を利用し、計算機の力を設計や意志決定の問題に役立てるための技術である。一方、最近 CAD (Computer Aided Design) とか Design Automation という言葉がポピュラーなものになってきたが、これは計算機向きの設計方式の開発に重点をおいた技術を表現するものとみてよいであろう。コンピュータ・グラフィックスの技術は CAD にも大きな影響を与えるから、この両者は深い関連があることはいうまでもない。

コンピュータ・グラフィックスはインタラクティブであることに主眼をおいてはいるが、設計などへの利用を考えると、当然そのハードコピーが必要になってくる。これはインタラクティブの利用には適しないが、設計への計算機利用は、むしろハードコピーから始まり、実用的な意味で活用されているのもハードコピーの方が多い現状であるから、これを無視するわけにもゆかない。そこで、コンピュータ・グラフィックスの中にこれを含める。ただし紙数が限られているので、ハードコピー・グラフィックスに関しては簡単に触れるにとどめる。

2. ハードコピー・コンピュータ・グラフィックス

ハードコピー・コンピュータ・グラフィックスは、計算機からのデジタル情報に基づいて紙やフィルム上に図形を描く装置およびその技術である。これにはペンと電気機械系を用いるプロッタ(またはドラフタ)と、光で描いた図を写真にとるコンピュータ・マイクロフィルムに大別される。後者は概して装置が高価になるが、前者は簡単な小型のプロッタから計算機を組み込み、高度のソフトウェア・パッケージが利用される大型の自動製図器まであり、価格についても大きな

* Computer Graphics [1], by Setsuo Osuga (Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo)

** 東京大学宇宙航空研究所

第1表 ハードコピー・グラフィックス比較

	アナログ	インCREMENTAL	デジタル・ドラフタ	CRT
精度または 分解度	0.015"	(インCREMENTAL・ステップサイズ) 0.002", 0.05 mm 0.005", 0.1 mm 0.01"	0.001" (max)	0.01% (フルスケールの)
速度	7"/sec (線表示)	900 ステップ/sec	12"/sec (線表示)	3 フレイム/sec
出力フォーマット の大きさ	標準 30"×30" 大型 48"×60"	12"×120" 30"×120" 54"×72"	5'×5' より 5'×20' まで	35 mm または 16 mm film 8 $\frac{1}{2}$ "×11" ハードコピー
コスト	オフ・ライン \$50 K 以上 オン・ライン \$25 K 以上	オン・ライン ≒\$7 K オフ・ライン \$16 K カード入力 \$25 K-50 K 磁気テープ入力	\$90 K 以上	\$100 K-\$200 K 以上

幅がある。

図形を機械的に描く装置としては、従来からアナログ計算機の出力装置としてアナログサーボを用いた記録器があるが、デジタル信号を処理するには DA 変換器を必要とするほか、機構上多くの問題点がある。そのため、デジタル計算機の出力で直接図形を描くという要求は、計算機がようやく実用化にはいった初期のころから存在し、それにこたえて 1940 年代末期には、すでに現在のインCREMENTAL・プロッタの前身ともいべきものが発表されている。ドラム形とフラットベッド形という現在のプロッタの2つの代表形式がそもそもこの時点で現われたのである。1950 年代末になって磁気テープ入力機構を備え、毎分 300 点の速度で図を描くデジタル・ドラフタが現われた。これらハードコピー・プロッタはその後多くの改良を重ね、精度および速度ともに著しく向上してきた。一方 1960 年代初期に最初の CRT マイクロフィルム・システムが開発された。この新しい方式の成功により、以後多種類のものが現われ、これからのプロッタのうちで重要な役割を占めるものと予想されるに至っている。

このようにプロッタには電気機械式と、光学式とがあり、さらに、電気機械式はアナログサーボを用いたアナログ式、デジタルサーボを用いたデジタル・ドラフタ、パルスモータを利用したデジタル・インCREMENTAL・プロッタに分類される。これらの性能を第1表にまとめて示すことにする。

これら4種の装置はそれぞれに長があるため、目的に応じて使い分けが必要である。しかし一般的にいうと、アナログ式は急速にデジタル式におきかえられつつある。4種のうちで最も複雑であり、し

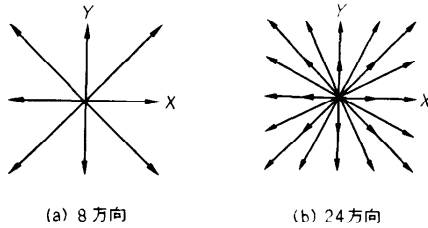
たがって価格も高いのは CRT マイクロフィルムとデジタルドラフタであるが、これらはそれぞれ速度および精度という重要な性能面で他にまさっている。CRT マイクロフィルム方式は CRT スクリーン上に図を描いて、これを写真にとるもので、電気機械式の約 300 倍と、絶対的な速度を誇る反面、精度はあまりよくないし出力の大きさも限られている。デジタルドラフタは精度が最も高く、かつ速度の点でも CRT 以外のほかのものより速い。特に精度の高いことは重要で、IC 回路のマスク設計などには $\pm 0.001"$ の精度が要求されているが、これは人手では容易に達し得ない。また速度の点でも人間に比べれば著しく早く、1台で製図工 30 人分程度の仕事を処理するといわれている。

デジタル・インCREMENT方式は精度や速度ではこれらに劣るが、価格が安く、手軽で使いやすく、コンパティビリティが大きいなど多くの利点があり、さらに最近ではステップ幅も非常に小さくとれるものが出現し、精度の点でもデジタルドラフタに匹敵するものも作られる一方、ステップ速度も向上しているなどのこともあって最も多く用いられている。インCREMENT方式については、もう少し詳しくしるすことにするが、これら各種方式の比較に際しては、コスト、精度、速度、結果の品質、利用できるソフトウェアの種類、使いやすさ、保守のしやすさなどを目安に、目的に応じて判断すべきであろう。

2.1 インCREMENTAL・プロッタ

話しの順序が逆になるが、プロッタの動作原理を、紙数の都合もあって、現在最もポピュラーなデジタル・インCREMENT方式のものについて述べておこう。

インCREMENTAL・プロッタは X 軸および Y 軸方



第 1 図

向にパルス・モータによりペンを駆動し、ペンの下におかれた紙に小ベクトルの連鎖として図形を描く。このステップ幅は第 1 表にも示したように 0.01", 0.005", 0.002" あるいは 0.1 mm, 0.05 mm といった程度である。またペンを上下させるために Z 方向にも制御される。基本動作はペンを X, Y 両方向に 0 または ± 1 ステップ動かすことで、この場合ペンは第 1 図 (a) のように 8 方向のいずれかに 1 ステップ動くことになるが、同図 (b) のようにこれを拡張して 24 ベクトルとしたものもある。この場合、精度を高めるため、プログラムによってインCREMENTの大きさを自動的に選択することができるようになっている。

INCREMENTAL・プロッタの問題点の一つは、ステップ速度にどうしても限界があることであったが、CALCOMP 社では多相のパルス・モータを使用して、速度を数倍にあげる ZIP モードと呼ばれる方式を採用している。これはプログラム内蔵の制御器を備え、ペンの動作が上述 24 方向のいずれかの方向を一定の距離以上進む場合、それを検出して自動的に ZIP モードにはいり、通常のINCREMENTAL速度の最大 3.75 倍までの速度でペンを移動させる。

一方、これと多少異なるデルタ・モードと呼ばれるものを用いる方式もあり、これは専用の制御機構またはプログラミング・ロジックを内蔵したバッファ制御ユニットを備え、一つのコマンドでマルチプルステップの駆動ができるようにしたもので、計算機を内蔵したデジタルドラフタにおけるデルタ・コマンドと類似な動作をINCREMENTAL・プロットにもたらし、たとえば、1 cm の直線を描くのに通常モードでは約 100 個のINCREMENTAL入力を必要とし、そのおのおの最小 1 キャラクタを必要とするが、デルタ・モードでは X, Y 両方向の全INCREMENT量を与えればよいので、2 キャラクタですむことになる。これには特殊目的のデルタ・モード発生器が必要であり、ここでデルタコマンドが分解され、プロッタへの X,

Y 両方向のINCREMENT指令が作られる。このデルタ・モードは入力指令の数を減少することによって計算機の負荷を軽減し、オンラインでプロッタを利用する際にマルチプレクシングを容易にするという利点がある。しかしいずれにしても、これらの技術が有用となるのは直線やゆるやかな曲線を多数含む図の場合で、変化の大きな曲線や小さな文字を描くにはあまり効果がない。

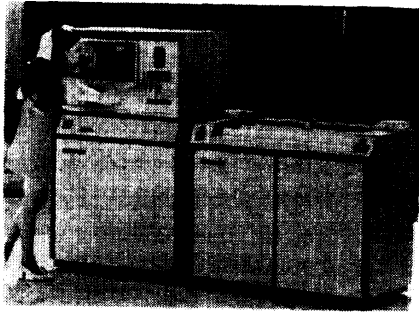
計算機とのインタフェイスという点からみると、計算機とオンラインで結合され、計算機からの指令で直接に駆動されるオンライン利用の場合と、磁気テープを介して利用されるオフライン利用の場合とがある。

オンライン利用の場合はプロッタの費用だけですよという利点があるから、小型の計算機で利用するにはよいが、高速の大型計算機のもとで利用する場合や、プロットの量が多いときには、速度の違いプロッタをオンラインで駆動することは、計算機側への負荷を増すため得策でない。このような場合には磁気テープにいったんプロット情報を吐き出すようにすれば、計算機のロードを著しく減らすことができる。たとえば、計算機で数分で作り出される情報でも、プロッタでは 1 時間分ほどにもなるから、オンライン方式では、たとえマルチプログラミングのもとでも計算機のロードは大きくなる。オフライン方式では制御部を含めた磁気テープ装置が必要になるが、大型計算機の場合、計算機時間を含めると、オペレーティング・コストは減少する。計算機出力を記録した磁気テープは特別のリードオンリー・デッキにかけられ、この出力がプロッタを制御する。個々のプロット情報はブロック・ヘッダを有する別個のデータ・ブロックに記憶され、プロッタ・テープデッキは通常ブロック・サーチ機能を有している。

プロッタ・テープ・デッキは標準の 7 または 9 トラックのテープを用い、テープ上のビット・デンシティも 200, 556 または 800 bpi と通常のものが用いられるが、ビット・デンシティの大きなものは、テープから送られる情報速度にマッチさせるため、情報間のブランク領域が大きくなり、テープの利用効率がよくない。この問題はテープ・デッキとプロッタ間にコアバッファを用い、テープからは、たとえば、1 K 字といった単位のブロックでコアバッファに読み出し、これからプロッタにINCREMENTAL情報を送るという方式により解決することができる。

プロッタを形状で分けると、前記ドラム式とフラッ

(a)

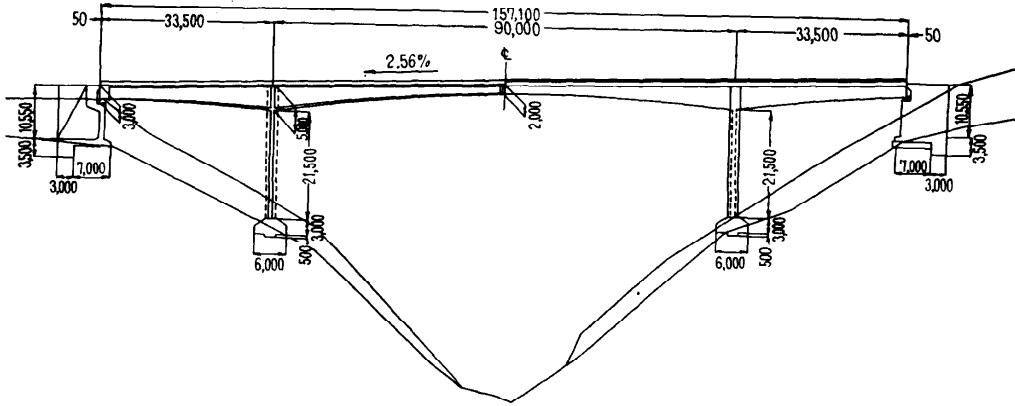


(b)

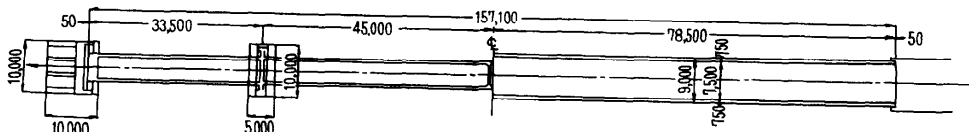


第 2 図

側面図



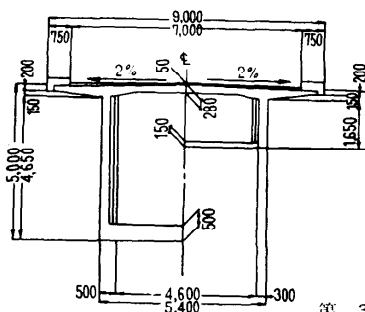
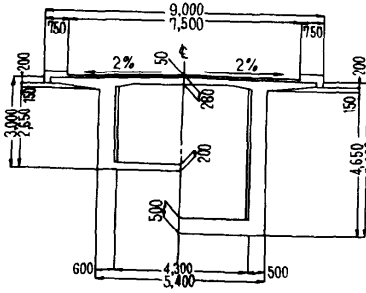
平面図



断面図

側径間

中央径間



第 3 図

トベッド式に分けられる。

ドラム式ではペンは縦方向にのみ動き、横方向の動きは紙の方が動くようになっている。使用される紙は縁に送り孔のあいたもので、これがドラムに巻かれ、ドラムの回転により紙の長さ方向に前後に移動する。この方式では出力図形は長さ方向には非常に長いものが得られるが、幅方向はあまり大きくとることができず、紙の方が動くため精度にも限界がある。

ドラム形プロッタはコストや使いやすさの面で比較的手軽に使えるので、最も普及している。どちらかという、簡単な図形の表示用に用いられるが、最近では性能も向上しており、アプリケーション・プログラムの開発とも相まって、この応用範囲も急速にひろがっている。このいくつかの例をあげてみると、実験や解析データの処理 PERT ネットワークの作成、経常用情報の表示などから始まって回路図、論理図あるいはフローチャートの作成、部品設計図面、土木・建築用の構造図面、建物の部屋の間取りや工場のレイアウト、さらに建造物の透視図などと広範囲にわたっている。**第3図**にドラム形プロッタで描いた橋梁図面の一例を示す。

フラットベッド形は X 、 Y 両方向ともペンが移動し、紙は固定されている。したがって、紙のすべりによるエラーが少なく、高精度のペン駆動機構を用いることにより、ドラム形より高精度のものが得られる。

フラットベッド・プロッタはドラム・プロッタと同程度の図面を、もっと高精度で、あるいは紙以外の材料に描くための比較的小型のものから、大きな製作図面を描くための大型 (54"×72") のものまである。小型の比較的簡単なものは計算機とのインタフェースもドラム・プロッタと同様であるが、大型の、もっと複雑なフラットベッド・プロッタは独自のコントローラを有し、これが計算機とプロッタ間のインタフェースの役割を果たしている。このインタフェースのもとでプロッターはオンラインで用いることもできるし、磁気テープ入力によるオフライン利用もなされる。このようなコントローラは、プロッタの応用の拡大とともに専用のコントローラからプログラム内蔵の小型計算機に移行しつつあり、従来は限定されていた図形入力の形式や入力ソースもユーザがプログラムを開発することにより、任意の指定ができるようになってきている。これはユーザにとって便利だけでなく、直線・円弧・円錐曲線などをすべて小型計算機で扱うことにより、主計算機のロードを大幅に軽減することができ

る。

以上の基本的要素に加え、ドラム形、フラットベッド形を問わず、より便利に、使いやすくするための各種の付属機構が用いられている。たとえば、最高6ペンまでのマルチプル・タレット・ヘッドを有するプロッタではペンの選択により、色や線の太さを変えることができる。このほか自動パターン発生器や数値制御機械用カッターシミュレータといった特殊なものがある。

最後にフラットベッド・プロッタの応用を考えてみると、ドラム形のもので扱われるものはすべてフラットベッド形でも扱うことができるほか、たとえば、金属板上に図を描くといった特殊な作業はフラットベッドでなければ不可能であり、さらに、建築・土木・自動車設計・造船・宇宙航空・気象・電子工業・石油工業など広範な分野にわたって、大型のかつ高精度の図面作成に役立っている。

2.2 プロッタ用ソフトウェア

このようにハードコピーグラフィックスはアプリケーションの拡大とともに、CAD の実用面での重要性を増してきているが、それがより高度なものになるにつれ、プロッタ用のプログラムが次第に重要なものになってきている。現在プロッタ・メーカーがペンの位置を動かしたり、直線を描いたり、あるいは文字を描くといった基本的なルーチンをサプライしている。基本ルーチンはペンの動きを直接コントロールするもので、機械語で書かれている。ほかのルーチンはこの基本ルーチンを利用する。たとえば、直線を現在の位置から ΔX 、 ΔY 離れた点まで引くとき、これを計算によってプロッタのインCREMENT信号に分解しなければならないが、“直線”のルーチンはこの分解のための計算アルゴリズムを用い、次いで個々のインCREMENTごとに基本のペン移動ルーチンと呼ぶことになる。

このほか、点線や矢印、センタラインを描くルーチンなどから、もっと高レベルのアプリケーション・ソフトウェア・パッケージが現在各プロッタ・メーカーで開発され、ユーザに供給されている。これらには、たとえば FORTRAN プログラムのフローチャートを自動的に作り出すもの、立体図を描くもの、等高線を描くもの、CPM や PERT のスケジュール・ネットワークを描くものなどのように問題向きのものとなっている。しかし、これら問題向きのソフトウェアになると、各ユーザに固有の要求があるため、必ずしもメー

カからサプライされるもののみで十分とはいえないから、ユーザ側で補ってゆく必要がある。しかし、これはプロッタだけの問題でなく、一般に問題向き言語と呼ばれるものに共通の問題であろう。

3. インタラクティブ・コンピュータ・グラフィックス

インタラクティブ・グラフィックスはディスプレイ・ターミナルを介して計算機をオンラインで利用する技術である。そして人と計算機との通信には文字や数字のほかにも図形が用いられる。計算機内ではターミナルにおけるオペレータの指示のもとにプログラムが実行され、その結果は直ちに表示されて、人の判断の資料となり、人はこれに基づいて新たな指令や入力を計算機に与える。

従来、人間と計算機が隔絶されたバッチ処理方式と異なって、このように人間と計算機とがチームを組んで問題の処理にあたるには、プログラム体系もバッチ処理とは異なると同時に、人間に結果を表示し、人間の指示やデータを直接受けることのできるターミナルの存在が前提になっている。

現在、インタラクティブ・グラフィック・ターミナルとしては Cathod Ray Tube (CRT) ディスプレイ・コンソールが主流となっている。CRT そのものの起源は放電現象の研究が進められたころ、すなわち約 100 年も以前にさかのぼることができるが、後にレーダ用として、さらに TV 用として広く普及し、次いで計算機の出力として用いられるようになってからかなりの年月がたっている。すなわち、1956 年にはすでに MIT で計算機のデバッグ用ターミナルとして CRT を用いており、また SAGE (Semi Automatic Ground Environment) システムでも、現在のライトペンの前身ともいうべきライトガンを入力装置として CRT ディスプレイ・コンソールが用いられていた。しかし人間と計算機とのインタラクションを通して意志決定や設計といった分野に計算機を活用すること、そのためにディスプレイ・コンソールをインタラクティブな入力装置として用いるということを最初に示したのは、I. E. Sutherland により作られた SKETCHPAD と呼ばれるシステムであろう。このシステムのもとで、人は CRT 面上に表示される図形要素の一つの名前としてライトペンにより指示することにより、取り扱っている問題の計算機内モデルであるデータ構造に働きかけ、これを修正し、補足し、削除し、あるいはデー

タを入力することができる。計算機のプログラムはデータ構造をたどって、人間により指定された部分を図形として CRT 面上に表示し、また人間の指示を受け入れる。

図形要素間の相互関係は画面上で関連づける図形要素を選択し、それらが互いに平行であるとか直角に交わるといった関係を指示することによって計算機に教えられ、これがデータ構造に組み込まれる。SKETCHPAD では関連ある要素がポイントによって環状に連結されたリング構造と名づけられた新しいデータ構造が用いられたが、このようなデータ構造を含めて、SKETCHPAD で用いられた諸方式が現在までに開発され、あるいは開発されつつある諸システムにいろいろの形で取り入れられている。しかしながら最も重要なことは、このプログラムがインタラクティブ・ディスプレイ・コンソールの果たすべき二つの機能を明確な形で提示したことであろう。この機能は第一に文字および図形によりデータを表現しまた受け入れるための入出力装置としての機能、もう一つはプログラムの遂行されるべき順序をコントロールするという機能である。これらの機能はオンライン端末としての共通の機能ではあるが、ディスプレイ端末は従来のいかなる入出力装置よりも効果的であることが実証された。同じ MIT の T. E. Johnson はこの SKETCHPAD の概念を三次元物体の表現に拡張し、三面図や Perspective の手法を用いて立体表現の先駆をなした。

SKETCHPAD が公表されたのは 1963 年であったが、その後 General Motors においても同様の研究がすでに進められており、かなりの成果をあげていたことが明らかにされた。DAC (Design Augmented by Computer) と呼ばれるこのシステムは IBM 7094 とディスプレイ・コンソールを用いて自動車の設計プロセスに計算機の手を導き入れ、実用面で大きな成果をあげたものである。これは現在の IBM 2250 システムの原型となっている。一方、このころ Itek Corp. において Digigraphics システムが開発され、現在では CDC に受けつがれている。以来、今日に至るまで多数のグラフィックス・システムが開発されてきている。

日本においては穂坂が図形処理の問題を 1960 年ころより独自の方法で扱っていたが、1966 年に本格的なインタラクティブ・グラフィックス・システムを完成した。これは現在の HITAC 8811 システムの原型となったものであるが、図形発生に、独自の、プログラムによる DDA 方式を用いているのが特長となっている。

る。その後各メーカーともグラフィックス・システムの開発にのり出し、すでに DDS 300, FACOM 6233 A, HITAC 8811, N 287 B-1 などが発表されている。

3.1 CRT ディスプレイ・ターミナル

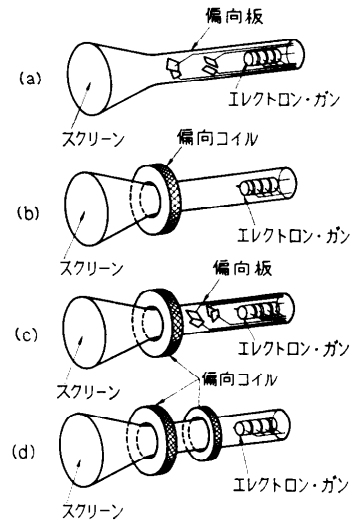
インタラクティブ・グラフィックス・コンソールとして現在実用化されているものは、ほとんど CRT ディスプレイ装置に限られているといってもよいが、CRT 以外にもフォトリソム・ディスプレイ、光弁ディスプレイ、エレクトロルミネッセンス・ディスプレイ、液晶ディスプレイ、レーザ・ディスプレイ、プラズマ・ディスプレイ、オプト・マグネティック・ディスプレイなど、各種の新しい技術に基づくディスプレイ装置の研究が行なわれている。これらのうちいくつかのものは大型スクリーン・ディスプレイにも利用されるものとして期待されているが、現状では一部の特殊な利用を除いて実用化までには至っていない。また、これらの新しい方式を用いたディスプレイ装置については、すでに多くの解説がなされているので、ここでは取り上げない。

CRT ディスプレイについても、限られたセットの文字および数字のみを表示するキャラクタ・ディスプレイからベクトルを表示し、ライト・ペンそのほかの図形入力装置を備えたグラフィックス・ディスプレイまである。どちらも CRT を用いているので、基本原理はにかよっている。ただキャラクタ・ディスプレイは表示するパターンが有限のセットの記号に限られるので、それを効率よく行なうために、CRT 表示部分のほかに特殊のキャラクタ発生装置を有している。これにも各種の方式があって、それぞれに文字発生速度、表示速度、文字セットの数、文字品質、文字種類の可換性、コストなどが異なり、用途ごとに使い分けられる。キャラクタ・ディスプレイは TSS 用のインタラクティブ・ターミナルとして近年急速に普及しているが、図形を取り扱うことはできないので、ここではこれ以上扱わない。ただし、グラフィックス・ディスプレイでも、通常は図形と同時に文字や数字が非常に多く利用されるので、専用の文字発生回路を有しているものが多い。

3.1.1 CRT

基本的な CRT は大別してエレクトロン・ガン、偏向システムおよびホスファ・スクリーンの3つの部分から構成されている。

エレクトロン・ガンはヒータ、カソード、グリッド、加速電極およびフォーカス・システムから成り、ここ



第 4 図

でエレクトロン・ビームを発生し、焦点を合わせる部分である。

偏向システムはエレクトロン・ガンから発生した電子ビームを所要の方向に向けるためのもので、これには静電偏向式、電磁偏向式およびこれらの組み合わせたものがあり、通常用いられるのは第 4 図に示したようなものである。これらはいずれも電子ビームが電場および磁場を通過するさい、電場または磁場の強さにはほぼ比例して偏向する性質を利用して外部からビームの方向、したがってビームがスクリーンにあたる位置を制御するものである。静電式と電磁式はそれぞれ一長一短があり、その選択は利用目的に依存する。一般的にいうと静電式は偏向角が小さいうえ、偏向板を内蔵しているため、電磁式に比べて CRT 全長が長くなる。また電磁式と違って偏向のさい電子ビームが加速され、しかも、これは偏向角によっても異なるため、電子ビームがひろがってしまうという欠点がある。反面表示速度は電磁式に比して約 10 倍も速いこと、外部のコイルなどが不要であるから重量が軽いこと、衝激などに比較的強いこと、偏向板が内蔵されていることは、一方ではマルチガンによる独立な複数ビームの方式が利用しやすいなどの利点がある。

電磁式の方は現在家庭用 TV として非常に普及しており、分解度がよく、偏向角が大きいため CRT 全長が短いこと、電場と異なって磁場では電子ビームは加速されないから、スポットがひろがらず画面上のスポットが小さいこと、CRT の外側からコイルを巻くため

かなりの自由度があるなどの利点がある一方、表示速度が遅く、偏向角が大きい部分でピン・クッションによる変形が生ずるなどの欠点もある。現在のところ、静電偏向式は CRT の画面の径が小さく、表示速度の早いものに用いられ、電磁式は径の大きなものを利用して、静電式+電磁式、あるいは電磁式+電磁式といった複偏向システムは、これらを改良し性能向上をねらったもので、たとえば、静電式+電磁式では文字を表示する際、表示位置まで偏向するのは電磁的に、そこで実際に文字を描くのは静電式にといった使い分けをすることにより、この両方の長所をとり入れている。

ホスファ・スクリーンは電子エネルギーを光エネルギーに変換するもので、電子ビームのあたったところに光を発生する。電子ビーム・エネルギーの一部は、スクリーン上に塗布されたホスファ結晶電子に与えられてこれを励起し、これが再びもとのエネルギー・レベルにもどるときに光を放出する。画面の明るさはビームのエネルギーのみでなく、用いる蛍光物質にも依存する。蛍光物質によって光の持続性が異なり、初期の強さの 10% レベルに落ちる時間をめやすとして、 $0.1 \mu\text{s}$ ~数 10 sec にわたるが、この時間により数段階のクラス分けがされている。持続時間の長いものを用いると像がなかなか消えないから、静止した像を表示するにはよいが、変化の多い図を表示する場合は前の像と次の像が重なってしまう。持続時間の短いものを用いるとこのようなことはないが、画像のちらつき(フリッカ)をなくすためには、同じ画を何度も繰り返して表示してやらなければならない。このように同じ画を繰り返して表示することをリフレッシングと呼ぶが、一般的に言って、持続性の短いものほどリフレッシングの回数を多くしてやらなければならない。ただし、所要リフレッシング回数は持続性と相関はあっても光の波長その他にも依存し、またフリッカの生じない程度というのも見る人の個人差もあって絶対的なものではない。通常リフレッシング型のディスプレイといわれるものは、持続性で大体 $40 \mu\text{s}$ ~600 ms の範囲であるが、フリッカ・フリーのリフレッシング回数は大体 30~60 フレーム/sec である。

図形を描くために電子ビームを動かすには有限の時間が必要であるから、このようなリフレッシングが必要となることは、CRT で描きうる図形の複雑さを限定することになる。持続性の大きなホスファを用いてリフレッシュレートを下げれば描きうる図形量は増大

するが、変化の大きな図形を扱えなくなる。点および線を表示する速度は CRT ディスプレイの重要な性能指標の一つである。通常の CRT ディスプレイ装置では長い直線を引くものと、曲線を描くために用いる短ベクトルがあり、同じ線でも多少表示時間が異なるが、電磁偏向方式を用いた標準の CRT ディスプレイで長線の場合 20 cm に約 30~50 μsec 、短線の場合 1 cm に約 10 μsec 程度かかっている。

このような基本的な CRT のほかに、この変形として各種の特殊 CRT が作られている。これには前述のキャラクタ・ディスプレイの一部、たとえば CRT 内部に文字マスクを有し、文字選択と表示位置選択という 2 回の偏向を行なうものとか、計算機出力の表示に背景図などを重ねてうつすための窓付きの CRT などがあるが、グラフィックス・ディスプレイとして特に触れておかなければならないものにストレージ管がある。CRT は元来電気信号を光に変換するトランスジューサであるから、画像情報は別に独立の記憶装置に記憶する必要があるが、このためのコストがかなり大きい。もし画面が画像を保持するなら CRT 自身が変換と記憶を兼ねることになり、リフレッシングが不要になる。ストレージ管はエレクトロン・ガンのほかにもう一つ別の電子流を発生させるフラッド・ガンというものを内蔵し、ここから放出される低圧の電子流により一度スクリーン上に描かれた画像が常時再生され、画像を数時間あるいはそれ以上にわたって保持している。このようなストレージ管では像は固定していて、フリッカの心配はなく、リフレッシュ型に比して多くの線を表示できる。リフレッシュ用の特別な記憶装置が不要になるから、特にリモート・ターミナルなどに便利である。一方、画像が画面に記憶されてしまうので修正がしにくいという不便がある。ディスプレイ・ターミナルがインタラクティブであるためには任意の図形を描くことができると同時に、任意にその一部分を消去できることが必須条件である。リフレッシュ型では、画像が必ず消滅し、次のサイクルで前と異なった情報を与えてやれば自動的に像が変化するから、部分消去のみでなく、変化の激しい図形、たとえば動画などでも特に問題はない。ストレージ管は表示された図形を一部修正してやるときでも、全部を消して改めて描き直してやる必要がある。この際、リフレッシュ型では画像情報がアクセスの容易な記憶装置にすでに作られているから、修正部分のみを変化させれば十分であるが、ストレージ管では画像情報を改た

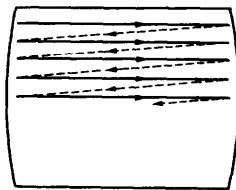
めて全部作り出さなければならず、計算機側の負担が大きい。さらに後に述べるように有力な入力装置であるライトペンが使えないという不便もある。このほか画面の明るさがリフレッシュ型に比して約 1/3 と暗いため周囲を暗くする必要があり、現在のところ画面が小さく、値段も高いという欠点もある。しかし、リフレッシュが不要であるということは非常に大きな利点であるので、今後用途によりかなり利用されるものと思われる。

3.1.2 図形の表示

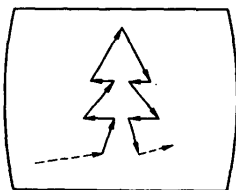
CRT ディスプレイでは電子ビームを X および Y 方向に制御するほか、輝度の制御が行なわれる。これはプロッタのペン上下の制御と対応するもので、いわば Z 方向制御である。この 3 種の制御を用いて画面に像を描く方法に二とおりある。一つはテレビ式のラスタ・ビーム・スキャン方式で、ビームはスクリーン全面を一定の周期で走査し、それに同期させて輝度を制御する方法である。これはテレビの場合のように複雑な陰影のある像を表現し、しかも輝度制御信号自身が対象をカメラでうつして、その光の信号を電気信号とかえるといった電送形式の場合には適しているが、たとえば、うつしているものが直線であるとか円であるといった図形固有の性質はまったく考慮されていない。しかし計算機で図形を扱うとしたら、まず第一にこれらの図形の性質に基づいて、それに関するパラメータ、たとえば直線の場合には両端の座標といったものをプログラムによって求めるのが普通であるし、また、それだからこそ図形に様々な処理がなされる。したがって、

計算機出力をラスタ・スキャン方式で表現しようとすると、プログラムによって得られた図形情報に面倒なラスタ・スキャン変換を施すという手順をとらなければならない。さらに、計算機とディスプレイ・コンソール間に早い伝送速度が要求されるのでこの方式は一般的でない。ただし、ドラムとかディスクといったマス・メモリを利用し、この回転速度に同期してラスタスキャンを行なうというような方式を用いることにより、端末に安価なディスプレイ装置が利用できるのも、CAI のように 1 台の計算機で多数端末を制御し、しかもそれほど高級な図形表示をする必要のない場合にラスタ・スキャンが用いられることもあり、またその反対に、従来扱われてきたように、図形を線のみで表現するのでなく、影つきの物体を表現しようとする非常に高度の問題において、ラスタ・スキャン方式が用いられている。これらは、しかしながらむしろ例外であって、通常用いられるのはランダム・ポジション方式とも呼べるものである。これは図形を線で表現するものとし、表現しようとする線にそってビームを動かすもので、いわば、人間が紙の上にペンで線画を描くと同じ方法である。実際には曲線も点もしくは短いベクトルの連鎖として表現するから、すべての図が点もしくは直線の列である。輝度は何も光を出さないブランクを含めて数段階に制御される。

このようなビームの動きは、計算機から送られてくる図形情報（コマンド）により制御される。原理的にはこの情報は次にビームが移るべき位置を示す座標データであればよい。現在位置から指定された点まで直線上をビームが動けば、すでに述べたように、すべての図が直線の連鎖として表わされる。この際、 X 方向、 Y 方向の両偏向シグナルは、任意の時点で常に一定の比例関係を保つように制御されていなければならない。しかし、実際には使いやすさを考慮して、多種類の制御様式が作られている。たとえば、ビームの位置を画面上の任意の位置に線を出さずに移動させること、同じく指定された位置まで長い直線を引くこと、現在位置から X 、 Y 両方向に指定された増分だけ線を描くことなどを初めとして、キャラクタ発生器を有するものは、キャラクタのコードを送ること、そのほか多くのコマンドの種類が作られる。したがって、図形コマンドは単にデータのみでなく、動作様式を示すコードを有し、このコードとデータから構成される。なお、キャラクタ発生器を有しないものでは、文字も 1 つの図形とみなして描くことができる。しかし実用上



(a) ラスタ・スキャン



(b) ランダム・ポジショニング

図形処理システムでは、図形と同時に文字が表示される場合が多く、いつも上述のような一般的な方法で(計算機の直接制御のもとで)、文字を表示するのは得策でないので、高速に文字を発生する文字発生器をもつものが多い。

このような図形データは最終的には CRT の偏向システムに与えられる電圧波形に変えられなければならない。これはディスプレイ・コントローラにより行なわれる。ここではコードによりコマンドの種類を判別し、図形情報の場合には特別なファンクション発生器(DA 変換器を含む)で所要の電圧波形を作って偏向システムに送る。文字コードの場合には文字発生器に文字コードを送ってこれを駆動し、その出力信号を制御信号とする。

個々の図形コマンドはそのつど計算してディスプレイ・コントローラに送られるのでは到底間に合わないから、あらかじめ計算機内でプログラムによって作り出されたものが、図形情報用記憶装置に一定の順序で記憶されており、ディスプレイ・コントローラが順次これを取り出して使うことになる。したがって、ディスプレイ・コントローラは次に読み出すべきコマンドのアドレス・カウンタを有している。リフレッシュングをするには記憶された情報の最後から再び最初のところにもどらなければならない、このために図形コマンドにはジャンプ命令が含まれるか、あるいはこれに等価なことのできる制御機能がコントローラ内に作られている。さらに、目的によっては(電気回路内の抵抗などのように)同じ形の図形要素が多数用いられる場合が多く、これをただ1つの図形プログラム(図形コマンドの列)で間に合わせるため、サブルーチン・リンクに相当する命令を含むものがある。

ディスプレイ・コントローラには、このほかビーム位置の刻々の座標を記憶している。これは図形入力装置を利用する際に重要である。

3.2 入力装置

グラフィックス・システムには大別して3種の入力装置がある。文字鍵盤、ファンクション・キー・ボードおよび図形入力装置である。

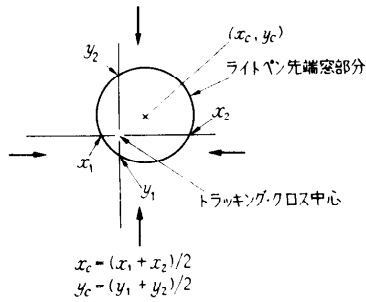
文字鍵盤は通常のタイプライタと同様、文章や数値データを入力する場合などに用いられる。

ファンクション・キー・ボードは 16~48 個程度のキーのセットで、オペレータがプログラムに指示を与えるために用いられる。ハードウェアの機能としてはどれかのキーが押されると計算機への割込信号を発生

し、押されたキー番号をコード化して送るもの、あるいはこれにただか押されたキーのランプをオンにする程度のもので、これらにどのような機能を与えるかは、オペレータがこれらにプログラムを対応させることにより決定される。たとえば、No. 3 のキーに A というプログラムを対応させて(たとえば、スーパーバイザ内の対応表の No. 3 の位置にプログラム A の開始番地を登録して)おけば、No. 3 を押すたびにプログラム A が実行される。プログラム A は、たとえば画面上に座標系を表示するルーチンであれば、No. 3 のキーを押すということは、“座標系を表示せよ”と指示することと同じになる。いずれにしる何をするかは対応づけられたプログラムの中身に依存して決められる。

図形入力装置は画面上の図形に直接関連する種類の入力装置で、これにはライト・ペン、タブレット、ジョイスティック、マウス、ローリング・ボールなど各種のものがある。図形入力装置に必要な機能は、(1)すでに表示されている図形を指示し、プログラムにそれを識別させること(ピッキング)、(2)画面上の任意の位置をさして、その座標をプログラムに識別させること(ポインティング)である。いかなる図形入力装置を用いるにしても、これはプログラムの援助のもとでのみ可能になる。

図形入力装置のうち最もポピュラーなものはライト・ペンであるが、これはリフレッシュ型の CRT ディスプレイにのみ使われる。これはペン状の単純な光検出装置で、先端の窓部分に光がはいると、ただちに電気信号を発生してディスプレイ・コントローラに送り、そこから計算機への割込信号が発せられる。すでに述べたようにコントローラは現在表示中のディスプレイ・コマンドの記憶装置内アドレスと、ビーム位置を保存しているから、割込信号と一緒にこれらの情報を計算機に転送する。計算機はこれに基づいてどの図形要素を表示中に割込みが生じたか、すなわち、ライト・ペンがあてられたかを知ることができる。これはピッキングにはかならない。これから明らかのようにライト・ペンは、リフレッシュ型のディスプレイにおいては画面上常に一点のみが光っているという性質を利用しているので、描かれている図形全体が光っているストレージ型ディスプレイには使えない。一方、ポインティングの方はもう少し複雑で、プログラムの積極的な援助が必要である。ライト・ペンの機構から、なにも描かれていない画面上に点をとることはできな



第 6 図

いから、まずライト・ペンが作用しうるような準備が必要である。ポインティングの一つの方法として、あらかじめ画面上にこまかな間隔の走査線を表示するプログラムを準備しておき、それを働かせ(たとえばファンクション・キーの一つと対応させておいて)、そこにライト・ペンを用いる。この方法にもラスタ・スキャンやスパイラル・スキャンなどがあり、また最初走査線をあらい間隔で表示してあらい座標を得てから、その周辺にもっと細かな走査線を表示するといった方法も用いられる。もう一つの方法はトラッキングと呼ばれる方法で、最初にトラッキング・クロスと呼ばれる小十字を表示し、この十字の中心が常にペンの中心に一致するように、計算機がたえず十字の位置を修正するようにする。この方法はライト・ペンの先端が点ではなく、ある面積をもった円形であることを利用するもので、第 6 図のように十字の 4 本の枝についてライト・ペン内にはいる座標を検出すると、ライト・ペンの中心位置の座標 (x_c, y_c) が

$$x_c = (x_1 + x_2) / 2, \quad y_c = (y_1 + y_2) / 2$$

と計算される。そこで十字の中心をこの位置に移動するようにすると、十字はライト・ペンの動きについて

くる。このようにしてライト・ペンを動かし、所要の位置までもってくることによりポインティングを行なうことができる。計算機が十字の位置を移動するとき、この移動分を次ぎ次ぎに図形コマンドに付加してゆけば、ライト・ペンの動いたとおりの図形が描かれる。十字がライト・ペンを追うには一連のプログラムが実行される必要があるから、ライト・ペンのあまり早い動きには追従できない。これを逆に利用すると、ライト・ペンを早く動かすことにより、トラッキングを終了させることができる。ライト・ペン以外の入力装置のうちジョイスティック、マウスあるいはローリング・ボールなどは、いずれも X および Y 方向にパルス列を発生する機構を有し、オペレータの手動操作によりその信号を積算した座標位置にカーソルを表示する。オペレータはカーソルを見ながらそれが所要の点に達するまで操作をつづける。このようにポインティングの方は比較的容易だが、ピッキングの方は指定された座標と一致する図形要素を記憶装置内のデータ・コマンドの中からさがし出す必要がある。

タブレットは平面的な入力装置で、ペン状のスタイラスとともに用いられる。現在ランド・タブレットとシルベニア・タブレットと呼ばれる 2 種のものがある。ランド・タブレットは、X および Y 座標を示す 2 層の交さした導体のマトリックスで、この各線にその座標を表わすコード化された信号が周期的に流されている。スタイラスを面に近づけると、その点の座標の X および Y 信号がとりだされ計算機に送られる。シルベニア・タブレットは抵抗板を用い、両方向に与えられた信号の位相差により位置を検出する。ランド・タブレットに比し分解度はよいが精度は落ちる。

(昭和 46 年 2 月 12 日受付)