

# 汎用画像解析装置 (DIANA-1) の高速前処理装置

藤井 憲男 河原 厚 橋本 憲慶  
(日本光学工業株式会社)

## 1. はじめに

画像処理の方法は多くの場合 (1)原画入力, (2)雑音除去, エッジ強調, 二値化等の前処理, (3)特徴抽出, 計量等の本処理, (4)判断といった手順におよびる。一方, 処理装置については (2)以降を汎用電子計算機や専用ハードウェアにより実行しているが, 汎用システムを考へる場合, ソフト, ハードの一方のみは片善さの性能率が悪くかつ不経済である。

上記の点に鑑み, 筆者らは  $\mu$ -コンピュータによって Function を変更できる局所並列処理装置と画像メモリを主体とするハードウェアを前処理装置として有する汎用画像解析装置 (Digitized Image Analyser-1 略称 DIANA-1) を開発した。即ち, 比較的多くの処理時間, メモリ容量を要する前処理や, Shrinking, Swelling 等の繰り返し処理をこの前処理装置に実行させ, 情報圧縮された結果を汎用計算機に転送して計算機の規模, 負担を可能な限り軽減しようとするものである。

## 2. ハードウェア

システムは図1に示す如く, 全体の管理及び汎用処理を行なうミニコンピュータ, 前処理装置としてのハードウェア (IPP), 及び種々の周辺機器から成り, 画像データはバスラインを通じて送受される。この内, IPPと周辺機器は  $\mu$ -コンピュータによって一括管理される。これは, 処理にミニコンを必要としない場合, (即ち, 局所並列処理のみで可能な場合) ミニコンを切り離し一連の意味のある処理の実行管理を可能として, システムの規模に弾力性をもたせるためである。

以下, 本稿では前処理装置及び周辺機器について詳述する。

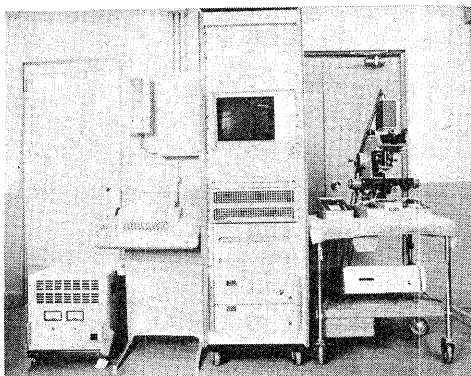


写真1. 外観

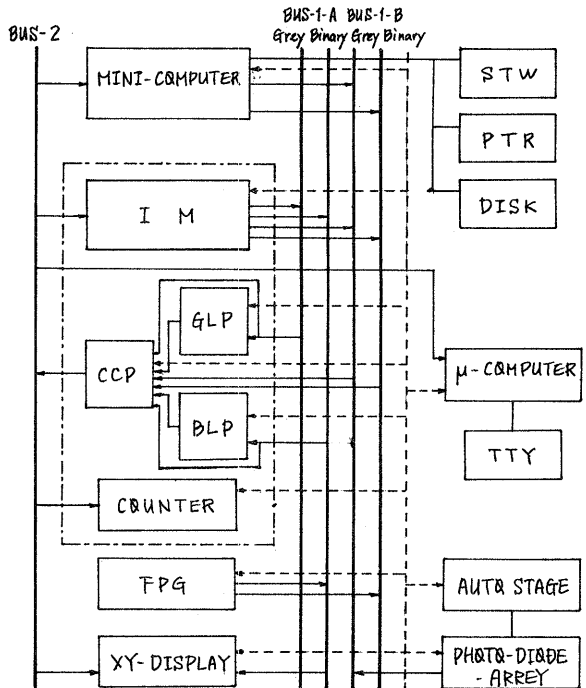


図1 システム構成

## 2.1 画像データ及びクロック

画像データは原則として一度画像メモリへストアし、画像メモリから処理部を経て画像メモリへストア、又はディスプレイする方法をとる。このための画像データ転送用のバスは処理部を中心とし、入力側として総輝度のデータを同時並列に転送する Bus-1-A と画像演算のために画素のデータを転送する Bus-1-B、及び出力側として濃淡画像、二値画像共用の Bus-2 から構成される。

画像データ転送及び処理のためのクロックは内部クロックとしてメモリコントローラが発生するクロックを使用するが、独自のクロックを必要とするデバイスを使用する際にはそのデバイスで発生するクロックを外部クロックとしてシステム全体で使用する。

この様に、デバイスの増設に対しは適当なデータバス及びμコンピュータとインタフェースをとり、クロックを導入又は発生させればよく極めて簡明である。

## 2.2 画像入力部

当面は顕微鏡画像を対象としている。受光素子として一次元 Photo-Diode-Array を使用し、これと直角方向にステータス筋のありかにより二次元の情報を得る。シェーディング、素子の感度バラツキ等に対する補正は付置した回路により行われる。ステータスの移動はステップモーターによりピッチ 0.5μm で行われる。

物体面での画面の上下は X 方向 (Photo-Diode-Array の方向) は光学系の倍率で、Y 方向はステータスの移動何ピッチ毎に画像データを入力するのにより決定される。なお、画像データの入力ライン数はμコンピュータで管理する。

## 2.3 画像メモリ (IM), メモリコントローラ

原画像、処理済画像を記憶するためのメモリをシフトレジスタによって構成される。二値画像12枚分を備え、濃淡画像用として使う場合は6枚を1組とし順に濃度  $2^0, 2^1, 2^2, 2^3, 2^4, 2^5$  に対応させる。使用するメモリととの使い方はμコンピュータから指令される。

このメモリからは Bus-1-A の Grey 側へ  $3 \times 3$  画素分の、Binary 側へは  $5 \times 7$  画素分の、Bus-1-B へは Grey 側、Binary 側各1画素分のデータが並列に出力される。Bus-2 からは Grey データの場合には6本のラインを各濃度レベルによって振り分け、Binary データの場合には同じデータが転送される6本のラインの内1本から入力される。

表1 システム仕様

画面サイズ	256 × 256 画素
濃度レベル	6ビット
一画面処理速度	50msec, 100msec
計算機	Melcom-70 (16KW + 2.5HW) Intel-8008 (8Kbyte)

表2 デバイス機能

IM	画像メモリ	原画像、処理済画像の記憶 256 × 256 画素。二値画像12枚。 (濃淡画像 (6ビット) 2枚)
GLP	濃淡画像処理部	3 × 3 画素の総輝度処理。
BLP	二値画像処理部	2 × 2, 3 × 3, 5 × 5, 5 × 7 画素の総輝度処理。
CCP	画像演算部	2枚の画像の対応する画素同士の演算
COUNTER		二値画像の論理1の画素数計数
FPG	Frame-Pattern -Generator	任意のサイズの矩形を任意の位置に発生させる。
XY-DISPLAY		画像のディスプレイ
PHOTO-DIAPHRAGM		一次元センサ。AUTO-STAGE と組み合せて二次元画像を入力。 シェーディング補正機能を付置。

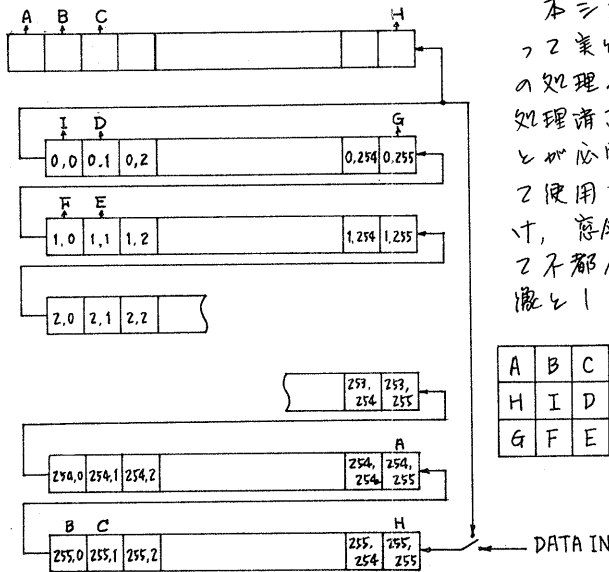


図2 画像メモリ

本システムでは局所並列処理を全面に渡って実行させるが、このためには一画面分の処理が終了するまで総領域画素データか処理済画素データに置きかわり、2通りのことが必要である。このため、薄淡画像として使用する際はメモリに付加レジスタを設計、総領域画素データをここから切り出して不都合を解消している。(図2) 二値画像として使用する場合は、処理すべき画像と処理済画像を異なるメモリに記憶させることとし、11-トの考慮は払ってはいない。

メモリコントローラは取送する画素数を管理するためX, Y2つのカウンタをもち、Xカウンタは1ラインの画素数、Yカウンタはライン数を数え、一画面に対応するX=256, Y=256になった時点で

メモリクロック停止信号を発生する。これらのカウンタにはM-コンピュータから任意の数をプリセットでき、これを利用して画像の平行移動が可能である。

クロックは処理に要する時間を考慮して2/3MHz, 4/3MHzの2種をもち、一画面に換算すると約10Hz, 20Hzに相当する。

### 2.4 薄淡画像処理部 (GLP)

Bus-1-AのGray側から次のと転送される3x3=9画素分のデータを受け取り、必要に応じて処理の結果を処理者中央画素として画像演算部へ出力する。

ここには2入力出力の演算モジュールを基本とし、総領域の隣り合う画素同士の演算を実行しての結果同士を順次合成して最終結果を得る。(図3, 図4)

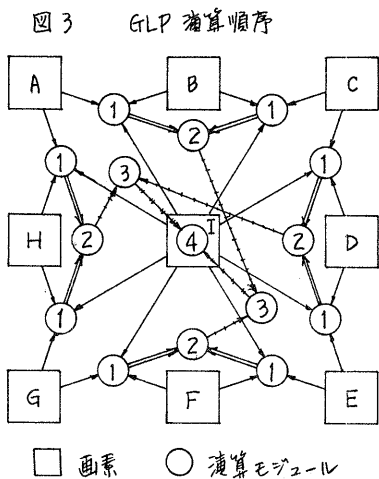
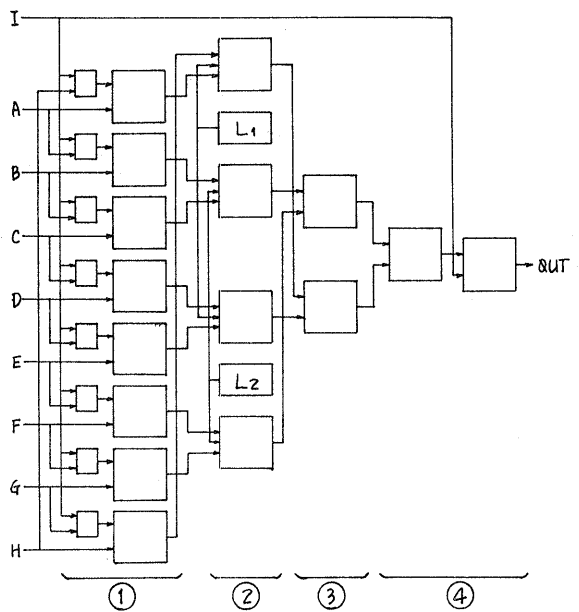


図3 GLP演算順序

図4 GLP構成図



各演算モジュールは ALU を主体に若干の追加回路により構成され、μ-コンピュータから演算機能の指定される。また任意の2種の定数を μ-コンピュータから設定でき、二値化の閾値としても使用できる。以上、各演算モジュールの機能及び定数の設定によつて、本処理部全体の演算機能の各種設定決定できる。(表3)

表3

GLPの演算機能例

平滑化  
二値化

$$i' = (a+b+c+d+e+f+g+h)/8$$

$$i' = \begin{cases} 1 & l_2 \geq i' > l_1 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

微分  
8方向ラプラス  
4方向ラプラス

$$i' = \max(|a-i|, |b-i|, \dots, |h-i|)$$

$$i' = |(i-a)+(i-b)+\dots+(i-h)|/8$$

$$i' = |(i-b)+(i-d)+(i-f)+(i-h)|/4$$

X方向差分  
Y方向差分

$$i' = |(a+b+c)-(e+f+g)|/2$$

$$i' = |(a+g+h)-(c+d+e)|/2$$

差分  
最大値  
最小値

$$i' = \{ |(a+b+c)-(e+f+g)| + |(a+g+h)-(c+d+e)| \} / 4$$

$$i' = \max(a, b, c, d, e, f, g, h, i)$$

$$i' = \min(a, b, c, d, e, f, g, h, i)$$

なお、本処理部には画素

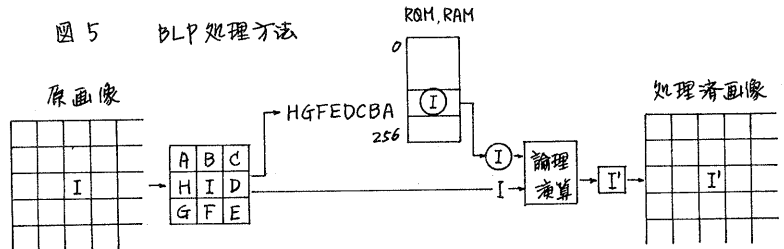
取送クロックを導入せず、あらかじめ演算機能の設定された状態で、Bus-1-Aに現れたデータ要素を伝播してゆく過程で演算が行われ一定時間後(約800ms)に最終結果の出口に現れるようにしてあり、回路の簡明化を図つてゐる。このため、本処理部を使用する場合のクロックは 3/8MHz に下げなければならない。

2.5 二値画像処理部 (BLP)

本処理部では 3x3 の窓の周囲8画素を ROM, RAM のアドレスとして使い、該当するアドレスに記憶された情報と中央画素との別は定める論理演算結果を処理済中央画素として出すことを基本演算とする(図5)

本処理部では処理の効率向上のため以下の6種の処理モードをもち、

図5 BLP処理方法



- ① 3x3窓の処理
- ② 2x2窓の処理: これは 3x3 を必要としたいライナー数計数や周囲長計数等に使用する。3x3窓の左上側 2x2 画素を使用する。
- ③ マルチフェーズ 3x3窓の処理: これは、別々ば骨格線化を行つた場合、線の連結を確保するために左上側からの shrinking と右下側からの shrinking を交互に実行させるため、あらかじめ2つの ROM, 又は RAM を指定しておけば一画面分の処理終了の段階で ROM, 又は RAM の使用指定が交互に切り換るものがある。
- ④ 領域分割 5x7窓の処理: これは Golay の六角形格子に対応する sub-field の考え方を变形させたものであり、一度に最大2画素分の shrinking, 又は swelling が可能となる。

図6の如く画面の画素を I, II, III, IV の4つの領域に分割すると、3x3窓の処理を考へる場合、Iの画素を中央画素とした際の周囲8画素中にはIの画素は含まれず、II, III, IV はついでとも同様である。ここでIの画素を処理する時は単に 3x3 の処理を行ない、IIの画素を処理する時は先に上下に存在するIの画素を処理した後IIの処理を行ない、III, IVの画素を処理する時はそれぞれ先にI, II, 又はI, II, IIIの画素を処理した後処理を行ない。この様にすると最大2画素分の

shrinkingやswellingが実行され、かつ隣接する画素はI, II, III, IVの順に処理されるため位相の保存は保証される(図7)。

本処理部はROM, RAMを複数個有する $2 \times 2$ 窓処理モジュールを13個もち、本モードを指定されると自動的に画面をI, II, III, IVの領域に分割し、処理すべき中央画素がどのどれに該当するかによって $2 \times 2$ 窓処理モジュールの組み合わせ方をコントロールする。

⑤  $5 \times 5$ 窓の処理: これは領域分割処理モードのIIIの画素に対す

る古のと同様の処理を全2の画素に対して実行するもので、 $5 \times 5$ の小領域に對する1パターンマッチングのために使用される。

⑥ First "1" Detect: 上記①から⑤までの処理結果に対し、画面中ラスタ一走査の順(Xメモリからの画素転送の順)で最初に現れる論理1(以下"1"と略記)の画素のみ"1"とし他の画素は全"0"とあるもので、画面中に多数の解析対象要素が散在する場合にこれを1個ずつとり出す時等に使用される。

μコンピュータからは処理モードの指定、各モジュールで使用するROM, RAMの選択、RAMへの書き込み、及びROM, RAMから得られた内容と処理すべき中央画素との論理演算内容の指定が行われる。

本処理部にも画素転送のクロックは算入され、クロック1周期の間はデータが伝播して処理が実行される。クロックは $4/3$ MHzで使用できる。

## 2.6 画像演算部 (CCP)

ここには2枚の画像の対応する画素同士の演算を実行する。本処理部には対応する2入力の内一方は濃淡画像処理部の出力、又は二値画像処理部の出力、又はBus-1-Aの中央画素(Grey, Binary等)であり、他方はBus-1-BのGrey又はBinary値である。この選択のため本処理部の前にはセレクタが設けられ、μコンピュータからセレクタ指定が行われる。この部分で二値画像データは同じデータの6ビットに増加され、濃淡画像データはビット数が左右される。

本処理部はALUを使用しており、処理結果は濃淡画像、二値画像共に6ビットでBus-2へ出力される。

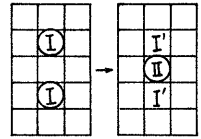
本処理部にも画素転送クロックは算入せず、1周期の間はデータが伝播して演算が実行される。

図7 領域分割処理

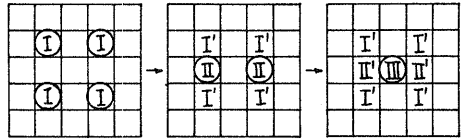
Iの処理



IIの処理



IIIの処理



IVの処理

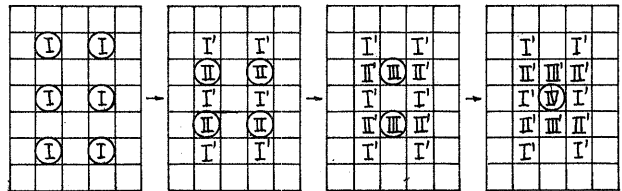


図6 領域分割

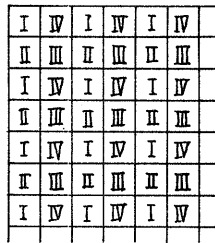


表4 CCPの演算機能例

$F=A$	$F=A \text{ OR } B$	$F=A \text{ AND } B$	$F=A \text{ EX. OR } B$
$F=B$	$F=\overline{A \text{ OR } B}$	$F=\overline{A \text{ AND } B}$	$F=\overline{A \text{ EX. OR } B}$
$F=\overline{A}$	$F=\overline{A \text{ OR } B}$	$F=\overline{A \text{ AND } B}$	$F=A \text{ plus } B$
$F=\overline{B}$	$F=A \text{ OR } \overline{B}$	$F=A \text{ AND } \overline{B}$	$F=A \text{ minus } B$

## 2.7 カウンタ

ここでは Bus-2 に転送される二値画像データの "1" の数を計数するため、カウンタ及びレジスタを備える。レジスタは複数回の計数の内最大値を保持するごと、又は前回の計数値を保持する。これは例之ば、前者は規格化の係数として、後者はくりかえし処理の終了判定のため（例之ば一息収縮のため shrinking をくりかえし、一回毎に計数レジスタへの転送を行ない、前回の計数結果と今回の計数結果とを比較して一致した時に終了とする）に使用される。この際の一致の判定は別に一致フラグとして出力される。

μ-コンピュータはカウンタ、レジスタのクリア、読み出し、一致フラグの有無判定を行なう。

## 2.8 Frame Pattern Generator (FPG)

画面の任意の位置へ任意の矩形を発生させるものとして、Bus-1-A の Binary 側中央画素ライン及び/又は Bus-1-B の Binary 側へ出力する。

μ-コンピュータからは矩形の位置とサイズ（左上角と右下角の座標値）、出力するバス及び矩形の内側を "1" とするの外側を "1" とするのを指定する。

本デバイスではマスクパターンの発生の際に任意のテストパターンを発生させるのに使用される。

## 2.9 XY-ディスプレイ

Bus-2 及び/又は Bus-1-A の Binary 側中央画素のデータを D/A 変換しディスプレイする。ここでは二枚の画像を濃度レベルに単に重ね合わせで見るとかまざるのことで処理前後の確認に極めて有効である。この操作機能はマン・マシンインタラクティブなシステムには必須と考えられる。二枚の画像を重ねディスプレイした場合、濃度レベルが自動的に調整されて双方を区別する。

μ-コンピュータからはディスプレイすべきバスを指定される。

## 2.10 μ-コンピュータ

CPU に Intel-8008 を使用し、RAM 8kbyte、PTR、TTY を備える。各デバイスに必要な指令を与え、動作の管理、シーケンス制御、カウンタの読み出し、Bus-2 とのインタフェースを介して画像のハートコピー等を行ない人間のインタフェースを司る。

現在は会話型の管理プログラムを常駐させ、マン・マシンインタラクティブに作業を進めたいが、解析方法が確立したものに付いては全自動解析プログラムを作成するに容易である。

## 3. ソフトウェア

μ-コンピュータの会話型常駐プログラムは、前項までで説明した各デバイスに対応する機能設定、処理開始（クロックスタート）、処理終了後のディスプレイ、マクロ命令の展開と実行管理、及び必要ならば結果のプリントアウトを行なう。

ユーザーは各デバイス毎に機能設定を行ない、クロックにスタートをかける。一画面命令のクロックが発生して処理を行なわれ、直ちに結果の画像がディスプレイされる。しかし、個体計数、周囲長計測等は機能設定、クロックスタートを何度でもくりかえす必要があるので、使用頻度の高いこの操作は 1 命令（マ

マクロ命令)にしている。一方簡単処理や、マクロ命令にない特殊な処理は各デバイス毎に機能設定をすることにより実行する。この様にして本システムの機能を十分に生かすことができる。

以下、表5に例示したマクロ命令の内いくつかについてそのアルゴリズムを紹介する。

### 3.1 ヒストグラム作成

入力された原画像を二値にするための閾値を決定するために濃度ヒストグラムを作成する。これは4LPに於て閾値を変化させて二値に作りかえし、その都度カウンタにより“1”の画素数を計数してM-コンピュータのメモリへ記憶させ、最後にFPGにより棒グラフを順に適當な画像メモリの適當な位置に発生させればよい。

### 3.2 縁要素除去

二値化した画像について各種のパラメータを計測する場合、画面の縁にかかっている要素は計測対象外とする必要がある。このため、その様な要素を画面中から除去する。これは、画面の縁にかかった要素のみを抽出して、原画像と排他的論理和をすればよい。

縁にかかった要素のみを抽出するには、画面の縁に1ビット中の枠パターンを発生させ、これと原画像との論理積をとった画像を作成し、これをswelling (2原画像との論理積をとることをカウント値が変化する)と称して実行すればよい。(図8)

### 3.3 穴埋め、個体数計数

個体数を計数するには位相保存shrinkingをカウント値が変化するまで繰り返して、その計数値を調べればよいが、十ナツ位の要素については前者の穴を埋めなければならぬ。これは物体の外側の背景のみをとり出

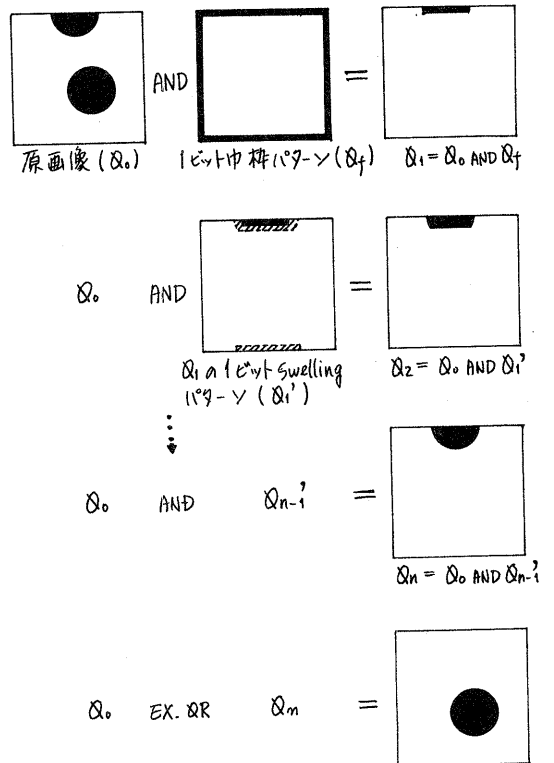
表5

マクロ命令例

原画入力	顕微鏡画像を6ビットレベルで入力する。
二値化	上下二種の閾値により二値化する。
ヒストグラム作成	濃度ヒストグラムの作成。
縁要素除去	画面の縁にかかった要素を除去する。
穴埋め	要素の穴を埋めた画像を作成する。
個体数計数	画面中の要素の数を計数する。
個別切り出し	画面中の要素の内ラスター走査の順で最初の要素のみ抽出する。
8角形化	要素の外接8角形を作成する。
投影長X,Y	X,Y方向への投影長を計測する。
フェレ径X,Y,V,W	4方向へのフェレ径を計測する。
周囲長計測	周囲長を計測する。
テストパターン発生	紙テープに列手番号座標に従い、任意のパターンを作成する。
スケール発生	画像を2^n分割するスケールを発生する。
Xメモリテスト	画像メモリのデータ保持機能についてチェックする。

図8

縁要素除去手順



12反転すればよい。外側の背景は必ず画面の縁にかかっていることに着目すれば、原画を反転して3.2で示した縁要素除去を実行すればよい。但し、要素を8連結で考えれば、この場合のswellingは4連結の意味で実行されるべきである。

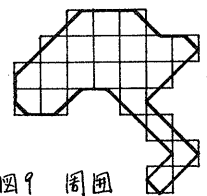
### 3.4 個別切り出し

画面中の多数の要素について、個別にパラメータを測定する場合、1個ずつ順に抽出する必要があり。これはFirst "1" Detect機能により画面中の最初の要素の最初の画素を検出し、これを核としてswellingし原画像と論理積をとることを繰り返すことで変化するまで繰り返すこととなる。

### 3.5 周囲長計測

周囲長計測は2x2パターンマッチングにより要素の周囲パターンを数え計測し、このパターンが周囲長に寄与する定数を乗ずることによって得られる。

正方形の画素が画面を構成しているとした場合、我々は要素の周囲を周囲画素の辺の中点を結んで得られる図形と考へ(図9)、各パターンに対する定数を図10の様に与える。



乗算はμ-コンピュータで実行する。

図10 周囲長計測パターン

※1パターン 長さ=1/√2

1	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	1	1	1	1
1	1	1	1	0	0	0	1

※2パターン 長さ=1

1	1	0	0	1	0	0	1
0	0	1	1	1	0	0	1

※3パターン 長さ=3/√2

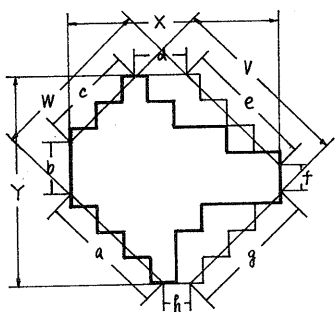
0	1	1	0
1	0	0	1

### 3.6 フェレ径計測

フェレ径は要素の"ほらみ径"でありから要素に外接する多角形の該当する辺の長さを計測すればよい。我々はココ、タテ(X, Y)方向の他にナナメ(V, W)方向も計測できるようにするため、BLPの3x3モードでswellingを実行し、要素の外接多角形を作成する(図11, 図12)。

次に、多角形化したパターンについて、2x2パターンマッチングにより、計測すべき方向について必要毎辺の画素数を計測し定数を乗じればよい(図13)。辺の定義、定数は3.5の周囲長と同様である。

図11. フェレ径 X, Y, V, W



$$\begin{aligned}
 X &= c/\sqrt{2} + d + e/\sqrt{2} \\
 Y &= a/\sqrt{2} + b + c/\sqrt{2} \\
 V &= d/\sqrt{2} + e + f/\sqrt{2} \\
 W &= b/\sqrt{2} + c + d/\sqrt{2}
 \end{aligned}$$

図12 8角形化swellingパターン \*→1

1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	
0	*	1	1	*	1	1	*	0	1	*	1	1	*	1	1	*	0
0	0			0	0	0			0	0	0			0	0	0	0
1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	*	1	1	*	1	1	*	1	1	*	0	0	*	1	1	*	1
0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
1	*	1	1	*	1	1	*	0	1	*	1	1	*	1	1	*	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

90°, 180°, 270°回転, 鏡像対称パターンを含む。

図13 フェレ径検出パターン

1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
0	*	1	1	*	1	1	*	0	1	*	1	1	*	1	1	*	0
0	0			0	0	0			0	0	0			0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0
0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1



### 3.7 面積分布

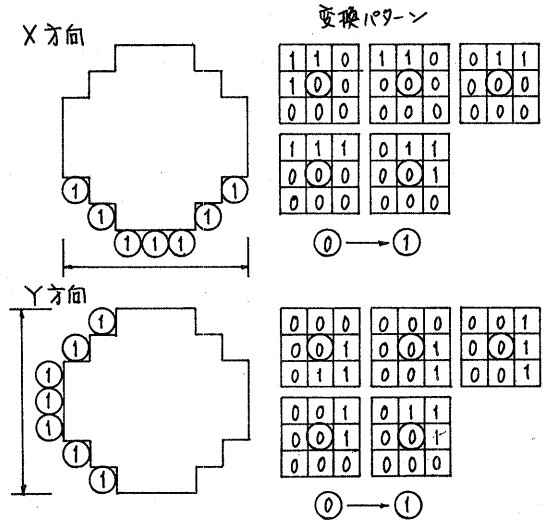
画面中の要素の面積分布を求め方には、3.4の個別切り出しと面積測定（画素数計数）を全2の要素について実行すればよい。

### 3.8 長さ分布

要素の長さ分布を求め方には、個別切り出しと3.6のフェレー径計測を全2の要素について実行すればよいが、次の様なお方法も可能である。

二値化した原画像を8角形化し、 $M \times M$ モードで要素の下側又は左側の画素に対応する画素のみ抽出した画像を作成する（図14）。この画像に対し $M \times M$ モードで孤立点の計数と1ビットの片側shrinkingを $N$ 回の画素がなくなるまでくりかえす。片側shrinking  $N$ 回実行後の孤立点の数が長さ  $N+1$  の要素の数に対応する。結果のディスプレイについてはヒストグラム作成と同様である。

図14 長さ分布測定



### 4. ミニコンピュータ

画像データについては既述の様に前処理装置で情報圧縮された結果が転送されて来るので、ここではデータ処理としてランダムアクセスの必要のある処理と、統計計算、判断等を実行する。また、システム管理面では総合的な処理の実行手順管理、画像メモリの使用管理、ディスクへの画像の保管等を実行する。

本部分に対応するソフトウェアは未成である。

### 5. 寸法

既述の様に本システムはデバイスの増減に対して極めて柔軟に対応できるとともに、更に高機能化を図るべく、TVカメラ、ライトペン、キャラクタジェネレータ等の増設を検討中である。

本システムは多種のフィルタリングが、処理が実行可能であるため、今後このシステムにより多くの解析対象物について有効な処理アルゴリズムを探り、他のシステムへの応用を図ってみたい。

最後に、御指導、御検討いただいた中2研究課研究員の皆様、カメラ技術部藤田次長に感謝いたします。

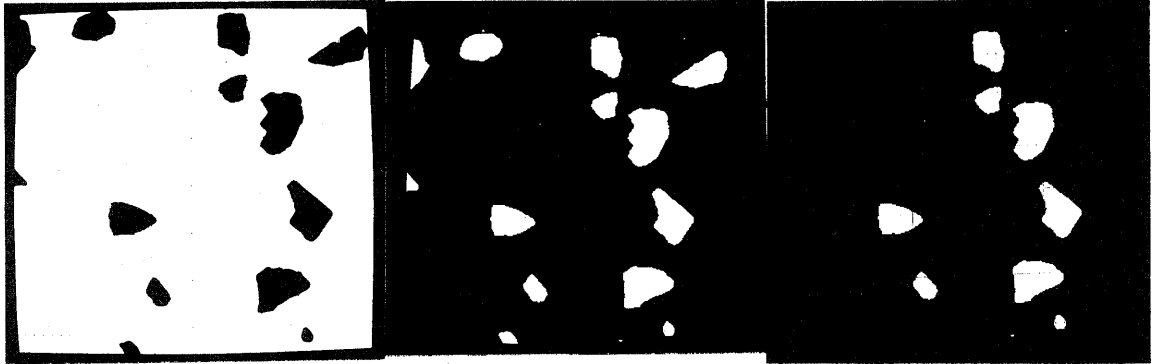


写真2. 研属枝のデジタル画像. 写真3. 写真2の二値化画像

写真4. 写真3から縁にのつた要素を除去して画像

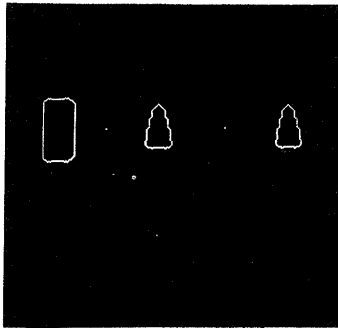


写真5 FPAにより発生させた DIANA のパターンと DIANA を BLP の領域分割 5x7 モードによる位相保存 shrinking したパターン

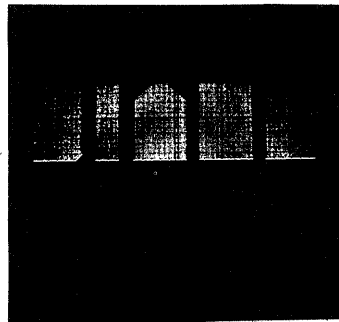


写真6. DIANA を六角形化したパターンと左半径 (X方向) の計測対象画素パターン



写真7 DIANA の周囲画素パターン

## 文献

1. マイクロコンピュータ制御の前処理装置を用いた画像処理システム  
河原, 藤井, 橋本 昭々信号学会全国大会 講演番号 956
2. パターン情報処理装置について  
谷内田, 辻 信号会研資 PRL 72-69 1972.
3. パターン認識における縁, 線の抽出  
長尾, 金出 信号誌 vol. 55 No. 12. 1972 pp 1618 ~ 1627
4. 標本化した二値図形のトポロジカル性質について  
種井, 息脇, 福村 信号論 vol. 56-D No 11 pp 662 ~ 669 1973
5. Hexagonal parallel pattern transformation  
M. J. E. Golay IEEE Trans. Comput. vol. C-18 No. 8 1969 pp 733 ~ 740
6. 線図形の細線化についての比較研究  
田村 情報処理学会イメーソプロセッシング研資 1 1975 pp 1 ~ 12

との地.