

指紋同定システム

浅井 紘 星野 幸夫 山下 直紀 平塚 誠一

(日本電気株式会社)

1. まえがき

指紋は、「終生不変」及び「万人不同」という2大特性によって、人物確認の最も有力な手段に利用され、古来からの犯罪捜査に、又最近では入門管理や、クレジット・カードの確認にも利用されるに至っている。指紋同定の自動化は、1965年から米国FBIがNBSの技術援助のもとに研究開発を開始し、現在実用化に向って実験を行っている。またパターン認識技術の応用研究という立場から国内外でいくつかの論文が発表されている。

指紋同定方式は、その自動化を考慮するとき種々の方式が考えられるが、現在最も有力とされているのは、司法裁判上の指紋鑑定に用いられている方法であって、指紋紋様に点状する特徴点(Minutiae)と呼ばれる特異点の合致による方法である。第1図に於て、指紋紋様内の最も内側の隆線(紋様線)の頂上点を中心点(Core point)とし、中心点を中心とする半径2mmの円と上記最も内側の隆線の左側隆線との交叉点(Cross-point)とから図のような(x,y)-座標系を定義する。このとき特徴点は、その代表的なものとして

- (i) 端点(Ridge ending) ----- 隆線が切れた点
- (ii) 分岐点(Ridge bifurcation) ----- 隆線が分岐又は合流した点

に区別され、それぞれの点に座標(x,y)と、その点に於ける有向方向θを、前述の座標系によって決定する。

指紋同定の過程は、上述の特徴点を用いる方式に依る場合、次の2つの過程によって構成される。

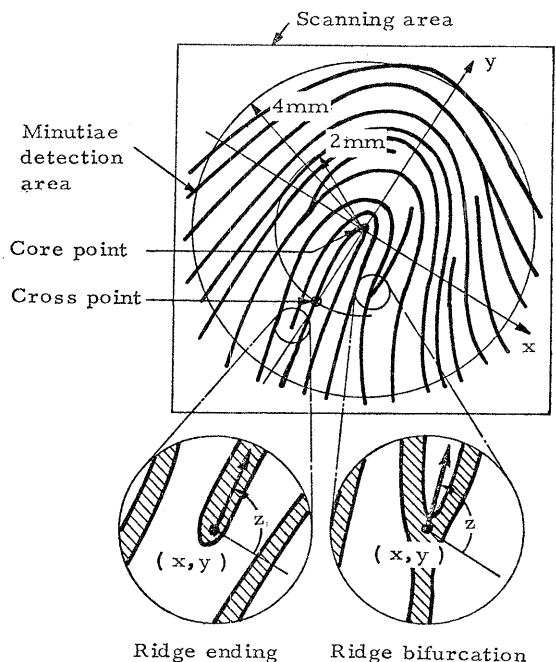
(i) 特徴点の抽出過程

与えられた指紋の濃淡紋様図形から、パターン認識の特徴抽出技術によって特徴点を抽出し、(x,y,θ)を求める。

(ii) 特徴点の合致照合

抽出された2つの指紋の特徴点群の合致度を数値化し、指紋照合を行う。

特徴点の指紋画像からの抽出は、FBIでは、FINDERという自動

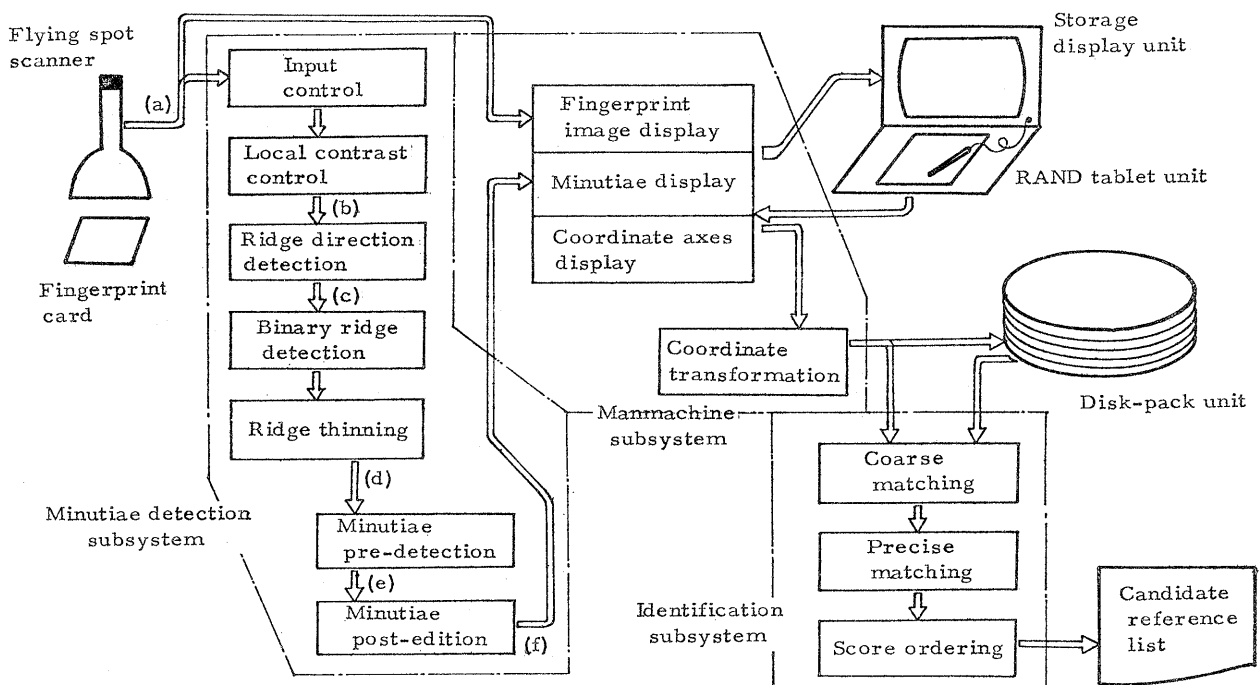


第1図 特徴点と座標系

抽出装置が Stock^[1] によって報告されている。 FINDER 装置は指紋カードの自動装置機構が備えられ、FSS 装置で読取られた指紋印象の2次元濃淡画像信号を、16×16 絵素を入力とする Ridge-valley filter と呼ばれるマスク処理ロジックで走査し特徴点の検出及び同時に隆線方向も検出している。 隆線方向情報は後のファイル分類に使用されている。 また、早大の犬照教授他^[2]は、15妙の Skew-shift register によって特徴点抽出を行っている。 筆者等は濃淡画像を方向性を有する一種の Weight-filter を用いて2値図形化した後に隆線の骨格化処理を行い、この隆線骨格化図形から特徴点を検出することにより、マスク検出では行い難い精密な特徴抽出を行っている。

特徴点の合致照合に関しては、特徴点 (x, y, z) によって点配置の距離による照合方式が Wegstein^{[3]-[7]} によって報告されている。 筆者等は、点配置を多角形の頂点と考え、2つの多角形の相似性による精密な照合を提案する。

報告する指紋同定システムは、NEAC2200 (65kchrs; 6bits/chr; 2μsec/cycle) 汎用コンピュータに、FSS装置及び RAND-tablet, Storage display を接続したものに、シミュレーションをソフトウェア・プログラムによって実現するもので、オス図に示す如く3つのサブシステムから構成されている。 即ち、特徴点を指紋濃淡画像から抽出する特徴点抽出サブシステム、濃淡画像と特徴点を同一画面上に表示し、座標系の入力、特徴点の検査修正を可能にするマン・マシンサブシステム、及び特徴点群による照合を行う照合サブシステムであって、以下にそれぞれのサブシステムの詳細を説明する。



第2図 シミュレーションシステムのブロック図
(図中 (a)-(f) は第6図の (a)-(f) に対応する。)

2. 特徴点抽出システム

第2図に示す如く、特徴点抽出システムは、FSS装置により入力される指紋画像信号から特徴点を抽出し、これをマン・マシンサブシステムに出力するものである。

2.1 指紋画像入力

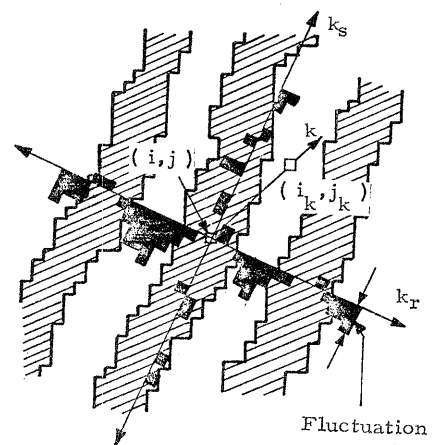
40mm 枠内に指紋印象が押捺されたカードを、人手によって FSS 装置にセットすると、FSS 装置は、40mm 内の濃淡を 6bit (64 level) を 1 絵素とする 220×200 絵素から成る 2 次元濃淡画像走査信号をコンピュータに送る。コンピュータは入力制御の一つとして、順次入力される画像濃度の度数分布を作り、この度数分布の形状によって自動的に FSS 装置に対する入力輝度調節を行う。即ち、本来指紋画像は、2 値図形（隆線部分のインク濃度と紙の地色）であるから、度数分布は 2 つの正規分布を合成したもので、この 2 つの正規分布頂点を検出できるように FSS 装置の入力輝度が調節される。次に、上述の印象全体の輝度補正によって入力された濃淡信号を、さらに部分的な押捺斑を補正するために 31×31 絵画からなる局所濃淡補正処理を施し、入力部の最終濃淡画像出力は 4bit (16 level) としている。

2.2 隆線抽出

紋様押捺された隆線部分を 1、紙地部分を 0 とする隆線の 2 値抽出のために、筆者等は、通常の抽出処理と異なり、先ず局所濃淡補正処理の出力である 16 level 濃淡信号から隆線の方角抽出を行っている。方角抽出は、指紋紋様のような層状縞パターンに於ては、最も安定な情報であって、その抽出は、縞と同じ方向では濃淡は変位が小さく、縞と直交方向では、縞の白黒が出現するために濃淡の変位が激しいことを利用して行っている。第3図は、上述の確相を図示したもので、方角決定を行う絵素 (i, j) に関し、これを中心とする無向 8 方向 (k) の濃淡変位の積分値最大最小から、絵素 (i, j) に於ける隆線方向を決定している。

方角抽出は 220×200 絵素全体 i, j ともに 1 絵素飛びに行い、抽出後 16×16 絵素マスクの範囲で多数決論理による強度の平滑化を行って、局所的な方角変位を取除いている。

局所濃淡補正処理の出力と、上述の隆線方向抽出とは、次の隆線の 2 値化抽出処理にもともに入力される。隆線の 2 値化は、一種の Weight filter であって、特異な方向性を有するものである。即ち、荷重は方向性により、第4図に示す如く隆線方向では、平均化処理荷重となり、隆線と直交方向では差分処理荷重となるように設計されており、隆線方向抽出の出力により 8 通りの Weight filter が選択的に 2 値化処理を行う。指紋のような層状縞パターンでは、前述の方向成分の



第3図 隆線の方角抽出

安定性によつて、この方向性を有する Weight-filter は、局所パターン抽出処理に於て、人間の視覚に適合する 2 値化抽出を実現した。

2 値化隆線出力は、量子化雑音を除去するために、簡単なる 3×3 絵素マスクによる平滑処理を行い、次の過程に入る。

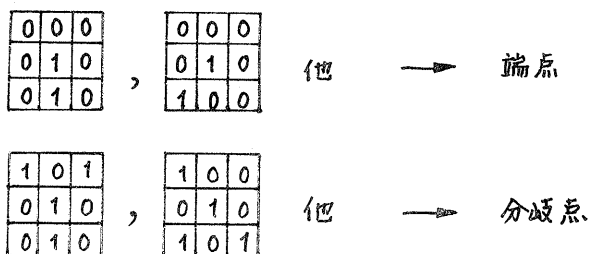
2.3 隆線の骨格化

2 値化隆線抽出による出力は、隆線に巾を持つもので、これによつて特徴点の抽出を行うことは、これらでの種々の報告に発表された方法によつても決して容易なものではない。筆者等は、隆線の 2 値化パターンは、その隆線が有する隆線巾が、指紋照合過程に於て、差程重要な情報でない事に着目して、隆線を 1 絵素の連結線から成る骨格化を行う処理を導入した。2 値パターンの骨格化処理は、Rosenfeld 他^[8]によつて、その処理の容易さ、パターン情報の有力は圧縮手段として報告されている。

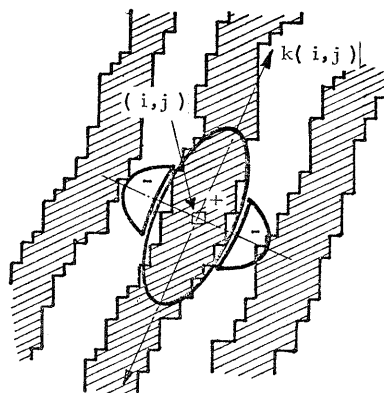
第 5 図に示す如く、骨格化処理は、隆線を、その新地との境界から 1 絵素ずつ削つて行く事によつて、最終的には、1 絵素の連結線にするもので 3×3 絵素のロジック判定処理を数回繰返す事で行われる。

2.4 特徴点抽出

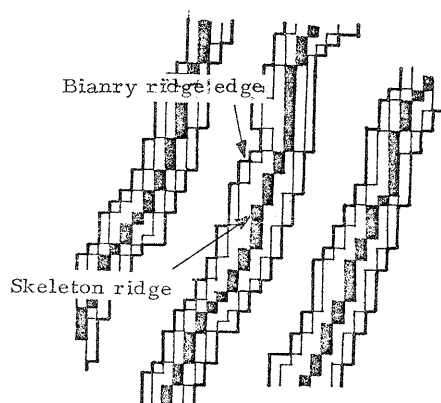
前述した如く、骨格化隆線によつて特徴点抽出を行う事は、骨格化処理によつて 1 絵素の連結線として、そのパターン構造が限定されているために、 3×3 絵素マスクによつて容易に検出される。例えば



のように決定される。この検出マスクは 220×200 の絵素全体に走査され、特徴点が発見された場合のマスク中心絵素の位置 (i, j) が、特徴点抽出の出力として順次出力される。また検出位置から骨格隆線を数絵素たどる事によつて、



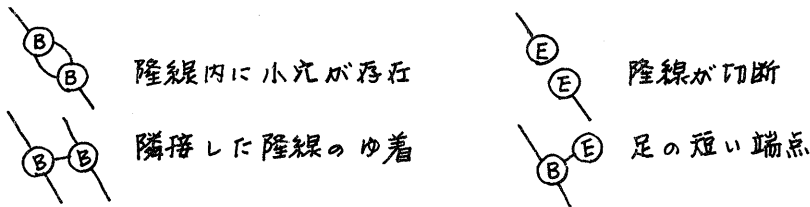
第 4 図 2 値隆線抽出



第 5 図 骨格化

特徴点の方向(k)も出力される。この特徴点検出は粗抽出過程と呼ばれる。

特徴点抽出は、これまでの種々の処理によってパターン特徴抽出の一環として行われるが、入力印象の押捺状態によって混入してくる雑音については、これを全て完全に取除く事はできない。また骨格化処理は、前述のように特徴点抽出を容易にほしたか、処理自体が本質的には微分操作であるために、独特の雑音を発生する。これを指紋紋様の特異な形状を考慮して特徴点抽出を精密化するものが精抽出過程である。指紋紋様は、ある一定の湾曲性、及び隆稜ピッチを有するもので、粗抽出された特徴点の内、骨格隆線上で検査し、次のような場合には特徴点から取除いている。



(a) 原入力 (b) 濃度補正

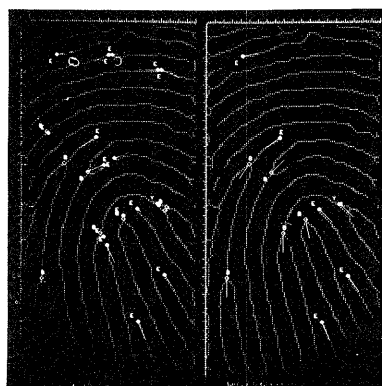
このようにして精抽出された特徴点は、その位置及び方向(i, j, k)がリスト化されて、次のマン・マシンサブシステムに出力される。

第6図は、特徴点抽出サブシステムの各過程の出力を図示したものである。

実際に押捺印象100指を実験した結果、正しい特徴点の93%が抽出され、正しくない特徴点30%が余分に検出されている。余分の特徴点の大部分はインクの汚れた部分及び水虫のある指紋に集中しており、紋様の不鮮明部分は特徴点抽出範囲から除けば解決される性質のものである。コンピュータ・シミュレーションは1指紋で約1時間である。



(c) 隆線方向 (d) 2値隆線と骨格化隆線



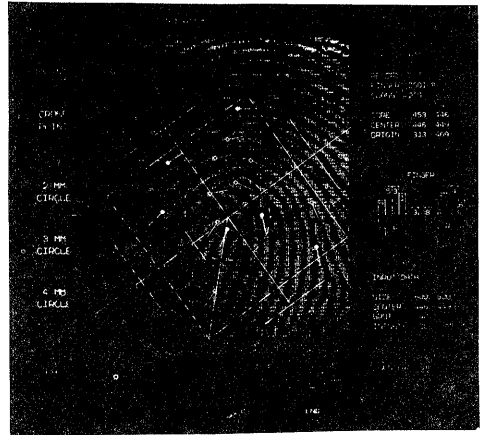
(e) 粗抽出 (f) 精抽出

第6図
特徴点抽出過程の各部出力

3. マン・マシンサブシステム

マン・マシンサブシステムは、第2図に示した如く、図形表示手段としての Storage display unit と2次元座標入力手段としての RAND tablet を用いて構成されている。

第7図は、Storage display の表示画面の一例であって、指紋特徴抽出に必要な各種情報をオペレータと交換することが可能である。特徴点を記述すべき座標系は、FSS 装置を介して画面エに表示された指紋紋様をモニターしながら、オペレータが RAND-tablet により中心点及び交叉点を入力することができる。さらに付属している鍵盤から指紋ファイル番号、分類番号、指種等の入力も可能である。



第7図 マン・マシンサブシステムの表示画面

マン・マシンサブシステムの他の重要な目的は、現在のパターン認識技術では困難な、低品質印象の人手による特徴点入力、さらに特徴点抽出過程から出力された特徴点の検査修正を可能にすることである。

上述のマン・マシンサブシステムでの入力された座標系と、検査された正しい特徴点の位置及び方向要素 (i, j, k) は、次の照合過程のために、合成されて (x, y, z) なる指紋個別に一義点に決定される情報に変換される。

このようにして、筆者等は照合用指紋として現在までに 6000 指 (600 人) 以上の特徴点リストをファイル化し 10 Mchr のディスクポップ装置に蓄積して次の照合実験に用いている。

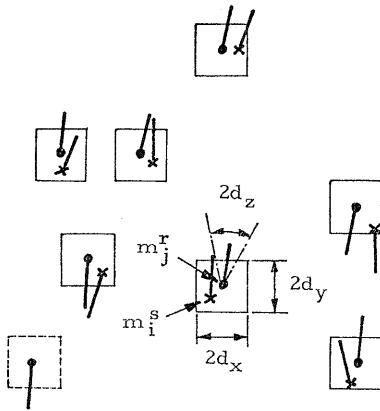
4. 照合サブシステム

照合されるべき指紋は、指紋ファイルに入力された指紋と全く同じ過程を経て、照合サブシステムに於て、ファイル内の指紋と照合される。照合方式は、指紋を固有に表現する特徴点群の配置関係を一対一に検査する原理による。第1図に示した特徴点の抽出領域 (中心点を中心とする半径 4mm 円内) に存在する特徴点の平均出現数は約 12 点であって、照合のために十分な点数である。照合過程は大別して粗照合と精照合の2過程で行われる。

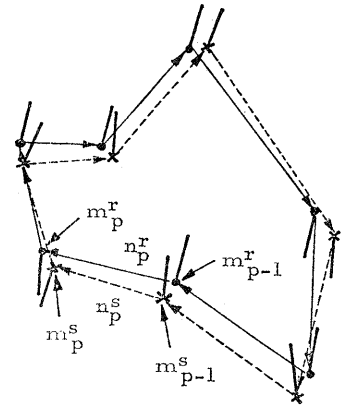
4.1 粗照合

粗照合は、膨大なファイル指紋の内から、比較的に簡単なアルゴリズムによって候補指紋を絞る目的である。第8図に示した如く、照合すべき検索指紋 F^S の特徴点を $m_i^S(x_i^S, y_i^S, z_i^S)$; $i=1, 2, 3, \dots, N^S$ 及び、指紋ファイルから一指づつ呼び出される参照指紋 F^R の特徴点を $m_i^R(x_i^R, y_i^R, z_i^R)$; $i=1, 2, 3, \dots, N^R$ とすると、対応特徴点を x, y, z 成分の閾値 d_x, d_y, d_z を用いて

$$|x_i^S - x_j^R| \leq d_x, \quad |y_i^S - y_j^R| \leq d_y, \quad |z_i^S - z_j^R| \leq d_z \quad (1)$$



第8図 粗照合アルゴリズム



第9図 精照合アルゴリズム

と定義する。もし2つ以上の m_j^r が1つの m_i^s と(1)式を満足する場合は、距離 $\sqrt{(x_i^s - y_j^r)^2 + (y_i^s - y_j^r)^2}$ の意味で近いものが対特徴点として決定される。この対特徴点の個数を N^P とするとき粗照合値 $S_c(F^S; F^r)$ は

$$S_c(F^S; F^r) = \frac{(N^P)^2}{N^S \cdot N^r} \quad (2)$$

として決定される。例えば第8図の場合は、 $S_c(F^S; F^r) = \frac{7^2}{8 \times 9} = 0.64$ という具合である。この粗照合値 $S_c(F^S; F^r)$ が適当に定められた閾値 S_c^* と比較され、 $S_c(F^S; F^r) < S_c^*$ ならば $(F^S; F^r)$ は同一指紋ではないと判定され、次の参照指紋 F^r が指紋ファイルから呼び出される。

4.2 精照合

粗照合で $S_c(F^S; F^r) \geq S_c^*$ を満足する検索指紋と参照指紋の対 $(F^S; F^r)$ に関して精照合が行われる。精照合の方式は、第9図を参照して、粗照合で対特徴点と決定された $(m_p^r; m_p^s)$ をそれぞれ頂点とする2つの多角形を考えるとき

$$D(F^S; F^r) = \min_{K, \epsilon, v} \frac{1}{N^P} \sum_{p=1}^{N^P} |m_p^r - cK(m_p^s - v)|^2 \quad (3)$$

で定義される距離 $D(F^S; F^r)$ を考える。ここで、 K は回転行列、 c は伸縮係数、 v は平行移動ベクトルである。即ち、 $D(F^S; F^r)$ は上述の2つの多角形が、回転伸縮、平行移動を適当に選択したときの対特徴点間の距離の最小2乗平均和を意味する。この距離を用いて精照合値 $S_p(F^S; F^r)$ は

$$S(F^S; F^r) = \{1 - \epsilon \cdot D(F^S; F^r) / D^*\} \cdot S_c(F^S; F^r) \quad (4)$$

とする。 ϵ は対特徴点 $(m_p^s; m_p^r)$ の方向要素 z_p^s, z_p^r の歪みを考慮するために

$$Z = \frac{1}{N^P \cdot 2d_z} \sum_{i=1}^{N^P} |(z_p^r - z_p^s) - (z_{p-1}^r - z_{p-1}^s)| \quad (5)$$

と定義される量である。また D^* は $D(F^S; F^r)$ の(1)式を満足する範囲内での最大値で、 $D(F^S; F^r)$ に対する正規化係数となっている。

$D(F^S; F^r)$ を実際に算出するのは、いわゆる二次形式の最小値問題として定式化される

$$D(F^S; F^r) = \frac{1}{(NP)^2} \{ |A|^2 - (a^2 + b^2) / |B|^2 \} \quad (6)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} |A|^2 &= \sum_{i=1}^{NP} \sum_{j=1}^{i-1} (m_{ij}^r \cdot m_{ij}^s), & |B|^2 &= \sum_{i=1}^{NP} \sum_{j=1}^{i-1} (m_{ij}^s \cdot m_{ij}^s) \\ a &= \sum_{i=1}^{NP} \sum_{j=1}^{i-1} (m_{ij}^r \cdot m_{ij}^s), & b &= \sum_{i=1}^{NP} \sum_{j=1}^{i-1} (m_{ij}^r \cdot J m_{ij}^s) \\ J &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, & m_{ij}^r &= m_i^r - m_j^r, & m_{ij}^s &= m_i^s - m_j^s \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

となる。しかしこの(7)式に出現する2重加算演算はコンピュータでは多くの計算時間を必要とするため、実用的とは言えない。このために、筆者等は擬以の歪み距離として

$$D(F^S; F^r) = \min_{K, c, v} \frac{1}{NP} \sum_{p=1}^{NP} |n_p^r - cK(n_p^s - v)|^2 \quad (8)$$

を定義した。ここに $n_p^r = m_p^r - m_{p-1}^r$, $n_p^s = m_p^s - m_{p-1}^s$ ($m_0 = m_{NP}$) である。この場合(6)式は同じで、(7)式は

$$\left. \begin{aligned} |A|^2 &= \sum_{p=1}^{NP} (n_p^r \cdot n_p^r), & |B|^2 &= \sum_{p=1}^{NP} (n_p^s \cdot n_p^s) \\ a &= \sum_{p=1}^{NP} (n_p^r \cdot n_p^s), & b &= \sum_{p=1}^{NP} (n_p^r \cdot J n_p^s) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

となる。これは $\sum_{p=1}^{NP} n_p^r = \sum_{p=1}^{NP} n_p^s = 0$ という関係を利用したために簡単化されて

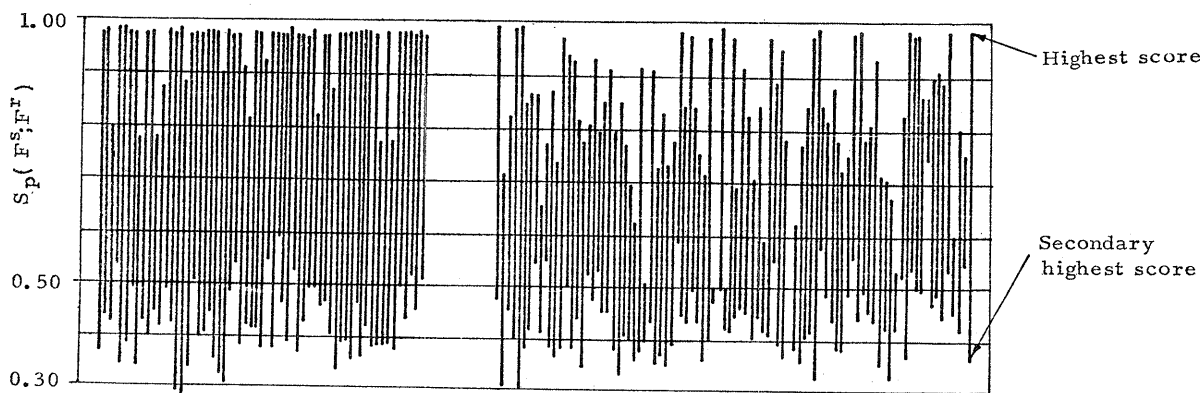
おり、実際上は照合値として歪距離を対応させるに十分なものとなっている。

4.3 照合値による順序付

4.2で詳述した精照合値は粗照合を通過した参照指紋 F^r について逐次計算され、その照合値の高いものから順に10個の候補指紋が照合中保持される。全ての参照指紋ファイルが調べられると、最終的に残った10候補指紋が出力され、その指紋ファイル番号を索引して実際の指紋印象同志の鑑定業務を行うことができる。また入門管理に於ては、照合結果の最上位候補指紋の照合値が一定値以上でなければ入門を許可しないという使い方も可能である。

現在までに参照指紋ファイル5622指に対して、照合すべき151指の検索指紋を照合サブシステムに処理させたが、全検索指紋とも正しい対参照指紋と最上位照合値で同定を行っている。第10図は、151指の照合状況を図示するもので、図中縦棒は、その上端が対参照指紋との照合値を、下端が非対指紋の最高照合値を示している。また左61指は、検索指紋と参照指紋の中心点、交叉点を同一のオペレータが入力した場合であって、右90指は異なるオペレータによって入力した場合である。中心点及び交叉点は座標系を決定する要素であって本来一致させるべきものであるが、結果が示す如く多少の入力差異は照合サブシステムで吸収することができる。

照合に要するシミュレーション時間は、検索1指紋当り5622指ファイルの場合平均5.5分、1指対1指の照合速度は90.4msecであった。



第10図 照合サブシステムによる照合結果 (5622 ファイル指紋)

5. 結言

特徴点抽出, マン・マシン, 照合の3つのサブシステムから構成される指紋同定システムについて報告した。この研究はパターン認識技術の応用として実用的なシステムを実現する方向で特に努力が払われ, その性能について評価すべき結果を得た。特徴点抽出サブシステムは, この場合専用ハードウェア化による1指の抽出時間を1秒以内に行う必要があり, その可能性が検討され現在の素子技術で十分可能であるという結論を得ている。また照合サブシステムは小ファイルの場合は高速のミニコンでも実用的なシステムが可能である。

指紋特徴点の座標系を決定する中心点, 交叉点は現在入手によって入力されているが, これらの点の自動決定は特徴点抽出サブシステムで出力される骨格化隆線から可能であり, 現在実験中である。さらに次のステップとして犯罪現場に遺留されているような指紋の同定は, その品質上さらに別の照合情報としての特徴が要求される。その最も有力なものは特徴点間の関係(Relation)であって, この関係の自動抽出には, やはり骨格化隆線の情報が重要な役割を演ずると予想される。

謝 辞

本研究の画像処理専用装置は荒川氏に, 照合の理論展開は永井氏に, また実用化の見地から多くの助言は中村氏に依るもので感謝するしだいです。

本研究推進に際し, 御指導, 御鞭撻をいただいた, 木地部長, 橋本部長, 大津課長, 木村主任に感謝致します。

参 考 文 献

- [1] R.M. Stock, "Automatic fingerprint reading",
Proceedings of 1972 Carnahan conference on electronic crime countermeasure, April 1972.
- [2] 大照完, 小林賢, 加藤頼一, 玉山清志, 野田文夫, "指紋パターン自動識別"
電通学・画像工学研究会資料 IT 73-4, April 1973.
- [3] J.H. Wegstein, "A computer oriented single-fingerprint identification system,"
NBS Technical Note 443, March 1968.
- [4] J.H. Wegstein and J.F. Rafferty, "Matching fingerprint by computer,"
NBS Technical Note 466, July 1968.
- [5] J.H. Wegstein, "A semi-automated single fingerprint identification system,"
NBS Technical Note 481, April 1969.
- [6] J.H. Wegstein, "Automated fingerprint identification,"
NBS Technical Note 538, August 1970.
- [7] J.H. Wegstein, "Manual and automated fingerprint registration,"
NBS Technical Note 730, June 1972.
- [8] A. Rosenfeld and J.L. Pfaltz, "Sequential operation in digital picture processing,"
J. ACM, vol. 13, no. 4, October 1966, pp 471-494.
- [9] 星野幸夫, 浅井紘, 山下直紀, 平塚誠一, "指紋同定システム"
情報処理学会第15回大会論文誌 p 297, 昭和49年12月
- [10] 浅井紘, 荒川武, 山下直紀, 星野幸夫, "押捺指紋特徴抽出方式",
昭和50年度電子通信学会全国大会論文誌 p 1084, 昭和50年3月
- [11] 平塚誠一, 星野幸夫, 永井義裕, 浅井紘, "押捺指紋の照合方式,"
同上 p 1085
- [12] 山下直紀, 平塚誠一, 浅井紘, 星野幸夫, "押捺指紋照合の実験,"
同上 p 1086