1 : 1 型指紋同定システムにおける一手法

Development of Fingerprint Verification System.

金 鳳一*, 李 在淵*
 金 定圭*, 福江 潔也**
 下田 陽久**, 坂田 俊文**

Bongil KIM, Jaeyeon LEE
 Chungkyue KIM, Kiyonari FUKUE
 Haruhisa SHIMODA, Toshifumi SAKATA

Abstract: This paper reports about the algorithms of 1 : 1 Fingerprint Verification System which is based on micro-computer with simple special purpose processor.

The algorithms are considered to be simple and easy to hardwarize. To satisfy the requirements, Binarization by circular window, registration and matching by direction pattern, limitation of numbers and types of pseudo-minutiae by shrinking and noncontact expansion and simple restoration algorithms are used.

The experiment results say that 1.39% of same finger denied, and 0.000% of different finger is accepted. The result is considered as an enough one to be used in real life.

概 要: マイクロコンピュータと簡単な画像処理プロセッサの使用を想定した 1 : 1 型指紋照合システムの処理手法について述べた。

本論文では、できるだけ簡単に、ハードウェア化が容易かつ効率的である手法の開発を目標とし、円形マスクによる二値化、二値化の際求められた方向パターンによる位置合せと照合処理、縮小と非接触型拡張処理による疑似マイニューシャの量と種類の制限、その結果としての簡単な復元処理など、幾つかの新しい手法を採用している。

同一指紋72対、相違指紋1254対を対象とした実験の結果、処理精度の面では、本人拒否率1.39%、他人受率率0.000%で実用化に充分であると考えられる。

一方、ハードウェア化が行なわれていないため、処理速度の報告はできなかったが、大概の処理アルゴリズムが簡単な操作の反復で構成されているため、ハードウェア化は簡単であり、十分な処理速度も得られると思われる。

1. ま え が き

近年の社会における情報化、自動化に伴い、人の自動確認技術の必要が飛躍的に高まってきている。人の確認方法としては、鍵などの所有物、暗証番号などの記憶情報、顔などの身体的特徴の3種類が従来広く利用されているが、身体的特徴による場合が最も高い信頼性を持つ、身体的特徴としては、顔、指紋、掌紋、声、目の網膜パターンなどがあるが^{1),2)}、中でも指紋は「終生不変・万人不同」という特性を持っているため最

も信頼できる。そのため、指紋については古くかは研究がなされており、近年の人の自動確認技術の研究も指紋を対象としたものが主流となっている^{3),4),5)}。

犯罪捜査の分野などでは、一つの入力指紋に対して数多くの登録指紋の中から一致する指紋を選択するような 1 : n 型の指紋認識システムが要求されるが、このようなシステムについては多くの研究がこれまで行なわれており、既に実用化段階に入りつつある。このタイプのシステムは、処理対象データが多いこともあって、現在大型計算機が使用されており、処理も20分程度を必要としているようである。また、完全自動化も達成されていない。一方、部屋の入出管理や現金自動引出し機などにおいて本人の確認を行なう場合には、一つの入力指紋が既に登録されている一つの指紋

* 韓国科学技術院システム工学センター

** 東海大学情報技術センター

「写真測量とリモートセンシング」Vol.28, No.1, 1989

と一致するかどうかを判断する1:1型の指紋認識システムが要求される。このシステムについては、比較的最近研究が始められており⁹⁾⁻¹⁰⁾、まだ実用化段階に至っているとは言えない。

1:1型認識システムは、利用者がいら立ちを覚えない程度の処理の高速性と安全を保証するだけの判定精度が最低限要求される。また使用目的上、完全自動化と小型化、簡素化も要求される。

本研究は、マイクロコンピュータと簡単な画像処理プロセッサの使用を想定した1:1型指紋認識システムの開発を目標においており、まずその基本的な処理手法の開発を行なった。これまでなされてきた1:n型認識システムの開発過程の知見をベースに、高速性、高信頼性、簡素化などを考慮し、できるだけ簡単に、ハードウェア化が容易かつ効率的な手法の開発を目指した。1:1型認識システムにおける一つの処理手法としてここで報告する。

2. 処理システムの概要と特徴

アルゴリズムの開発は、次のような原則に基づいて行なった。1) 必要な精度を得るためにはマイニューシャと呼ばれる指紋の隆線の分岐点と端点からなる特徴点(図1)に注目した処理が有効であることが、1:n型システムの研究から明らかとなっているので、本システムにおいても、マイニューシャに基づく判定を用いる。2) しかし、1:1型システムで大型計算機で行なわれていた処理をマイクロコンピュータでそのまま実行しては、数秒以内と言うスループットは達成困難である。3) そこで、識別しやすい指紋については、

図1 マイニューシャ

マイニューシャに基づく手法よりはるかに簡単に、高速に判定を下せる手法を適用する。すなわち、判定の困難な場合においてのみ、マイニューシャに基づく手法を用いることにより、システムの平均的なスループットの向上を図ると同時に、必要な判定精度を達成する。4) また、疑似マイニューシャの除去処理などのマイニューシャ抽出処理は、従来極めて多くの画像データのアクセス（特にランダムアクセス）を必要とする手法が提案されていたが、これは処理速度低下の大きな要因となる。本システムで使用する処理手法は、画像データへのアクセスを極力抑えたものにするか、もしくは画像データへのアクセスをしないで済むようなものとする。5) 画像データへのアクセスを行なう場合は、ハードウェア化が容易なアルゴリズムとする。6) さらに、処理過程そのものや個々の処理項目についても、効率化と簡素化を図る。

本章ではシステム全体の構成と処理の流れを簡単に述べ、各々の処理段階に対しては後章で一つずつ扱うことにする。

本システムは図2に示したように登録データベース、入力装置、処理部の三つから構成されている。登録データベースは、指紋の照合に必要なデータを保管している部分で、各個人の特徴点リスト（種類、位置および特徴点の方向）、領域・方向テーブル、同一指紋の場合と相違指紋の場合の照合スコアの分布からなるトレーニングデータが保管されている。入力装置は指紋および暗証番号を入力する部分である。本システムでは、プリズムを用いた入力装置¹¹⁾を使用している。処理部は認識を行なう部分であり、本論文はこの部分で使用される手法について報告したものである。

最初に指紋と暗証番号が入力される。画像サイズは512×480画素であり、1画素あたり8bitで最量化される。現在使用されている入力装置では、指表面の15mm×15mmが読み込まれ、この場合、隆線間距離は8～9画素となる。暗証番号は各個人の固有番号で、登録データベースからその番号に該当する指紋に関する情報が読み出される。次に、処理部では入力指紋から照合に必要な情報が抽出され、登録指紋の情報と照合される。処理部で行なわれる処理の内容は3章以下で詳しく述べるが、基本的には次の4段階からなる(図2)。

1) 2値化と方向テーブルの作成

この段階で入力指紋画像は、2値化されると同時に

図2 システムの論理構造

16×15個の小領域に分割され、各小領域毎に、小領域内の平均的な隆線方向が記述された方向テーブルが作成される。

2) 方向パターン照合

登録指紋と入力指紋の隆線方向パターンを照合して、2枚の画像間に存在する大局的な平行移動量を求める。また、その照合により判定が下せる場合は、この段階で処理を終える。

3) マイニューシャの抽出

前段階で判定できなかった場合、詳細照合のために入力指紋のマイニューシャを求める。この段階では非接触型拡張処理を主に用いたごく簡単な録音の除去や疑似マイニューシャの除去処理が行なわれる。

4) マイニューシャによる照合

登録指紋と入力指紋の二つのマイニューシャリストから対応するマイニューシャを捜し出し、照合のために必要な種々の特徴量を抽出する。これらに基づき、最終判定を行なう。

3. 2値化と方向・領域テーブルの作成

3.1 2値化

抽出対象のマイニューシャは、隆線の端点と分岐点であるため、まず、隆線部を抽出する必要がある。この処理は二値化処理によって行なうが、その結果によって疑似マイニューシャが増減し、疑似マイニューシャの増加はその除去処理時間の増大と照合精度の低下に結びつくので、非常に重要な処理である。

従来、指紋の2値化には、主として処理時間の観点から局所閾値による手法が最も広く用いられていた⁵⁾。しかし、閾値設定の手法にもよるが、概してあまり高い性能ではない。中村らは¹²⁾指紋の特性を考え、隆線の方角を考慮して閾値を求めることによって優れた2値画像を得ているが、画素当りの計算量が非常に多い。

本研究では計算量が少ないにもかかわらず、隆線方角を考慮した隆線の抽出性能の高い次のような手法を用いた。

画像上の全画素に図3の円形マスクを適用させ、次の値を求める。

$$D_i = (X_i - X_0) + (X_{i+4} - X_0) \quad (i=1,2,3,4) \quad (1)$$

D_i の値が持つ意味は注目画素 X_0 を基準にしたときの i 方向の濃度値の変化量である。従って、 D_i ($i=1,2,3,4$) の最大値がある閾値 T_b 以上の値ならば、 X_0 が i 方向の画素に比べて低い濃度値を持っていることであり、これは X_0 が隆線部に属する画素であることを意味する。逆に、 D_i の最大値がその閾値以下であるならば、 X_0 は谷部に位置すると判断することができる。すなわち、

$$\text{隆線部} \quad : (\text{MAX}(D_1, D_2, D_3, D_4) > T_b)$$

$$\text{谷部または背景領域} : (\text{MAX}(D_1, D_2, D_3, D_4) \leq T_b)$$

(2)

またこの時、 D_i の絶対値が最大になる方向（すなわち、値の変化が最も大きい方向）に直交する方向は、 X_0 を中心に見た時の隆線方向を示している。以後この方向を画素方向と呼ぶことにする。画素方向は、後述する方向テーブル作成の基礎データとなり、位置合せや照合に使用される。

$$\text{画素方向} \quad \text{MOD}(\text{IMAX}+1, 4)+1 \quad (3)$$

(ここで、 IMAX は次の条件を満たす値。

$$\text{MAX}(|D_1|, |D_2|, |D_3|, |D_4|) = D_{\text{IMAX}}$$

図3 円形マスクと画素方向

本研究では、隆線方向パターンによる1次照合を行なうが、この二値化処理によって、隆線部と谷部の識別のみならず隆線方向の基礎データの抽出も同時に行なうことができる。

3.2 領域テーブルの作成

入力された指紋画像には、図4に示したように対象とした指紋の領域とそうでない領域があるが、それぞれを指紋領域、背景領域と呼ぶことにする。この二つ

× : 背景領域
 Δ : 境界領域
 ● : 疑似端点

図4 指紋領域と背景領域

の領域の境界部分（この領域を境界領域と呼ぶことにする）では指紋の隆線が途切れるため、多くの疑似端点が現われる。従来、これらの除去のためには、全ての端点の候補から、幾つかの方向に補助線を引き、その補助線のある距離だけ追跡し、他の隆線とぶつかるかどうかを試すなど¹³⁾の手法が採られていたが、そのような手法は画像データへのアクセスが増えるため処理の高速化の障害の一つになる。また、境界領域の入力画像濃度は不安定になりやすく、この領域に現われるマイニューシャは信頼性が低い。さらに、背景領域に現われるマイニューシャは入力画像上の小さなごみなどによって発生したことは明らかである。そこで、指紋画像を一定の小領域に分割し、各小領域を指紋領域、背景領域および境界領域に区別した上で、背景領域や境界領域に現われるマイニューシャ候補は無条件で除去することにより、極めて容易かつ高速に上記の疑似マイニューシャの除去を行なうことができる。

ここでは、画像を16×15個の小領域に分割する。このとき、小領域の大きさは32×32画素である。各小領域に対する領域の識別は2段階で行なう。まず、次の基準によって指紋領域と背景領域を区別する。

小領域 R_{ij} 内に隆線部と判断された画素の数を N_{ij} とする時、

$$R_{ij} = \begin{cases} \text{指紋領域} : N_{ij} \geq T_r \\ \text{背景領域} : N_{ij} < T_r \end{cases} \quad (4)$$

(T_r : 領域閾値)

境界領域は背景領域と8-近傍で接している指紋領域として定義した。上記の処理によって16×15個の要素について3種類（指紋領域、境界領域、背景領域）のラベル付けが行なわれるが、これを領域テーブルと

呼ぶことにする。

3.3 方向テーブルの作成

後述する入力指紋と登録指紋との大局的な位置合せを実現するために、指紋領域に識別された各小領域に対してその領域内に存在する隆線の平均的な方向を求めた。2値化処理によって、各画素は四つの方向で表現された画素方向が与えられている。小領域における隆線方向はその領域内の全画素方向のベクトルの和として定義し、 -90° から 90° までの値で表現される。小領域は、 16×15 個存在し、前述の領域テーブルと区別するため、これを方向テーブルと呼ぶことにした。この処理は領域テーブルの場合と同様に、4方向に対する小領域のヒストグラムを求めることで、簡単に実現できる。

4. 方向パターン照合

4.1 位置合せ

同じ指の場合にも指紋を採取する際の条件によって入力指紋と登録指紋の間には幾何学的な歪みが存在し、それは1) 指の平行移動、2) 指の回転、3) 指そのものが歪むことから生じる局所的歪みの3種類に分類できる。この歪みは照合に大きな影響を与えるため、その除去(位置合せ)方法について、これまでも多くの研究報告がなされているが^{(7),(13),(14),(15)}、平行移動と回転が大きいことから、アフィン変換を用いる手法で比較的良好な結果が得られている。

しかし、1:1型指紋認識システムの場合、指紋入力装置にフィンガーガイドなどを設けることによって回転量は度数以下に抑えることができる。局所的歪みはアフィン変換から良い結果が得られることから分るように、比較的小きな歪みである。従って、ここでは、最大の歪みである平行移動のみに注目し、方向テーブル(方向パターン)の照合による位置合せを行なう。

本手法は、まず入力指紋画像の方向テーブルを x, y 方向に対して平行移動させながら、次式によって登録されている指紋の方向パターンとの差分を重複指紋領域について求める。

$$D(S_x, S_y) = \sum |R_x(i, j) - R_b(i + S_x, j + S_y)| / L \quad (5)$$

S_x, S_y : x, y 方向の平行移動量

$R_a(i, j)$: 登録指紋の方向テーブル

$R_b(i, j)$: 入力指紋の方向テーブル

L : 重複指紋領域における小領域の数

最小の $D(S_x, S_y)$ を与える S_x, S_y を $\Delta X, \Delta Y$ とすると、 $\Delta X, \Delta Y$ を2枚の画像間のテーブルメッシュ単位、すなわち32画素を1とする位置ずれと判断する。

次に、 $D(\Delta X, \Delta Y)$ の4近傍から線形近似((6式))によって画素レベルの位置ずれ $\delta X, \delta Y$ を求めた。

$$\delta X = 32\Delta X - 31 + 32W(\Delta X - 1, \Delta Y) / (W(\Delta X - 1, \Delta Y) + W(\Delta X + 1, \Delta Y))$$

$$\delta Y = 32\Delta Y - 31 + 32W(\Delta X, \Delta Y - 1) / (W(\Delta X, \Delta Y - 1) + W(\Delta X, \Delta Y + 1))$$

(6)

ここで、 $W(a, b) = D(a, b) - D(\Delta X, \Delta Y)$

方向テーブルは、 16×15 個のデータより構成されているので、この計算量は非常に少ない。また、局所的な二値化処理の誤りやノイズなどに対してあまり影響されず安定的な結果が得られる。

4.2 照合

位置合せのために求められた最小差分値 $D(\Delta X, \Delta Y)$ は、当然のことながら同じ指の場合は小さく、違う指の場合は大きい値を示す。従って、 $D(\Delta X, \Delta Y)$ によって判定を下すことができる。しかし、違う指にもかかわらず方向パターンが非常に似ている場合も時としては現われるため、一意的に判定を行なうには問題がある。そこで、本研究では同一指紋と相違指紋の $D(\Delta X, \Delta Y)$ の分布から二つの閾値 T_a と T_b を設け、非常に高い確率で同じ指、または違う指と判断できる場合のみをここで判定し、曖昧な場合は次の段階(マイニューシャを用いた詳細照合)の処理に進めることにした。すなわち、次の判定基準で判定を行なう。

- 1) $D(\Delta X, \Delta Y) < T_a$: 同じ指と判断する
- 2) $D(\Delta X, \Delta Y) > T_b$: 違う指と判断する
- 3) その他 : 次の段階に進む

(7)

5. マイニューシャの抽出

簡易照合、すなわち局所隆線方向パターンによる照合によって判定ができなかった場合、従来の研究からその有効性が明らかになっているマイニューシャに基づいた詳細照合を行なう。

マイニューシャを抽出する処理において、最も複雑で、処理時間を要するのは、ノイズなどによって発生

する疑似マイニューシャの除去処理である。従来、疑似マイニューシャの除去のためには、細線化前に疑似マイニューシャが生じないように画質を改善する手法¹⁶⁾と、細線化後現われた疑似マイニューシャを除去する手法¹⁷⁾などが提案されていた。しかし、細線化前の処理の場合は、処理手法は比較的に簡単であるが、性能に問題があり、細線化後の処理は疑似マイニューシャ除去の性能は優れているが、細線化された画像上を隆線に沿って追跡しながら種々の条件を検討し、除去する¹⁷⁾ため、画像データへのランダムアクセスが増加し、高速化、ハードウェア化に適した手法とは言えない。

そこで、本研究では細線化前の処理によって、疑似マイニューシャの量と種類を減らした後、最小限の細線化後の処理を行なうことにより、上記の問題点を避けつつ、必要なマイニューシャの抽出性能を得ようとする方法論を採った。図5は本研究で行なったマイニューシャ抽出処理の流れである。

3.2で述べた境界領域に存在する疑似端点を除いて2値化画像上で見られる大部分の疑似マイニューシャは、図6に示す5種類に分類できる。図中、左側に黒で示した領域を隆線部とし、その隆線部を細線化した時現われる分岐点と端点を右側に示した。図6の(e)のタイプは2値化画像で隣り合う隆線部同士が誤って接触することによって発生する。指紋中には本来このようなパターンも比較的多く見られるため、2値化後に誤って接触したのか、そうでないかを判断するのはかなり困難である。そこで2値化のための閾値 T_b ((2)式参照) を最適値より少し大きめの値とすることによってこのタイプの疑似マイニューシャの発生を大部分防ぐことができる。この場合、逆に隆線の断線(図6の(b)のタイプ)が発生しやすくなるが、単に2値化閾値を操作するということによって、除去の困難なこのタイプの疑似マイニューシャの発生を抑える方が全体として利点が大きいと考えた。

図6中、a)、b)、c)の小ループ型、短線型、髭型については、“縮小と非接触型拡張処理”で除去される。残りのd)の断線型は、細線化後に行なう“復元処理”で除去される。これらの処理内容について以下に述べる。

5.1 縮小と非接触型拡張

図6中b)、c)の単線型と髭型のものについては、

2 値 画 像

図5 マイニューシャ抽出

画像処理の分野で一般によく知られているように縮小処理を2値画像に施すことによって簡単に除去できる。この処理は3×3画素のマスキング処理によって実行できるので、極めてハードウェア化が容易である。

図6中a)の小ループ型は、隆線部に存在する汗腺によるものと考えられるが、図6の5種類の疑似マイニューシャの中では最もよく見られる。この小ループを細線化後に除去するためには、線追跡を行なわざるを得ないので、発生頻度が多いことから、結果としてかなり多量の追跡を行なうことになってしまう。そこで、ここでは縮小処理の後、非接触型拡張処理を行なうことにより、この小ループを除去した。非接触型にしたのは、小ループの半径が隣り合う隆線間距離より大きい場合があり得るため、この処理によって橋型の疑似マイニューシャが発生しないようにするためであ

(a) 小ループ型

(b) 短線型

(c) 髭型

(d) 切断線型

(e) 橋型

図6 疑似特徴点の種類

る。この処理も縮小処理と同様に、 3×3 画素のマスク処理で実行可能である。

非接触型拡張処理の利点は、小ループの除去処理を行なうと同時に谷部に注目した時の細線化が行なわれること、および、5.3で後述するが、最後のd)の断線型の疑依マイニューシャが、極めて除去しやすい形として線画像中に残る、という2点である。

5.2 画像の濃度反転

非接触型拡張処理の結果は、谷部についての細線化結果と同等である。そこで、非接触型拡張処理の後、(8)

式によって濃度反転を行なうことにより、線画像を得ることができる。

$$X_n = 1 - X_o \quad (8)$$

(X_n : 反転後の画素値

X_o : 反転前の画素値=0or1)

ここで、背景領域の画素は無条件で0にする。

5.3 マイニューシャ候補の抽出

濃度反転された画像の指紋領域から、次の三つの条件を満たす画素をマイニューシャの候補として抽出する。

- 1) $X_0 = 1$
- 2) $CN = 2 \text{ or } 6$
- 3) $PN = 1 \text{ or } 3$

ここで、 X_0 は注目画素であり、 DN と PN は X_0 の8近傍について(9)式で定義される値で、交差数と連結数である。

$$\begin{aligned} CN &= \sum |X_{i+1} - X_i| \\ PN &= \sum X_i \end{aligned} \quad (9)$$

(ただし、 $X_9 = X_1$)

上記条件によって求められたマイニューシャ候補は(10)式に示すように CN と PN の値によって分岐点と端点に区別される。

$$\begin{cases} \text{分岐点: } CN=6 \text{ かつ } PN=3 \\ \text{短点: } CN=2 \text{ かつ } PN=1 \end{cases} \quad (10)$$

5.4 復元処理

この段階で残存している疑似マイニューシャは、隆線の断線によって生じたタイプ(図6の(d))のみであるが、濃度反転して得られた線画像上では、橋型(図6の(e))として現われる。従って、マイニューシャの候補リスト中には、一対の分岐点として存在している。

分岐点から分岐点までを橋と呼ぶとすると、多くの橋が密に発生している場合、どの橋から除去していくによって異なる結果が得られる。従来この問題については、画像を一定の大きさの小領域に分割し、各々の領域の複雑度を求め、より簡単な領域から除去処理を進めていく方法¹⁷⁾などが提案されている。しかし、疑似分岐点と疑依端点の全ての組合せを考えなければならないことを含めて、非常に複雑な処理にならざるを得なかった。ところが、本研究の場合、第1に対象となる疑似マイニューシャは一対の疑似分岐点のみであり、第2に非接触型拡張処理と濃度反転後に現われる疑似分岐点を持つ橋は、隆線とはほぼ直交するようになる、という2点より、ここで行なう復元処理は以下に示すように簡単なものに行うことができる。

まず、マイニューシャ候補リスト中の全ての分岐点に対して、次の処理を行なう。

- 1) 図7に示すように分岐点から延びる3本の線 l_1 , l_2 , l_3 各々について、一定の距離追跡し、各線の方角 δ_1 , δ_2 , δ_3 を求める。
- 2) 局所隆線方向に直交する方向 ϕ と δ_1 , δ_2 , δ_3 との差 Ω_1 , Ω_2 , Ω_3 を次式により算出する。

$$\Omega_i = |\Delta(\delta_i, \phi) - 90| \quad (11)$$

ここで、 Δ は(12)式で定義される関数であり、 ϕ は、注目

図7 追跡線の方角

図8 点方向の計算

分岐点の位置に対応する方向テーブル中の小領域を含む隣接4領域の方向テーブルの値より4点線形近似された局所隆線方向で(13)式より求められる。

$$\Delta(a, b) = \begin{cases} |a - b| & : |a - b| < 90 \text{ の時} \\ 180 - |a - b| & : |a - b| \geq 90 \text{ の時} \end{cases} \quad (12)$$

$$\phi = u(va_3 + (1-v)a_2) + (1-u)(va_4 + (1-v)a_1) \quad (13)$$

ここで a_i は注目する分岐点 X_0 を含む近傍の4小領域(32×32画素)に対応する方向テーブルの値である。また、 u , v の値は図8に示すように、 X_0 と近傍4小領域の中心までの距離なのである。

- 3) 最小の Ω_i とその方向に延びる線 l_i を求め、それぞれ Ω_m と l_m とする。 l_m は3本の l_i の内、最も局所隆線方向に直交する方向に延びる線である。 Ω_m はその時の局所隆線方向に対する直交方向からのずれを意味する。

次にマイニューシャリストによる全ての分岐点中 Ω_m の値が小さいものからその分岐点の l_m 方向に一定距離追跡し、追跡中に他の分岐点に出会った場合、それら二つの分岐点をマイニューシャリストから除くと

同時に、追跡した lm を橋と考え、画像から除去する。この処理を全ての分岐点について、順次行なう。分岐点中最小の Ωm を持つ分岐点から処理を進めるのは、 lm が橋であることが最も確実な分岐点から処理を行なうためである。

6. マイニューシャに基づく照合

6.1 マイニューシャ対の抽出

登録指紋のマイニューシャリストと入力画像から抽出したマイニューシャリストを比較し、同一指紋であることを想定した時の対応する2つのマイニューシャ（これをマイニューシャ対と呼ぶことにする）を抽出する。入力指紋のマイニューシャを M_i 、また登録指紋のマイニューシャを N_j とすると、マイニューシャ対は入力指紋と登録指紋との間の平行移動成分を補正した後では、本来ほぼ同じ位置になるはずであることから、まず M_i について(6)式で求められた δX 、 δY の平行移動成分を除去する。次にマイニューシャ対を次の2条件を満足する M_i 、 N_j として定義する。

1) M_i から見て最短距離にある登録指紋のマイニューシャは N_j であり、かつ N_j から見て最短距離にある入力指紋のマイニューシャは M_i である。

2) M_i と N_j 間の距離 d を次式で定義した時、 d がある閾値以下である。

$$d^2 = W_1 \Delta R^2 + W_2 \Delta U^2 \quad (14)$$

ΔR : 対応するマイニューシャの半径の差

ΔU : 対応するマイニューシャの偏角の差

W_n : 重み係数

d は、わずかであるが残存している指紋画像の回転に依る影響を抑えるために使用した。すなわち、入力指紋と登録指紋の指紋領域に注目した時、その論理和で求められる領域の重心 (C_x , C_y) を座標原点として各々のマイニューシャを極座標で表現する。(14)式の ΔR 、 ΔU は、それぞれの時のマイニューシャ対の半径の差と位相差であり、 $W_1 > W_2$ と重みを変えることによって回転の d への影響を相対的に少なくすることができる。

6.2 照合特徴量の抽出

選択されたマイニューシャ対から、判定に用いる特徴量を求める。特徴量は得られる種々の値の内、同一指紋と相違指紋の平均値が離れており、それぞれの分

散が小さいことを基準に実験により以下の6種類を選択した。

a) マイニューシャ対の数の全マイニューシャ数に対する比率

$$u_1 = 2N/M \quad (15)$$

b) マイニューシャ対の数

$$u_2 = N \quad (16)$$

c) マイニューシャ対の極座標上の半径の差

$$u_3 = (1/N) \sum \Delta R_k \quad (17)$$

d) マイニューシャ対の極座標上の偏角の差

$$u_4 = (1/N) \sum \Delta U_k \quad (18)$$

e) マイニューシャ対の密集度

$$u_5 = Y_1 + Y_2 \quad (19)$$

f) マイニューシャ対の数に対するマイニューシャ対の密集度の比率

$$u_6 = u_5 / 2N \quad (20)$$

ここで用いられた記号は、次の通である。

N : 抽出された対の数

M : 指数領域の重複部分に存在する両方のマイニューシャ数の合計

ΔR_k : k 番目の対の半径の差

ΔU_k : k 番目の対の偏角の差

Y_n : 入力画像 ($n=1$) あるいは登録画像 ($n=2$) において最短距離にある二つのマイニューシャが伴にマイニューシャ対として抽出されている数

6.3 判定

$u_1 \sim u_6$ の特徴量の多くは正規分布に近い分布を示しており、判定精度の観点から次式によって与えられる尤度を用いて最尤判定を行なうこととした。ここでクラス k は、同一指紋と相違指紋の2クラスを指す。入力指紋に対して特徴ベクトルが求められ、より高い尤度 $f_k(u)$ を持つクラス k にその入力指紋は判定される。

$$f_k(u) = \frac{1}{2^{n/2} |C_k|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} d_k^2\right)$$

$$d_k^2 = (u - M_k)^t C_k^{-1} (u - M_k) \quad (21)$$

$$u = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6)$$

d_k^2 : クラス k に対するマハラノビス距離

n : 特徴量の数 (=6)

C_k : クラス k の分散共分散行列

M_k : クラス k の平均ベクトル

ただし、 u_2 や u_5 のように図9に示すような分布を持つものがあるが、この場合、平均値として全データの

図9 特徴量の分布

算術平均値 M ではなく、同図 M' を与えることで対処した。また、統計的な判定手法を使用する場合、一般によく知られているように特徴空間中におけるクラス領域の回り込み現象が発生する。この現象は、統計的には妥当な現象であるが、物理的には不合理な結果をもたらす。この問題は、各特徴軸上(一次元)で明らかに判定可能な平均値から離れて存在するサンプルについては、閾値によって予め判定を下しておくことで回避できる。従って、詳細照合では、まず各特徴量 $u_1 \sim u_6$ について閾値による判定を行ない、次にその判定では判定できなかった入力指紋についてのみ全特徴量を使った6次元の最尤判定を行なう。

7. 処理実験

以上述べた処理システムの性能を評価するために、同一指紋72対、相違指紋1254対を対象に実験を行なった。

7.1 2値化処理および方向パターン抽出の結果

従来比較的によく用いられていた局所平均値を閾値に用いた2値化結果と本手法による2値化結果の例を図10に示した。隆線の連続性、分離性の低下は、それぞれ疑似端点、疑似分岐点の増加をまねき、疑似マイニューシャ除去処理時間の増加や判定精度の低下に結びつくが、本手法による結果の方が隆線の連続性、分離性とも、画像全領域にわたってはるかに優れていることが解る。

図11は図10(b)に示した二値化の際同時に求められた画素方向から局所領域毎に算出された隆線方向であ

(a) 局所閾値による2値化

(b) 円形マスクによる2値化

図10 2値化の結果

図11 方向パターン

る。入力装置としてプリズムを用いている場合、指の湿気などの影響で画質がかなり悪い場合があるが、そのような場合も方向パターンは安定して抽出される。

7.2 方向パターン照合の結果

(a) 位置合せ前

(b) 位置合せ後

図12 位置合せの結果

図13 方向パターン照合スコアの分布

図12は方向パターンによる位置合せ前後の画像を重ねた例である。目視判読によって確認した結果、実験対象の同じ指の場合全てに対して位置合せに成功していることが解った。

方向パターン照合スコア $D(\Delta X, \Delta Y)$ の分布を図13に示した。実線で表現したのが同一指紋の場合、点線で表現したのが相違指紋の場合である。図中、 T_s と T_d は(7)式に示した判定の閾値である。正規分布を仮定した場合、本人が拒否される確率が0.15%以下で、他人が受入れられる確率が0.15%以下であるように設けられている。これらの閾値を用いた場合、同じ指の31%、違う指の95%がこの段階で正しく判定された。

7.3 特徴点抽出結果

7.3.1 線画像作成の結果

縮小と非接触型拡張処理の効果を図14に示した。同図のa)は縮小と非接触型拡張を行わずに細線化した結果、b)は縮小と非接触型拡張を行なった結果、そして、c)はb)画像を反転させた結果である。同図の結果からa)の場合は切れた隆線や小ループ、短い線分など図6に示した全ての疑似マイニューシャの発生原因がかなり多く現われているのに対して、本手法によるc)の結果は比較的疑似マイニューシャの数が少なく、さらにほとんど橋型に限られていることが分かる。

この段階で、図14のa)とc)からマイニューシャ候補の抽出を行ない、数を比較した結果によれば、境界領域に存在する疑似端点の数も含めた場合(すなわち、存在する全てのマイニューシャの数を意味する)a)画像について、平均349個、c)画像の場合が平均220個であった。これは本手法の場合、129個も疑似マイニューシャの発生が抑制されていることを示している。

7.3.2 復元処理の結果

図14のc)画像に復元処理を施した結果を図15に示す。復元処理後、14枚の指紋画像を目視判読し、自動抽出されたマイニューシャリストの内、正しいマイニューシャの比率を計算した。表1に示したのが判読の結果で、約82%の精度が確認された。

7.4 マイニューシャに基づく照合の結果

マイニューシャに基づく照合で用いる特徴量の分布を図16に示す。実線が同一指紋の場合であり、点線が相違指紋の場合である。図中の横軸下に示した矢印は、

(a) 縮小・非接触型拡張処理なしの細線化

(b) 縮小・非接触型拡張処理結果

(c) 反転結果

図14 縮小と非接触型拡張の効果

図15 復元処理結果

表1 特徴点抽出の信頼度

	コンピュータ処理	人間の判読	特徴点の信頼度
1	31	27	0.871
2	21	20	0.952
3	40	37	0.925
4	45	36	0.800
5	33	26	0.788
6	60	45	0.750
7	56	46	0.821
8	45	39	0.867
9	41	32	0.780
10	37	24	0.649
11	56	51	0.911
12	64	51	0.797
13	44	32	0.727
14	46	41	0.891
平均	44.2	36.2	0.819

統計的な判定の前に行なった閾値処理(6.3節参照)の閾値である。同一指紋と相違指紋の分布の標準偏差をそれぞれ σ_s , σ_d とすると、これらの閾値は表2に示す位置に対応している。閾値による判定誤りの期待値は、表2から最大でも 1.9×10^{-7} ($5.4\sigma_s$)であることがわかる。

照合の結果は、本人が拒否される確率が1.39% (1/72), 他人が受入れられる確率が0.000% (0/1254)であった。システムの運用上、後者の判定誤りが発生すると大きな問題となるが、本人が拒否される場合は、再度指紋を入力し直すことによって正しく認識されることが多いのであまり大きな問題とはならないものと考えられる。

(a) $u_1 = 2N/M$

(b) $u_2 = N$

(c) $u_3 = (1/N)\Sigma\Delta R_\kappa$

(d) $u_4 = (1/N)\Sigma\Delta U_\kappa$

図16 特徴量の分布
(←..... : 閾値判定領域)

表2 使用した閾値の統計的な位置

	特徴量 U_1	特徴量 U_2	特徴量 U_3	特徴量 U_4	特徴量 U_5	特徴量 U_6
受理	—	—	$5.4\sigma_s$	$5.6\sigma_s$	—	—
拒否	$7.0\sigma_d$	$8.0\sigma_d$	—	—	$9.2\sigma_d$	—

—：不使用

(e) $u_5 = Y_1 + Y_2$

(f) $u_6 = u_5 / 2N$

図16 特徴量の分布
(←..... : 閾値判定領域)

8. ま と め

本研究はマイクロコンピュータをベースとする1:1型の指紋自動認識システムの開発を目標としており、簡単なハードウェア化を前提にしている。本論文では、そのようなシステム上での実行に適した処理手法について提案した。次の幾つかの点で、従来報告されている指紋認識システムとは異なる手法を採用している。1) 二値化処理手法は、比較的計算量が少ないにもかかわらず、指紋の特性を利用して高い隆線の識別性能を持っている。また、同時に位置合せや照合に必要な方向パターンに関する情報をも求めている。2) 2値画像に対する縮小や非接触型拡張処理を用いて疑似マイニューシャの種類と量を制限し、線画像に対する復元処理を単純な操作でできるように配慮している。さらに、非接触型拡張処理の結果を反転させることによって細線化画像と同等な線画像を得ている。3) 復元処理は特徴点の周辺の隆線方向を参考に、簡単なリスト処理と最小限の画像データアクセスで済むように工夫している。4) 隆線方向パターンを用いた簡単で信頼性の高い位置合せ手法を用いている。5) 隆線方向パターンの照合により、殆ど(実験では90%以上)のケースについて判定を下すことができる。方向パターン照合に必要なデータは、基本的には二値化処理

だけで得られるので、殆どのケースは即座に判定を下せることを意味している。6) 方向パターンとマイニューシャという相関関係のない二つの特徴を用いるため、より高い信頼性が得られる。

同一指紋72対、相違指紋1254対を対象としたこれらの手法を用いた処理実験によると、本人拒否率1.39%、他人受率率0.000%という結果が得られた。このことから精度面では十分な性能を持っているのではないかと考えられる。処理速度に関してはまだハードウェア化が行われていないので、報告はできなかったが、画像データをアクセスする処理アルゴリズムを簡単な操作の反復で実行できるように考慮したので、簡単なハードウェア化で十分な速度が得られると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 白井克彦：個人の識別技術—話者、筆跡、指紋、顔、計測と制御、vol.20, No.1, 1981, pp.162-166
- 2) John Koehring: Automatic identity verification, Information Age, Vol. 6, No. 2, April 1984, pp.103-110
- 3) 瀬戸昌忠, 星野幸夫：指紋照合の自動化技術, 画像電子学会誌, 第15巻, 第3号, 1988, pp.184-191
- 4) 河嶋操, 木地和夫：指紋と掌紋による個人識別技術, 情報処理, Vol. 25, No. 6, June 1984, pp.599-605
- 5) 中村納, 佐藤正, 奥野治雄：電子計算機による指紋同定システムについて(その1), 工学院大学研究報告第42号, 昭和52年5月

- 6) 大和一晴, 中島恭一, 鈴木隆史, 田中由: マイクロコンピュータを用いた指紋特徴点のパターンマッチング, 画像電子学会誌, 第16巻, 第4号, 1987, pp.215-222
- 7) NBS: An Automatic Fingerprint Identification System, NBS Special Publication 500-89, Fed. 1982
- 8) Finger Matrix: Ridge Reader Specifications, Finger Matrix, Inc., NY, USA
- 9) 古村, 山縣, 近藤: 複合マイクロコンピュータによる実時間指紋照合システム, 第13回画像工学コンファレンス, 1985, pp.173-174
- 10) 森田, 浅井: 個人識別用指紋照合端末, 電子通信学会, AL85-56, 1985, pp.97-104
- 11) 清水明宏, 長谷雅彦: プリズムを用いた指紋情報検出方法, 電子通信学会論文誌, vol. J67-D, No. 5, 1984, pp.627-628
- 12) 中村納, 山下一徳, 奥野治雄: 可変領域を持つ微分フィルタに関する研究, 工学院大学研究報告第47号, 昭和54年11月, pp.156-165
- 13) 中村納, 岡本教佳, 南敏: 最短路構造に基づく形状マッチングの高速化, 画像電子学会誌, 第11巻, 第4号, pp. 281-289
- 14) 清末, 長谷, 星野: 指紋画像の基準点検出に関しての一考察, 電子通信学会論文誌, Vol. J67-D, No. 7, 1984, pp.807-808
- 15) 清水明宏, 長谷雅彦: 指紋画像の中心点検出方法, 電子通信学会論文誌, Vol. J67-D, No. 3, 1984, pp.383-384
- 16) 手塚, 中村, 南, 奥野: テンプレート・マッチングによる濃淡画像の復元について, 工学院大学研究報告52号, 昭和57年4月, pp.1119-1120
- 17) 細貝, 中村, 奥野: 構造認識に基づく線画像の階層的復元アルゴリズム, 電子通信学会論文誌, Vol. J63-D, No. 9, 1980, pp.731-738
- 18) J.R. Ullmann: Pattern Recognition Techniques, Butterworth, 1973