

摂動法とマニユージャマッチングの結合を用いた指紋照合

大高, 聡 / OTAKA, Satoshi

(発行年 / Year)

2008-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2008-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(理学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

修士論文

摂動法とマニューシャマッチングの結合を
用いた指紋照合

平成 20 年 1 月 29 日提出

指導教官 若原徹教授

法政大学大学院情報科学研究科情報科学専攻

学籍番号 06T0008 大高 聡

概要

This paper describes a new, powerful technique of fingerprint verification using a combination of perturbation method and minutiae matching. The proposed method consists of following five parts. The first part performs local FFT band-pass filtering to enhance the cyclic ridge structure in respective local areas. The second part is optimal block-wise-shift matching between input and enrolled fingerprint images using five rotation images. The third part is detail matching by perturbation. The key ideas of our perturbation method are in three ways: extraction of core points from enrolled fingerprint images, setting local windows around the core point, and asynchronous perturbation of local windows for optimal detail matching between input and each enrolled fingerprint images. The fourth step is minutiae matching based on optimal one-to-one correspondence search. Finally, the fifth step is combination of the perturbation method and minutiae matching using multiple effective thresholds. In fingerprint verification experiments using FVC2000 fingerprint database (110 fingers \times 8 images) via the cross-validation method, the proposed method has achieved a very low equal error rate (EER) of 4.01%. This EER is much superior to those rates of 4.35% and 9.52% obtained by the perturbation method only and the minutiae matching only, respectively.

本論文では、2種類の照合方法を使用し、様々な劣化や変形を含む指紋画像に対する照合処理の高精度化の課題を扱う。今回、提案する手法は5つのパートで構成される。(1)指紋隆線の周期性に着目した局所的FFTバンドパスフィルタによる画像強調、(2)登録-入力指紋間での ± 10 度までの回転画像と、ブロック単位の最適位置ずらしによる大局的照合、(3)登録指紋のコアポイントを中心とした4つの局所窓領域の非同期摂動による、入力指紋との詳細照合、(4)1対1の対応付けによるマニューシャマッチング、(5)最適閾値による摂動法とマニューシャマッチングの結合、である。キーアイデアである処理(3)は、3段階によって構成される。最初にコアポイントの抽出。次にコアポイントを中心とした、摂動領域の設置。最後に、非同期摂動による詳細な照合である。FVC2000指紋画像データベース(110指 \times 8枚)を使用し、1枚/指を登録指紋とするcross-validation法による指紋照合実験により、本人拒否率(False Rejection Rate ; FRR)と他人受理率(False Acceptance Rate ; FAR)が等しくなるEqual Error Rate(EER)が4.01%に達した。摂動法だけでは、EERが4.35%、マニューシャマッチングだけでは、9.52%だったのに対し、提案手法は十分に低い値となり、有効性を示すことが出来た。

目次

概要	2
第1章 序論	4
1.1 研究の背景	4
1.2 論文の構成	5
第2章 FVC2000 指紋データベース	6
2.1 FVC2000 指紋データベースの概略	6
2.2 DB1 に収録されている指紋	8
第3章 FFTバンドパスフィルタ	9
第4章 大局的な重ね合わせ処理	11
4.1 回転による回転成分の吸収	11
4.2 ブロック単位の最適位置ずらし	12
4.3 大局的な重ね合わせ	14
4.4 位置ずらし範囲の検討	16
第5章 摂動法	18
5.1 コアポイントの抽出	19
5.2 局所窓の設定	20
5.3 摂動範囲の設定	21
5.4 重なり評価	21
5.5 局所窓の最適化の検討	23
5.6 指紋隆線密度による評価の検討	25
第6章 マニューシャマッチング	27
6.1 細線化とマニューシャ抽出	27
6.2 マニューシャ対応付け	29
6.2.1 過剰対応解消法	30
6.2.2 不足対応解消法	31
6.3 照合率の算出	32
6.4 マニューシャ対応付け条件の検討	32
第7章 本人他人判定	34
第8章 実験結果	35
第9章 考察	37
9.1 提案手法の強み	37
9.2 残された課題	39
謝辞	42
文献	42

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

近年、身体特徴に基づいた個人認証技術であるバイオメトリクス[1]が大きな注目を浴びている。What you have (鍵) や what you know (パスワード) ではなく、what you are (身体) に基づいて行う厳密な個人認証手段として社会的な期待が大きい[2]。

バイオメトリクスで用いられる身体特徴には、顔、指紋、指や掌の静脈、掌形、虹彩、網膜、声紋、筆跡、サーモグラムなど様々なものがある。それらの比較項目として、普遍性、唯一性、永続性、収集容易性、性能、受容性、偽造回避性が挙げられる[3]。指紋は、万人不同で経年変化に強い、指紋採取が容易である、指紋採取を行う際の機器が比較的安価・軽量である、認識率・認識速度が十分要求を満たせる、などの利点により、最も実用化が進んでいるバイオメトリクス技術と言える。実際、市場占有率では指紋が 43.6%、顔が 19.0%、掌形が 8.8%と報告されている[4]。

このため、指紋認証技術の現状レベルを把握する目的で 2000 年より Fingerprint Verification Competition (FVC) が隔年で開催されてきた。これまで FVC2000、FVC2002、FVC2004、FVC2006 の実施結果が Web 上で公開されており、FVC2006 以外は、使用した指紋画像データベースもダウンロード可能である[5]。技術の性格上、優秀な成績を収めた指紋認証アルゴリズムの中身は不明であるが、公開指紋画像データベース上でのトップ性能が明らかにされたことには大きな意義がある[6]。

従来の指紋照合技術は、大きく分けてマニューシャマッチングとパターンマッチングの 2 つに分類できる。マニューシャマッチングは、指紋隆線の端点と分岐点であるマニューシャを抽出し、マニューシャの位置や方向などを比較し、同一指であるかを評価する方法である。一方、パターンマッチングは指紋隆線の方向分布や濃淡画像そのものを用いて、マッチングを行う手法である。

本論文では、上記 FVC2000 で使用された指紋画像データベースを対象に、様々な劣化や変形を含む指紋画像に対する照合処理の高精度化の課題を扱う。本研究の特長は、相補的な 2 つのアプローチであるパターンマッチングとマニューシャマッチングを結合するところにある。

提案手法は次の 5 段階の処理から構成される。(1) 指紋隆線の周期性に着目した局所的 FFT バンドパスフィルタによる画像強調、(2) 登録—入力指紋間での 0 度、±5 度、±10 度の回転画像を用いた回転成分の吸収と、ブロック単位の最適位置ずらし[7]による大局的照合、(3) 登録指紋のコアポイントを中心とした局所窓領域の非同期摂動による入力指紋との詳細照合、(4) マニューシャマッチング、(5) 摂動法とマニューシャマッチングの結合、である。

上記(1)は掠れ・潰れの画像劣化に対処する前処理である。処理(2)は、登録ー入力指紋画像間での線形歪みを吸収する。処理(3)は局所的な非線形歪みを吸収する。処理(4)は、登録ー入力指紋間でマニューシャの最適な対応付けを行う。最後に、摂動法とマニューシャマッチングの結合により、照合の高精度化を狙う。

FVC2000 で使用されたデータベース DB1 に含まれる 110 指×8 枚の指紋画像データを用い、1 枚／指を登録指紋とする cross-validation 法[8]による指紋照合実験より、本人拒否率(False Rejection Rate; FRR)と他人受理率(False Acceptance Rate; FAR)が等しくなる値として EER(Equal Error Rate) = 4.01%を達成し、提案手法の有効性を示すことができた。

1.2 論文の構成

本章では序論として、本研究がどのような背景および目的のもとに行われるか、提案手法の概要と結果について述べた。第2章では本研究に用いた指紋画像データベース FVC2000 について紹介する。第3章では本研究における提案手法の一段階目となる FFT バンドパスフィルタについて述べる。続く、第4章では大局的な重ね合わせについて述べる。第5章では本研究のメインとなる摂動法について述べる。そして、第6章ではマニューシャマッチングについて述べる。第7章では、摂動法とマニューシャマッチングの結合について述べる。第8章で実験結果を示し、第9章では実験結果に対しての考察を述べる。最後に、第10章において結論を述べ、本論文のまとめとなる。

第 2 章 FVC2000 指紋データベース

本研究で使用した指紋画像は、公開データベース FVC2000 の指紋データベースである。本章ではこの指紋画像データベースについて紹介する。

2.1 FVC2000 指紋データベースの概略

本研究で使用したデータベースは 2000 年に実施された指紋照合の国際コンペティション FVC2000 (Fingerprint Verification Competition) で使用され、後に公開されたものである[9]。このデータベースは DB1~DB4 という 4 つのセクションで構成され、各々指紋採取に用いたセンサが異なる。DB1 は低コスト光学式センサ (Secure Desktop Scanner) を用いて収集されたものである。同様に DB2 は低コスト静電容量式センサ (Touch Chip)、DB3 は光学式センサ (DFR-90)、DB4 は指紋合成ジェネレータを用いて収集されたものである。データベースには、110 人分の指と、指 1 本あたり 8 枚の指紋画像データ、計 880 枚の指紋画像データが収録されている。指紋画像は 8 ビットの濃淡画像であり、画像サイズは各セクションによって異なる。図 2.1 にそれぞれのセクションの指紋画像データを示す。



(a)



(b)



(c)



(d)

図 2.1 FVC2000 データベースにおけるサンプル例。

(a)DB1 (低コスト光学式センサ)。 (b)DB2 (低コスト静電容量式センサ)。
(c)DB3 (光学式センサ)。 (d)DB4 (指紋合成ジェネレータ)。

2.2 DB1 に収録されている指紋

本研究では低コスト光学式センサ (Secure Desktop Scanner) を用いて収集された DB1 を使用した。DB1 には、110 本の指 (同一人は最大 4 本まで) を対象として、指 1 本あたり 8 枚の指紋画像データを採取したもので、計 880 枚の指紋画像データが収録されている。

指紋画像は 8 ビットの濃淡画像であり、画像サイズは 300×300、分解能は 500dpi である。本研究では、第 3 章で述べる FFT を適用するため、画像サイズを 2 の累乗である 256×256 に線形補間法で変換して使用した。

図 2.2 に、DB1 に含まれる指紋画像の例を示す。

図 2.2 より、指紋隆線が鮮明なものから掠れ・潰れで劣化したものまで含まれること、また同一指でかなりの位置ずれや回転が生じていることが分かる。そのため、指紋照合をする際に、このような劣化画像をどのように処理するかが重要な要素となってくる。

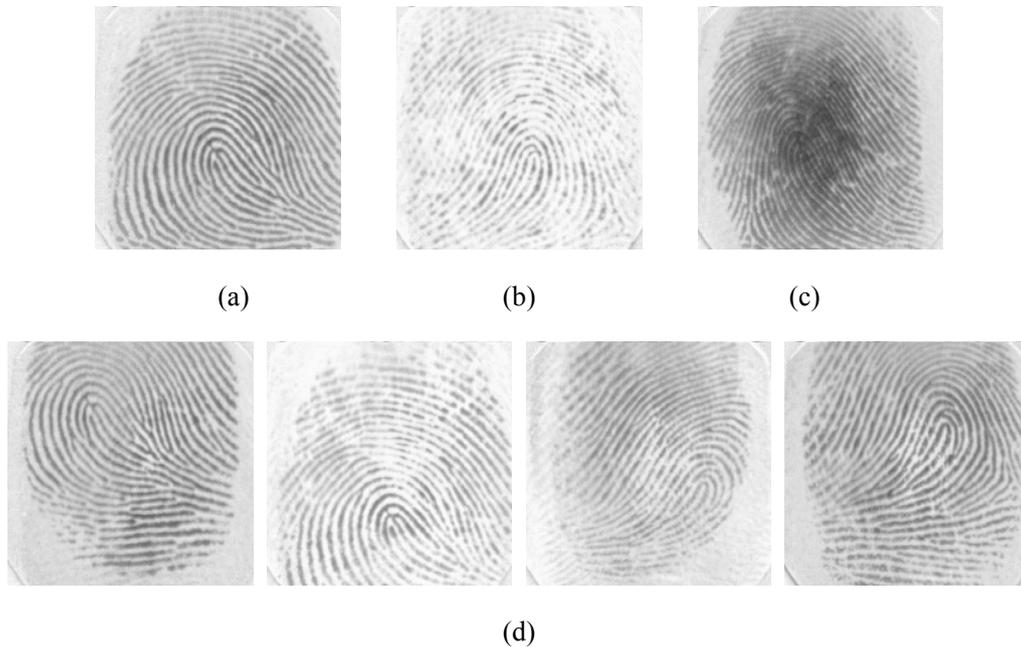


図 2.2 FVC2000 の DB1 に含まれる指紋画像の例。

(a)鮮明な画像。(b)掠れ画像。(c)潰れ画像。

(d)同一指での位置ずれや回転。

第3章 FFT バンドパスフィルタ

指紋認証技術の精度は入力指紋画像の品質に大きく依存する。このため、乾燥指やキズ・亀裂等により画像が掠れる、あるいは逆に指を強く押すこと等により画像が潰れる、ことによる画像劣化への対処が必要であり、指紋画像の強調処理と呼ばれている。

指紋隆線が局所領域ではほぼ同一方向・ピッチを持つことに着目し、従来からフーリエ変換やガボールフィルタの適用が有効であることが報告されている[3]。

本研究においても、FFT バンドパスフィルタの適用と選択的パワー強調の処理を用いた。バンドパスフィルタは、特定の周波数帯域のみを通過させ、最も強い周波数成分を強調するフィルタである。今回は、指紋画像をローカルエリア (32 ピクセル×32 ピクセル) の小ブロックに分割して、ブロックごとに FFT バンドパスフィルタを適用した。ブロック単位では指紋隆線がほぼ一定方向になることという性質、つまり指紋隆線方向の局所安定性という性質がある。これに注目したローカル FFT バンドパスフィルタの利点は、特定の方向と周波数を持つ指紋隆線を効果的に強調できる点にある。

以下に具体的な手順を示す。

- (1) 指紋画像全体をサイズ $M \times M$ の小領域を単位にブロック分割する。ここで、サイズ M は $N (=256)$ より小さくかつ、2 のべき乗の値をとる。各ブロック位置を中心に $M/4$ のステップ幅でブロック位置をずらして、それらすべての位置でブロック単位に FFT を施して、フーリエ変換 $F(\omega_1, \omega_2)$ を求める。
- (2) 各ブロックについて、フーリエ変換成分 $F(\omega_1, \omega_2)$ からパワーが最大となる周波数 R_{\max} を求める。

$$R_{\max} = \max_{\omega_1, \omega_2} |F(\omega_1, \omega_2)| \quad (1)$$

- (3) 周波数 R_1 と R_2 を、パラメータ α_1 、 α_2 を用いて、次式のように定める。

$$R_1 = \alpha_1 \times R_{\max}, \quad R_2 = \alpha_2 \times R_{\max}, \quad 0 < \alpha_1 < 1.0 < \alpha_2 \quad (2)$$

- (4) 直流成分を含む低周波数領域を通過させるための上限周波数 R_0 を次式で定める。ここでは画像際す N を定数 16 で割った値を用いた。

$$R_0 = N/16 \quad (3)$$

- (5) 次式の伝達関数 $H(\omega_1, \omega_2)$ を用いてフィルタリングを行う。

$$H(\omega_1, \omega_2) = \begin{cases} 1 & , \quad \omega_1^2 + \omega_2^2 \leq R_0^2 \\ 1 & , \quad R_1^2 \leq \omega_1^2 + \omega_2^2 \leq R_2^2 \\ 0 & , \quad otherwise \end{cases} \quad (4)$$

(6) 選択的パワー強調を行う。

$$\tilde{F}(\omega_1, \omega_2) = F(\omega_1, \omega_2) |F(\omega_1, \omega_2)|^\gamma, \quad \gamma > 0 \quad (5)$$

(7) 各ブロックで逆フーリエを行う。

(8) 画像を分割した際の各ブロックに、そのブロックの修復画像とそのブロックと部分的に重なるすべてのブロックでの修復画像をガウシアン加重により加算して最終的な修復画像を作成する。

図 3.1 に画像修復の例を示す。

図 3.1 より、亀裂・掠れ・潰れが修復され、指紋隆線が強調された出力が得られていることが分かる。



図 3.1 劣化指紋画像の強調処理例。

(a) 掠れ画像。(b) 潰れ画像。

第4章 大局的な重ね合わせ処理

同一指の指紋画像の間でも、図 2.2.(d)に示した例のように、相互にかなりの回転や位置ずれを含む場合がある。本章では、撮動法、マニューシャマッチングの前処理として、回転画像の使用による回転成分の吸収と、ブロック単位の最適位置ずらしによる位置ずれ吸収の 2 つの処理による、大局的な重ね合わせについて述べる。使用する指紋画像は、登録および入力画像ともサイズは 256×256 で、第 3 章の強調処理を施してある。

4.1 回転による回転成分の吸収

まず、回転画像の生成について述べる。回転は、0 度、 ± 5 度、 ± 10 度の計 5 種類を生成する。回転を加えた後、それぞれにおいて、節 4.2 のブロック単位の位置ずらしを行う。これにより、画像間の回転成分の吸収を行う。

図 4.1 に回転画像の例を示す。

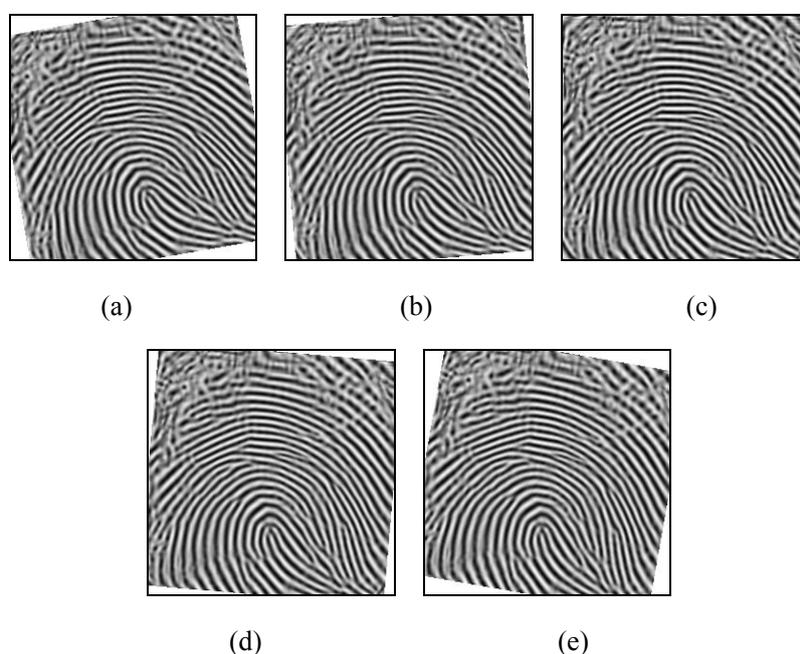


図 4.1 回転画像例。

(a)-10 度。(b)-5 度。(c)0 度。(d)+5 度。(e)+10 度。

4.2 ブロック単位の最適位置ずらし

節 4.1.に続いて、ブロック単位の位置ずらし[7]により、画像間に生じた平行移動のずれを吸収する。

位置ずらしマッチングにおいて、ずらし幅の設定とマッチングに用いる特徴・マッチング尺度の2点が重要となってくる。ずらし幅については、サイズ $N \times N$ の指紋画像全体を正方ブロック (サイズ $M \times M$) に分割し、このブロック単位で位置ずらしを行うこととする。本研究では、1ブロックを $M=16$ とした。分割ブロック数は 256 となる ($N=256$)。指紋画像の特徴としては、隆線が挙げられる。1つの指紋において、隆線の幅や間隔はほぼ一定だが、隆線は端点や分岐点などが多くあり、複雑になっている。が、図 4.2 のように、ブロック単位で考えると、各ブロック内で隆線はほぼ一定の方向となる。このような指紋隆線の特徴を利用する。

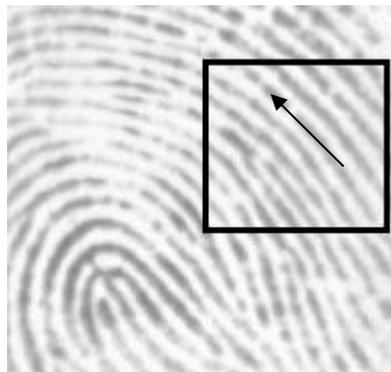


図 4.2 ブロック内での隆線方向。

このブロック単位での位置ずらしを行い、正規化相互相関値が最大となる回転および、ずらし位置を求める。

図 4.3 にブロック単位の位置ずらしの概念図を示す。図中のブロック分割数は 8×8 の例で示してある。

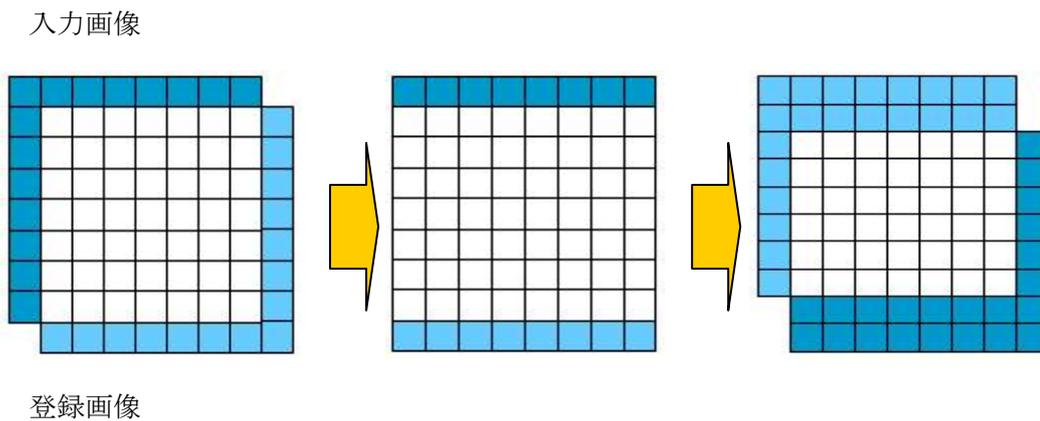


図 4.3 ブロック単位の最適位置ずらしの概念図。

4.3 大局的な重ね合わせ

上記の節 4.1. と節 4.2. を順に行い、回転・平行成分の吸収を行う。具体的な手順を以下に説明する。

- (1) 入力画像にアフィン変換を施し、回転画像を生成する。アフィン変換の式を以下に示す。伸縮・回転・せん断を表す 2×2 の行列 A と平行移動を表すベクトル b で表現できる。さらに、この A, b を用いて、位置座標 (i, j) は (i', j') に変換される。

$$A = (a_0 a_1) = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} \\ a_{10} & a_{11} \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} i' \\ j' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} \\ a_{10} & a_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{00}i + a_{01}j + b_0 \\ a_{10}i + a_{11}j + b_1 \end{pmatrix}$$

- (2) 指紋画像のすべて（最右辺と最下辺は除く）のピクセル位置 (i, j) において、その点での濃淡勾配を算出する。位置 (i, j) での濃淡値を $g(i, j)$ と記すと、濃淡勾配の角度は $\theta(i, j)$ は、 2×2 の Roberts 交差勾配オペレータ[10]を用いて次式で計算される。ただし、右水平方向を 0° としている。

$$\Delta u = g(i+1, j+1) - g(i, j), \quad \Delta v = g(i+1, j) - g(i, j+1)$$
$$\theta(i, j) = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta v}{\Delta u} \right) - \frac{\pi}{4} \quad (7)$$

- (3) 各ブロック内の 16×16 ピクセルがどの 32 方向の勾配方向成分を計算する。そして、ガウシアンフィルタ $[1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1]^T$ の重みを用いて 32 方向から 16 方向に圧縮し 16 次元の特徴ベクトルを抽出する。

(4) 入力画像を登録画像に対してブロック単位でシフトさせて、ブロック間距離 D の平均を求める。

① 入力画像の濃淡勾配特徴ベクトルを以下のように表現する。

$$n^i = (n_1^i, n_2^i, \dots, n_{16}^i) \quad (8)$$

② 登録画像の濃淡勾配特徴ベクトルを以下のように表現する。

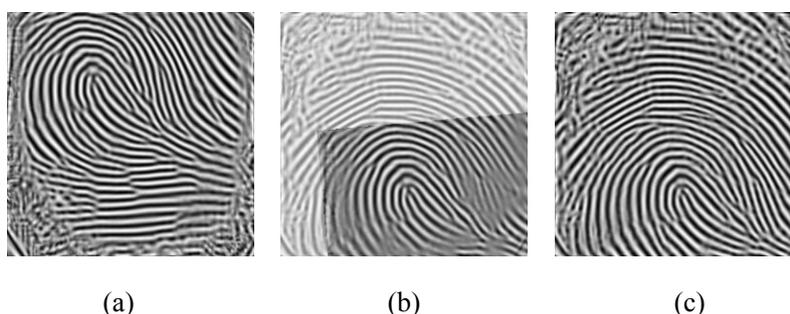
$$m^i = (m_1^i, m_2^i, \dots, m_{16}^i) \quad (9)$$

③ ここで、入力指紋を登録指紋に対して相対的に次式で示すようにブロック単位で縦横にずらす。 Δ がブロック単位での縦横ずらし、 $N(\Delta)$ はずらし Δ のときの入力画像と登録画像間の重なりブロック数を表す。 $D(\Delta)$ の値が最小になったときがブロック単位の最適位置ずらしとなる。

$$D(\Delta) = \frac{1}{N(\Delta)} \sum_j \|m^j - n^{\Delta(j)}\|^2 \quad (10)$$

(5) ずらし Δ の最大範囲を上下左右方向に K ブロックとして、 $(2K+1)^2$ 通りのずらし Δ に対して、式(1)の値 $D(\Delta)$ が最小となるずらし Δ^* を決定する。この Δ^* がブロック単位の最適位置ずらしを与える。予備実験より、 $K=8$ と設定した。この場合は、最大ずらしでの重なりブロック数は最少 64 となり、指紋画像全体の 25% の領域でマッチングを評価していることになる。

図 4.4 に大局的な重ねあわせの例を示す。図 4.4 より、相互の回転と位置ずれが吸収されていることがわかる。



(a) (b) (c)

図 4.4 回転・平行移動成分の吸収例。

(a)入力画像。(b)大局的な重ね合わせ画像。(c)登録画像。

4.4 位置ずらし範囲の検討

ブロック単位の位置ずらしの際の最大ずらし範囲 (K) の検討を行った。ずらし範囲は本人拒否率と他人受理率のトレードオフに大きく関わってくる。ずらし範囲が大きいと、対本人認識に弱く、対他人認識に強くなる。逆にずらし範囲が小さいと、対本人認識に強く、対他人認識に弱くなる。本研究では、従来のブロック単位の位置ずらし範囲である、 $K=6$ と新しい位置ずらし範囲として、 $K=8$ の検討を行った[7]。比較は、摂動時・マニューシャマッチング時・摂動法とマニューシャマッチングの結合時の EER と FRR と FAR の差 (DIF) の 2 点で行った。

表 4.1 に摂動時の比較結果、表 4.2 にマニューシャマッチング時の比較結果、表 4.3 に結合時の比較結果をそれぞれ、上位 4 位までを掲げる。比較対象は、EER が最小のもの、DIF がより小さいものとした。どの場合においても、ずらし範囲が大きい方が良い結果を示すことが出来た。よって、本研究では、従来の条件より大きいずらし範囲 ($K=8$) を採用した。

表 4.1 位置ずらし範囲の比較。(摂動時)

	D_{min}	$D_{max}-D_{min}$	FRR	FAR	DIF((FRR-FAR))	EER
K=8	50.77	28.45	4.25%	4.26%	0.00%	4.25%
	50.92	32.76	4.35%	4.35%	0.00%	4.35%
	53.85	48.33	6.90%	6.90%	0.00%	6.90%
	54.16	48.81	7.06%	7.06%	0.00%	7.06%
K=6	51.54	19.35	4.72%	4.73%	0.00%	4.73%
	51.54	19.59	4.72%	4.73%	0.00%	4.72%
	51.54	19.83	4.72%	4.72%	0.00%	4.72%
	52.47	40.18	5.57%	5.57%	0.00%	5.57%

(上から、4 位・3 位・2 位・1 位。 D_{min} 、 $D_{max}-D_{min}$ は第 5 章参照のこと。)

表 4.2 位置ずらし範囲の比較。(マニユージャマッチング時)

	照合率	FRR	FAR	DIF((FRR-FAR))	EER
K=8	39%	7.03%	15.00%	7.97%	11.02%
	40%	7.27%	14.11%	6.84%	10.69%
	41%	8.52%	11.08%	2.56%	9.80%
	42%	9.48%	9.56%	0.08%	9.52%
K=6	38%	7.71%	16.26%	8.55%	11.99%
	39%	8.60%	14.01%	5.40%	11.30%
	40%	8.86%	13.03%	4.17%	10.95%
	41%	10.08%	10.29%	0.21%	10.18%

(上から、4位・3位・2位・1位。)

表 4.3 位置ずらし範囲の比較。(結合時)

	D_{min}	$D_{max}-D_{min}$	照合率	FRR	FAR	DIF((FRR-FAR))	EER
K=8	73.75	8.81	42%	9.46%	9.46%	0.00%	9.46%
	73.75	9.05	42%	9.46%	9.46%	0.00%	9.46%
	53.85	16.47	31%	4.01%	4.01%	0.00%	4.01%
	51.08	17.67	13%	4.09%	4.09%	0.00%	4.09%
K=6	55.71	10.73	11%	12.50%	12.50%	0.00%	12.50%
	55.71	10.97	11%	12.50%	12.50%	0.00%	12.50%
	58.94	11.21	28%	13.31%	13.31%	0.00%	13.31%
	71.59	14.56	37%	16.12%	16.12%	0.00%	16.12%

(上から、4位・3位・2位・1位。 D_{min} 、 $D_{max}-D_{min}$ は第5章参照のこと。)

第 5 章 摂動法

本章では、指紋の局所窓領域の非同期摂動で表現される非線形歪みの吸収と 1 画素レベルでの詳細照合を行う。

指紋画像の照合に摂動法を導入したのは Hatano 等の報告[10]が最初である。入力指紋を 2 値画像、登録指紋は細線化画像で与えて、重なり領域の中心に 4 つの局所窓領域を設定している。登録指紋の 4 つの局所窓領域に入力画像上で非同期に摂動を加えて、局所窓領域内の黑白画素の一致率の変化を調べる。同一指と他人指では、上記の一致率の変化の様子が異なることに注目して、高精度な照合率を達成している。

本研究で提案する摂動法では、Hatano 等の手法を次の点において改良している[11]。

- (a) 登録指紋上での局所窓領域をコアポイントの周囲に 4 つ設定する。
- (b) 2 値化や細線化を行わず、登録および入力指紋とも濃淡画像で照合を行う。

上記(a)は、複数の方向を持つ指紋隆線が集結しているコアポイント（指紋隆線パターンの渦やループの中心である core や delta[3]）を強制的に局所窓領域からはずし、かつ指紋隆線の方向がほぼ一定で周期性が顕著な局所窓領域をコアポイントの周囲に設定するという狙いを持つ。

一方、(b)は 2 値化による情報欠損を回避し、局所窓領域内での一致率を忠実かつ安定に算出することが目的である。

以下、各節で詳細に説明する。

5.1 コアポイントの抽出

本研究ではコアポイントを複数の方向を持つ指紋隆線の集結点、"*the north most point of the innermost ridge line*"と定義しており、画像の中心ではなく、指紋の中心部といえるものであるが[10]、指紋画像からコアポイントを高精度に自動抽出するアルゴリズムの構築は容易ではない[3]。しかし、本研究でのコアポイントは登録指紋に対して設定すればよいので、手動で抽出することに全く問題はない。さらに、手動であれば、コアポイントが特定しにくい指紋画像に対しても摂動中心として最適な位置を選んで設定できる。

実際、FVC2000 の DB1 に含まれる全 880 枚の指紋画像について、手動でコアポイントを抽出する作業を行った。抽出されたコアポイントは各指紋画像を登録指紋として摂動法を適用する場合に使用される。

図 5.1 にコアポイント抽出例を示す。

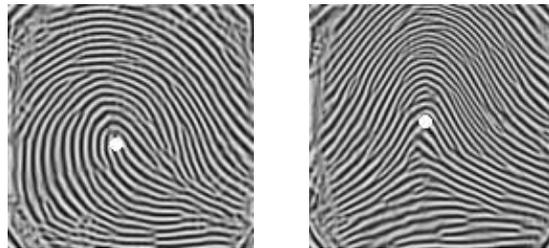


図 5.1 コアポイント抽出例。
白点がコアポイントを示す。

5.2 局所窓の設定

コアポイントの近傍は、複数方向の指紋隆線が混在しているため、画像間の一致度を高くすることが困難となるケースが多々ある。そのため、局所窓領域の設定範囲から除外することとする。この緩衝領域として、予備実験より、コアポイントの周辺である、縦横ともに $-10\sim+10$ の正方領域を用いた。この緩衝領域を除いて、コアポイントを中心に最大4つの局所窓領域を対称に配置する。この局所窓領域は、登録指紋画像から作成され、入力指紋画像に対して摂動を行うために使用する。

次に、局所窓領域のサイズについては、コアポイントの周囲で安定に確保できる窓領域を考慮して、固定サイズ 50×50 を用いた。しかし、コアポイントの位置が登録指紋の周辺に近い場合、サイズ 50×50 を確保できないことがある。その場合は、登録指紋画像内にある矩形領域の短辺を一辺とする正方領域を改めて局所窓領域とした。但し、その短辺の長さが25未満の場合は、本来のサイズ 50×50 に対して面積が25%未満となるため、信頼性が低いとみなし、局所窓領域としては用いないこととした。

図 5.2 に、局所窓領域の設置例を示す。

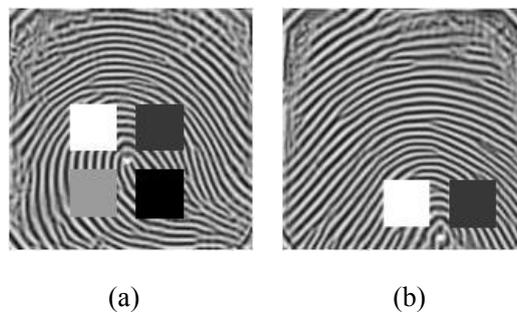


図 5.2 局所窓領域の設置例。

(a) 設置数 4 の例。(b) 設置数 2 の例。

白点はコアポイントを示す。

5.3 摂動範囲の設定

4つの局所窓領域に入力指紋画像上で非同期に摂動を加えて重なりを評価する。摂動は、登録指紋画像における局所窓領域内の指紋隆線の濃淡勾配特徴を元に、局所窓領域の周辺領域を摂動させ、高い一致度を求める方法である。指紋隆線の濃淡勾配特徴は、節4.3と同様に *Roberts* 交差勾配オペレータを使用した[10]。そして摂動では、摂動の際の、摂動の方向および摂動の大きさの設定が重要である。

摂動方向については、局所窓領域内の指紋隆線に直交する方向や一定の8方向、16方向も検討したが、予備実験より、全方向摂動を用いることとした。すなわち、上下左右に摂動の大きさを定めて、その範囲内で網羅的に摂動を行い、より高い一致度を目指した。

摂動の大きさについては、指紋隆線間隔の倍以上が適当であると判断した。FVC2000のDB1に含まれる指紋画像について指紋隆線間隔の平均は約6画素であった。一般に、摂動の大きさは本人拒否と他人受理のトレードオフに深く関わる。摂動範囲が小さいと対本人認識に弱く、対他人認識に強くなる。逆に摂動範囲が大きいと対本人認識に強く、対他人認識に弱くなる。さらに、網羅的な摂動ということで、処理時間も考慮する必要がある。今回は、摂動の大きさを左右上下に ± 20 画素とした。これより、摂動の総回数は 41^2 となる。

5.4 重なり評価

重なりの評価には、階調値特徴を用いる。入力画像と登録画像の間で、第 k 局所窓領域の摂動で重なった N_k ($25^2 \leq N_k \leq 50^2$)画素での平均階調値差 D_k を次式により計算する。

$$D_k = \frac{1}{N_k} \times \sum_i \sum_j |f_k(i, j) - g_k(i, j)|, (1 \leq k \leq 4) \quad (11)$$

ここで、 $f_k(i, j)$ と $g_k(i, j)$ はそれぞれ摂動領域内で重なった入力画像および登録画像の階調値を表す。節5.2で述べたように、局所窓領域は最大4箇所ある。

摂動法では、1つの局所窓領域に一定方向の摂動を加えた場合の平均階調値差の変化を調べると、指紋隆線の周期性により、平均階調値差も周期的に変化することに注目する。

図5.3に、摂動による平均階調値差の変化を示す。

図5.3より、対本人指の場合は平均階調値差の変動幅が大きく、かつ最小値も小さい。一方、対他人指の場合は平均階調値差の変動幅は小さく、最小値は大きい。よって、平均階調値差は入力画像と登録画像間の一致度と言え、重なりの評価とした。

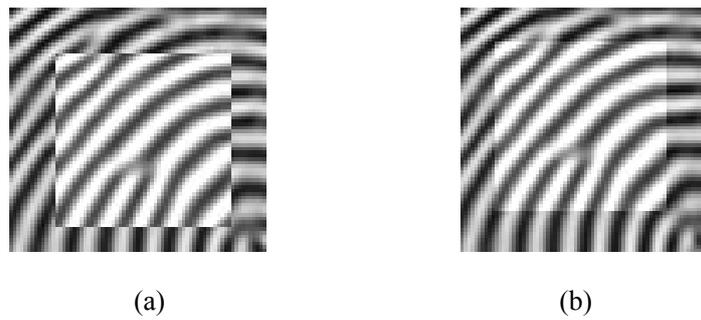
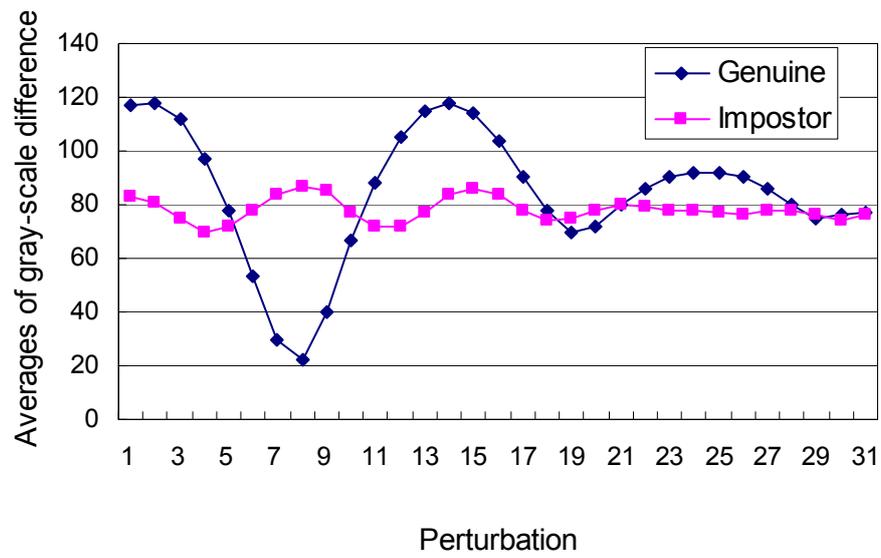


図 5.3 摂動による平均階調値差の変化。
 (a)階調値差最大の場合。 (b)階調値差最小の場合。

ここで、局所窓領域毎の非同期摂動により得られる平均階調値差の最大値と最小値の和をそれぞれ D_{max} 、 D_{min} と記すことにする。

5.5 局所窓の最適化の検討

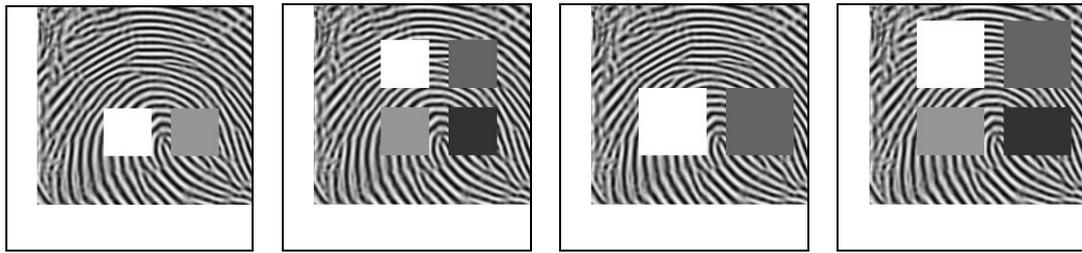
節 5.2 で示したとおり、コアポイントを基準とし局所窓を設定するため、コアポイントの位置によっては 4 つの局所窓を設定できない場合がある。そのため、摂動時の情報量が少なくなり、他人受理が多くなってしまいう現象があった[11]。この課題に対して、局所窓の最適化の検討を行った。

今回は、局所窓が 2 つとなった組み合わせに限定し、局所窓設定条件を変え、検討を行った。条件は、(1)従来技術の条件、(2) 局所窓を 4 つに増設する条件、(3) 局所窓の大きさを 1.4 倍にする条件、(2)と(3)の組み合わせの計 4 つである。

比較対象は、対本人認識が 6,160 組中の 1,159 組、対他人認識が 767,360 組中の 190,465 組であり、判断基準は、EER と摂動法の本人受理条件の閾値である平均階調値差の最小値 (D_{min})、最大値-最小値 ($D_{max}-D_{min}$) とした。

図 5.4 にそれぞれの条件の局所窓設定例を示す。また、表 5.1 にそれぞれの条件の EER と本人受理条件の閾値を掲げる。

表 5.1 より、条件(4)において、EER が 1%弱向上したことが分かる。が、1%弱の向上以上に本人受理条件が大幅に甘くなってしまうことが目立つ。 $D_{max}-D_{min}$ にいたっては、条件(1)の半分以下となってしまう。また、摂動法においては、処理時間も課題として挙げられており、条件(4)では、処理時間相応の結果を得ることが出来なかった。そのため、本研究では従来の局所窓設定条件を採用した。



(a)

(b)

(c)

(d)

図 5.4 局所窓の設定例。

(a)従来技術。(b)増設条件。(c)増幅条件。(d)(b)と(c)の組み合わせ条件。

表 5.1 局所窓の設定条件の違いによる、EER と本人受理条件の閾値。

条件	EER	D_{min}	$D_{max} - D_{min}$
(1)	8.63	53.8	23.77
(2)	11.48	59.4	50.04
(3)	11.56	62.55	34.88
(4)	7.85	55.55	11.37

5.6 指紋隆線密度による評価の検討

本研究では、摂動の評価に平均諧調値差の D_{min} と $D_{max}-D_{min}$ の二つを用いたが、別の評価基準として、局所窓領域内の指紋隆線密度による評価を検討した。

入力画像、登録画像において、最大 4 つの局所窓領域内を縦、横、右斜め、左斜めに走査し指紋隆線密度を求める。そして、それぞれの走査方向によって算出された指紋隆線密度の、入力画像と登録画像の差を求め、指紋画像の一致度を評価した。具体的な手順を以下に示す。

- (1) 動的 2 値化を施し、入力画像および、登録画像を 2 値化する。
- (2) コアポイントを基準に、最大 4 つの局所窓を設定する。
- (3) それぞれの局所窓領域内において、最大 50 ラインを走査し、入力画像、登録画像の指紋隆線密度 d_k^f 、 d_k^g を以下の式で算出する。走査方向は、縦、横、右斜め、左斜めの 4 種類であり、各局所領域内で求められた指紋隆線密度を、走査方向ごとに合計する。走査数は、局所窓の大きさに比例する。

$$d_k^f = \sum_l d_{kl}^f, \quad d_k^g = \sum_l d_{kl}^g, \quad (1 \leq l \leq 4), \quad (k = 4) \quad (12)$$

ここで、 k は走査方向、 l は局所窓、 d_{kl} は第 l 局所領域内においての k 方向指紋隆線密度を表す。

- (4) 指紋隆線密度の安定化のために、走査数を 10 ラインに圧縮する。
- (5) 走査方向ごとに差を求め、その差を合計することで指紋隆線密度差 D を以下の式で求める。

$$D = \sum_k \|d_k^f - d_k^g\|^2, \quad (k = 4) \quad (13)$$

求められた指紋隆線密度差 D がより小さければ、入力画像と登録画像の一致度が高いと言え、評価の基準とした。

図 5.5 に走査例、図 5.6 に指紋隆線密度分布、図 5.7 に指紋隆線密度差より求めた FRR、FAR 曲線を示す。

図 5.6 より、対本人認識と対他人認識の分布が広い範囲に渡って重なってしまっていることが分かる。また、図 5.7 より、EER (FRR と FAR が等しくなる値) も 12.7% と高い値を示しており、指紋隆線密度による評価は精度が低いと言える。

よって、本研究では、従来どおり、平均諧調値差の D_{min} と $D_{max}-D_{min}$ の二つを用いた。

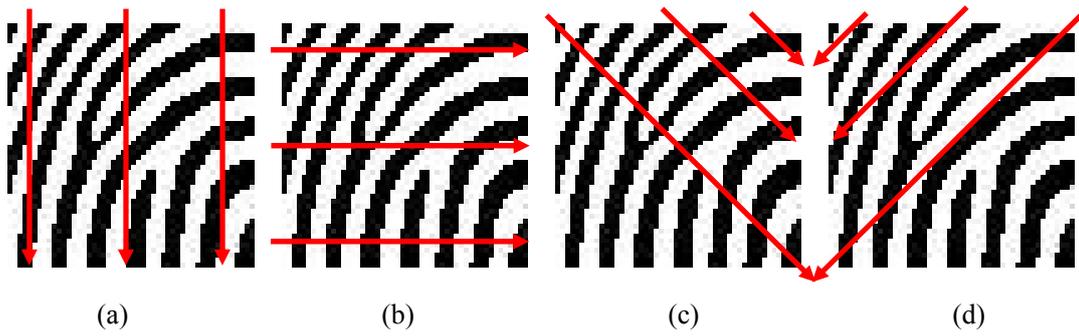


図 5.5 走査例。

(a)縦。(b)横。(c)右斜め。(d)左斜め。

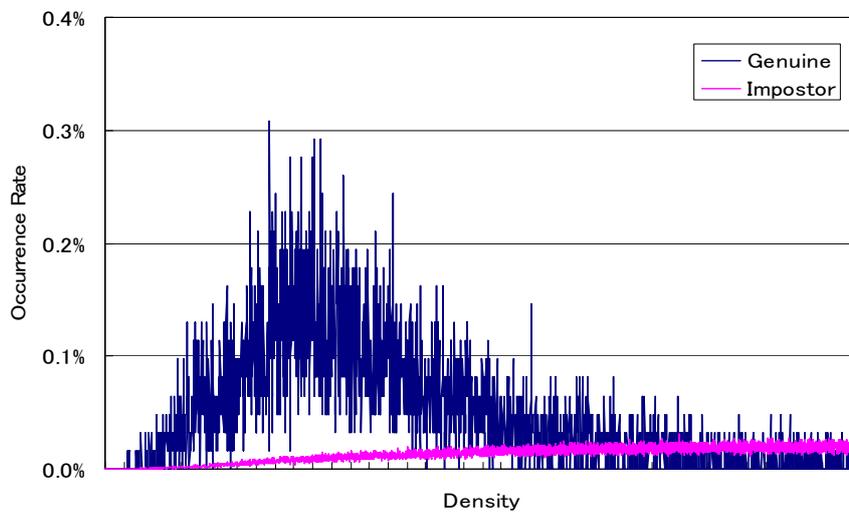


図 5.6 指紋隆線密度分布。

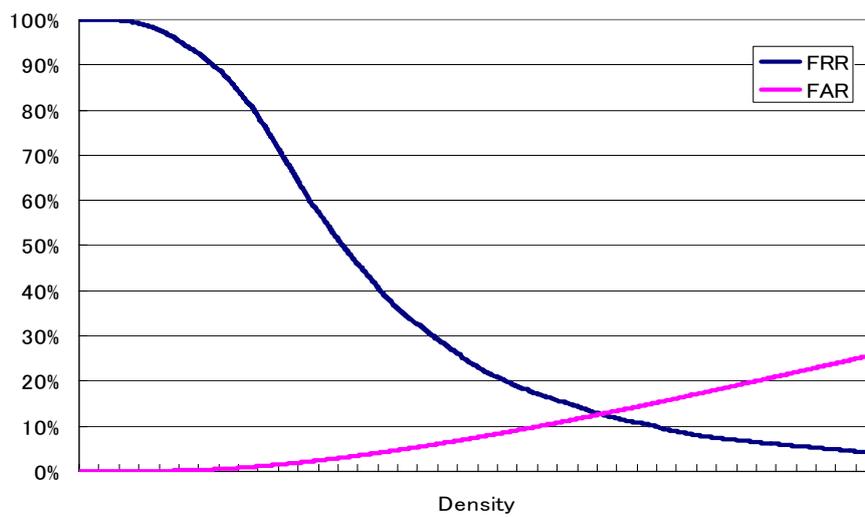


図 5.7 指紋隆線密度による FRR、FAR 曲線。

第6章 マニューシャマッチング

本章では、細線化処理と交差数判定によるマニューシャ抽出および登録ー入力指紋間で最適なマニューシャ対応付けを行うマニューシャマッチングについて述べる。マニューシャとは、指紋隆線の端点、分岐点を指す。精度良くマニューシャを抽出するため、使用する指紋画像には第3章の画像強調を施してある。また、入力指紋画像には第4章の大局的重ね合わせ処理を施してある。

6.1 細線化とマニューシャ抽出

まず、入力および登録指紋画像に、2値化・細線化処理を施す。その後、段階的に偽マニューシャを削除し、最適マニューシャ抽出を行う。2値化は動的2値化、細線化はHilditchの細線化法[12]を用いた。

マニューシャ抽出は以下の手順で行う。

- (1) 細線化した指紋隆線上の 3×3 近傍で交差数を算出し、マニューシャである、指紋の端点・分岐点の候補を抽出する。それぞれの抽出条件を式(12)に示す。方向成分は、8方向で分類した。

$$\text{端点: } \frac{1}{2} \left(\sum_{i=0}^7 |N_{i+1} - N_i| \right) = 1, \quad \text{分岐点: } \frac{1}{2} \left(\sum_{i=0}^7 |N_{i+1} - N_i| \right) > 2 \quad (14)$$

- (2) 段階的に偽マニューシャを削除していく。

- ① 入力画像のマニューシャ情報を以下のように表現する。 r_i は抽出されたマニューシャの位置ベクトル、 ϕ_i は抽出されたマニューシャの方向、 N は抽出されたマニューシャ数を表す。

$$\{r_i, \phi_i\}_{i=1}^N \quad (15)$$

- ② 登録画像のマニューシャ情報を以下のように表現する。 s_j は抽出されたマニューシャの位置ベクトル、 ϕ_j は抽出されたマニューシャの方向、 M は抽出されたマニューシャ数を表す。

$$\{s_j, \phi_j\}_{j=1}^M \quad (16)$$

- ③ 抽出したすべてのマニューシャ間の距離 d を算出し、一定距離 Th_d 以下の場合、偽マニューシャとする。偽マニューシャ判定条件を以下に示す。本研究では、 $Th_d=8$ とした。

$$\|s_j - r_i\|^2 \leq Th_d \quad (17)$$

- ④ 端点同士において、一定距離 Th_d 以下、方向の違いが $180^\circ \pm Th_\theta$ 以下の場合、偽マニューシャとする。偽マニューシャ判定条件を以下に示す。本研究では、 $Th_d=8$ 、 $Th_\theta=45^\circ$ (1方向) とした。

$$\|s_j - r_i\|^2 \leq Th_d \quad \text{and} \quad |\varphi_j - \phi_i| \leq 180^\circ \pm Th_\theta \quad (18)$$

- ⑤ 指紋領域と背景領域との境で抽出されているマニューシャを削除する。
 ⑥ 最後に、入力画像と登録画像の指紋領域で、重なっていない領域のマニューシャを削除する。

図 6.1 に 2 値化、細線化、マニューシャ抽出の例を示す。

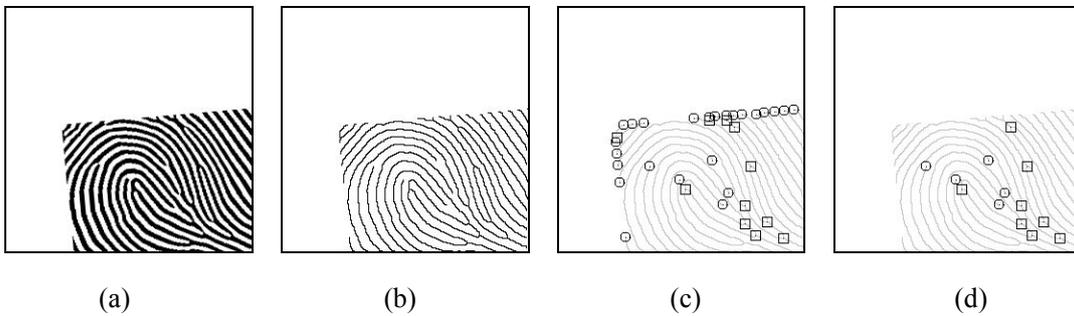


図 6.1 マニューシャ抽出例。

- (a)2 値化。(b)細線化。
 (c)マニューシャ候補の抽出。(d)最終的なマニューシャ抽出。

6.2 マニユーシャ対応付け

入力画像と登録画像の間で最適なマニユーシャの対応付けが行われるように、1対多のマニユーシャ対応の解消（過剰対応解消法）、および対応付かないマニユーシャの解消（不足対応解消法）という2つの相補的な最適対応付け探索アルゴリズムの併用を用いた[13]。両者の組み合わせ探索結果からマッチング数が多い方を、最終的なマニユーシャ対応付けとして用いる。対応付ける際は、マニユーシャの位置の近接性および端点同士の場合は方向の類似性を考慮し、間違った対応付けを抑制した。式(19)、(20)に対応付け条件を示す。本研究では、位置の近傍性の閾値、 $Th_d=16$ 、端点同士の方向の類似性の閾値、 $Th_\theta=45^\circ$ （1方向）とした。

$$\text{端点-端点} : \|s_j - r_{\tau(j)}\| \leq Th_d \quad \text{and} \quad |\varphi_j - \phi_{\tau(j)}| \leq Th_\theta \quad (19)$$

$$\text{端点-分岐点, 分岐点-分岐点} : \|s_j - r_{\tau(j)}\| \leq Th_d \quad (20)$$

図 6.2 に対応付けの例を示す。

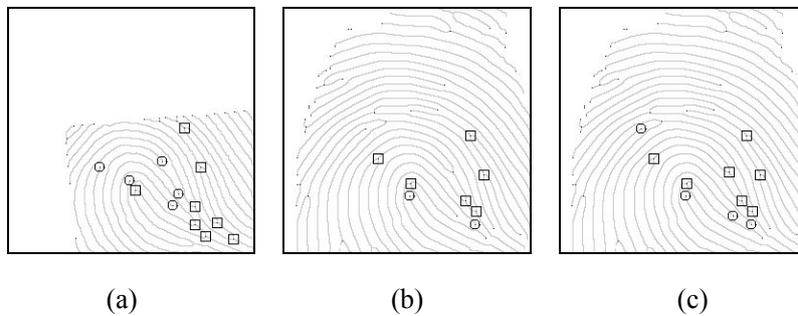


図 6.2 マニユーシャ対応付け例。

(a)入力画像。(b)対応付けられたマニユーシャ例。(c)登録画像。

6.2.1 過剰対応解消法

マニューシャが 1 対多の対応になったとき、それを解消するために行う手法である。以下に具体的な説明を行う。

- (1) 入力画像のマニューシャをもっとも近い登録画像のマニューシャに対応付けさせる。
- (2) 1 対 1 の対応付けであれば処理 4 へ進む。そうでなければ処理 3 へ進む。
- (3) 同一の登録画像のマニューシャに対応付けている入力画像のマニューシャ群の中で最も近い入力画像のマニューシャを対応相手として確定し、その他の入力画像のマニューシャはそれぞれ次に近い登録画像のマニューシャに対応付ける。処理 2 に戻る。登録画像で未対応のマニューシャをそれぞれ入力画像でもっとも近いマニューシャに対応付けて、終了する。
- (4) 最後に、入力画像と登録画像の指紋領域で、重なっていない領域のマニューシャを削除する。

図 6.3 にアルゴリズムに対応する図を示す。●が入力画像のマニューシャであり、○が登録画像のマニューシャである。

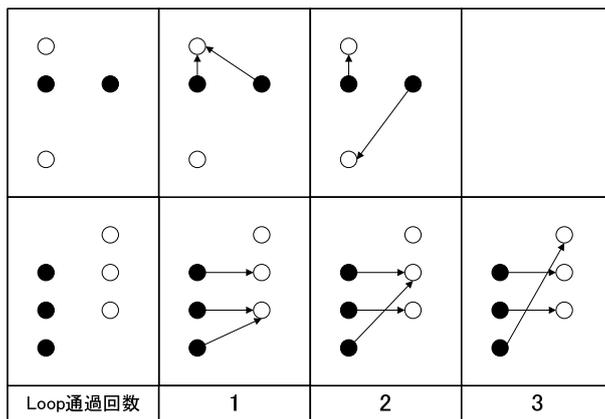


図 6.3 過剰対応解消法例。

6.2.2 不足対応解消法

対応付かないマニューシャが存在するとき、それを解消するために行う手法である。以下に具体的な説明を行う。

- (1) 登録画像のマニューシャを最も近い入力画像のマニューシャに対応付ける。
- (2) 対応相手のいない入力画像のマニューシャがあれば処理 3 へ進む。そうでなければ処理 4 へ進む。
- (3) 対応相手のいない入力画像のマニューシャ群についてそれぞれ最も近い確定済みでない登録画像のマニューシャを選び、それらの中で最も遠く離れた対を確定とする。処理 2 へ戻る。
- (4) 複数の登録画像のマニューシャから対応付いている入力画像のマニューシャがあれば最も近い登録画像のマニューシャを対応相手として確定し、終了する。

図 6.4 にアルゴリズムに対応する図を示す。●が入力画像のマニューシャであり、○が登録画像のマニューシャである。

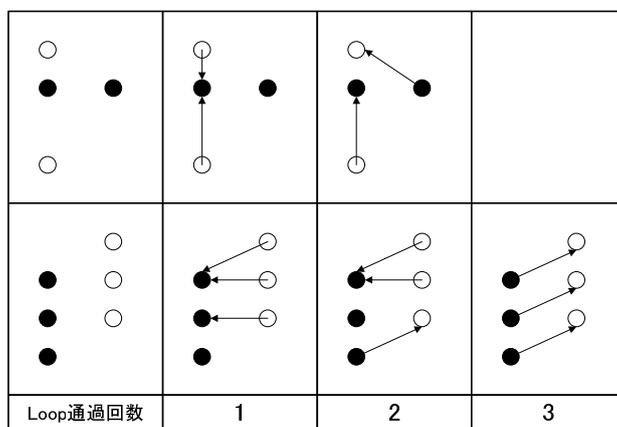


図 6.4 不足対応解消法例。

図 6.3、図 6.4 を見てわかるとおり、過剰対応解消法と不足対応解消法では入力画像と登録画像のマニューシャをマッチングさせる仕方が違うため、指紋によってはマッチング数が異なってくる。上記で述べたように、本研究ではよりマッチング数が多い方を対応付けの結果とした。

6.3 照合率の算出

入力指紋と登録指紋の間でマニューシャ対応付けが決定され、この対応付けの程度を評価する。本研究では、入力-登録指紋マニューシャ間の照合率 κ を以下の式で求める。

$$\kappa = \frac{2 \times N_{pair}}{M + N} \quad (21)$$

ここで、入力指紋のマニューシャ数を M 、登録指紋のマニューシャ数を N 、入力-登録指紋間で対応づいたマニューシャ対の数を N_{pair} とする。式 (21) より、この照合率 κ は $0.0 \leq \kappa \leq 1.0$ の値を取る。照合率 κ の値が大きいほど同一指の指紋である可能性が高いと言える。

6.4 マニューシャ対応付け条件の検討

従来のマニューシャ対応付け条件は、端点・分岐点ともに位置と方向を条件としていた [13]。本節では、対本人認識の向上を目指し、対応付け条件の検討の結果を述べる。

比較対象は端点・分岐点の位置ずれの閾値 (Th_d) を $Th_d=8 \cdot Th_d=16$ の場合と、分岐点の方向成分を考慮する・しないの 4 つの条件である。表 6.1 に 1 つ対本人認識の組み合わせに対しての、4 つの条件の組み合わせによるマニューシャ対応付けの結果を掲げる。また、図 6.5 にそのときのマニューシャ対応付け結果を示す。本研究では、より良い照合率を達成した $Th_d=16$ 、分岐点の方向成分を考慮しない、の組み合わせ条件を採用した。

表 6.1 条件の違いによるマニューシャ対応付けの結果。

	入力画像の マニューシャ数	登録画像の マニューシャ数	マッチした マニューシャ数	照合率
$Th_d=8$ 分岐点方向有	18	22	5	25%
$Th_d=16$ 分岐点方向有	18	22	10	50%
$Th_d=8$ 分岐点方向無	18	22	8	40%
$Th_d=16$ 分岐点方向無	18	22	15	75%

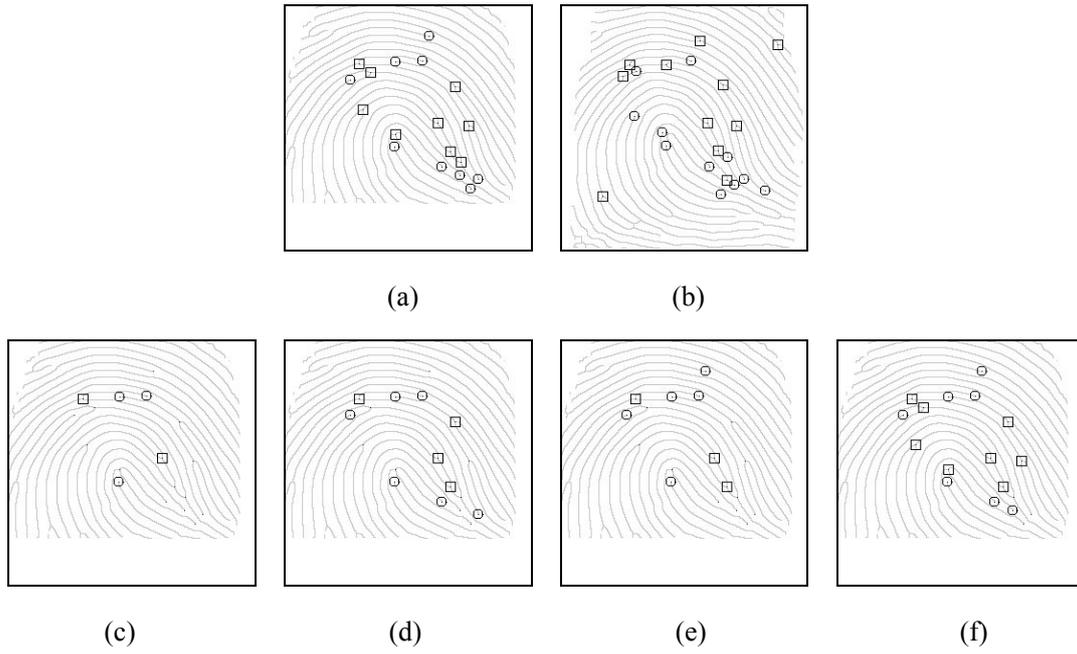


図 6.5 条件の違いによるマニューシャ対応付けの結果。

(a)入力画像。(b)登録画像。

(c) $Th_d=8$ 、分岐点方向考慮した場合。(d) $Th_d=16$ 、分岐点方向考慮しない場合。

(e) $Th_d=8$ 、分岐点方向考慮した場合。(f) $Th_d=16$ 、分岐点方向考慮しない場合。

第7章 本人他人判定

本人・他人判定には、第5章で求めた D_{min} と $D_{max}-D_{min}$ 、および第6章で求めたマニユーシヤマッチングによる照合率 κ を使用する。

図7.1に、 D_{min} 、 $D_{max}-D_{min}$ 、 κ を3軸とする値の散布図を示す。本人指照合56回、他人指照合6976回の結果をプロットしたものである。左上の塊が対本人指の照合、右下の塊が対他人指の照合の結果である。この分布に対して3つの最適な閾値を決め、本人拒否率(False Rejection Rate ; FRR) と他人受理率(False Acceptance Rate ; FAR) を算出する。

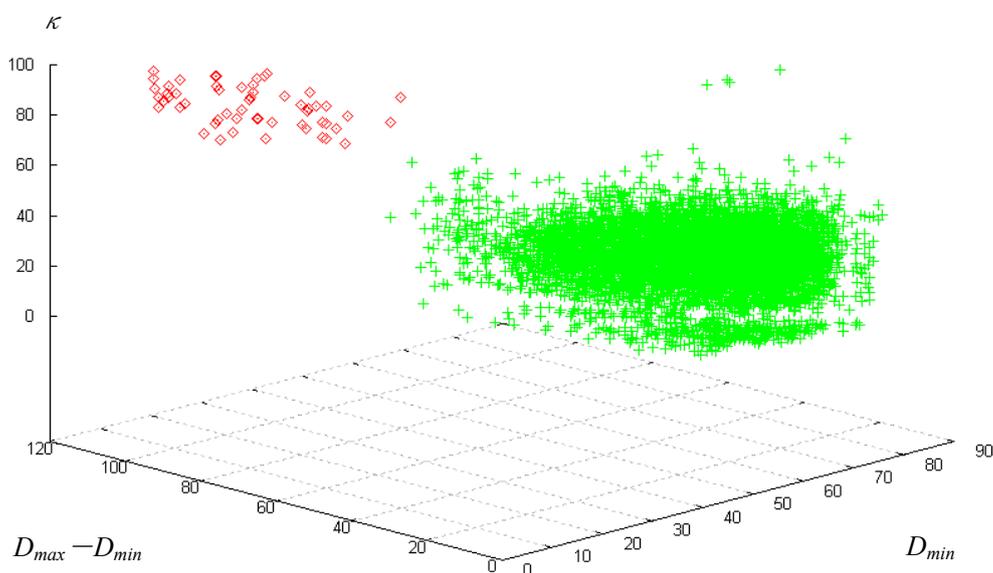


図7.1 D_{min} 、 $D_{max}-D_{min}$ 、 κ に関する散布図。

◇：対本人照合。 +：対他人照合。

本研究では、次式の条件を満たす場合に本人指として受理する、という判定方法を用いた。

$$D_{min} \leq Th_1 \ \& \ D_{max} - D_{min} \geq Th_2 \ \& \ \kappa \geq Th_3 \quad (22)$$

第 8 章 実験結果

FVC2000 の DB1 に含まれる全 110×8 枚の指紋画像データを用いて、*cross-validation* 法[8] に従い、各指について 1 枚ずつ順次に登録指として残り 7 枚を本人指の照合、その他の 109×8 枚を他人指の照合に用いた。したがって、本人照合の総試行数は $110 \times 8 \times 7 (=6,160)$ 回、他人照合の総試行数は $110 \times 8 \times 109 \times 8 (=767,360)$ 回となった。

図 8.1 に、提案手法による ROC (*Receiver operating characteristics*) 曲線を示す。 D_{min} 、 $D_{max} - D_{min}$ 、 κ の各閾値 Th_1 、 Th_2 、 Th_3 を変化させて得られたものである。

表 8.1 に、撮動法のみ、マニューシャマッチングのみ、提案手法の本人拒否率(FRR)と他人受理率(FAR)が等しくなる値、EER と、その際の D_{min} 、 $D_{max} - D_{min}$ および κ の閾値を掲げる。撮動法のみでは、 Th_1 が 50.92、 Th_2 が 32.76 で、EER が 4.35%であった。マニューシャマッチングのみでは、 Th_3 が 42%で、EER が 9.52%であった。提案手法では、 Th_1 が 53.85、 Th_2 が 16.47、 Th_3 が 31%で、EER が 4.01%であった。

提案手法は、撮動法とマニューシャマッチングをそれぞれ単独で行った場合に比べ、より良い照合が出来ていることが分かる。また、結合時、 D_{min} 、 $D_{max} - D_{min}$ の閾値が多少甘くなっているが、それを補う以上に、マニューシャマッチングとの結合が効果を発揮していることが分かる。

そして、表 8.2 に、FVC2000 での DB1 を用いた評価での参加 11 機関中の上位アルゴリズムの EER を掲げる[6]。提案手法は上位グループに入ることが分かる。

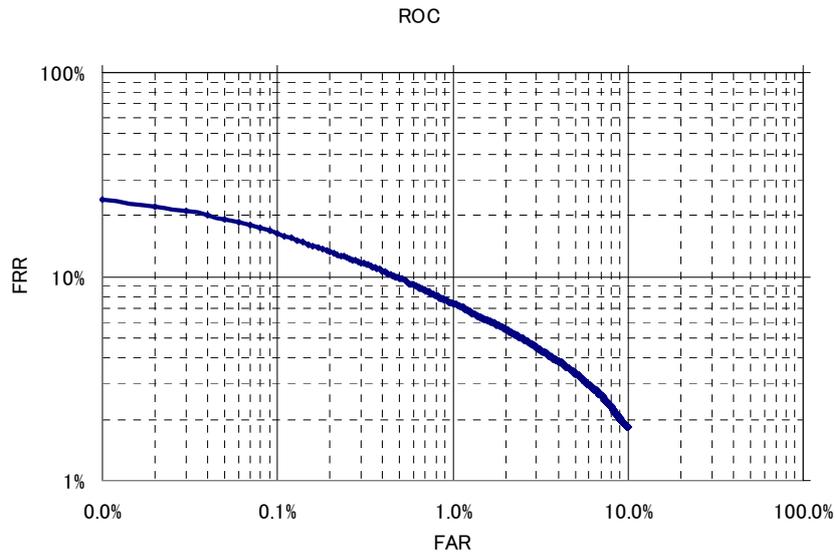


図 8.1 ROC 曲線。

表 8.1 本人受理条件の閾値と EER。

	Th_1	Th_2	$Th_3(\%)$	EER(%)
摂動法のみ	50.92	32.76	—	4.35
マニユーシャマッチングのみ	—	—	42	9.52
提案手法	53.85	16.47	31	4.01

表 8.2 FVC2000 での DB1 を用いた評価結果。

Algorithm	EER(%)
<i>Sag1</i>	0.67
<i>Sag2</i>	1.17
<i>Cetp</i>	5.06
<i>Cwai</i>	7.06
<i>Cspn</i>	7.60

第9章 考察

本章では、第8章の結果を受けての考察を説明する。提案手法のより解決された問題と解決できなかった問題を述べる。

9.1 提案手法の強み

提案手法は、(1)線形歪みの吸収（回転画像+ブロック単位の最適位置ずらし）、(2)非線形歪みの吸収を狙った摂動法、(3)マニューシャマッチングとの連携、により指紋照合の高精度化を狙ったものである。

前処理としての画像強調も照合精度を高める効果を有する。

図9.1は、劣化画像に対する提案手法の成功例である。画像強調による指紋隆線の鮮明化、大局的重ね合わせによる線形歪み吸収、摂動による詳細照合の各処理が有効に働いていることが分かる。特に、(d)で示すような画像の照合は、最適なマニューシャ抽出が困難であり、マニューシャマッチング単独での照合の高精度化はなかなか難しい。が、パターンマッチングベースの摂動法を組み合わせることで、救うことが出来た。

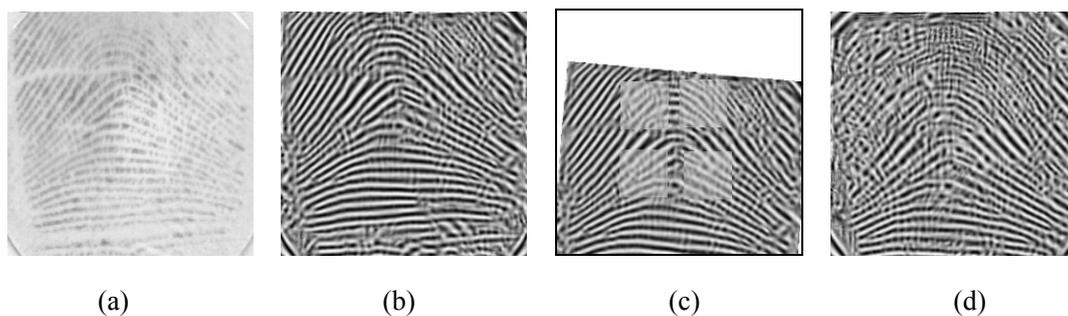


図9.1 摂動法の成功例。

(a)入力画像。(b)画像強調結果。(c)最適摂動時の結果。(d)登録画像。

図 9.2 は、摂動法のみでは、本人拒否となってしまうていたが、提案手法により救われた例である。

(b)を見て分かるとおり、左上の局所窓が大きく動いてしまっている。そのため、摂動法のみでは、本人条件 ($D_{\min} \leq Th_1$ & $D_{\max} - D_{\min} \geq Th_2$) をクリアすることが出来なかった。が、マニューシャマッチングとの連携により、正しく本人指として受理することが出来た。

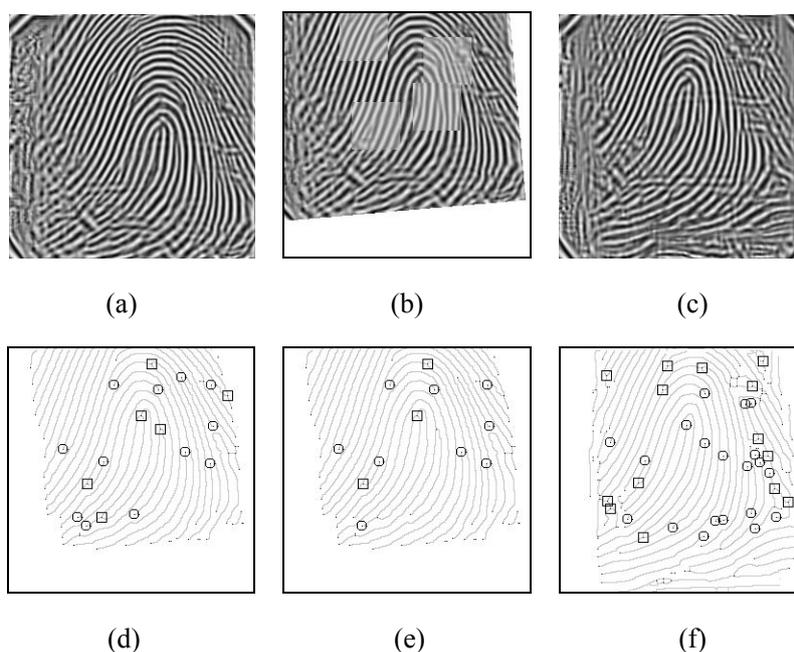


図 9.2 マニューシャマッチングの成功例。

(a)入力画像。(b)最適摂動時の結果。(c)登録画像。

(d)入力画像のマニューシャ抽出結果。

(e)マニューシャ対応付け結果。

(f)登録画像のマニューシャ抽出結果。

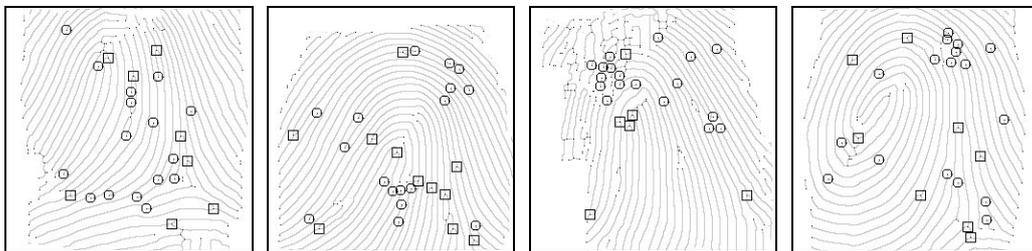
9.2 残された課題

最初に挙げられる課題として、局所窓の最適化の課題がある。摂動法では、局所窓、つまり摂動領域の設定がとても重要になってくる。しかし、コアポイントを基準とした設定方法であると、局所窓はコアポイントの位置により、十分な数を確保できない場合がある。そのため、摂動時の情報が大幅に削られ、それぞれの閾値をクリアすることが出来ず、本人拒否や他人受理となってしまうことがある。その解決策として、節 5.5 において局所窓の設定方法をいくつか検討したが、現状では良い方法を見つけ出すことが出来なかった。最適な局所窓を設定出来れば、本人拒否、他人受理を大幅に改善することが出来ると考えている。

その他の課題としては、次の 4 点がある。

- (i) 最適なマニューシャ抽出ができていない。
- (ii) ブロック単位の最適位置ずらしにおいて、ずらし量が過剰、もしくは不足のため、摂動法も有効に働かない。
- (iii) 同一指の中で、指紋採取の際の押し具合によって、隆線の太さが非線形に変化しているものがあり、摂動法が有効に働かない。
- (iv) 指紋隆線が細い指紋の場合、摂動法による平均諧調値差の変化が乏しく、 D_{min} 、 $D_{max} - D_{min}$ が閾値に達せず本人拒否となることがある。

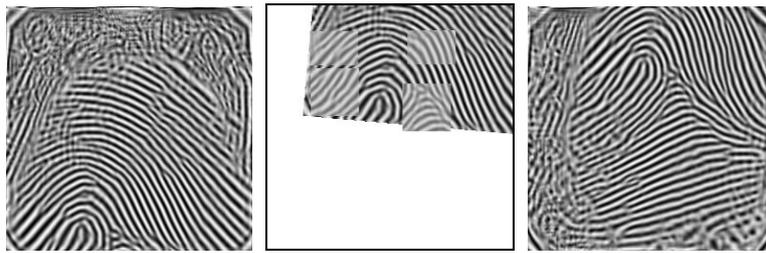
図 13 に、上記要因による失敗例を示す。(b)-(e)は、左から入力画像、マッチング後の画像、登録画像である。



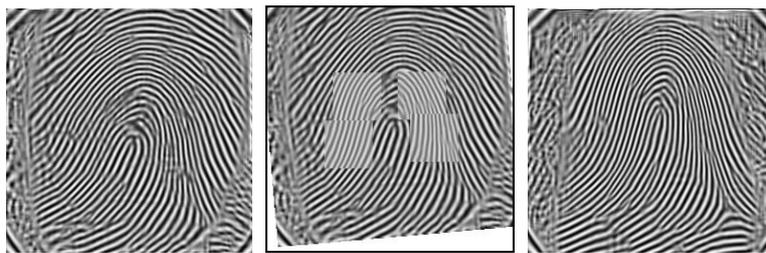
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

図 13 失敗例。

(a) マニューシャ抽出の失敗例。(黒点が偽マニューシャ)

(b) 位置ずらし過剰。 (c) 位置ずらし不足。

(d) 同一指による隆線の太さの違い。

(e) 隆線の細い指のマッチング。

第 10 章 結論

バイオメトリクスを用いた個人認証は、今後益々社会に浸透するものと予想される。このため、より高い認証精度が要請されてくることは明らかである。

本論文では、様々な劣化や変形を含む指紋画像に対して、画像強調、大局的重ね合わせ、摂動法、マニューシャマッチング、摂動法とマニューシャマッチングの結合、の 5 段階処理に基づく高精度な指紋照合手法を提案した。

FVC2000 で使用された DB1 に含まれる 110 指×8 枚の指紋画像データを用いた照合実験により、指紋照合の評価基準である、本人拒否率(FRR)と他人受理率(FAR)が等しくなる値、EER=4.01%を達成し、提案手法の有効性を示した。

今後の課題としては、(1) 線形歪み吸収を行う大局的な重ね合わせ処理の高度化、(2) 隆線密度の変動に対する適応的な摂動窓領域の設定、(3)マニューシャ抽出の高精度化、がある。

(1)の解決策としては、まず、位置ずらしの範囲を増やすことが挙げられるが、現状でも最大ずらしでの重なりブロック数が指紋画像全体の 25%と比較領域が小さい。そして、ずらし範囲の増減は本人拒否と他人受理のトレードオフに大きくかかわってくる。そのため、位置ずらしの範囲指定は、動的なものを用いたほうが良いと考えられる。また、ブロックの 1 単位を詳細化することによって、より高精度な線形歪み吸収が期待される。

(2)においては、摂動窓領域内の登録画像に伸縮を加えることで指紋隆線の太さの違いを吸収でき、高精度化を図れるのではないかと考えている。

(3)においては、輪郭追跡によるマニューシャ抽出や偽マニューシャの判定法の強化を検討すべきであろう。

また、局所窓の最適化、そして、FVC2002、FVC2004 で公開されている、より条件の悪い多様な指紋画像への適用も必要となってくる。

謝辞

本研究が多くの方のお力添えの下に成り立っていることは言うまでもありません。特に指導教官である若原徹教授には研究当初からさまざまなアドバイスを頂きました。その的確な助言により、本研究がこのような成果を得られたのだと思います。研究以外の面でも多数お世話になっており、感謝の念に絶えません。また同研究室の皆様を初め、お世話になったすべての方々に深い感謝の意を表します。

文 献

- [1] A. K. Jain, R. Bolle, and S. Pankanti, Eds., *BIOMETRICS–Personal Identification in Networked Society–*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
- [2] 児玉充晴, 梅崎太造, 佐藤幸男, “情報漏えい対策システムへの指紋認証の適用とその発展形態の提案,” *信学論(D-I)*, vol. J87-D-I, no.2, pp. 278-286, 2004.
- [3] D. Maltoni, D. Mario, A. K. Jain, and S. Prabhakar, *Handbook of Fingerprint Recognition*, Springer, New York, 2003.
- [4] A. K. Jain, “Biometric Recognition: Techniques, Applications and Challenges,” Tutorial A in 18th Int. Conf. on Pattern Recognition, Hong Kong, China, Aug. 2006.
- [5] <http://bias.csr.unibo.it/fvc2006/>.
- [6] D. Mario, D. Maltoni, R. Cappelli, J. L. Wayman, and A. K. Jain, “FVC2000: Fingerprint Verification Competition,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 24, pp. 402-412, 2002.
- [7] 若原徹, 木村善政, 鈴木章, 塩昭夫, 佐野睦夫, “指紋隆線方向分布とマニューシャ対応付けを用いた指紋照合,” *信学論 (D-II)*, vol. J86-D-II, no.1, pp. 63-71, 2003.
- [8] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer, New York, 2006.
- [9] <http://bias.csr.unibo.it/fvc2000/databases.asp>
- [10] T. Hatano, T. Adachi, S. Shigematsu, H. Morimura, S. Onishi, Y. Okazaki, and H. Kyuragi, “A Fingerprint Verification Algorithm Using the Differential Matching Rate,” *Proc. 16th Int. Conf. on Pattern Recognition*, vol. 3, pp. 799-802, Quebec, Canada, Aug. 2002.
- [11] S. Otaka, Y. Nishiyama, T. Hatano, and T. Wakahara, “Fingerprint Verification Using Perturbation Method,” *Proc. Machine Vision Applications 2007*, pp. 424-427, Tokyo, May 2007.
- [12] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing, Second Edition*, Prentice Hall, 2001.
- [13] 佐藤雅之, “境界追跡によるマニューシャ抽出と対応付けによる指紋照合の高度化,” *Graduation Theses 2005 Extended Abstracts*, pp. 417-420, The Faculty of Computer and Information Sciences, Hosei University, March 2006.