

勾配方向分布とマニューシャマッチングを用いた指紋照合

TSUBOI, Yusuke / 坪井, 祐輔

(発行年 / Year)

2011-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2011-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(理学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2010 年度修士論文

勾配方向分布とマニューシャマッチングを
用いた指紋照合

Fingerprint Verification Using Gradient Distribution
and Minutiae Matching

2011 年 1 月 28 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 09T0011 ツボイ ユウスケ 坪井 祐輔

Abstract

High-accuracy fingerprint matching from poor-quality fingerprint images is important and the most challenging problem. This paper describes a new poor-quality fingerprint verification technique combining pattern matching and minutiae matching composed of the following four parts. The first part is local FFT band-pass that passes only the dominant frequencies' components representing the periodicity of ridge patterns and in each local area and raises the norms of all frequencies' components to the power of a specified number. The second step is generation of a mask image that extracts fingerprint region by segmenting background region and part below the second joint of finger. The third step is pattern matching that is optimal block-wise shift using gradient distribution of input and enrolled fingerprints for absorbing rotation and translation. Finally, the fourth step is minutiae matching that are extraction of endpoints and bifurcations of fingerprint ridges called minutiae and one-to-one correspondence determination between input and enrolled minutiae. Experimental results using the public FVC2004 fingerprint image database demonstrate a fairly low equal error rate (EER) of 12.91% for false rejection and false acceptance as compared to those obtained by academic groups that participated in the FVC2004.

概要

低品質の劣化指紋画像から高精度な指紋照合は重要で最も挑戦的な課題となっている。本論文では、以下の 4 つのステップで構成されたパターンマッチングとマニューシャマッチングを融合した劣化指紋画像に対する新しい指紋照合手法を提案する。第 1 ステップは、局所領域ごとに指紋隆線方向の局所的周期性を表す周波数成分だけを通過させ、周波数成分をノルムの累乗で増幅する局所的 FFT バンドパスフィルタを適用する。第 2 ステップは、背景領域と指の第二関節部分から指紋領域を抽出する指紋マスク画像を生成する。第 3 ステップは、回転と平行移動成分を吸収するために、入力と登録指紋の勾配方向分布を使用する最適なブロック単位の位置ずらしを用いたパターンマッチングを行う。最終第 4 ステップは、指紋隆線の端点と分岐点であるマニューシャを抽出し、入力と登録マニューシャ間で 1 対 1 対応付けるマニューシャマッチングを行う。FVC2004 公開指紋画像データベースを用いた評価実験より、FVC2004 に参加したアカデミックグループの結果と比べて、本人拒否率(FRR)と他人受理率(FAR)が等しくなる EER の値として、12.91%を達成することを示した。

目次

概要	ii
第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景および目的	1
1.2 論文の構成	3
第 2 章 FVC2004 指紋データベース	4
2.1 FVC2004 指紋データベースの概略	4
2.2 DB1 に収録されている指紋	5
第 3 章 局所的 FFT バンドパスフィルタ	7
第 4 章 指紋マスク領域の抽出	9
第 5 章 位置ずらしマッチング	11
5.1 回転による回転成分の吸収	11
5.2 ブロック単位の最適位置ずらし	12
5.3 勾配方向分布を用いた位置ずらしマッチング	14
第 6 章 マニューシャマッチング	16
6.1 マニューシャ抽出	16
6.2 マニューシャ対応付け	17
6.2.1 過剰対応解消法	18
6.2.2 不足対応解消法	19
6.3 照合率の算出	20
第 7 章 実験結果	21
7.1 ROC 曲線	21
7.2 EER の評価	22
7.3 処理時間	23
第 8 章 考察	24
8.1 位置ずらしマッチングの課題	25
8.2 マニューシャマッチングの課題	27

第9章 結論	30
謝辭	31
参考文献	32

第1章 序論

1.1 研究の背景および目的

近年、ネットワークを介しての商取引やサービスの利用により、ユーザーのセキュリティに対する認識が深まっており、情報の漏洩や不正アクセスへの対策として、バイオメトリクスを用いた個人認証が社会に浸透している。

バイオメトリクス認証を用いると、本人であることを証明するための物を携帯する必要がなくなる。また、パスワードや暗証番号を記憶する必要がなくなることなどの利点を得ることができる。さらに、本人だけしか持ち得ない情報をパスワードや鍵の代わりに使用することができるため、それらの盗難や偽造が困難である。そして、自身の一部を用いているため、紛失という概念が不要になり、管理の面でも負担が軽減されることなどの利点もある。例を挙げれば、銀行のATMなどで採用されている手指静脈認証がある。パスワードと違い、忘れることもなければ、盗まれることもない。

また、会社や家のドアにバイオメトリクス認証装置が設置されていると、鍵を持ち歩くことなく開錠・施錠することができ、部外者が建物や部屋へ不正に侵入することを防ぐことができる。

認証に使われる生体的特徴としては、指紋、顔、DNA、耳形状、顔や手の体温、歩き方、掌形、手の甲の静脈、虹彩、キーストロック、臭気、網膜、署名、声紋などが代表的なものとして挙げられる。

図 1.1 に International Biometric Group の調査による身体特徴別のバイオメトリクスマーケットシェア[1]を示す。

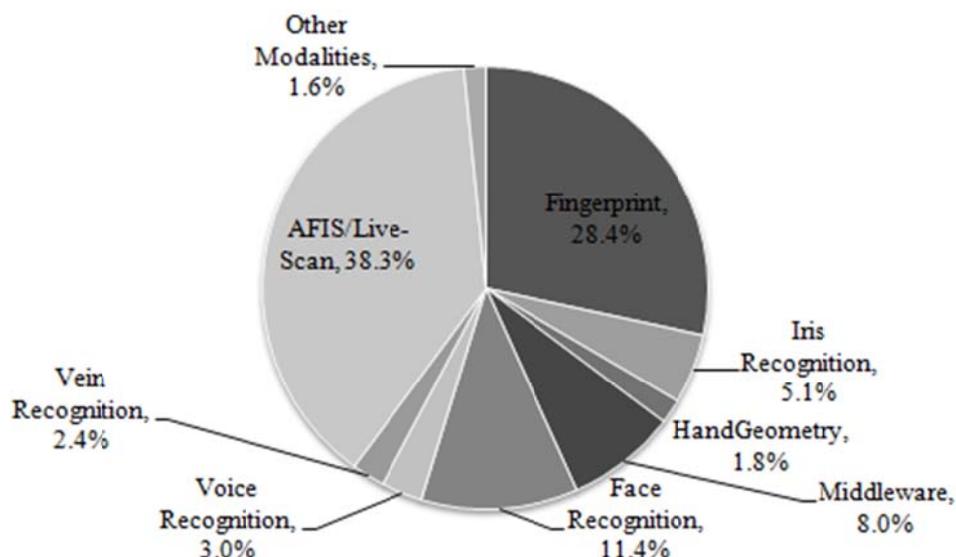


図 1.1 身体特徴別のバイオメトリクスマーケットシェア：

Biometric Revenues by Technology, 2009

Copyright @ 2008 International Biometric Group

このようなバイオメトリクス認証の中でも，万人不同で終生不変である指紋は最も普及しているバイオメトリクスである。指紋認証装置を搭載したノートパソコンや携帯電話も市場に出回っており，図 1.1 から Fingerprint(28.4%)と AFIS(Automated Fingerprint Identification System)/Live-Scan(38.3%)と合わせて 66.7%を占めている。さらなる市場拡大も予想されており，性能向上への期待も大きい[2], [3]。

従来の代表的な指紋照合法は，指紋隆線の端点と分岐点を捉えて判別するマニューシャマッチング法と，指紋を画像として取り込み，画像同士を重ね合わせて照合するパターンマッチング法がある[4]。

当研究室では，パターンマッチング法の一つとして，摂動法による指紋照合法を提案して有効性を報告した[5]が，処理量が多いという難点があった。

一方，多くの実用化装置で採用されているマニューシャマッチング法では，指紋画像が乾燥によるかすれ，しわ，手荒れなどによって劣化していると，偽マニューシャが発生して照合精度に大きく影響する。そのため，こうした劣化画像の修復，安定なマニューシャ抽出と照合処理が，照合精度の向上には必須となる。

本論文では，劣化指紋画像を対象として，パターンマッチング法とマニューシャマッチング法を融合した照合手法を提案する。全体の処理は大きく 4 つの部分で構成され，(1)指紋隆線の周期性に着目して局所的 FFT バンドパスフィルタを用いた劣化画像の修復，(2)背景領域の分離による指紋マスク画像の生成，(3)入力登録指紋間での複数回転画像を用いた回転成分の吸収と，勾配方向分布を用いたブロック単位のずらしマッチング，(4) 入力登録指紋マニューシャ間での 1 対 1 対応付けによるマニューシャマッチング，となる。

提案手法を，FVC2004 で使用されて後に公開された指紋画像データベース DB1 に適用して評価実験を行った。その結果，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 EER (Equal Error Rate)として，ブロック単位の位置ずらしによる前段のパターンマッチングの段階で 13.64%，後段のマニューシャマッチングと結合した最終段階で 12.91%，を達成できることを示した。

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 FVC2004 指紋画像データベースについて紹介する。続いて，第 3 章では局所的 FFT バンドパスフィルタ，第 4 章では指紋マスク領域の抽出，第 5 章では位置ずらしマッチング，第 6 章ではマニューシャマッチング，の本研究における提案手法の各処理について述べる。そして，第 7 章では実験結果を示し，第 8 章では実験結果に対しての考察を述べる。最後に，第 9 章において結論を述べる。

第2章 FVC2004 指紋データベース

本研究の提案手法の有効性を確認する評価実験で使用した指紋画像は、公開指紋データベース FVC2004 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 FVC2004 指紋データベースの概略

本研究で使用した指紋データベースは、世界中の大学や企業が参加した世界的指紋照合コンペティション FVC2004 で使用され、後で公開されたものである[6]。本データベースは DB1 から DB4 までの4つのセクションで構成されている。DB1 は光学式センサ“V300”を用いて収集されたものである。同様に DB2 は光学式センサ“U.are.U 4000”，DB3 は感熱式スワイプセンサ“FingerChip FCD4B14CB”，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。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。

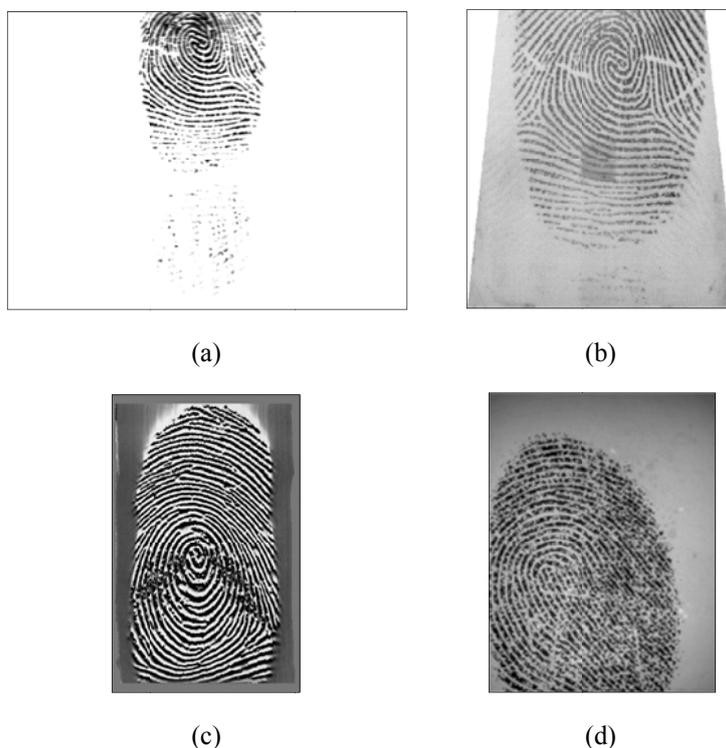


図 2.1 FVC2004 指紋データベースの指紋画像データ例：

- (a) DB1 (光学式センサ) (b) DB2 (光学式センサ)
(c) DB3 (感熱式スワイプセンサ) (d) DB4 (指紋合成ジェネレータ)

それぞれのセクションには 100 人×1 本×8 種類，すなわち全部で 800 枚の指紋画像データが収録されている。また，全ての指紋画像データは階調値[0,255]，すなわち 8 ビットの濃淡画像として用意されており，各セクションによって画像サイズや解像度が異なる。これらの情報をまとめたものを表 2.1 に示す。

表 2.1 FVC2004 指紋データベースの各セクションの属性

DB	センサの種類	サイズ (横×縦)	収録数 (指×枚)	解像度
DB1	光学式センサ	640×480	100×8	500dpi
DB2	光学式センサ	328×364	100×8	500dpi
DB3	感熱式スweepセンサ	300×480	100×8	512dpi
DB4	指紋合成ジェネレータ	288×384	100×8	およそ 500dpi

2.2 DB1 に収録されている指紋

今回の実験では DB1 に収録されている指紋画像を利用した。前節に記述したとおり，DB1 に収録されている指紋データは光学式センサ“V300”を用いて収集されたものであり，図 2.2 に示すとおり収集状態も画像によりさまざまである。

例えば，(a)の示すような画像はとてもきれいに採取されているが，(b)は指紋領域が画像領域全体に対して少ない。他にも，(c)のように全体的に指紋がかすれていたり，(d)は潰れによって劣化したりしている。さらに，(e)は指の第二関節まで含まれている。そのため，指紋照合をするにあたり不利になる要素も含まれている指紋画像データをどのように処理するかが重要な要素となってくる。

本研究では，第 3 章で述べる FFT を適用する際に画像サイズを 2 の累乗とする必要がある。このため，まず左右の背景部分を除いた 480×480 としてから，双一次線形補間法を用いて 256×256 の画像サイズに変換して使用した。

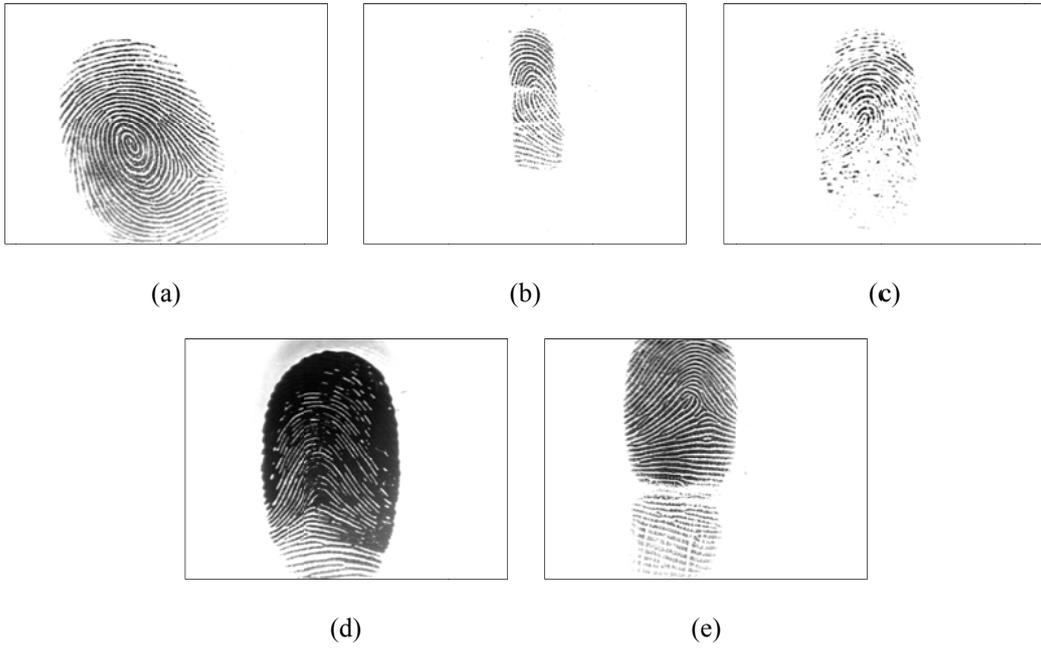


図 2.2 FVC2004 指紋データベース DB1 に収録されている指紋画像データ：
(a) 7_6 (b) 10_2 (c) 11_7 (d) 14_8 (e) 99_1

第3章 局所的FFTバンドパスフィルタ

指紋画像に潰れやかすれがあり、画像が劣化していると、マニューシャ抽出が困難となり、マニューシャマッチングの精度も著しく低下する。このため、指紋隆線を修復するためのフィルタリング処理を施す。

指紋画像を観察して主に指紋隆線方向や周期性に着目すると、《指紋隆線方向の局所安定》と《指紋隆線の周期性》という性質を指摘することができる。本節では、《指紋隆線方向の局所安定》という性質を利用して、指紋画像を局所領域にブロック分割し、各ブロック領域にバンドパスによるパワー強調処理を施す。本処理により、局所領域では指紋隆線方向・間隔がほぼ一定であるため、FFT パワースペクトラムにおいて特定の方向・周波数に鋭いピークが現れる、という利点が予想される。これらの利点は、いずれも信号とノイズの判別がより容易になり、画像修復に大きな成果を与える。また、本処理によりブロック境界で画像が不連続となることを防ぐため、パワーフィルタを施すブロックを互いに重なるようにして複数領域で行い、それらを重み付け加算し、滑らかな修復画像の作成を行う。

以下に処理の具体的な手順を示す。

1. 指紋画像全体をサイズ $M \times M$ の小領域単位にブロック分割する。ここで、サイズ M は画像サイズ $N (= 256)$ より小さく、2 のべき乗の値を取る。例えば、 $M = 16, 32, 64$ となる。 $M = 16$ の場合、画像全体は 256 ブロックに分割される。さらに各ブロック位置でステップ幅を $M/4$ として上下左右の位置ずらしを行う。それら全ての位置でブロック単位に FFT を施し、フーリエ変換成分 $F(\omega_1, \omega_2)$ を求める。
2. 直流成分を含む低周波数領域をそのまま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、画像サイズ N を定数 16 で割った値を用いる。

$$R_0 = N/16 \tag{1}$$

3. フーリエ変換成分 $F(\omega_1, \omega_2)$ を次式に従い、各成分のノルムの累乗を用いて成分の大きさを増幅する。

$$\tilde{F}(\omega_1, \omega_2) = F(\omega_1, \omega_2) \times |F(\omega_1, \omega_2)|^\gamma \tag{2}$$

ここで、累乗の指数パラメータ γ の値として、 $\gamma = 3.0$ を用いた。

4. 逆フーリエ変換 IFFT を行い、ブロック毎に修復された指紋画像を得る。
5. ブロック毎に得られた修復画像に対して、そのブロックと部分的に重なる全てのブロックでの修復画像をガウス型の重み付けにより加算し、最終的な修復画像を作成する。この処理を $M = 16, 32$ の 2 種類のブロックサイズで行い、それらの平均画像を出力する。

式(2)から明らかなように、 $F(\omega_1, \omega_2)$ のノルムが大きいほど増幅されるので、局所領域毎に強い、周波数成分が強調される効果を持っている。

図 3.1 に、提案手法による画像修復の例を示す。

図 3.1 より、かすれや潰れが修復され、指紋隆線が強調された指紋画像が得られていることがわかる。



図 3.1 提案手法による画像修復の例：
上段：かすれ画像 下段：潰れ画像
(a)原画像 (b)指紋隆線修復画像

第4章 指紋マスク領域の抽出

指紋画像には、指の第二関節の部分まで含まれている場合がある。また、指紋画像の修復処理を行うと、背景に雑音が発生する。そのため、指紋マスク画像を生成し、最適な指紋領域を抽出する。

具体的な手順を以下に説明する。

1. 指紋画像を局所平均に基づく動的2値化処理を行う。まず、指紋画像全体での平均濃淡値 `total_mean` を求める。次に、指紋画像の各画素に着目して、着目画素を中心とするサイズ $(2n+1) \times (2n+1)$ の正方ブロック内での平均濃淡値 `local_mean` を算出する。`total_mean` と `local_mean` の値の小さい方を閾値として、着目画素を動的に2値化する。本研究では、 $n = 10$ を用いた。
2. モルフォロジ演算である太め処理 (dilation) を N 回、穴埋めを行ってから細め処理 (erosion) を $2N$ 回、最後に太め処理を N 回施す。こうして得られる黒領域のうち、最も大きい黒領域のみ残す。本研究では、 $N = 20$ とした。
3. 黒領域の幅の最大値とその時の y 座標を調べる。
4. 黒領域の幅の最大値をとる y 座標より下の部分について黒領域の幅を調べていき、以下の2つの条件のうちどちらかに該当したら、その時の y 座標以下の黒領域を取り除く。
 - (1) 最大値 $\times 0.7$ 以下の場合
 - (2) 最大値 $\times 0.8$ 以下かつ一列上の幅より大きい値をとる場合こうして得られる黒領域を指紋領域のマスク画像とする。

図4.1に、マスク画像を用いた指紋領域の抽出例を示す。

図4.1より、第二関節以下の部分のみが消去され、最適な指紋領域が抽出されていることがわかる。

第5章 位置ずらしマッチング

同一指の指紋画像の間でも、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、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、勾配方向分布を用いた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つの処理による入力-登録指紋画像間の位置ずらしマッチングについて述べる。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。

5.1 回転による回転成分の吸収

回転成分の吸収には、単純に入力指紋画像を予め設定した複数の角度で回転した画像を生成してマッチングすることで対処した。具体的には、入力指紋画像を正立画像として、 -20 度から $+20$ 度の範囲で5度刻みに計9種類の回転角度を設定して、正立画像を含めて9枚の回転画像を用意した。

この処理により、次節で述べるブロック単位の最適位置ずらしの処理量は、回転吸収のために9倍になることになる。

図5.1に回転画像の例を示す。

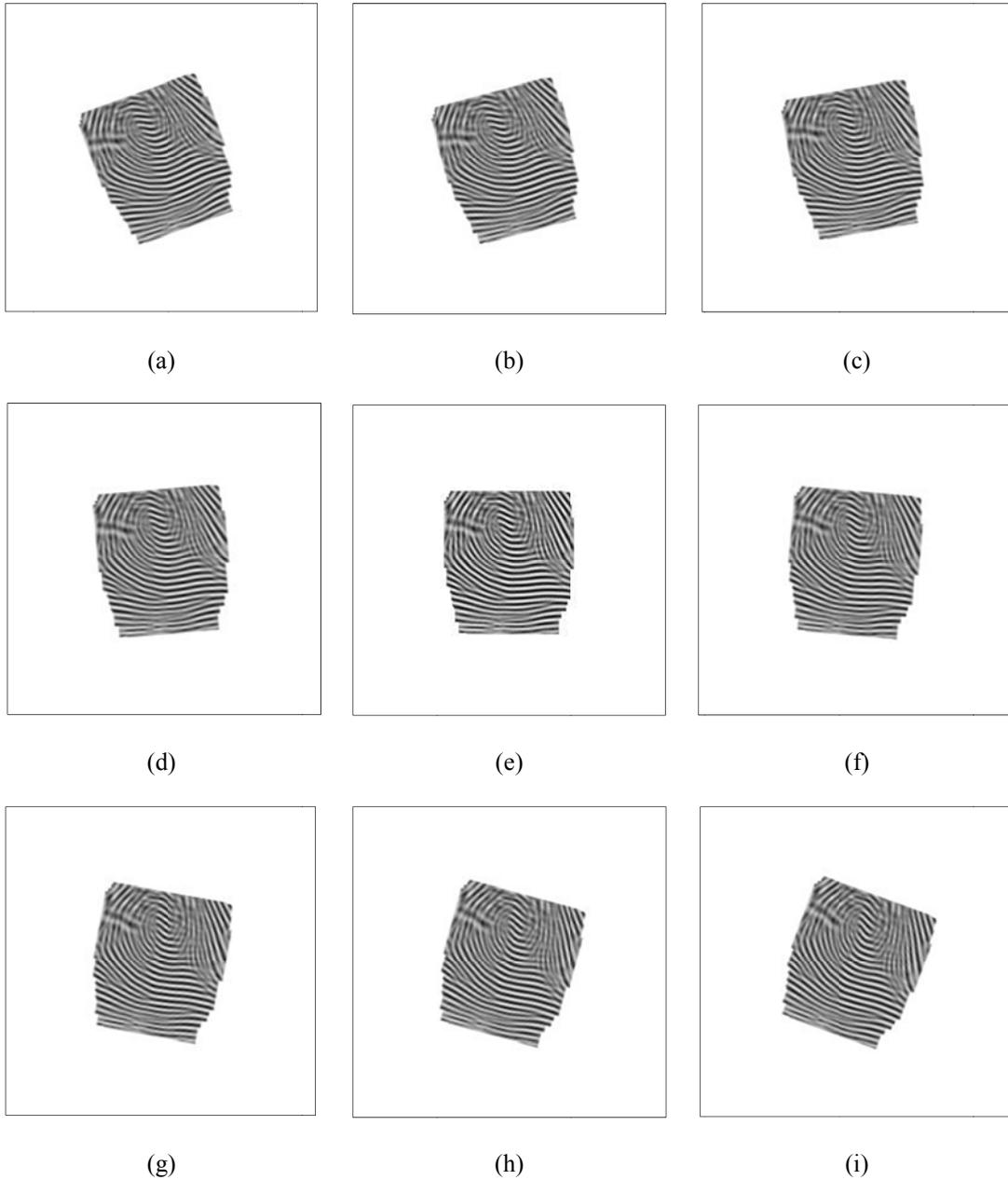


図 5.1 回転画像の例：

(a) -20度 (b) -15度 (c) -10度

(d) -5度 (e) 0度 (f) +5度

(g) +10度 (h) +15度 (i) +20度

5.2 ブロック単位の最適位置ずらし

前節に続いて、ブロック単位の最適位置ずらしにより、画像間に生じた平行移動のずれ

を吸収する。

位置ずれマッチングにおいて、ずれ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。ずれ幅については、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れを行うこととする。本研究では、1ブロックを $M=8$ とした。分割ブロック数は 1024 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。しかし、図 5.2 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。

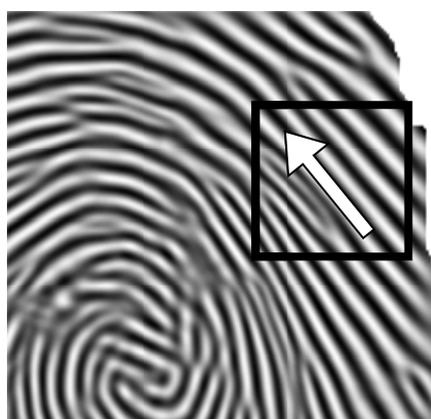


図 5.2 ブロック内での指紋隆線方向

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

図 5.3 に、ブロック単位のずれマッチングの概念図を示す。わかりやすくするため、ブロック分割数を 8×8 とした図となっている。実際の分割数は 32×32 である。

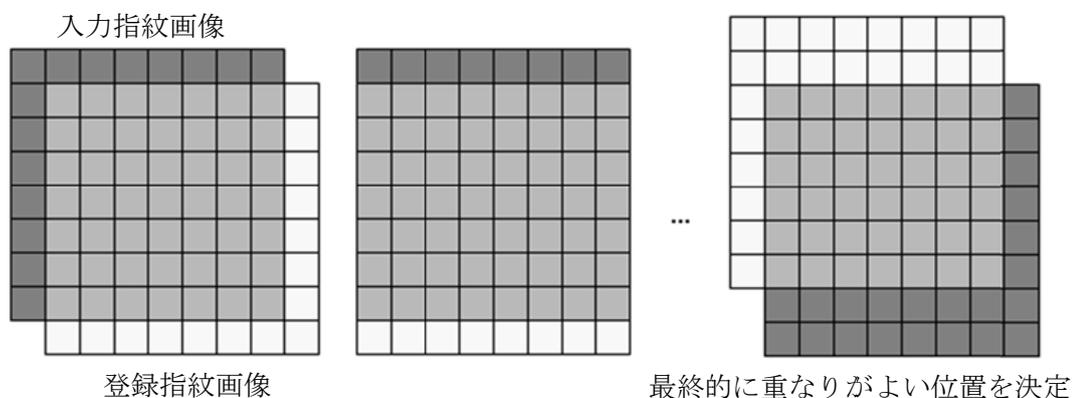


図 5.3 ブロック単位のずれマッチングの概念図

5.3 勾配方向分布を用いた位置ずらしマッチング

上記の節 5.1 と節 5.2 を順に行い、回転・平行成分の吸収を行う。
具体的な手順を述べる。

1. 入力・登録指紋画像それぞれのマスク画像の重心が画像の中心になるように平行移動する。
2. 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。

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

$$\begin{pmatrix} i' \\ j' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} \\ a_{10} & a_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{00}i + a_{01}j + b_0 \\ a_{10}i + a_{11}j + b_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

3. Roberts 交差勾配方向オペレータ[7]を用いて、濃淡指紋画像の各ピクセル位置 (i, j) における濃淡勾配を算出する。位置 (i, j) での濃淡値 $g(i, j)$ と記すと、濃淡勾配の角度 $\theta(i, j)$ は、 2×2 近傍マスクを用いて次式で計算される。なお、右水平方向を 0 度とし、濃淡勾配の角度 $\theta(i, j)$ は、 $\pi/16$ の間隔で 32 方向に量子化する。

$$\Delta u = g(i+1, j+1) - g(i, j) \quad \Delta v = g(i+1, j) - g(i, j+1)$$

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

4. 各ブロック内の 8×8 ピクセルがどの勾配方向であるか計数して、 32 方向別のヒストグラムを作成する。そして、ガウス型の重み $[1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1]^T$ 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。これを当該ブロックの勾配方向分布特徴ベクトルとする。
5. 入力画像を登録画像に対してブロック単位でずらしを施し、重なったブロック毎に勾配方向特徴ベクトル間の二乗距離を算出する。

- ① 入力画像の勾配方向特徴ベクトルを以下のように表現する。

$$n^i = (n_1^i, n_2^i, \dots, n_{16}^i) \quad (5)$$

- ② 登録画像の勾配方向特徴ベクトルを以下のように表現する。

$$m^i = (m_1^i, m_2^i, \dots, m_{16}^i) \quad (6)$$

- ③ ブロック当たりの平均二乗距離を当該ずらし A によるマッチング尺度 $D(A)$ として次式で示す。 A をブロック単位での縦横ずらし、 $N(A)$ をずらし A 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。

$$D(\Delta) = \frac{1}{N(\Delta)} \sum_j \|m^j - n^{\Delta(j)}\|^2 \quad (7)$$

6. ずらしの最大範囲を上下左右に K ブロックとすると、総数 $(2K+1)^2$ 通りのずらしを行うことになる。値 $D(\Delta)$ が最小となるずらし Δ^* を決定すると、これがブロック単位の最適位置ずらしを与える。本研究では、 $K=12$ と設定した。
7. ここで得られた最適な位置ずらしマッチングの評価尺度 $D(\Delta^*)$ は指紋照合判定にも用いる。

図 5.4 に、回転・平行移動成分の吸収例を示す。

図 5.4 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。

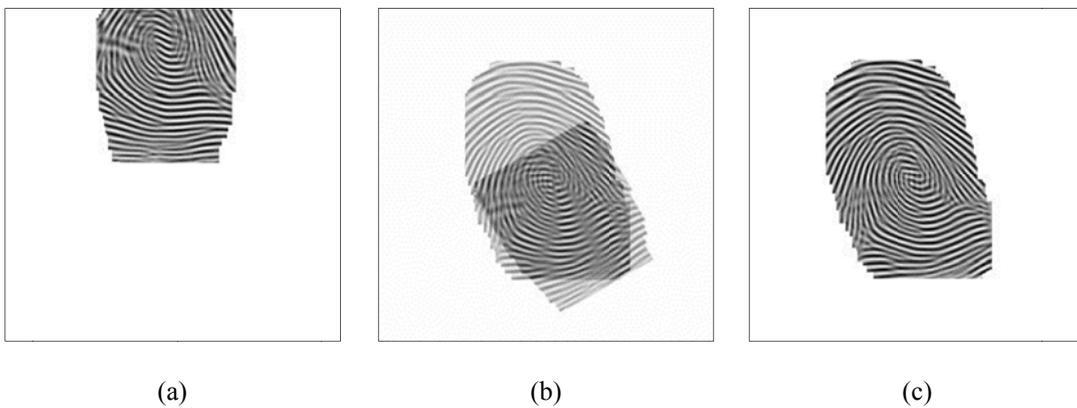


図 5.4 回転・平行移動成分の吸収例：
(a)入力画像 (b)マッチング画像 (c)登録画像

第6章 マニューシャマッチング

前章までの処理により，回転成分の吸収と勾配方向分布を用いた平行移動成分の吸収が実現している。

本章では，この位置ずらしマッチング後の入力および登録指紋画像から，指紋隆線の端点と分岐点であるマニューシャを抽出し，入力-登録マニューシャ間で最適な1対1対応づけを行うマニューシャマッチングについて述べる。

6.1 マニューシャ抽出

まず，マニューシャ抽出の前処理として，入力および登録指紋画像を2値化する。2値化には，第4章でも述べた局所平均に基づく動的2値化処理を用いた。

次いで，細線化処理を施す。細線化処理には Hilditch の方法[7]を用いた。

細線化パターンを用いてマニューシャ抽出を行うが，具体的な手順を以下に述べる。

1. 細線化した指紋隆線上の各点を中心とする 3×3 近傍で交差数 γ を算出する。交差数とは，図 6.1 のように 3×3 近傍で中心画素を囲む 8 画素を用いて次式で示す。

B(3)	B(2)	B(1)
B(4)	黒画素	B(0)
B(5)	B(6)	B(7)

図 6.1 3×3 近傍の画素

$$\gamma = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^7 |B(k+1) - B(k)| \quad (8)$$

$\gamma = 1$ である場合，中心画素は端点の候補とする。 $\gamma > 2$ の場合，中心画素は分岐点の候補とする。これらがマニューシャ候補点となる。

2. 抽出したすべてのマニューシャ候補点間の距離 d を算出し，一定距離 Th_d 以下で同一指紋隆線上にある場合，それら 2 候補点はともに偽マニューシャとして候補点から削除する。本研究では， $Th_d = 8$ とした。

これは，画像修復処理後にも残っている画像のかすれによる指紋隆線の分断により発生した端点を偽マニューシャとして判定するものである。

3. 指紋領域と背景領域の境界部分に，指紋隆線の端点や分岐点が発生するため，これらもマニューシャ候補点から削除する。

4. 最後に入力指紋と登録指紋のマスク領域の重なり部分の外にあるマニューシャ候補点を削除する。
5. 以上の処理で残ったマニューシャ候補点をマニューシャとして出力する。

図 6.2 に、マニューシャ抽出例を示す。図中、○が端点、□が分岐点を表す。

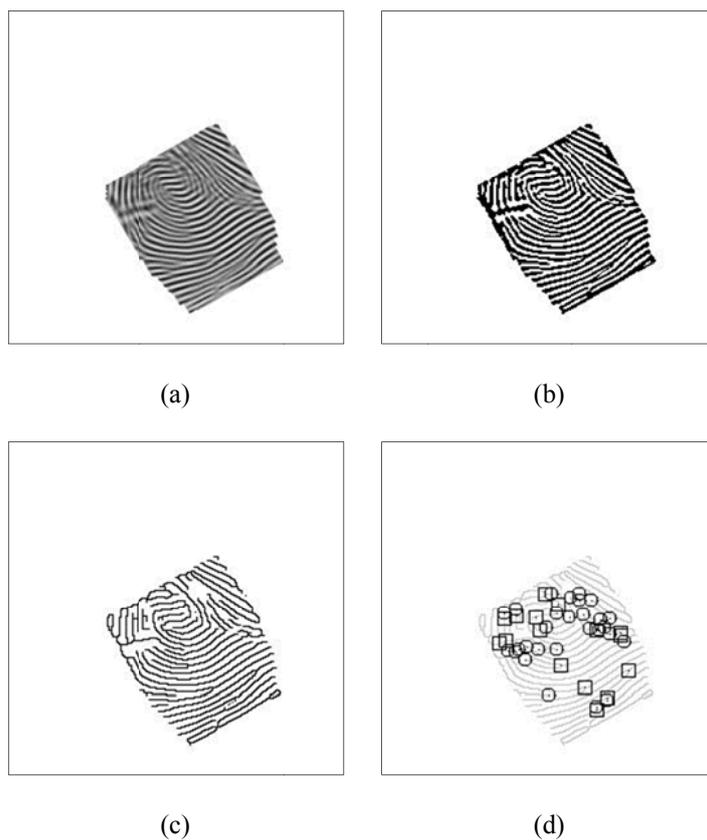


図 6.2 マニューシャ抽出例：

- (a)画像修復後の濃淡指紋画像 (b)2 値化画像
 (c)細線化画像 (d)抽出マニューシャ

6.2 マニューシャ対応付け

入力-登録マニューシャ間で1対1の最適なマニューシャ対応付けを行う。ただし、端点と分岐点の区別は行わないこととする。

まず、入力-登録マニューシャ間で全てのマニューシャ対間の点間距離を算出する。入力マニューシャと登録マニューシャで点数の多い方を P 、少ない方を Q と記すと、 P 行 Q 列の点間距離行列が作成される。この行列を用いて、点間距離和が最小となる Q 個の点对を 1

対 1 対応の条件下で求めることで、最適な対応付けとすることとした。

その際、対応マニューシャの点間距離に上限を設定した。今回の実験では上限値 = 14 とした。この制限により、対応付けられる点对の総数は Q 個以下となる。

この最適な組み合わせ探索アルゴリズムとして、1 対多の対応を解消する過剰対応解消法と Q 点側での未対応点を解消する不足対応解消法という 2 つの相補的な対応付け探索アルゴリズムの併用を用いた[8]。

最後に、相補的な両者の組み合わせ探索結果で照合点对数が多い方を採用し、最終的なマニューシャ対応付け結果として出力する。

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い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。

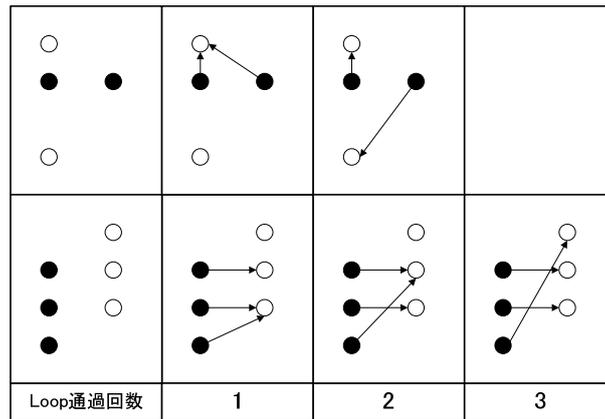


図 6.3 過剰対応解消法例

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。

第7章 実験結果

提案手法の評価実験には、FVC2004 指紋画像データベースの DB1 に含まれる全 100×8 枚の指紋画像データを用いた。cross-validation 法[9]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99枚 \times 8枚を他人指の照合に用いた。すなわち、8-fold cross-validation で評価を行った。したがって、本人照合の総試行数は $100 \times 8 \times 7 (= 5600)$ 回、他人照合の総試行数は $100 \times 8 \times 99 \times 8 (= 712800)$ 回となった。

7.1 ROC 曲線

指紋照合による本人・他人判定には、第5章の $D(\Delta^*)$ 、第6章の照合マニューシャ対数 N_{pair} および照合率 κ 、という3種類の評価尺度を使用する。

この3種類の評価尺度のそれぞれに対して閾値を決め、本人拒否率(False Rejection Rate; FRR)と他人受理率(False Acceptance Rate; FAR)の関係を調べた。

まず、3種類の評価尺度を単独で用いた場合の FRR と FAR の関係についての実験結果を示す。

図7.1に、 $D(\Delta^*)$ 、 N_{pair} 、 κ についてそれぞれ閾値 $Th1$ 、 $Th2$ 、 $Th3$ を変化させて得られた ROC(Receiver operating characteristics)曲線[2]を示す。

図7.1より、単独では位置ずらしマッチングでの評価尺度である $D(\Delta^*)$ が最も性能が良いことが分かる。

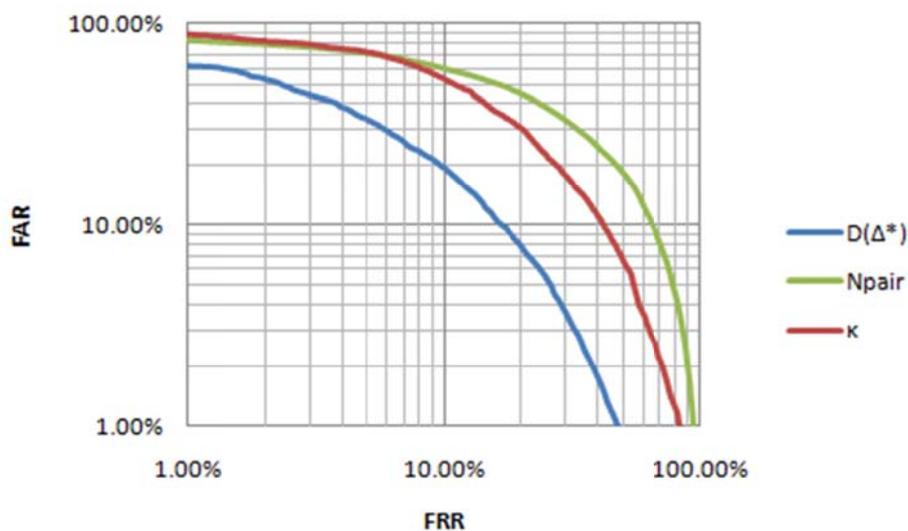


図7.1 $D(\Delta^*)$ 、 N_{pair} 、 κ 単独での ROC 曲線

7.2 EER の評価

指紋照合システムの性能評価には、本人拒否率(FRR)と他人受理率(FAR)が等しくなる値 EER(Equal Error Rate)の値がよく用いられる[2]。

表 7.1 に、3 種類の評価尺度を単独で用いた場合の EER の値を掲げる。

表 7.1 単独の評価尺度での EER

評価尺度	EER(%)
$D(\Delta^*)$	13.64
N_{pair}	31.64
κ	23.86

次に、3 種類の評価尺度 $D(\Delta^*)$, N_{pair} , κ の組み合わせによる本人・他人判定の実験を行った。

それぞれの閾値 $Th1$, $Th2$, $Th3$ を用いた判定式を論理和と論理積で組み合わせる方式を検討した結果、次式の条件で本人受理の判定を行った場合に最小の EER 値 12.91%を達成した。

$$N_{pair} > Th2 \cap (D(\Delta^*) < Th1 \cup \kappa > Th3) \quad (10)$$

この EER 値が、位置ずらしマッチングとマニューシャマッチングを融合した提案手法による性能評価の指標となる。

図 7.2 に、式(10)の条件を用いて各閾値を変化させて得られた ROC 曲線を示す。

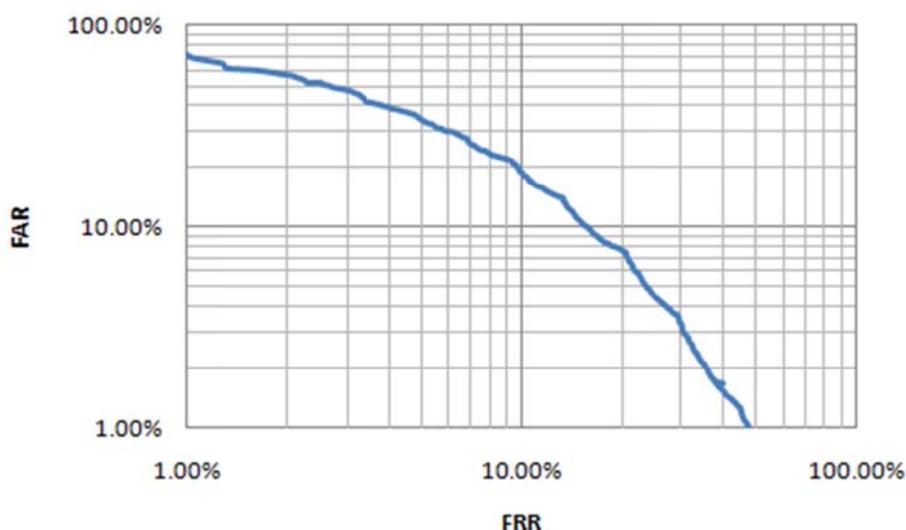


図 7.2 式(10)の条件を用いた場合の ROC 曲線

7.3 処理時間

表 7.2 に、提案手法の各段での処理時間を示す。入力指紋画像と登録指紋画像の 1 対当たりの照合に要する平均処理時間を表している。

ただし、開発は Windows 上の Visual Studio で C 言語を用いて行った。計算機環境は CPU が Intel Core 2 Duo P8600 2.4GHz, メモリが 4GB である。

表 7.2 提案手法の各段での処理時間

処理内容	平均処理時間(s)
局所的 FFT バンドパスフィルタによる画像修復	9.35
指紋マスク領域の抽出	1.94
位置ずらしマッチング	2.29
マニューシャマッチング	2.16

第8章 考察

提案手法では、位置ずらしマッチングとマニューシャマッチングの前処理として局所的FFTバンドパスフィルタによる画像修復を行い、目視では確認することも難しい指紋隆線を修復することができた。さらに、指紋マスク画像を生成して最適な指紋領域を抽出することで、画像修復処理で発生してしまう雑音や指の第二関節の部分などマッチング精度に悪影響を及ぼす部分をきれいに取り除くことができ、EER = 12.91%という結果を得られた。

図 8.1 に提案手法の成功例を示す。

図 8.1 より、局所的FFTバンドパスフィルタによる画像修復や回転画像を用いた回転成分の吸収、位置ずらしマッチングによる平行移動成分の吸収が有効に働いていることが分かる。特に、図 8.1 下段(c)の画像は、画像修復が不十分で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は照合率が良くなかった。しかし、位置ずらしマッチングと組み合わせることで救うことができた。



図 8.1 提案手法の成功例：

(a)入力画像 (b)重ね合わせ画像 (c)登録画像

EER = 12.91%という結果は、FVC2004 に参加した academic groups が得た値[6]と比較する

と、中位に相当する第5位の成績である。ただし、academic groupでの最高性能はEER = 4.37%である。また、industryも含めた全参加41機関の中では、提案手法でのEER値は32位であり、良い結果とは言えない。以下では、各マッチング処理の今後の課題について考察する。

8.1 位置ずらしマッチングの課題

回転成分の吸収には -20 度から $+20$ 度の範囲で 5 度刻みに計 9 種類の回転画像を生成することで対応し、平行移動成分の吸収には勾配方向分布を用いたブロック単位のずらしマッチングを用いた。しかし、マッチング結果を調べてみると、入力-登録指紋画像がきれいに重なっていないものがあった。主に2種類の失敗例があったので考察する。

まず、図8.2に位置ずらしマッチングの失敗例1を示す。

この失敗例1は、入力画像のずらし量が足りなかったために、正しく重なるべき位置を見つけないことができず、間違った位置でマッチングしてしまった。

これを解決するには、ずらし範囲を広げることで正しく重なるべき位置を見つけることができると思われる。しかし、単純に広げてしまうと少ない重なりブロック数の位置でマッチングしてしまい、他人受率が高くなってしまう可能性が考えられる。そのため、マッチング尺度 $D(\Delta^*)$ の最小値だけでなく、重なっているブロック数を考慮して位置ずらしマッチングをする必要がある。

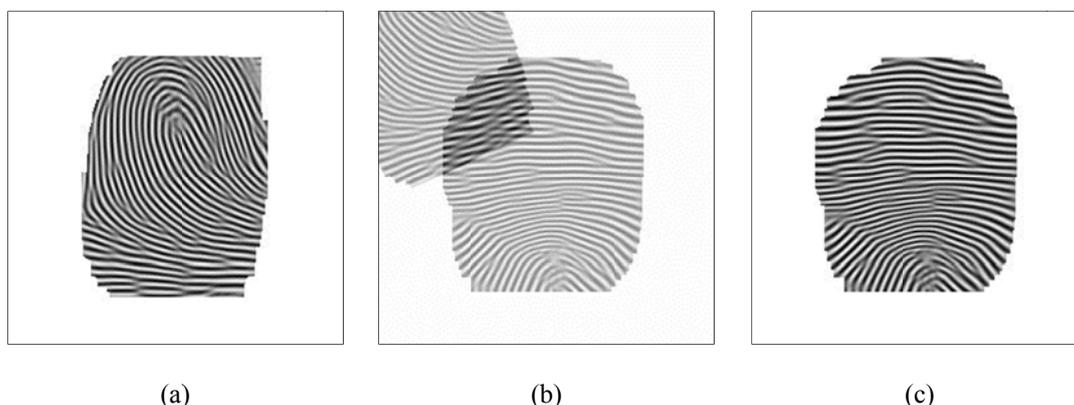


図8.2 位置ずらしマッチングの失敗例1：
(a)入力画像 (b)重ね合わせ画像 (c)登録画像

次に、図8.3に位置ずらしマッチングの失敗例2を示す。

この失敗例2は、指紋画像が非線形な歪みを起こしているためにマッチング尺度 $D(\Delta^*)$ の値が大きくなってしまい、本人同士の指紋であるにも関わらず他人と判定されたマッチング結果である。

これを解決するには、位置ずらしマッチングでは回転と平行移動の成分しか吸収できないため、非線形な画像歪みに対処する必要がある。しかし、新たに処理を追加すると処理量が増大する。そのため、位置ずらしマッチングの精度をさらに上げて非線形な画像歪みによる悪影響を小さくするか、新たに非線形な画像歪みに対処する処理を追加するか、増大する処理量を比べながら検討する必要があると考えられる。

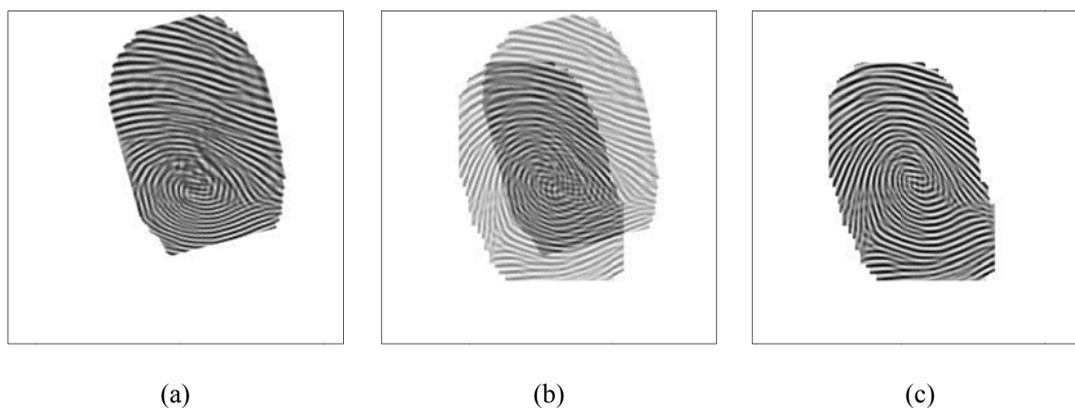


図 8.3 位置ずらしマッチングの失敗例 2 :
(a)入力画像 (b)重ね合わせ画像 (c)登録画像

位置ずらしマッチングの精度を上げるには、回転角の刻み幅やずらしマッチングに用いるブロックのサイズをより小さくすることが考えられる。さらに、FVC2004 の DB1 に収録されている指紋画像を調べてみると、画像全体に対して指紋領域がかなり小さいものも多く、指紋領域が画像全体の 4 分の 1 に満たないような画像も見られる。

そのため、解像度を上げた指紋画像を用いて実験を行った。具体的には、提案手法が 640×480 サイズの原画像を左右 80 画素切り取った後、双一次線形補間法を用いて 256×256 サイズに変換して実験を行っているのに対して、検討案は 640×480 サイズの原画像からマスク画像を生成し、マスク画像の重心を中心に 256×256 サイズを原画像から切り取って実験を行った。画像解像度以外のその他の条件は全て同じである。この検討案の実験結果、3 種類の評価尺度 $D(\Delta^*)$, N_{pair} , κ についてそれぞれ閾値 $Th1$, $Th2$, $Th3$ を変化させて得られた ROC 曲線を図 8.4 に示す。さらに、提案手法の結果と比較して表 8.1 に示す。

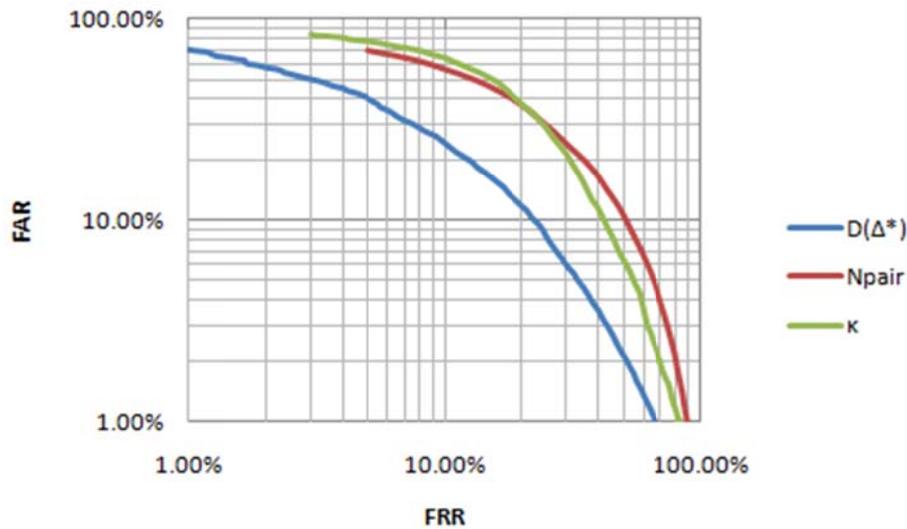


図 8.4 検討案の $D(\Delta^*)$, N_{pair} , κ 単独での ROC 曲線

表 8.1 解像度の違いによる EER(%)の比較

評価尺度	提案手法	検討案
$D(\Delta^*)$	13.64	15.92
N_{pair}	31.64	27.11
κ	23.86	26.30

表 8.1 からわかる通り、位置ずらしマッチングの評価尺度 $D(\Delta^*)$ とマニューシャマッチングの照合率 κ とともに精度が低下していることがわかる。これは、指紋隆線の修復が不十分な部分が解像度を上げたことによって、より多数のブロックの勾配方向特徴に影響を及ぼしたためと考えられる。そのため、ブロックサイズを細かくしてマッチングすることより、勾配方向特徴の精度を高めることの方が重要であると考えられる。解決案としては、16 方向に圧縮していた勾配方向特徴を 32 方向のヒストグラムをそのまま使用する案が挙げられる。また、隣接するブロック同士の隆線方向は似ているため、位置ずらしマッチングを行う前に、各ブロックについて近傍ブロックの勾配方向特徴を比較して修正することで、指紋隆線の修復が不十分な部分の影響を軽減することができると考えられる。

8.2 マニューシャマッチングの課題

マニューシャマッチングでの課題としては、偽マニューシャの削除に改良の余地があると考えられる。偽マニューシャが全て削除されず残っているために照合率の低下に影響しているものがある。

図 8.5 に偽マニューシャが多く残っている例を示す。図中、○が端点、□が分岐点を表す。

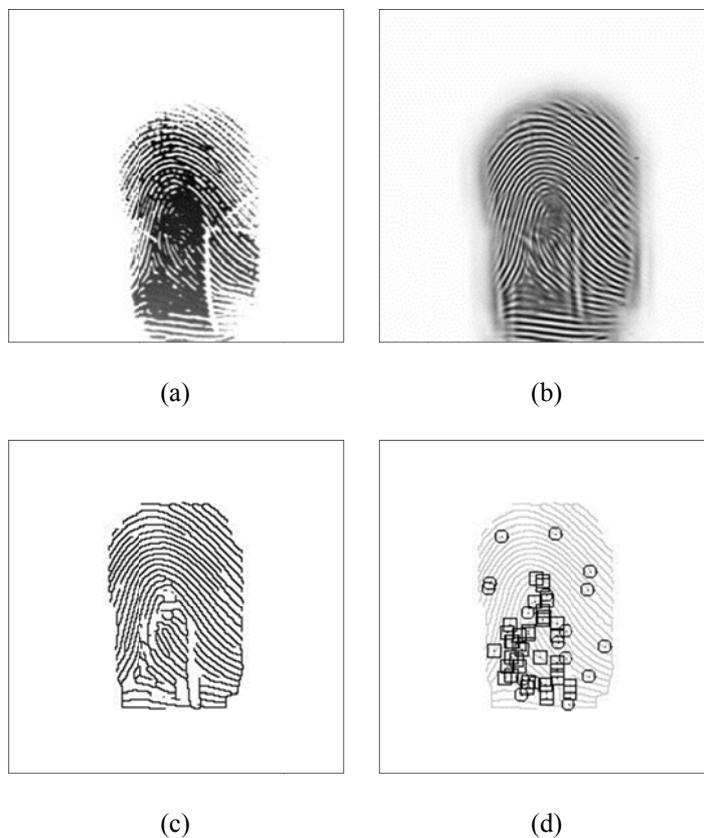


図 8.5 偽マニューシャが多く残っている例：

- (a)原画像 (b)指紋隆線修復画像
- (c)細線化画像 (d)マニューシャ抽出画像

偽マニューシャの削除では、点間の直線距離を算出して指紋隆線の分断により発生した端点を削除しているが、直線距離だけでは偽マニューシャを検出することは難しいと考えられる。また、同一指紋隆線上であるかを考慮しているが、図 8.6 で示す例のように 2 本の指紋隆線が途中で合流していると同一指紋隆線と判断しているため、正確ではない。

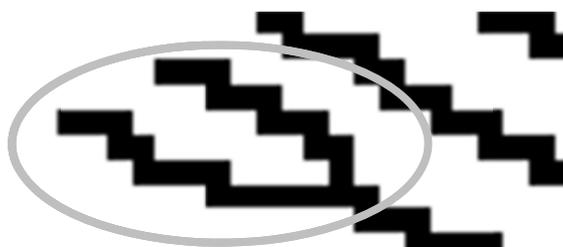


図 8.6 2 本の指紋隆線を同一と判断してしまう例

偽マニューシャは、図 8.7 で示すように指紋隆線から髭のように少し伸びて端点と分岐点を発生させたり、小さな輪を形成して分岐点を 2 点発生させたりと、いくつか決まったパターンがある。そのため、直線距離に加えて、端点や分岐点を延長した場合の指紋隆線方向、2 点間の隆線に沿った距離を用いて各パターンの偽マニューシャを検出することが有効と考えられる。



図 8.7 偽マニューシャのパターン

また、局所的 FFT バンドパスフィルタを用いて指紋隆線を修復しているが、2 値化、細線化処理の過程で修復された指紋隆線が再び失われていることがあり、このために偽マニューシャが多く発生する場合がある。2 値化には、局所平均に基づく動的 2 値化処理を用いているが、局所的 FFT バンドパスフィルタで用いた指紋隆線方向が局所領域でほぼ一定であるという性質を 2 値化処理にも利用するなどの改良が必要であると考えられる。

他に、マニューシャマッチングの精度を向上させるには、1 対 1 の対応付けの強化がある。偽マニューシャの検出でも取り上げた、端点や分岐点を延長した場合の指紋隆線方向を 1 対 1 の対応付けにも用いることは有効と考えられる。

第9章 結論

身体特徴を用いて個人認証を行うバイオメトリクスの中でも指紋認証技術は、今後も市場拡大が予測されており、さらなる性能向上が期待されている。

本論文では、劣化指紋画像を対象として、パターンマッチング法とマニューシャマッチング法を融合した照合手法を提案し、FVC2004 指紋画像データベースの DB1 を用いて照合実験を行った。勾配方向分布を用いたブロック単位の位置ずらしで得られるマッチング尺度、マニューシャマッチングで得られる照合数と照合率の 3 種類の評価尺度を併用した閾値判定を用いることにより、本人拒否率と他人受率率が等しくなる値として $EER = 12.91\%$ を達成した。

しかし、FVC2004 の全参加 41 機関の評価報告と比較すると、提案手法の性能は良い結果とは言えない。

今後の課題として、画像修復の改良、指紋隆線の勾配方向分布の特徴能力の向上、偽マニューシャの削除アルゴリズムの強化、がある。画像修復の改良は、フーリエ変換成分の大きさの増幅量やフィルタリングの上限周波数を変更して修復能力を向上させることが考えられる。指紋隆線の勾配方向分布の特徴能力の向上は、勾配方向特徴を細かく算出し、ずらし範囲を広げてマッチングことが挙げられる。偽マニューシャの削除アルゴリズムの強化は、マニューシャから伸びる隆線の特徴を加えることで対処できると考えられる。

さらには、非線形な画像歪みに対処する必要がある、これをできるだけ少ない計算量で実現するアルゴリズム開発は挑戦的な課題である。

謝辞

本研究を行うにあたり，御指導いただいた若原徹教授に深い感謝の意を表します。的確な御助言により，本研究がこのような成果を得られたのだと思います。研究以外の面でも日頃から多数お世話になっており，感謝の念に絶えません。

また，手助けしてくださった若原研究室の皆様を初め，お世話になったすべての方々に深く感謝します。

2011年1月28日

参考文献

- [1] http://www.biometricgroup.com/reports/public/market_report.php
- [2] D. Maltoni, D. Mario, A. K. Jain, and S. Prabhakar, *Handbook of Fingerprint Recognition*, New York: Springer, 2002.
- [3] A. K. Jain, “Biometric Recognition: Techniques, Applications and Challenges,” *Tutorial-A, in 18th Int. Conf. on Pattern Recognition*, Hong Kong, China, Aug. 2006.
- [4] 星野幸夫監修, 指紋認証技術—バイオメトリクス・セキュリティ, 画像電子学会編, 東京電機大学出版局, 2005.
- [5] S. Otaka, Y. Nishiyama, T. Hatano, and T. Wakahara, “Fingerprint verification using perturbation method,” *Proc. of the IAPR Conf. on Machine Vision Applications 2007*, pp. 424-427, Tokyo, Japan, May 2007.
- [6] <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004/>.
- [7] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Third Edition, Prentice Hall, 2007.
- [8] T. Wakahara, A. Suzuki, N. Nakajima, S. Miyahara, and K. Odaka, “On-line cursive Kanji character recognition as stroke correspondence problem,” *Proc. of 3rd Int. Conf. on Document Analysis and Recognition*, vol. 2, pp. 1059-1064, Montreal, Canada, Aug. 1995.
- [9] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, New York: Springer, 2006.