

位相限定相関法と特徴点マッチングの組み合わせに基づく指紋照合アルゴリズム

A Fingerprint Matching Algorithm Based on the Combination of Phase-Only Correlation and Minutiae Matching

森田 歩[†] 伊藤 康一[†] 青木 孝文[†] 中島 寛[‡] 小林 孝次[‡] 樋口 龍雄[§]
 Ayumi Morita Koichi Ito Takafumi Aoki Hiroshi Nakajima Koji Kobayashi Tatsuo Higuchi

1. まえがき

ユビキタス情報社会を迎え、鍵・ICカード・パスワードを使った従来の認証方式にかわって、行動的・身体的特徴を使った認証方式であるバイオメトリクス認証が注目されている。従来の認証方式は、本人の所有物や知識を使って認証を行うため、「なくす」「忘れる」、「盗まれる」という危険性がある。一方、バイオメトリクス認証は、本人の行動的・身体的特徴を用いるため、記憶や所持などが不要であり、従来の認証方式よりも信頼性が高い[1, 2]。バイオメトリクス認証に使われる特徴には、指紋・掌形・顔・虹彩・声紋・署名などがある。なかでも、指紋を使った認証がその利便性より、よく使用されている[3]。

指紋照合には、大きく分けて2種類ある。1つは、指紋の流れである隆線が途切れる点(端点)や分岐する点(分岐点)の位置や角度などを使って照合する「特徴点ベースの照合手法」[4]である。もう1つは、2つの指紋画像を重ね合わせて照合する「相関ベースの照合手法」[5, 6]である。特徴点ベースの照合手法は、指紋を採取する際に生じる歪みに対してロバストであるが、かすれなどで指紋の状態が悪く、特徴点を正確に抽出することができないと照合精度が悪くなる。一方、相関ベースの照合手法は、画像全体を使うため、かすれなどで状態が悪くなった指紋画像に対してロバストであるが、指紋画像の歪みによって照合精度が悪くなる。

筆者らは、現在までに、相関ベースの照合手法である位相限定相関法(Phase-Only Correlation: POC)[7]を使った指紋照合アルゴリズムを提案し、かすれた指紋画像に対して特徴点ベースの照合手法よりも高精度に照合できることを確認している[6]。しかし、全体的な構造を使うため、歪んだ指紋画像に対しては照合精度が悪くなる問題があった。この問題に対し、本論文では、歪みにロバストな特徴ベースマッチングとかすれにロバストなPOCを使った照合とを組み合わせた高精度な指紋照合アルゴリズムを提案する。

2. 位相限定相関法を使った指紋照合

画像の位相情報を使った照合手法である位相限定相関法(Phase-Only Correlation: POC)[7]について述べる。大きさ $N_1 \times N_2$ 画素の画像を $f(n_1, n_2)$ および $g(n_1, n_2)$ とする。ただし、定式化の便宜上、離散空間のインデックスを $n_1 = -M_1 \cdots M_1$ ($M_1 > 0$) および $n_2 = -M_2 \cdots M_2$ ($M_2 > 0$) とし、画像の大きさを $N_1 = 2M_1 + 1$ および $N_2 = 2M_2 + 1$ とする。これら

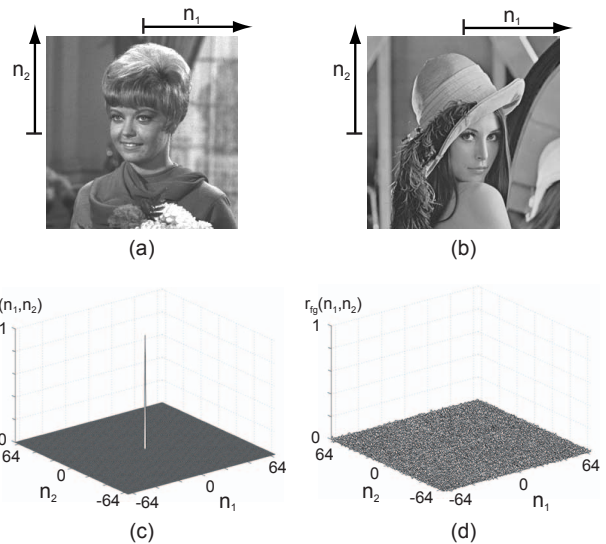


図 1: POC を使った画像照合の例: (a) 画像 $f(n_1, n_2)$, (b) 画像 $g(n_1, n_2)$, (c) 全く同じ 2 枚の画像間の POC 関数 (使用した画像は $f(n_1, n_2)$), (d) $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ の POC 関数

の画像の 2 次元離散フーリエ変換をそれぞれ $F(k_1, k_2)$ および $G(k_1, k_2)$ としたとき、POC 関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$ は次のように定義される。

$$r_{fg}(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1, k_2} \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}|} \times W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2} \quad (1)$$

ただし、 $W_{N_1} = e^{-j \frac{2\pi}{N_1}}$, $W_{N_2} = e^{-j \frac{2\pi}{N_2}}$ であり、 \sum_{k_1, k_2} は $\sum_{k_1=-M_1}^{M_1} \sum_{k_2=-M_2}^{M_2}$ を、 $\overline{G(k_1, k_2)}$ は $G(k_1, k_2)$ の複素共役を意味する。

図 1 に POC を使った画像照合の例を示す。図 1(c) のように類似した 2 枚の画像間の POC 関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$ は鋭いピークを示す。一方、異なる 2 枚の画像間では、図 1(d) のように全くピークが現れない。このように、POC 関数のピークの高さは、画像間の類似度を調べる指標となる。

これまで筆者らが提案している指紋照合アルゴリズムでは、指紋照合に特化した POC 関数である帯域制限位相限定相関(Band-Limited Phase-Only Correlation: BLPOC)関数を用いている[6]。指紋画像の周波数特性を調べると、画像に含まれる重要な情報が低周波領域にある楕円状の周波数帯に含まれており、高周波領域

[†]東北大学大学院情報科学研究科

[‡]株式会社山武

[§]東北工業大学工学部

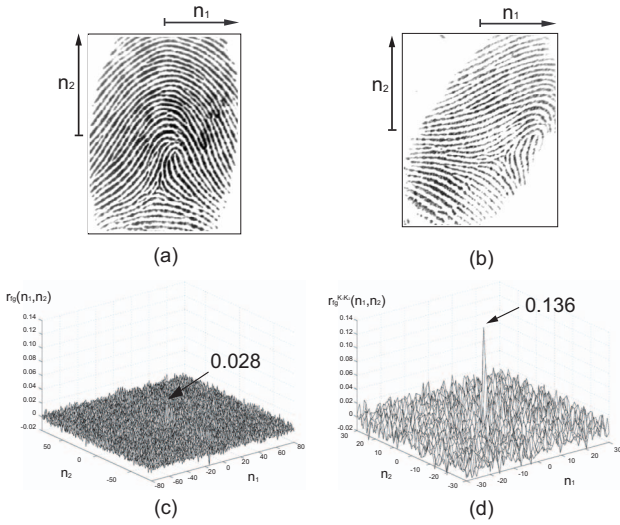


図 2: POC 関数と BLPOC 関数を使った本人同士の指紋照合例: (a) 登録画像 $f(n_1, n_2)$, (b) 同じ指紋から採取した入力画像 $g(n_1, n_2)$, (c) POC 関数 $r_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$, (d) BLPOC 関数 $r_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$

にはノイズなどの意味のない情報が含まれていることがわかる。BLPOC は、この性質を利用したもので、指紋画像の高周波成分を取り除き、画像の持っている有効な周波数成分のみを使用する照合手法である。BLPOC 関数は次式で定義される。

$$r_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2) = \frac{1}{L_1 L_2} \sum_{k_1, k_2} \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) G(k_1, k_2)|} \times W_{L_1}^{-k_1 n_1} W_{L_2}^{-k_2 n_2} \quad (2)$$

ここで、 $L_1 = 2K_1 + 1$, $L_2 = 2K_2 + 1$, $n_1 = -K_1 \cdots K_1$, $n_2 = -K_2 \cdots K_2$ であり、 \sum_{k_1, k_2} は $\sum_{k_1=-K_1}^{K_1} \sum_{k_2=-K_2}^{K_2}$ を意味する。BLPOC では、制限する周波数帯域の大きさに依存せず、常に相関ピークの最大値が 1 に正規化される。有効な周波数成分は、指紋画像の解像度によって変化するため、使用するデータベースごとに設定する必要がある。また、適切な周波数帯域に設定しなければ、照合性能が大幅に低下する。本論文では、実験より $K_1 = 0.2N_1$, $K_2 = 0.2N_2$ とした。実際に、POC 関数 r_{fg} と BLPOC 関数 $r_{fg}^{K_1 K_2}$ を使って本人同士の指紋照合を行った例を図 2 に示す。これより、POC 関数よりも BLPOC 関数を使った方がよりよい類似度の指標になっていることがわかる。

3. 特徴ベースマッチング

指紋の歪みに対してロバストに照合するために、指紋の特徴点を使って照合する特徴ベースマッチングを提案する。指紋を採取する際に、センサに指を強く押し付けたりすることによって指紋が歪んでしまうことがある。このため、POC を使った照合のように全体的な構造を使った照合法では照合精度が悪くなる。全体的に見れば歪みが大きくても、局所的に見れば歪みは

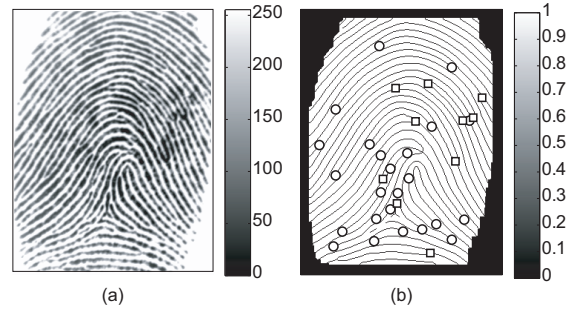


図 3: 特徴点を抽出した例: (a) 原画像, (b) 特徴点を抽出した細線化画像 (○: 端点, □: 分岐点)

小さい。そこで、指紋画像の局所的な領域を使って照合する特徴ベースマッチングを提案する。

特徴ベースマッチングとは、2つの画像間で一致する特徴点を抽出し、その一致特徴点の近傍領域を使って照合する手法である。照合スコアの精度を向上させるために、特徴点の位置や相対角度などの情報を使った照合スコアも使用する。特徴ベースマッチングの全体の流れは、(1) 特徴点抽出、(2) 一致特徴点の抽出 (特徴点を使った照合)、(3) 一致特徴点近傍領域の抽出、(4) SAD による照合、(5) 照合スコアの算出の 5 ステップからなる。各ステップの詳しい処理について説明する。

(1) 特徴点抽出

特徴点を使って照合するために、指紋画像から特徴点を抽出する。特徴点抽出は、(i) 指紋領域の抽出、(ii) Gabor フィルタを使った強調 [3]、(iii) 2 値化と細線化 [3]、(iv) 特徴点の抽出 [3]、(v) 疑似特徴点の除去 [8] の 5 ステップからなる。抽出された特徴点は、位置と角度の情報を持っている。指紋画像から抽出した特徴点の例を図 3 に示す。

(2) 一致特徴点の抽出 (特徴点を使った照合)

画像間で一致する特徴点を抽出し、照合スコア S_M を算出する [9]。まず、ある特徴点に近接する 2 つの特徴点に対して距離と相対角度を求める。これらを全ての特徴点に対して求める。これらの情報を使って画像間の全特徴点ペアに対する類似度を求め、類似度が最大となったペアを登録画像と入力画像の位置と角度を合わせるための基準特徴点ペアとする。次に、基準特徴点ペアを基準として画像間の特徴点の位置と角度を合わせる。そして、すべての特徴点に対して基準特徴点との距離と相対角度を求める。このとき、登録画像と入力画像間で距離と相対角度の差が小さい特徴点ペアを一致特徴点ペアとし、そのペアの類似度を求める。また、指紋の撮像状況により得られる指紋領域が異なる場合があるので、両方の指紋画像の共通部分に存在する特徴点数 N_{c1} , N_{c2} を求める。各一致特徴点ペアの類似度 $ml(l_1, l_2)$ と特徴点数 N_{c1} , N_{c2} を使って照合スコア S_M を求める。 S_M は以下の式で表される。

$$S_M = \frac{\left(\sum_{l_1, l_2 \in C} ml(l_1, l_2) \right)^2}{N_{c1} \times N_{c2}} \quad (3)$$

ただし, l_1, l_2 は各画像における一致特徴点のインデックスであり, C は一致特徴点ペアのインデックスの集合である.

(3) 一致特徴点近傍領域の抽出

特徴ベースマッチングで使用する一致特徴点近傍領域を 2 値化画像から抽出する. 基準特徴点ペアより得られる画像間の位置と角度を使うことで, 画像全体の位置と角度を補正することができる. しかし, この方法で回転補正した画像から一致特徴点近傍の領域を抽出すると, 画像の歪みによって一致特徴点近傍領域間の角度が合わない場合がある. そこで, 歪みに対してロバストに照合するために, 基準特徴点ペアの角度を使って角度を合わせるのではなく, 特徴点の角度を使って一致特徴点近傍領域の角度を合わせる. 以上より, 一致特徴点を中心とする $r \times r$ 画素の領域を切り出し, 特徴点の角度を使って回転補正したものを一致特徴点近傍領域とする. 本論文では $r = 31$ とするが, 画像の解像度に応じて領域の大きさを変える必要がある.

(4) SAD による照合

抽出された一致特徴点近傍領域ペアごとに類似度を求め, この類似度を利用して照合スコア S_{SAD} を求める. 類似度の計算には, 計算量の削減のために SAD (Sum of Absolute Differences) を使う. SAD とは, 2 枚の画像を重ね合わせて 1 画素ごとの差分を求め, これらの差分をすべて足し合わせた値を類似度とする手法である. 同じ画像であるほど差分が小さくなるので, 値が小さいほど類似度が高くなる. 類似度の計算には 2 値化画像を用いる. 原画像では, 画像状態によっては濃淡の差が存在するので, 正確に類似度を求めることができないからである. 本論文では, 2 値化画像から 31×31 画素で切り出しているため, SAD で求めた類似度は $[0, 961]$ の範囲になるが, 直観的にわかりやすくするために, 0 から 1 に向かって類似度が大きくなるように $[0, 1]$ の範囲に類似度を正規化した. 図 4 は, 実際に本人同士の照合を行った例である. 一致特徴点ペアが 3 組以上ならば, 上位 3 組の平均類似度を求め, これをスコア S_{SAD} とする. 一致特徴点ペアが 2 組以下の場合, 実験的にほとんど他人同士であることを確認しているので, $S_{SAD} = 0$ とする.

(5) 照合スコアの算出

特徴点照合のスコア S_M と SAD による照合スコア S_{SAD} を使って, 特徴ベースマッチングの照合スコア S_F を求める. S_M の閾値を T_M , S_{SAD} の閾値を T_{SAD} としたとき, S_F は次式で求められる.

$$S_F = \begin{cases} 1 & S_M > T_M \text{ or } S_{SAD} > T_{SAD} \\ S_M \times S_{SAD} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

本論文では $T_M = 0.3500$, $T_{SAD} = 0.8637$ とした.

4. 指紋照合アルゴリズム

本論文で提案する指紋照合アルゴリズムについて述べる. 筆者らがこれまでに提案している POC を用いた指紋照合 [6] の中間処理として, 特徴ベースマッチングを使った照合を取り入れる. 提案するアルゴリズムのフローチャートを図 5 に示す. 各照合について説明する.

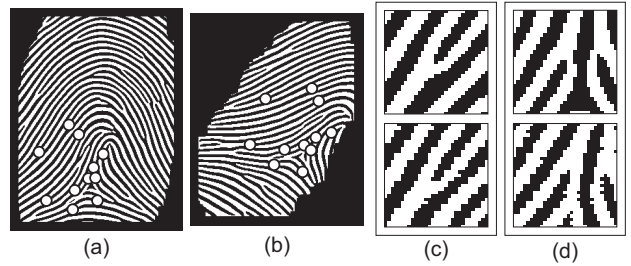


図 4: 特徴ベースマッチングによる本人同士の照合 ($S_M = 0.43$, $S_{SAD} = 0.88$): (a) 登録画像 (2 値化画像), (b) 入力画像 (2 値化画像), (c) SAD による類似度が最大の一致特徴点近傍領域ペア (類似度 = 0.83), (d) SAD による類似度が最小の一致特徴点近傍領域ペア (類似度 = 0.68) (○: 特徴点)

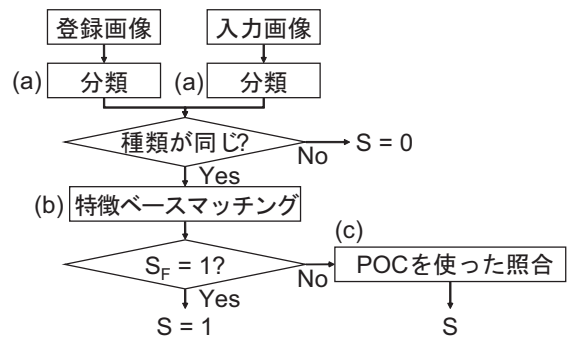


図 5: 提案する指紋照合アルゴリズムのフローチャート (S は最終的な照合スコアである)

(a) 分類

処理時間の短縮として指紋の分類を行う. 隆線の流れが大きく変化する点である特異点 (loop と delta) の位置関係と隆線が流れる方向を使うことで指紋をいくつかの種類に分類する. 指紋は, 一般的に 1900 年に Henry が提案した “Arch”・“Tented Arch”・“Left Loop”・“Right Loop”・“Whorl” の 5 種類に分類される. ただし, “Whorl” は “Whorl” と “Twin Loop” の 2 種類に分類されることもある. 本論文では, “Arch”・“Left Loop”・“Right Loop”, それ以外である “Other” の 4 種類に大別した [10]. なお, 指紋の種類の高正答率が 100% となるように, あいまいな種類である “Loop”・“Left Loop/Arch”・“Right Loop/Arch” の 3 種類を加え, 種類が一致しない場合は $S = 0$ として終了する.

(b) 特徴ベースマッチング

3. で述べた特徴ベースマッチングを使って照合スコアを求める. $S_F = 1$ ならば $S = 1$ として照合を終了する. それ以外ならば (c) に移る.

(c) POC を使った照合

2. で述べた POC を使って照合スコア S_{POC} を求める. まず, 片方の画像を -50° から 50° まで 1° 刻みで回転させ, BLPOC を使って類似度 (相関ピーク値) を調べる. 類似度が最大となった回転画像を使って共通領域を抽出する. 次に, 抽出した共通領域に対してさ

らに回転補正を行う． -2° から 2° まで 0.5° 刻みで片方の画像を回転させ，BLPOC 関数を求める．このとき，すでに画像の位置と角度が合っているため BLPOC 関数における相関ピークは原点付近に現れるはずである．そこで，原点を中心とする $b \times b$ 画素のブロック内の最大ピークから C 個の和を求め，最大値を S_{POC} とする．最終的な照合スコアは，実験で得られた S_F と S_{POC} のスコア分布より次式を用いた．

$$S = p \times S_F + (1 - p) \times S_{POC} \quad (5)$$

ここで， p は実験により 0.5 とした．

5. 実験・考察

提案するアルゴリズムを実装し，実験を行った結果とその考察について述べる．

本論文では，歪んだ指紋画像を多く含む FVC2002 [11] のデータベース 1 の SetA にある 100 人 \times 8 指に対して実験を行った．センサは Identix 社製 Optical Sensor “Touch View II” で，画像サイズは 388×374 画素，解像度は 500 dpi である．

実験は，(A) 指紋の分類を行ってから POC を使った照合のみを行うアルゴリズム [6]，(B) 市販されている特徴点ベースのアルゴリズム，(C) 提案するアルゴリズムの 3 種類に対して行った．まず，本人を間違えて他人として拒否してしまう割合である本人拒否率 (False Non-Match Rate: FNMR) を求める．同じ人の指紋画像においてすべての組み合わせ ($(8 \times 7) / 2 \times 100 = 2800$ 通り) に対する照合実験を行った．次に，他人を間違えて本人として受け入れてしまう割合である他人受入率 (False Match Rate: FMR) を求める．各指紋画像の 1 番目のみを使って異なった指紋画像ペアを作り，そのすべての組み合わせ ($(100 \times 99) / 2 = 4950$ 通り) に対する照合実験を行った．

これらの結果は，ROC 曲線 (Receiver Operating Characteristic Curve) を用いて評価した．これは，閾値を変化させたときの FNMR に対する FMR をプロットした曲線であり，一般的な照合装置の性能評価に用いられる．この曲線が原点に近くなるほど性能が高い．実験結果より得られる ROC 曲線を図 6 に示す．また，FNMR と FMR が同じ値となる EER (Equal Error Rate) でも評価した．EER が小さくなるほど性能が高い．EER はそれぞれ (A) 2.70%，(B) 1.82%，(C) 0.92% となる．提案アルゴリズムの EER は，POC のみを使った照合に比べて 1.78 ポイント，特徴点ベースのアルゴリズムに比べて 0.9 ポイント向上した．これらの結果より，提案アルゴリズムが POC を使った照合アルゴリズムや特徴点を使った照合アルゴリズムより高精度に照合できることを確認した．提案するアルゴリズムにおいて，POC を使った照合が行われるペア数は，本人同士で 654 ペア，他人同士で 3875 ペアであった．これより，本人同士の場合は 2146 ペアが特徴ベースマッチングで終了し，他人同士の場合は 1075 ペアが分類で終了していることがわかる．

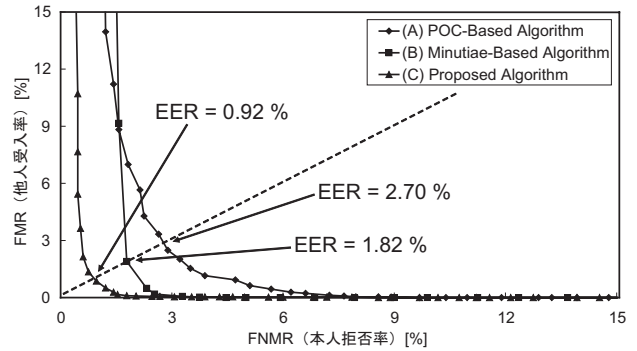


図 6: ROC 曲線 (FVC2002 DB1 SetA)

6. まとめ

本論文では，相関ベースの照合法である POC を使った指紋照合に，特徴点ベースの照合法である特徴ベースマッチングを組み合わせた指紋照合アルゴリズムを提案した．提案したアルゴリズムは，POC を使った指紋照合アルゴリズムだけではなく，特徴点を使った指紋照合アルゴリズムよりも高精度であることを示した．

今後は，照合精度を向上させるためにアルゴリズムを改善し，さまざまなデータベースに対して評価する予定である．

参考文献

- [1] 瀬戸洋一，バイオメトリックセキュリティ入門，ソフト・リサーチ・センター，2004.
- [2] J. Wayman, A. Jain, D. Maltoni, and D. Maio, *Bio-metric Systems*, Springer, 2005.
- [3] D. Maltoni, D. Maio, A. K. Jain, and S. Prabhakar, *Handbook of Fingerprint Recognition*, Springer, 2003.
- [4] A. K. Jain, L. Hong, S. Pankanti, and R. Bolle, “An identity-authentication system using fingerprints,” *Proc. IEEE*, Vol. 85, No. 9, pp. 1365–1388, September 1997.
- [5] H. Nakajima, K. Kobayashi, M. Kawamata, T. Aoki, and T. Higuchi, “Pattern collation apparatus based on spatial frequency characteristics (USP 5915034),” *US Patent*, May 1995.
- [6] K. Ito, H. Nakajima, K. Kobayashi, T. Aoki, and T. Higuchi, “A fingerprint matching algorithm using phase-only correlation,” *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 3, pp. 682–691, March 2004.
- [7] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi, “High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation,” *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E86-A, No. 8, pp. 1925–1934, August 2003.
- [8] M. Tico and P. Kuosmanen, “An algorithm for fingerprint image postprocessing,” *Thirty-fourth asilomar conference on signals, systems and computers*, Vol. 2, pp. 1735–1739, November 2000.
- [9] X. Jiang and W. Y. Yau, “Fingerprint minutiae matching based on the local and global structures,” *International Conference on Pattern Recognition.*, Vol. 2, pp. 1038–1041, September 2000.
- [10] 伊藤康一，森田歩，早坂昭裕，青木孝文，“特異点に基づくロバストな指紋分類アルゴリズム，” 第 17 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ，pp. 165–170, April 2004.
- [11] <http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/>