

位相限定相関法を用いた掌紋認証アルゴリズムとその性能評価

A Palmprint Recognition Algorithm Using Phase-Only Correlation and Its Performance Evaluation

伊藤康一[†] 青木孝文[†] 中島寛[‡] 小林孝次[‡] 樋口龍雄[§]

[†] 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

Koichi ITO[†] Takafumi AOKI[†] Hiroshi NAKAJIMA[‡] Koji KOBAYASHI[‡]
Tatsuo HIGUCHI[§]

[†] Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

[‡] Yamatake Corporation

[§] Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology

1 はじめに

ユビキタス情報社会において、セキュリティは、最も重要なキーワードの1つであり、信頼性が高く、利便性に優れた個人認証システムが必要とされている。現在までに一般的に用いられている個人認証システムは、パスワード、PIN (Personal Identification Number)、鍵などのように記憶や所持を必要とするものである。そのため、「忘れる」、「盗まれる」、「なくす」という危険性がある。これらの問題に対し、記憶や所持が不要で、さらに時間がたっても変化することのない究極的な認証方法として、個人の身体的・行動的特徴をそのまま認証情報として利用するバイオメトリクス認証技術が注目されている [1]。個人認証システムにおいて利用される身体的・行動的特徴には、指紋・虹彩・顔・掌紋・筆跡などがある。これらの中で、掌紋を用いた認証システムは、新しいバイオメトリクス認証として注目を浴びている [2]。

掌紋は、手のひらにあるパターンであり、隆線や特異点、特徴点、テクスチャなど多くの特徴がある。掌紋は、手のひらの大きな領域であるため、これらの特徴を安定して抽出することができる。また、指紋認証と同程度の識別性能を持っているだけでなく、カメラ等を使って非接触・非拘束で撮影することができる。これらの特徴は、バイオメトリクス認証に用いる身体的な特徴として個人の識別性、認証システムの利便性において非常に有用である。

現在までに報告されている掌紋認証アルゴリズム

は、それぞれの掌紋画像から特徴量を抽出し、特徴量間の距離に基づいて照合するアルゴリズムである [2, 3, 4, 5]。特徴に基づく掌紋認証アルゴリズムは、特徴抽出における多数のパラメータ (例えば、特徴抽出用のフィルタの位置や角度、周波数、フィルタのサイズなど) を適切に設定しなければ、大幅に性能が低下する問題がある。これらのパラメータは、掌紋パターンを採取する際の環境に依存して変化させる必要がある。

これに対して、本論文では、画像の位相情報を用いた照合手法である位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) を用いた掌紋アルゴリズムを提案する。POC を用いた画像照合手法は、コンピュータビジョンのためのサブピクセル画像位置合わせ手法として有用である [6, 7]。また、バイオメトリクス認証への応用として、POC は、指紋認証と虹彩認証へ適用され、その有効性が確認されている [8, 9, 10, 11, 12]。本論文では、指紋認証や虹彩認証と同様に画像の位相情報を用いた照合手法が掌紋認証にも有効であることを示す。性能評価実験では、PolyU Palmprint Database [13] とデジタルカメラで撮影した掌紋画像のデータベースを用いた。それぞれ、手の位置を固定して掌紋画像を撮影した場合と固定しないで撮影した場合のデータベースである。実験を通して、提案アルゴリズムは、どちらの場合でも高性能に認証できることを示す。

2 位相限定相関法

位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) の定義について述べる. 大きさ $N_1 \times N_2$ 画素の画像を $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ 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 $n_1 = -M_1, \dots, M_1$ ($M_1 > 0$) および $n_2 = -M_2, \dots, M_2$ ($M_2 > 0$) とし, 画像の大きさを $N_1 = 2M_1 + 1$ 画素および $N_2 = 2M_2 + 1$ 画素とする. これらの画像の 2 次元離散フーリエ変換 (2 次元 DFT) をそれぞれ $F(k_1, k_2)$ および $G(k_1, k_2)$ として次式で与える.

$$\begin{aligned} F(k_1, k_2) &= \sum_{n_1, n_2} f(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} \\ &= A_F(k_1, k_2) e^{j\theta_F(k_1, k_2)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} G(k_1, k_2) &= \sum_{n_1, n_2} g(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} \\ &= A_G(k_1, k_2) e^{j\theta_G(k_1, k_2)} \end{aligned} \quad (2)$$

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_{n_1, n_2} は $\sum_{n_1=-M_1}^{M_1} \sum_{n_2=-M_2}^{M_2}$ を意味する. ここで, $A_F(k_1, k_2)$ および $A_G(k_1, k_2)$ はそれぞれの画像の振幅成分, $e^{j\theta_F(k_1, k_2)}$ および $e^{j\theta_G(k_1, k_2)}$ はそれぞれの画像の位相成分である. 一般性を失うことなく離散周波数のインデックスを $k_1 = -M_1, \dots, M_1$, $k_2 = -M_2, \dots, M_2$ とすることができる. $F(k_1, k_2)$ と $G(k_1, k_2)$ の合成位相スペクトル $R_{FG}(k_1, k_2)$ を次のように定義する.

$$\begin{aligned} R_{FG}(k_1, k_2) &= \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}|} \\ &= e^{j\theta(k_1, k_2)} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで, $\overline{G(k_1, k_2)}$ は $G(k_1, k_2)$ の複素共役である. また, $\theta(k_1, k_2)$ は, $\theta_F(k_1, k_2) - \theta_G(k_1, k_2)$ で与えられる. POC 関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$ は, $R_{FG}(k_1, k_2)$ の 2 次元離散フーリエ逆変換 (2 次元 IDFT) として, 次のように表される.

$$\begin{aligned} r_{fg}(n_1, n_2) &= \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1, k_2} R_{FG}(k_1, k_2) \\ &\quad \times W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで, \sum_{k_1, k_2} は $\sum_{k_1=-M_1}^{M_1} \sum_{k_2=-M_2}^{M_2}$ を意味する. 類似した 2 枚の画像間の POC 関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$ はするどいピークを示す. 一方, 異なる 2 枚の画像間では, 全くピークが現れない. 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. この

特徴以外にも, POC 関数は, 画像間の位置ずれ (平行移動) や明るさの変化, 加算ノイズに対してロバストである. これらの特徴は, バイオメトリクス認証において非常に有効である [8].

本論文で提案する掌紋認証では, バイオメトリクス認証に特化させた POC である帯域制限位相限定相関法 (Band-Limited Phase-Only Correlation: BLPOC) を用いる [8]. 掌紋画像の周波数特性を調べると, 画像に含まれている重要な情報は低周波領域に含まれていて, 高周波領域にはノイズなどの意味のない情報が含まれている性質に気づく. BLPOC は, この性質を利用したもので, 掌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.

$$\begin{aligned} r_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2) &= \frac{1}{L_1 L_2} \sum_{k_1=-K_1}^{K_1} \sum_{k_2=-K_2}^{K_2} R_{FG}(k_1, k_2) \\ &\quad \times W_{L_1}^{-k_1 n_1} W_{L_2}^{-k_2 n_2} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで, $n_1 = -K_1, \dots, K_1$, $n_2 = -K_2, \dots, K_2$, $L_1 = 2K_1 + 1$, $L_2 = 2K_2 + 1$ である. BLPOC 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.

実際に, POC 関数 r_{fg} と BLPOC 関数 $r_{fg}^{K_1 K_2}$ を使って本人ペアの照合を行った例を図 1 に示す. これより, POC 関数よりも BLPOC 関数を用いた方が識別性能が高いことがわかる.

3 掌紋認証アルゴリズム

位相限定相関法を用いた掌紋認証アルゴリズムについて述べる. これまでに提案されている掌紋認証アルゴリズムでは, 手の形を利用して掌紋パターンの位置や角度を合わせている [2, 4]. 具体的には, 手のひらの中心のみを正確に抽出する必要があるため, 手のひらを撮影する際に手の位置を指示する固定具を利用する必要がある. また, 固定具を使ったとしても完全に位置や角度を合わせることは困難である. これに対して, 提案するアルゴリズムでは, 位相限定相関法を用いた高精度画像マッチング手法を利用することで, 画像間の拡大縮小率, 回転角度, 移動量を求める [7]. そのため, 手のひらの位置を指示するための固定具が必要なくなり, ユーザーは手のひらをカメラに向けるだけでよいことになる.

提案する認証アルゴリズムは, (i) 拡大縮小, 回転, 位置合わせ, (ii) 共通領域抽出, (iii) 照合の 3 ステッ

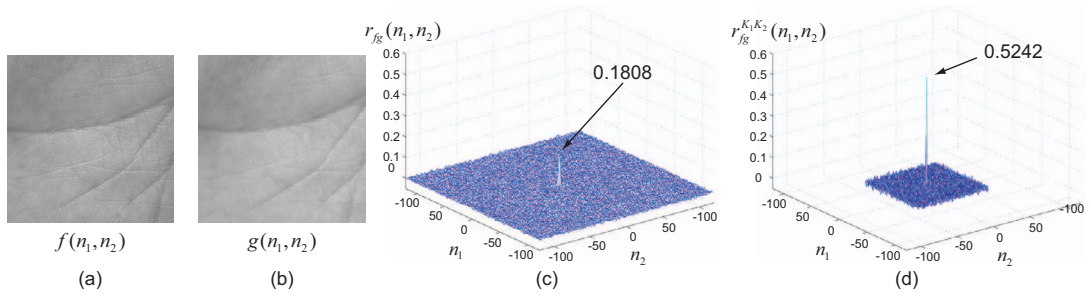


図 1: POC と BLPOC を使って本人ペアを照合した例: (a) 登録画像 $f(n_1, n_2)$, (b) 入力画像 $g(n_1, n_2)$, (c) POC 関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$, (d) BLPOC 関数 $r_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ ($K_1/M_1 = K_2/M_2 = 0.50$)

プからなる。以下では、それぞれのステップの処理について説明する。

3.1 拡大縮小, 回転, 位置合わせ

まず、画像間の位置合わせの処理について述べる。高性能に認証するためには、登録画像 $f(n_1, n_2)$ と入力画像 $g(n_1, n_2)$ の拡大縮小, 回転, 位置を正確に合わせる必要がある。

はじめに、掌紋画像に写っている背景の影響を抑えるために、それぞれの画像に窓関数を適用する。本論文では、窓関数としてハンニグ窓を用いる。ハンニグ窓は、2 枚の画像を正確に位置合わせするために、それぞれの画像の重心に対して適用する。重心は、 n_1 方向と n_2 方向の投影 (projection) を利用して求める。図 2 (a) は、掌紋画像とその重心である。また、図の (b) は、ハンニグ窓を適用した後の画像 $f_w(n_1, n_2)$ と $g_w(n_1, n_2)$ である。

続いて、画像間の拡大縮小率 λ と回転角度 θ を求める。一般的に、画像マッチングを利用して回転角度を求める場合、回転中心を基準として極座標展開 (polar mapping) し、画像の回転を平行移動に置き換える。しかし、画像間の回転中心を求めることは困難である。そこで、画像をフーリエ変換して得られる振幅スペクトルを利用する。振幅スペクトルは、画像の平行移動に関わらず、常に画像の拡大縮小と回転の中心が原点となる。振幅スペクトルを原点中心に極座標展開することで、回転角度を平行移動量に置き換えることができる。ここでは、回転角度と同時に拡大縮小率も求めるために、極座標展開ではなく、対数極座標展開 (log-polar mapping) を用いる。対数極座標展開をすることで、横軸に対する平行移

動量を回転角度、縦軸に対する平行移動量を拡大縮小率として表すことができる。以下では、 $f_w(n_1, n_2)$ と $g_w(n_1, n_2)$ の振幅スペクトルを用いて拡大縮小率と回転角度を求める処理について説明する (詳しくは、文献 [7] を参考にされたい)。

1. ハンニグ窓を適用した後の画像 $f_w(n_1, n_2)$ と $g_w(n_1, n_2)$ の 2 次元 DFT を計算し、それぞれ $F_w(k_1, k_2)$ と $G_w(k_1, k_2)$ とする。
2. それぞれの振幅スペクトル $|F_w(k_1, k_2)|$ と $|G_w(k_1, k_2)|$ を求める。自然画像の場合は、ほとんどのエネルギーが低周波領域に集中しているため、 $|F_w(k_1, k_2)|$ と $|G_w(k_1, k_2)|$ の代わりに、対数化した振幅スペクトルである $\log |F_w(k_1, k_2)|$ と $\log |G_w(k_1, k_2)|$ を使用する。
3. それぞれの振幅スペクトルの対数極座標展開を求め、 $|F_{LP}(l_1, l_2)|$ と $|G_{LP}(l_1, l_2)|$ とする。
4. $|F_{LP}(l_1, l_2)|$ と $|G_{LP}(l_1, l_2)|$ との間の BLPOC 関数 $r_{|F_{LP}||G_{LP}|}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ を計算し、相関ピークの位置を検出することで、画像間の移動量を求める。ここで、BLPOC 関数のパラメータは、 $K_1/M_1 = K_2/M_2 = 0.50$ とした。そして、求めた移動量より、画像間の拡大・縮小率 λ と回転角度 θ を計算する。

求めた λ と θ を用いて、拡大縮小と回転を補正した入力画像 $g_{w\theta\lambda}(n_1, n_2)$ を求める。そして、 $f_w(n_1, n_2)$ と $g_{w\theta\lambda}(n_1, n_2)$ の間の BLPOC 関数 $r_{f_w g_{w\theta\lambda}}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ を計算し、相関ピークの位置から画像間の平行移動量を求める。ここで、BLPOC 関数のパラメータは、 $K_1/M_1 = K_2/M_2 = 0.50$ とした。

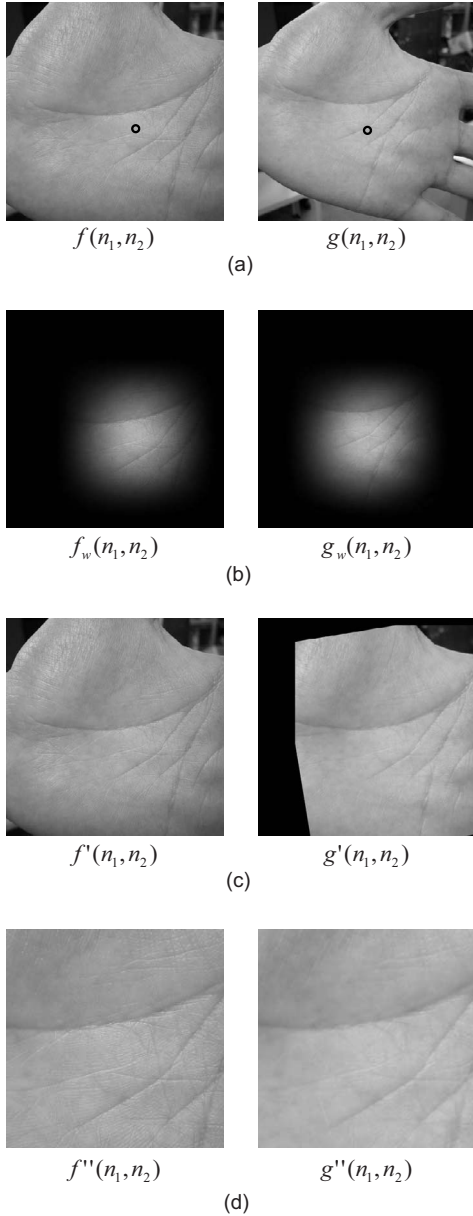


図 2: 画像間の位置合わせ : (a) 登録画像 $f(n_1, n_2)$ と入力画像 $g(n_1, n_2)$ (\circ は手のひらの重心を示す), (b) ハニング窓を適用した後の画像 $f_w(n_1, n_2)$ と $g_w(n_1, n_2)$, (c) 位置合わせをした後の画像 $f'(n_1, n_2)$ と $g'(n_1, n_2)$, (d) 抽出した共通領域 $f''(n_1, n_2)$ と $g''(n_1, n_2)$

以上のように、位相限定相関法を用いることで $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ との間の拡大縮小率、回転角度、平行移動量を求めることができる。正規化した画像を $f'(n_1, n_2)$ と $g'(n_1, n_2)$ とする。図 2 (c) に、拡大縮小、回転、平行移動を補正した後の画像を示す。

3.2 共通領域抽出

次に、正規化した画像 $f'(n_1, n_2)$ と $g'(n_1, n_2)$ の共通領域を抽出する。BLPOC 関数において、画像間で重なっていない領域は無相関なノイズ成分となる。このような領域が多く含まれていると正確に照合することができないため、画像間の共通領域を抽出する必要がある。 $f'(n_1, n_2)$ と $g'(n_1, n_2)$ の共通領域を抽出するために、 n_1 方向と n_2 方向に対する画素値の投影を利用する。抽出された共通領域は、同じ大きさであり、それぞれ $f''(n_1, n_2)$ と $g''(n_1, n_2)$ とする。図 2 (d) に抽出された共通領域を示す。

3.3 照合

最後に、共通領域 $f''(n_1, n_2)$ と $g''(n_1, n_2)$ の間の BLPOC 関数 $r_{f''g''}^{K_1K_2}(n_1, n_2)$ を計算し、照合スコアを求める。照合スコアは、BLPOC 関数 $r_{f''g''}^{K_1K_2}(n_1, n_2)$ の最大ピークの値とする。ここで、BLPOC 関数のパラメータ K_1/M_1 と K_2/M_2 は、掌紋画像の解像度に応じて最適な値を使用する必要がある。

4 実験と考察

ここでは、PolyU Palmprint Database (DB_A) [13] とデジタルカメラを使用して作成したデータベース (DB_B) を用いた性能評価実験について述べる。

DB_A は、香港理工大学が一般に公開している掌紋画像データベースである。このデータベースには、100 人の被験者から異なるタイミングで採取した 6 枚の掌紋画像 (384×284 画素) 計 600 枚が格納されている。この掌紋画像は、手の位置を固定するための固定具を有する掌紋認証装置を用いて撮影されている。そのため、画像間には、微小な位置ずれ、回転のみが生じていると考えられる。DB_B は、市販されているデジタルカメラで撮影した掌紋画像のデータベースである。このデータベースには、20 人の被験者から異なるタイミングで採取した 10 枚の掌紋画像 (640×480 画素) 計 200 枚が格納されている。手のひらを撮影する際に、被験者には、手のひらをカメラに向けるようにと伝えた。そのため、撮影のタイミングによって、画像間の拡大縮小、回転、位

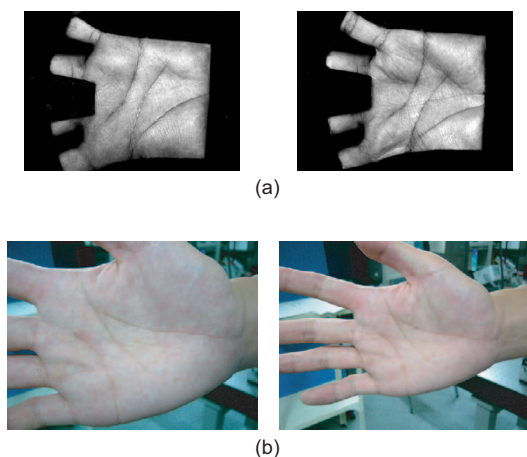


図 3: 性能評価実験で使用した掌紋画像データベース：(a) DB_A に格納されている本人ペアの例，(b) DB_B に格納されている本人ペアの例

置が大きく異なる．また，多少の射影変形も生じている．図 3 に，それぞれのデータベースに格納されている掌紋画像の例を示す．性能評価実験において，照合ステップにおける BLPOC 関数のパラメータは，DB_A に対して $K_1/M_1 = K_2/M_2 = 0.75$ ，DB_B に対して $K_1/M_1 = K_2/M_2 = 0.40$ とした．

バイオメトリクス認証システムの性能は，ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線を用いて評価される [14]．ROC 曲線は，本人と他人を識別する照合スコアの閾値を変化させて，本人受け入れ率 (Genuine Acceptance Rate: GAR) に対する他人受け入れ率 (False Acceptance Rate: FAR) をプロットすることで描かれる．まず，GAR を求めるために，同じ人の掌紋画像におけるすべての組み合わせについて照合実験を行う．DB_A に対しては， ${}^6C_2 \times 100 = 1,500$ ペア，DB_B に対しては， ${}_{10}C_2 \times 20 = 900$ ペアについて実験した．続いて，FAR を求めるために，各人の 1 番目の掌紋画像を使ったすべての組み合わせについて照合実験を行う．DB_A に対しては， ${}_{100}C_2 = 4,950$ ペアについて実験した．DB_B に対しては，すべての他人ペア (${}_{20}C_2 \times 10^2 = 19,000$ ペア) について実験した．また，性能評価の指標として， $100 - \text{GAR} = \text{FAR}$ で定義される EER (Equal Error Rate) も用いる．

本実験では，(A) 掌紋画像の特徴を用いた照合アルゴリズム [4] と (B) 提案するアルゴリズムの性能

を比較した．掌紋画像の特徴を用いた照合アルゴリズムは，掌紋画像に Gabor フィルターを適用することで画像を 2 値に符号化し，符号間のハミング距離で照合するアルゴリズムである．このアルゴリズムは，虹彩認証アルゴリズムで一般的に用いられているアイリスコード (iris code) [15] によく似たアルゴリズムである．

図 4 (a) と (b) は，それぞれ DB_A と DB_B の ROC 曲線と EER である．どちらのデータベースに対しても，提案アルゴリズムの ROC 曲線の方が左上に位置しており，認証性能が高いことを示している．また，DB_A について，提案アルゴリズム (B) の EER が 0.12% であるのに対し，特徴を用いたアルゴリズム (A) の EER は 0.45% である．DB_B についても，提案アルゴリズム (B) の EER が 0.57% であるのに対し，特徴を用いたアルゴリズム (A) の EER は 3.87% である．以上より，提案アルゴリズムは，拡大縮小や回転，平行移動している掌紋画像に対しても正確に認証することができる．これは，カメラに手のひらを向けるだけで認証できることを示唆しており，きわめて利便性の優れた認証アルゴリズムであることを示している．

5 まとめ

本論文では，位相限定相関法を用いた掌紋認証アルゴリズムを提案した．撮影条件の異なるデータベースを用いた性能評価実験より，提案アルゴリズムが従来の特徴を用いた認証アルゴリズムよりも高性能であることを確認した．提案アルゴリズムは，手のひらをカメラに向けるだけで認証できることが可能であるため，利便性の高い非接触個人認証システムの開発が可能である．今後は，認証性能を向上させるとともに，手のひらを用いた個人認証だけではなく，ヒューマンインターフェースへの応用も検討する．また，すでに提案されている位相限定相関法を用いた指紋認証，虹彩認証アルゴリズムと組み合わせることで，複数の生体特徴を利用した個人認証であるマルチモーダルバイオメトリクスへの応用を検討する．

参考文献

- [1] A. Jain, A. Ross, and S. Prabhakar, "An introduction to biometric recognition," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 4-20, Jan 2004.
- [2] D. Zhang, *Palmprint Authentication*. Kluwer Academic Publication, 2004.

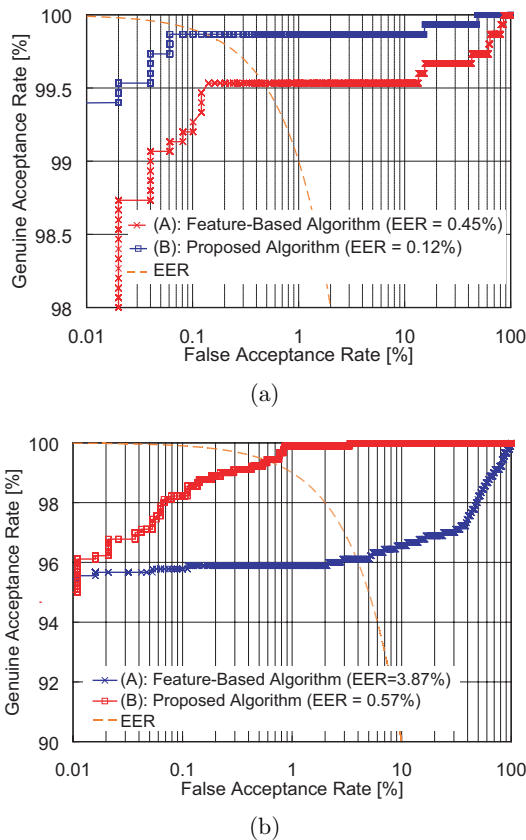


図 4: ROC 曲線と EER : (a) DB_A, (b) DB_B

[3] N. Duta, A. Jain, and K. Mardia, "Matching of palmprints," *Pattern Recognition Letters*, vol. 23, no. 4, pp. 477–485, 2002.

[4] D. Zhang, W.-K. Kong, J. You, and M. Wong, "Online palmprint identification," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 25, no. 9, pp. 1041–1050, Sept. 2003.

[5] A. Kong, D. Zhang, and M. Kamel, "Palmprint identification using feature-level fusion," *Pattern Recognition*, vol. 39, no. 3, pp. 478–487, 2006.

[6] C. D. Kuglin and D. C. Hines, "The phase correlation image alignment method," *Proc. Int. Conf. Cybernetics and Society*, pp. 163–165, 1975.

[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, Aug. 2003.

[8] 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, Mar. 2004.

[9] K. Ito, A. Morita, T. Aoki, T. Higuchi, H. Nakajima, and K. Kobayashi, "A fingerprint recognition algorithm combining phase-based image matching and feature-based matching," *Lecture Notes in Computer Science (ICB2006)*, vol. 3832, pp. 316–325, Dec. 2005.

[10] H. Nakajima, K. Kobayashi, M. Morikawa, A. Katsumata, K. Ito, T. Aoki, and T. Higuchi, "Fast and robust fingerprint identification algorithm and its application to residential access control products," *Lecture Notes in Computer Science (ICB2006)*, vol. 3832, pp. 326–333, Dec. 2005.

[11] K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, and H. Nakajima, "An efficient iris recognition algorithm using phase-based image matching," *Proc. the 2005 IEEE Int. Conf. Image Processing*, pp. II-49–II-52, Sept. 2005.

[12] K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, and H. Nakajima, "A phase-based iris recognition algorithm," *Lecture Notes in Computer Science (ICB2006)*, vol. 3832, pp. 356–365, Dec. 2005.

[13] PolyU palmprint database. [Online]. Available: <http://www4.comp.polyu.edu.hk/~biometrics/>

[14] J. Wayman, A. Jain, D. Maltoni, and D. Maio, *Biometric Systems*. Springer, 2005.

[15] J. Daugman, "High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 15, no. 11, pp. 1148–1161, Nov. 1993.