

位相限定相関法に基づく指紋照合アルゴリズムとその評価

伊藤 康一[†] 森田 歩[†] 青木 孝文[†] 樋口 龍雄^{††} 中島 寛^{†††}
小林 孝次^{†††}

[†] 東北大学大学院情報科学研究科, 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{††} 東北工業大学工学部, 〒 982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35-1

^{†††} 株式会社山武, 〒 259-1195 伊勢原市鈴川 54

E-mail: tito@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 一般的な指紋照合手法は、指紋画像から特徴点を抽出し、画像間で一致する特徴点ペアの数に基づいて指紋照合を行う手法である。指紋照合において最も困難な問題の1つとして、環境や個人的な要因によって指先の状態が変化し、それに伴って照合精度が大きく影響を受ける問題がある。この問題を解決するために、本稿では、位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) を使った指紋照合アルゴリズムを提案する。POC は、2次元離散フーリエ変換した画像より得られる位相成分を使って画像間の類似度を調べる照合法であり、状態の悪い指紋画像に対してロバストに照合することができる。本稿では、乾燥肌や肌荒れ、アレルギーなどが原因で指先の状態が悪い人から採取した指紋画像を使い、特徴点を使った照合アルゴリズムと比較して提案するアルゴリズムが高性能であることを示す。
キーワード 指紋照合, 指紋認証, 位相限定相関法, バイオメトリクス

A Fingerprint Matching Algorithm Based on Phase-Only Correlation and Its Evaluation

Koichi ITO[†], Ayumi MORITA[†], Takafumi AOKI[†], Tatsuo HIGUCHI^{††}, Hiroshi NAKAJIMA^{†††},
and Koji KOBAYASHI^{†††}

[†] Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, Sendai-shi 980-8579, Japan

^{††} Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology, Sendai-shi 982-8577, Japan

^{†††} Yamatake Corporation, Isehara-shi 259-1195, Japan

E-mail: tito@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

Abstract A major approach for fingerprint recognition today is to extract minutiae from fingerprint images and to perform fingerprint matching based on the number of corresponding minutiae pairings. One of the most difficult problems in fingerprint recognition has been that the recognition performance is significantly influenced by fingertip surface condition, which may vary depending on environmental or personal causes. Addressing this problem, this paper presents a fingerprint recognition algorithm using Phase-Only Correlation (POC). The use of phase components in two-dimensional discrete Fourier transforms of fingerprint images makes possible to achieve highly robust fingerprint recognition for low-quality fingerprints. Experimental evaluation using a set of fingerprint images captured from fingertips with difficult conditions (e.g., dry fingertips, rough fingertips, allergic-skin fingertips) demonstrates an efficient recognition performance of the proposed algorithm compared with a typical minutiae-based algorithm.

Key words fingerprint matching, fingerprint recognition, phase-only correlation, biometrics,

1. ま え が き

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、利便性に優れたシ

テムが必要とされている。現在までによく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個人認証技術が注目されている。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・網膜・虹彩・筆跡などがある。これらの中で、指紋を用いた認証システムは、その利便性より最も研究開発されている[1]。

一般的な指紋照合手法は、指紋の流れ（隆線）が途切れる点（端点）や分岐する点（分岐点）を利用する「特徴点を使った照合」である[2]。これは、登録画像と入力画像から特徴点を抽出し、2つの画像間で一致する特徴点ペアの数を調べ、その数に基づいて本人であるか他人であるかを識別する手法である。特徴点を使った照合は、多くの人々にとって有効な照合手法である。

しかし、指先の皮膚の状態が悪く、画像処理を使って特徴点を正確に抽出することが困難な人がある。このような人は、特徴点を使った照合で認証することができない。人種や性別、年齢、職業などによるが、このように指先の状態が悪く特徴点を抽出することが困難な人は、人口の1%から5%くらいいると言われている。

このような問題に対応するために、筆者らは、画像の位相情報を使って画像間の類似度を調べる位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) を使った指紋照合アルゴリズムを提案してきた[3],[4]。POCは、画像間の類似度を調べるだけでなく、移動量・回転角度・拡大縮小率も調べることができる汎用的な画像レジストレーション技術である[5],[6]。特に、画像間の移動量をサブピクセル精度で推定する必要があるステレオビジョンへの応用では、大きな役割を果たしている[7]。指紋照合に用いる場合は、一般的なPOCではなく、指紋に含まれる重要な周波数帯のみを使って照合することができる帯域制限位相限定相関法 (Band Limited Phase-Only Correlation: BLPOC) を使う。本稿では、状態の悪い指紋画像が多く含まれている指紋画像データベースを使って照合実験を行い、照合アルゴリズムのパラメータを最適化した。また、一般的に指紋照合アルゴリズムとして使用されている特徴点を使ったアルゴリズムでも照合実験を行い、提案アルゴリズムと性能を比較した。

2. 位相限定相関法

位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) の定義について説明する。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 $n_1 = -M_1 \cdots M_1$ ($M_1 > 0$) および $n_2 = -M_2 \cdots M_2$ ($M_2 > 0$) とし、画像の大きさを $N_1 = 2M_1 + 1$ 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。

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

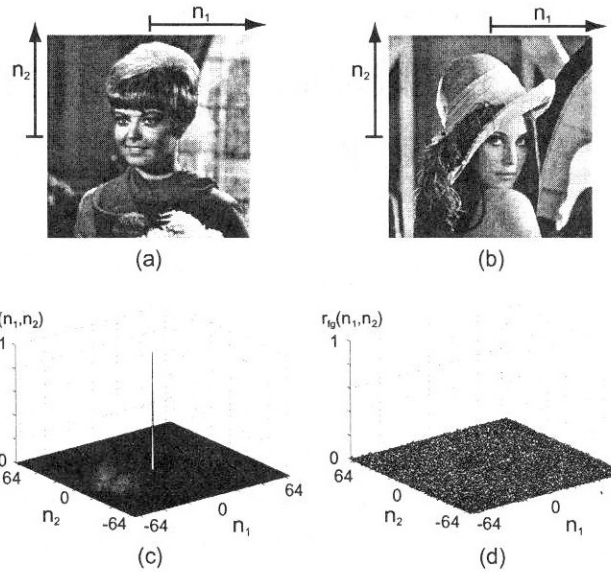


図1 POCを使った画像照合の例：(a) 画像 $f(n_1, n_2)$, (b) 画像 $g(n_1, n_2)$, (c) 全く同じ2枚の画像間のPOC関数（使用した画像は $f(n_1, n_2)$ ）、(d) $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ のPOC関数

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

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 $k_1 = -M_1 \cdots M_1$ 、 $k_2 = -M_2 \cdots M_2$ 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。

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

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。

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 $r_{fg}(n_1, n_2)$ はするどいピークを示す。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。この特性以外に、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り、これらの特性は指

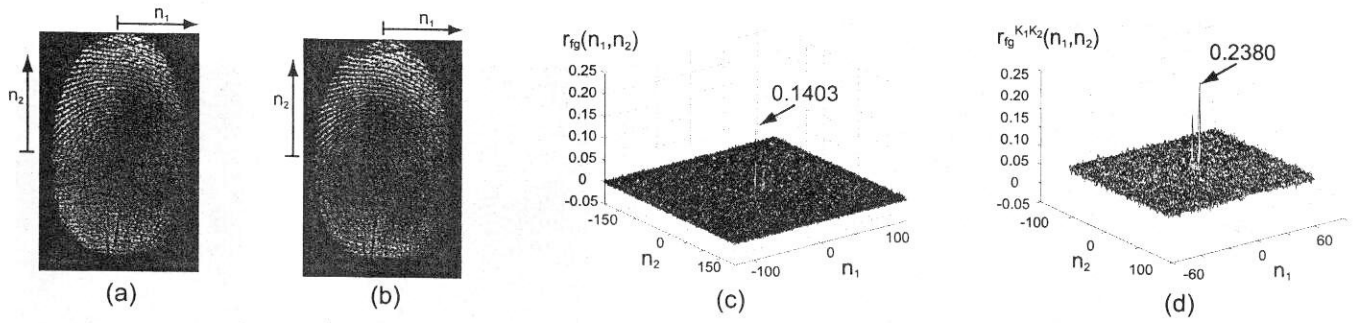


図2 通常の POC 関数と BLPOC 関数を使った本人同士の照合例：(a) 登録画像 $f(n_1, n_2)$, (b) 同じ指紋から採取した入力画像 $g(n_1, n_2)$, (c) 通常の POC 関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$, (d) BLPOC 関数 $r_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ ($K_1 = 51, K_2 = 76$)

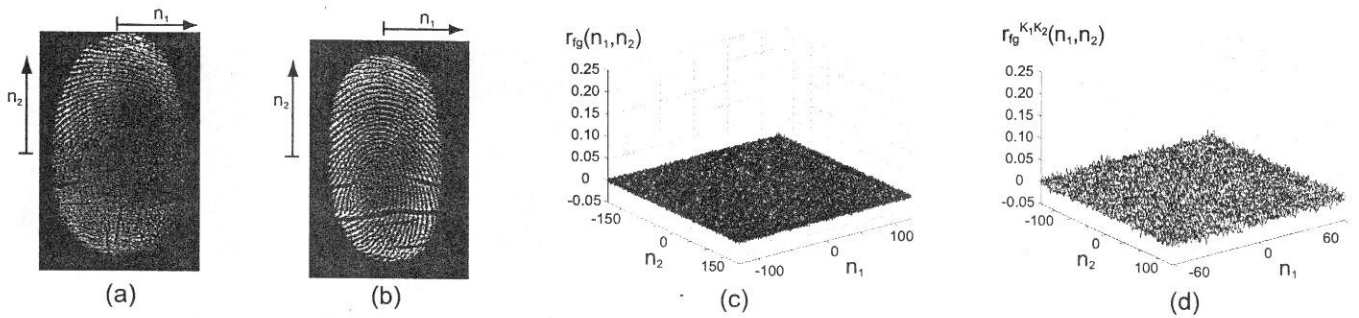


図3 通常の POC 関数と BLPOC 関数を使った他人同士の照合例：(a) 登録画像 $f(n_1, n_2)$, (b) 異なる指紋から採取した入力画像 $g(n_1, n_2)$, (c) 通常の POC 関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$, (d) BLPOC 関数 $r_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ ($K_1 = 51, K_2 = 76$)

紋照合においても有効である。これらの特性に関する詳細は、文献[4]を参考にされたい。

これまでに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) を用いている[4]。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は低周波領域にある楕円状の周波数帯に含まれていて、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、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。

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

ここで、 $n_1 = -K_1 \cdots K_1, n_2 = -K_2 \cdots K_2, L_1 = 2K_1 + 1, L_2 = 2K_2 + 1$ 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 $r_{fg}^{K_1 K_2}$ を使って本人同士の指紋照合を行った例を図 2, 3 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. 指紋照合アルゴリズム

本稿で提案する POC を使った指紋照合アルゴリズムについて

述べる。図 4 に POC を使った指紋照合アルゴリズムのフローを示す。提案するアルゴリズムは、画像間の回転と位置を正規化し、画像間の照合スコアを求めるアルゴリズムで、(i) 回転の補正、(ii) 位置の補正、(iii) 共通領域の抽出、(iv) 回転の補正と指紋照合の 4 ステップで構成される。以下に、それぞれのステップで行われる処理について説明する。

(i) 回転の補正

POC は、画像間の回転に敏感なので、高精度な指紋照合を行うためには、登録画像 $f(n_1, n_2)$ と入力画像 $g(n_1, n_2)$ との間の回転を補正する必要がある。提案するアルゴリズムでは、以下に示すように単純な方法で画像間の回転角度を求める。まず、登録画像 $f(n_1, n_2)$ を $-\theta_{max} \leq \theta \leq \theta_{max}$ の範囲で 1° 刻みに回転させた画像 $f_\theta(n_1, n_2)$ を作成する。ここで、回転画像の作成にはバイキュービック補間を用い、 $\theta_{max} = 20^\circ$ とした。次に、登録画像 $f_\theta(n_1, n_2)$ と入力画像 $g(n_1, n_2)$ との間の BLPOC 関数を計算し、最大相関ピークから 2 個の相関値の和を画像間の類似度として求める。入力画像の回転角度 θ を類似度が最大となる回転角度とし、回転補正した登録画像を $f_\theta(n_1, n_2)$ とする。

(ii) 位置の補正

回転補正した登録画像 $f_\theta(n_1, n_2)$ と入力画像 $g(n_1, n_2)$ との位置を合わせる。 $f_\theta(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ との間の POC 関数 $r_{f_\theta g}(n_1, n_2)$ を計算し、その相関ピークの座標より画像間の移動量 (τ_1, τ_2) を求める。画像間の位置を合わせるために、画像の大きさを n_1 と n_2 方向に対してそれぞれ τ_1 と τ_2 画素だけ

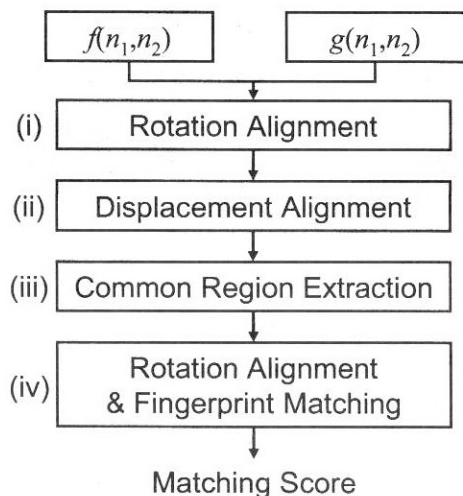


図4 指紋照合アルゴリズムのフロー

け拡大させる。以上の操作により、登録画像と入力画像を切り取ることなく位置を合わせることができる。位置を合わせた登録画像と入力画像をそれぞれ $f'(n_1, n_2)$ および $g'(n_1, n_2)$ とする。

(iii) 共通領域の抽出

2つの画像 $f'(n_1, n_2)$ と $g'(n_1, n_2)$ の重なりあっている部分(共通領域)を抽出する。POCにおいて、画像間で重なりあっていない部分は、相関のないノイズ成分となるため、高精度に照合するためには、なるべくこの部分を除去しなければならない。登録画像 $f'(n_1, n_2)$ と入力画像 $g'(n_1, n_2)$ にある有効な指紋の領域を抽出するために、 x 軸方向と y 軸方向の投影を利用する。2つの指紋画像の有効な共通領域 $f''(n_1, n_2)$ および $g''(n_1, n_2)$ を使って照合する。

(iv) 回転の補正と指紋照合

(i) の回転補正では、画像間の回転中心が指紋の中心と一致していなかったために、正確に回転を補正することができない。そこで、抽出した共通領域に対して、再び画像間の回転を補正する。ここでは、 $-2^\circ \leq \theta \leq 2^\circ$ の範囲で 0.5° 刻みに回転させた $f''(n_1, n_2)$ を用いる。2つの指紋画像 $f''(n_1, n_2)$ と $g''(n_1, n_2)$ との間のBLPOC関数 $r_{f''g''}^{K_1K_2}(n_1, n_2)$ を計算し、以下のことを考慮して照合スコアを求める。画像間の回転と位置を補正しているため、BLPOC関数の相関ピークは、原点付近に現れるはずである。そこで、BLPOC関数の原点を中心とする $W \times W$ 画素のブロックを使ってスコアを求める。また、指紋の歪みによっていくつかの相関ピークが現れるので、最大相関ピークから P 個の相関値の和を照合スコアとする。最終的な照合スコアは、得られた照合スコアの中で最大となったものとする。

4. 実験と考察

本稿では、提案する照合アルゴリズムのパラメータを最適化する実験と一般的に使われている照合アルゴリズムと性能を比較する実験について述べる。

実験で使った指紋画像データベースは、被験者30人から得

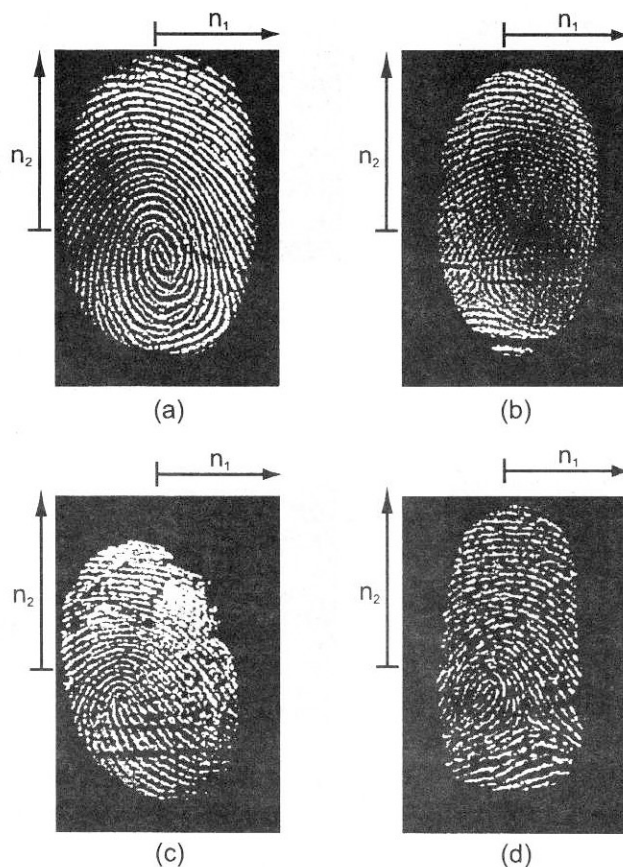


図5 データベースに格納されている指紋画像の例:(a)状態のよい人の指紋,(b)乾燥肌の人の指紋,(c)肌荒れの人の指紋,(d)肌アレルギーの人の指紋

られた指紋画像で構成されている。指紋画像は、 256×384 画素で指紋画像を撮影することができる感圧センサ(BLP-100, BMF社製)を使って撮影した。被験者のうちで20人は、指先の状態がよい人である。残りの10人は、乾燥肌(6人)、手荒れ(2人)、アレルギー(2人)が原因で指先の状態が悪い人である。実験では、すべての被験者の右人差し指を異なるタイミングで11回撮影してデータベースを作成した。実験で使用するデータベースに格納されている画像は、合計で330枚(30人 \times 11枚)ある。図5は、作成したデータベースに格納されているいくつかの指紋画像の例である。図5(a)は、状態のよい人の指紋で、(b)-(d)は、それぞれ乾燥肌の人の指紋、肌荒れの人の指紋、肌アレルギーの人の指紋である。以上のように、実験で用いる指紋画像データベースは、照合が困難な条件下で照合性能を評価するために特別に設計されたものである。

一般的に、バイオメトリクスを使った認証システムの性能は、ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線と EER (Equal Error Rate) を使って評価する。ROC 曲線とは、照合スコアの適当な閾値における他人受入率 (False Match Rate: FMR) に対する本人拒否率 (False Non-Match Rate: FNMR) を表した曲線である。本実験では、ROC 曲線を描くために、まず、可能な限りの本人同士のペア (${}_{11}C_2 \times 30 = 1650$ ペア) に対して照合実験を行い、FNMR を求める。また、それぞれのはじめの画像に対する可能な限りの他人同士のペア (${}_{30}C_2 = 435$

表1 提案アルゴリズムのパラメータを変化させたときの EER (単位: %)

(a) $L_1 = 0.2N_1, L_2 = 0.2N_2$

		P							
		1	2	3	4	5	6	7	8
W	11	6.47	7.28	7.91	8.62	9.18	9.82	10.12	10.45
	9	6.93	7.82	8.77	10.18	10.59	11.45	11.80	12.21
	7	7.15	8.35	10.18	11.21	11.95	12.62	13.19	14.04
	5	7.79	9.48	11.51	13.54	14.48	15.73	17.11	18.60
	3	8.41	11.10	15.07	19.76	24.72	28.74	33.71	39.21

(b) $L_1 = 0.25N_1, L_2 = 0.25N_2$

		P							
		1	2	3	4	5	6	7	8
W	11	3.92	4.43	5.02	5.64	6.19	6.38	6.61	6.70
	9	3.92	4.43	5.28	5.79	6.35	6.67	6.90	7.44
	7	3.92	4.54	5.40	5.96	6.32	6.96	7.64	8.38
	5	3.95	4.72	5.55	6.38	7.14	7.82	8.79	10.41
	3	3.99	5.52	7.02	9.30	13.25	18.06	23.77	30.69

(c) $L_1 = 0.3N_1, L_2 = 0.3N_2$

		P							
		1	2	3	4	5	6	7	8
W	11	2.69	2.86	3.48	3.60	3.98	4.42	4.66	4.98
	9	2.57	3.04	3.39	3.69	3.84	4.22	4.63	4.98
	7	2.57	3.10	3.25	3.54	3.75	4.54	4.81	5.20
	5	2.57	3.28	3.54	3.72	4.14	4.72	5.34	5.81
	3	2.96	3.66	4.46	5.20	7.93	11.57	16.94	23.98

(d) $L_1 = 0.35N_1, L_2 = 0.35N_2$

		P							
		1	2	3	4	5	6	7	8
W	11	2.01	1.98	2.13	2.39	2.63	2.83	3.07	3.28
	9	2.01	2.10	2.24	2.54	2.78	3.10	3.31	3.54
	7	2.01	2.07	2.28	2.63	3.22	3.37	3.69	3.89
	5	2.04	2.39	2.57	2.72	3.19	3.81	4.13	4.87
	3	2.39	3.07	3.48	4.37	5.25	7.11	9.86	15.92

(e) $L_1 = 0.4N_1, L_2 = 0.4N_2$

		P							
		1	2	3	4	5	6	7	8
W	11	1.66	1.71	1.71	1.89	1.89	2.13	2.33	2.54
	9	1.54	1.59	1.74	1.92	1.98	2.24	2.60	3.01
	7	1.54	1.59	1.68	1.92	2.10	2.51	3.01	3.18
	5	1.74	1.77	1.98	2.42	2.63	3.25	3.92	4.11
	3	1.87	2.33	2.63	3.33	3.92	5.07	6.46	8.64

ペア) に対して照合実験を行い, FMR を求める. EER とは, FNMR と FMR が等しくなるエラー率を表す. EER の値が小さければ小さいほどシステムの性能が高いことを示す.

まず, 提案する照合アルゴリズムのパラメータを最適化する実験について述べる. 提案する照合アルゴリズムの中で性能を決定する重要なパラメータとして, BLPOC 関数を計算する際の帯域幅 (L_1, L_2), 照合スコアを計算する際の BLPOC 関数のブロックサイズ W , 相関ピークの数 P がある. これらのパ

表2 提案アルゴリズムのパラメータを変化させたときの EER (単位: %)

(a) $L_1 = 0.45N_1, L_2 = 0.45N_2$

		P							
		1	2	3	4	5	6	7	8
W	11	1.86	1.86	1.71	1.86	1.92	1.95	2.06	2.16
	9	1.86	1.83	1.86	1.89	1.89	1.95	2.30	2.39
	7	1.86	1.60	1.71	1.86	1.80	2.13	2.27	2.27
	5	1.92	1.86	2.27	2.36	2.45	2.86	3.22	3.78
	3	1.95	2.01	2.22	2.51	2.99	3.75	4.58	6.16

(b) $L_1 = 0.5N_1, L_2 = 0.5N_2$

		P							
		1	2	3	4	5	6	7	8
W	11	1.95	1.74	1.83	2.01	2.04	2.16	2.16	2.30
	9	1.95	1.69	1.89	1.95	2.10	2.10	2.13	2.33
	7	1.98	2.10	1.90	2.04	2.19	2.36	2.54	2.54
	5	2.01	1.83	2.30	2.19	2.60	2.80	2.99	3.39
	3	2.13	1.95	2.33	2.34	2.77	2.92	3.40	4.28

ラメータは, データベースによって最適な値が異なる. そこで, 今回使用したデータベースに対する最適なパラメータを求めるために, これらのパラメータを変化させて実験を行い, 求めた EER より最適なパラメータを決定した. 実験では, 帯域幅 (L_1, L_2) を画像サイズ (N_1, N_2) に対する一定の割合 (画像サイズの 20%~50% で 5% 刻み) で変化させた. また, ブロックサイズ W を 3~11 で 2 刻み, 相関ピークの数 P を 1~8 で 1 刻みで変化させた. 上記のようにパラメータを変化させたときの実験結果を表 1, 2 に示す. 実験結果より, BLPOC を計算する際の帯域幅を $L_1 = 0.4N_1, L_2 = 0.4N_2$, 照合スコアを計算する際の BLPOC 関数のブロックサイズを $W = 7, 9$, 相関ピークの個数を 1 個と設定することが最適であることがわかる.

次に, 作成した指紋画像データベースを使って, (A) 典型的な特徴点を使った照合アルゴリズム (市販されている指紋照合システムに搭載されている照合アルゴリズム), (B) POC を使った指紋照合アルゴリズム [4], (C) 最適なパラメータに設定した提案する照合アルゴリズムの 3 つの照合アルゴリズムで性能評価を行った. 図 6 は, 3 つのアルゴリズムの ROC 曲線と EER である. (C) の ROC 曲線は, (A) および (B) の ROC 曲線よりも左下に位置しているため, 最も性能が高いことがわかる. また, (C) の EER が 1.54% であるのに対し, (A) の EER は 4.81%, (B) の EER は 3.03% であった. 以上より, 提案するアルゴリズムは, 指先の状態が悪い指紋画像に対して有効であることがわかる.

図 7 は, (A) と (C) に対する照合スコアの分布を示す. 垂直方向の点線は, 特徴点を使ったアルゴリズム (A) において最も高かった他人同士のスコアを示している. また, 水平方向の点線は, 提案アルゴリズム (C) において最も高かった他人同士のスコアを示している. 一般的な指紋照合システムでは, $FMR = 0$ を保証するために, 最も高い他人同士の照合スコアを閾値 Th_A (または Th_C) とする. このような閾値を用い

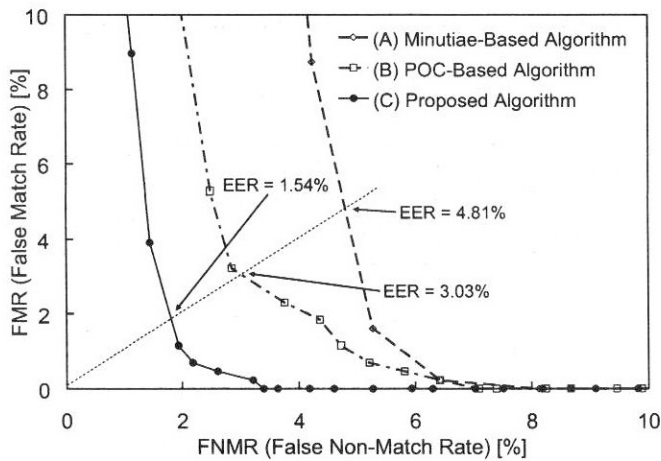


図 6 ROC 曲線と EER

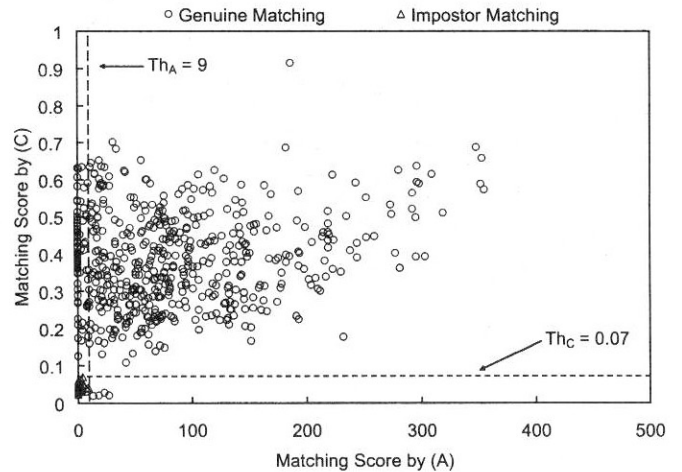


図 8 状態の悪い指紋画像に対する特徴点を使った照合アルゴリズム (A) と提案する照合アルゴリズム (C) のスコア分布

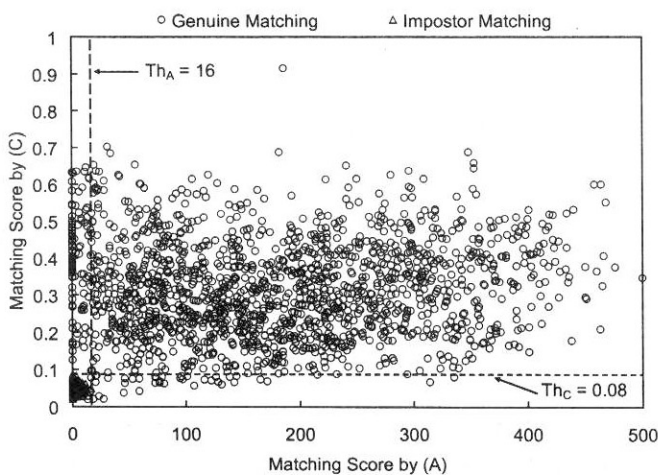


図 7 特徴点を使った照合アルゴリズム (A) と提案する照合アルゴリズム (C) のスコア分布

ると、特徴点を使ったアルゴリズム (A) は、本人同士のペアを 91.88% 正しく受け入れ、残りの 8.12% を間違えて拒否する。一方、提案するアルゴリズム (C) は、本人同士のペアを 96.73% 正しく受け入れ、残りの 3.27% を間違えて拒否する。図 8 は、状態の悪い指紋画像に対するアルゴリズム (A) と (C) のスコア分布を調べた結果である。FMR = 0 のときの特徴点を使ったアルゴリズム (A) は、本人同士のペアを 86.36% 正しく受け入れ、残りの 13.64% を間違えて拒否する。一方、提案するアルゴリズム (C) は、本人同士のペアを 98.73% 正しく受け入れ、1.27% を間違えて拒否する。この結果より、提案するアルゴリズム (C) の方が状態の悪い指紋画像に対して正確に照合していることがわかる。以上のように、提案するアルゴリズムは状態の悪い指紋に対してロバストに照合できることがわかる。

5. まとめ

本稿では、位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) を使っ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を使うことで、特徴点を使った照合アルゴリズムでは照合が困難であるような状態の悪い指紋画像に対しても精度よく照

合できることを実験を通して示した。今後は、出入管理のための指紋照合装置 [8] に提案アルゴリズムを実装することを検討している。POC を使った照合アルゴリズムは、指紋画像だけではなく、その他のバイオメトリクス (例えば、虹彩・網膜・顔・掌など) に対しても有効に活用できることが期待される。

文 献

- [1] D. Maltoni, D. Maio, A. K. Jain, and S. Prabhakar, *Handbook of Fingerprint Recognition*, Springer, 2003.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] C. D. Kuglin and D. C. Hines, "The phase correlation image alignment method," *Proc. Int. Conf. on Cybernetics and Society*, pp. 163–165, 1975.
- [6] 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.
- [7] K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki, and T. Higuchi, "A subpixel correspondence search technique for computer vision applications," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 8, pp. 1913–1923, August 2004.
- [8] Products using phase-based image matching <http://ivf.aoki.ecei.tohoku.ac.jp/>