

帯域制限位相限定相関法に基づく指紋照合アルゴリズム

A Fingerprint Matching Algorithm Based on Band-Limited Phase-Only Correlation

伊藤康一[†], 青木孝文^{*}, 樋口龍雄^{**}, 中島寛^{***}, 小林孝次^{***}

Koichi Ito^{*†}, Takafumi Aoki^{*}, Tatsuo Higuchi^{**}, Hiroshi Nakajima^{***},
and Koji Kobayashi^{***}

^{*}東北大学大学院情報科学研究科, ^{**}東北工業大学工学部, ^{***}株式会社山武,
[†]日本学術振興会特別研究員

^{*} Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

^{*} Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology

^{**} Yamatake Corporation

[†] Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

キーワード: バイオメトリクス (biometrics), 指紋照合 (fingerprint matching), 位相限定相関法 (phase-only correlation)

連絡先: 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 05 東北大学大学院情報科学研究科 青木研究室
伊藤康一, Tel.: (022)217-7169, Fax.: (022)263-9308, E-mail: ito@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

1. まえがき

ユビキタス情報化社会において, 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, 利便性に優れたシス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認証方法は, 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バイオメトリクスには, 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⁾.

指紋を使った照合法には, 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」^{2, 3, 4)} と, 指紋画像を重ね合わせて類似度を調べる「相関を使った照合」^{5, 6)} がある. 特徴点を使った照合は, 状態が悪く特徴点が抽出しづらい指紋に対して弱い, 歪みに対して強いという特徴がある. 一方, 相関を使った照合は, 歪みに弱い, 特徴点が抽出しづらいような状態の悪い指紋でも正確に照合できるという特徴がある.

本論文では、画像の位相情報を使って画像間の相関を調べる位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC)⁷⁾を使った指紋照合アルゴリズムを提案する^{5, 6)}。POCは、画像間の類似度を調べるだけではなく、位置ずれ・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。本論文では、指紋照合に特化したPOCとして帯域制限位相限定相関法 (Band Limited Phase-Only Correlation: BLPOC)を提案する。また、状態の悪い指紋画像データベースを使って、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と性能を比較した結果について述べる。

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 $N_1 \times N_2$ の画像信号を $f(n_1, n_2)$ 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 $N_1 = 2M_1 + 1$ および $N_2 = 2M_2 + 1$ とする。これらの画像信号の2次元離散フーリエ変換（以下では2次元DFTと呼ぶ）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、それぞれの画像信号の振幅成分、 $e^{j\theta_F(k_1, k_2)}$ および $e^{j\theta_G(k_1, k_2)}$ はそれぞれの画像信号の位相成分である。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、 $F(k_1, k_2)$ と $G(k_1, k_2)$ の合成 $R_{FG}(k_1, k_2)$ を次のように定義する。

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

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。 $R_{FG}(k_1, k_2)$ を2次元離散フーリエ逆変換（以下では2次元IDFTと呼ぶ）することで、通常の間関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$ を次のように定義する。

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

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。

一方、 $F(k_1, k_2)$ と $G(k_1, k_2)$ の位相限定合成 $\hat{R}_{FG}(k_1, k_2)$ を次のように定義する。

$$\begin{aligned} \hat{R}_{FG}(k_1, k_2) &= \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}|} \\ &= e^{j\theta(k_1, k_2)} \end{aligned} \quad (5)$$

POC関数 $\hat{r}_{fg}(n_1, n_2)$ は、 $\hat{R}_{FG}(k_1, k_2)$ の2次元IDFTとして、次のように表される。

$$\begin{aligned} \hat{r}_{fg}(n_1, n_2) &= \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1, k_2} \hat{R}_{FG}(k_1, k_2) \\ &\quad \times W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2} \end{aligned} \quad (6)$$

$f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ が同じ画像であるとき、すなわち $f(n_1, n_2) = g(n_1, n_2)$ であるとき、POC関数は次のようになる。

$$\begin{aligned} \hat{r}_{ff}(n_1, n_2) &= \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1, k_2} W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2} \\ &= \delta(n_1, n_2) \\ &= \begin{cases} 1 & (n_1 = n_2 = 0) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

全く同じ画像間のPOC関数は、クロネッカーのデルタ関数 $\delta(n_1, n_2)$ となることを示している。

画像照合において、POCは通常の間関法よりも高精度に照合することができる。図1は、POC

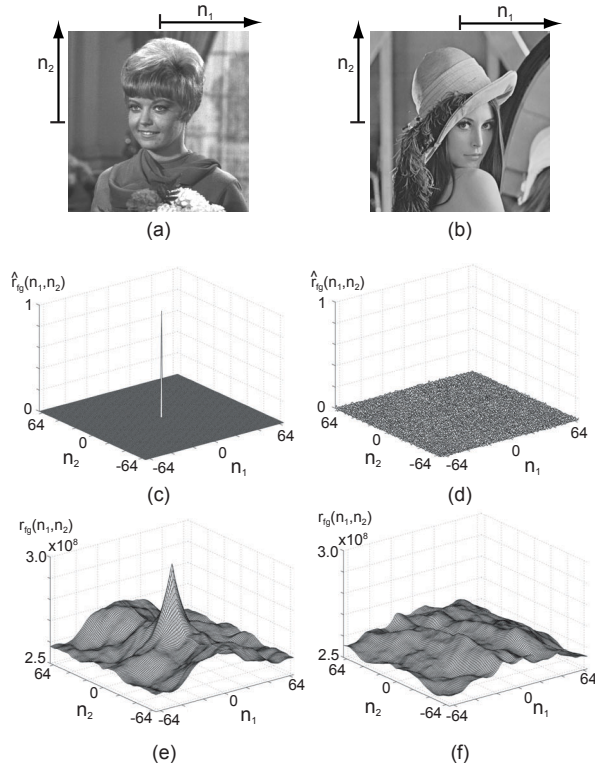


Fig. 1 POC 関数 $\hat{r}_{fg}(n_1, n_2)$ と通常の相関関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$ の例 : (a) 画像 $f(n_1, n_2)$, (b) 画像 $g(n_1, n_2)$, (c) 全く同じ 2 枚の画像間の POC 関数 (使用した画像は $f(n_1, n_2)$), (d) $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ の POC 関数, (e) 全く同じ 2 枚の画像間の通常の相関関数 (画像は $f(n_1, n_2)$), (f) $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ の通常の相関関数

関数を使って画像照合を行った例である . 類似した 2 枚の画像の場合 , その POC 関数 $\hat{r}_{fg}(n_1, n_2)$ は , するどいピークを示す . 一方 , 2 枚の画像が異なる場合は , 全くピークが現れない . このように , POC 関数は , ピークの高さを調べることで画像の類似度を計ることができ , 通常の相関法に比べて高精度に画像の照合を行うことができる . 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 6) を参考にされたい .

3. 帯域制限位相限定相関法

ここでは , 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) 関数について説明する .

筆者らは , これまでに , 登録されている指紋画像と入力された指紋画像間の POC 関数を求め , そのピークの高さを調べることで , 指紋照合に有効であることを確認している 5) . 指紋画像に含まれている重要な情報は , ほとんど楕円状の周波数帯に含まれているため , 高周波領域の位相成分には , 指紋画像として意味のない情報が含まれている場合が多い . 図 2 は , 指紋画像と 2 次元 DFT より得られる指紋画像の振幅特性である . ほとんどの指紋画像は , 図 2 のように周波数領域で楕円状の振幅特性を持っている . 一般的に , この帯域よりも高い周波数成分はエネルギーが低く , 位相成分の信頼性も低い . 位相限定合成 $\hat{R}_{FG}(k_1, k_2)$ の計算式 (5) は , $F(k_1, k_2)$ および $G(k_1, k_2)$ を各周波数成分の振幅の大小によらず常に振幅 1 の信号に変換してから合成することを意味しており , 相対的に信頼性の低い高周波成分の情報が強調されていることになる .

これに対し , 本論文では , 指紋画像の意味のない高周波成分を取り除いて位相限定合成 $\hat{R}_{FG}(k_1, k_2)$ を計算し , 照合精度を向上させる新しい POC を提案する . 図 2 (b) に示すように , 指紋画像固有の周波数帯を $k_1 = -K_1 \cdots K_1$ および $k_2 = -K_2 \cdots K_2$ とする . ここで , $0 \leq K_1 \leq M_1$ および $0 \leq K_2 \leq M_2$ である . K_1 と K_2 は , 画像処理により自動的に算出する . 有効な周波数スペクトルは , $L_1 = 2K_1 + 1$ および $L_2 = 2K_2 + 1$ となる .

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帯域制限 POC (Band-Limited POC: BLPOC) は次式で定義される .

$$\hat{r}_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2) = \frac{1}{L_1 L_2} \sum_{k_1=-K_1}^{K_1} \sum_{k_2=-K_2}^{K_2} \hat{R}_{FG}(k_1, k_2)$$

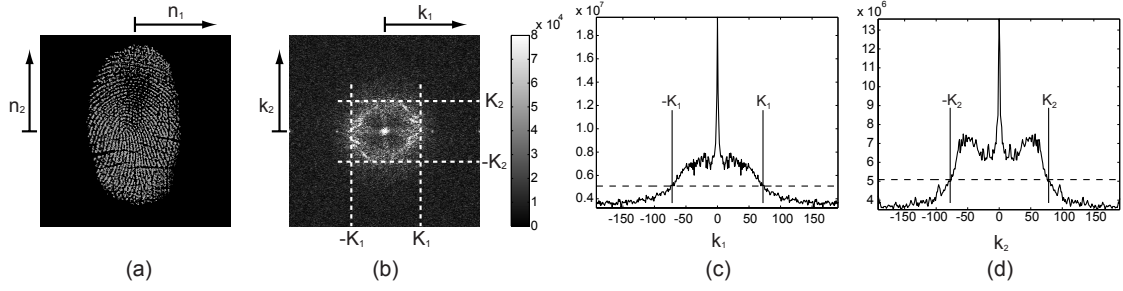


Fig. 2 (a) 空間領域における指紋画像, (b) 周波数領域における指紋画像 (振幅特性), (c) 振幅特性の k_2 軸方向に対する投影, (d) 振幅特性の k_1 軸方向に対する投影 (点線はそれぞれの投影の平均値を示す)

$$\times W_{L_1}^{-k_1 n_1} W_{L_2}^{-k_2 n_2} \quad (8) \quad \text{りも高精度な指紋照合を行うことができる.}$$

ここで, $n_1 = -K_1 \cdots K_1$ および $n_2 = -K_2 \cdots K_2$ である. BLPOC は, 制限する周波数帯域の大きさ L_1 と L_2 に依存せず, 常に相関ピークの最大値が 1 に正規化されている. 全く同じ 2 つの画像間の BLPOC 関数の形は, 常にクロネッカーのデルタ関数 $\delta(n_1, n_2)$ となる. また, オリジナルの POC 関数は, $\hat{r}_{fg}(n_1, n_2) = \hat{r}_{fg}^{M_1 M_2}(n_1, n_2)$ と表すことができる.

BLPOC 関数以外の周波数帯域を選択する POC 関数として, 適切な低域通過フィルタを位相限定合成 $\hat{R}_{FG}(k_1, k_2)$ に適用する方法がある. この方法では, 低域通過フィルタの種類によって相関ピークの形や高さが変化する⁷⁾. また, フィルタの形状に応じたピークモデルをフィッティングすることで画像の類似度を評価する必要がある. これに対し, BLPOC 関数は, 関数フィッティングのような複雑な計算を必要とせずに画像間の類似度を評価することができる.

図 3 と 4 は, 通常の POC 関数 \hat{r}_{fg} と BLPOC 関数 $\hat{r}_{fg}^{K_1 K_2}$ を使って本人同士と他人同士の照合を行った例である. 本人同士の照合の場合, BLPOC 関数は, 通常の POC 関数の最大ピークよりも高いピークを示す. 他人同士の照合の場合, BLPOC 関数は, ピークが現れないのに対し, 通常の POC 関数では, 誤ってピークを示してしまう. このように, BLPOC 関数を使うことで通常の POC 関数よ

本論文では, 入力された指紋画像に対して有効な周波数帯域 K_1 と K_2 を以下のように自動的に求めている: (i) 2 次元 DFT により指紋画像の振幅特性を計算する (図 2(b)), (ii) 振幅特性の k_2 軸方向の投影 $p_{k_2}(k_1)$ と k_1 軸方向の投影 $p_{k_1}(k_2)$ を求める (図 2(c) と (d)), (iii) 2 つの投影 $p_{k_2}(k_1)$ および $p_{k_1}(k_2)$ の平均値 $\mu_{p_{k_2}}$ および $\mu_{p_{k_1}}$ をそれぞれ求める, (iv) パラメータ K_1 と K_2 を次式で定義する.

$$K_1 = \max(\{k_1 | p_{k_2}(k_1) \geq \mu_{p_{k_2}}, 0 \leq k_1 \leq M_1\}) \quad (9)$$

$$K_2 = \max(\{k_2 | p_{k_1}(k_2) \geq \mu_{p_{k_1}}, 0 \leq k_2 \leq M_2\}) \quad (10)$$

ここで, 振幅特性は, すべての軸に対して偶対象であることに注意されたい.

指をセンサに乗せるときの膨張や収縮によって歪みが生じてしまうため, BLPOC 関数に複数のピークが現れることがある. 歪みは指紋画像のいくつかの部分が独立に移動していることを意味するため, それぞれの部分の類似度に応じた複数のピークが生じている. そこで, このような歪みに対してロバストに照合するために, 提案するアルゴリズムでは, いくつかのピークの和を類似度の評価に使うことにした. 提案アルゴリズムでは, BLPOC 関数 $\hat{r}_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ の最大ピークから P 個の和 $S_P^{K_1 K_2}[f, g]$ を照合スコアとする.

4. 指紋照合アルゴリズム

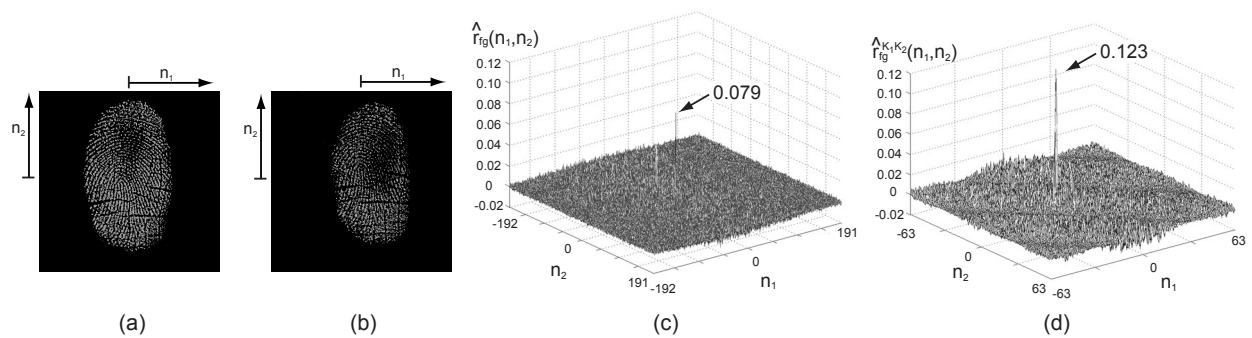


Fig. 3 通常の POC 関数と BLPOC 関数を使った本人同士の照合例：(a) 登録画像 $f(n_1, n_2)$, (b) 同じ指紋から採取した入力画像 $g(n_1, n_2)$, (c) 通常の POC 関数 $\hat{r}_{fg}(n_1, n_2)$, (d) BLPOC 関数 $\hat{r}_{fg}^{K_1, K_2}(n_1, n_2)$ ($K_1 = 63, K_2 = 63$)

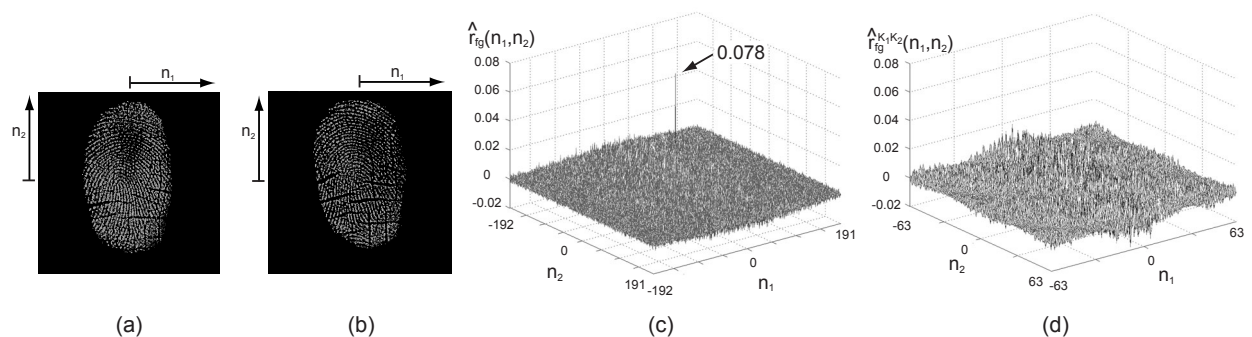


Fig. 4 通常の POC 関数と BLPOC 関数を使った他人同士の照合例：(a) 登録画像 $f(n_1, n_2)$, (b) 異なる指紋から採取した入力画像 $g(n_1, n_2)$, (c) 通常の POC 関数 $\hat{r}_{fg}(n_1, n_2)$, (d) BLPOC 関数 $\hat{r}_{fg}^{K_1, K_2}(n_1, n_2)$ ($K_1 = 63, K_2 = 63$)

BLPOC 関数を使った指紋照合アルゴリズムについて述べる．指紋照合アルゴリズムは，登録されている指紋と入力された指紋を比較し，類似度の度合い，または一致するかどうかを返す．指紋照合では，撮像のタイミングや指紋の状態の違いなどによって指紋画像に生じる変化が問題となる．原因として，(i) 指紋画像間の位置ずれ，(ii) 回転，(iii) 歪み，(iv) 皮膚の状態，(v) ノイズなどがあげられる．POC 関数は，(i)，(iv)，(v) に関してロバストである．画像間の回転 (ii) に関しては，前処理で正規化する必要がある．指紋画像の歪み (iii) に関しては，複数のピークを使って類似度を評価することで対処する．

図 5 に POC 関数を使った指紋照合アルゴリズム

を示す．提案するアルゴリズムは，はじめに入力画像を正規化し，それと登録画像を比較するアルゴリズムで，(i) 角度の補正，(ii) 位置ずれ補正，(iii) 共通領域の抽出，(iv) 指紋照合の 4 ステップで構成される．図 6 に提案するアルゴリズムを使って照合した例を示す．

(i) 角度補正 (lines 2–4)

POC 関数は，画像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 $g(n_1, n_2)$ の回転角度を補正する必要がある．POC 関数を使って高精度に指紋照合を行うためには， 1° 以下で回転を補正すればよいことが実験的にわかっている．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回転角度を求める．

procedure *Fingerprint Matching Using POC function*

Input:

$f(n_1, n_2)$: the registered fingerprint image,
 $g(n_1, n_2)$: the fingerprint image to be verified;

1. **begin**
2. store in advance a set of rotated images $f_\theta(n_1, n_2)$ of $f(n_1, n_2)$ over the angular range $-\theta_{max} \leq \theta \leq \theta_{max}$ with an angle spacing 1° ;
3. calculate the POC function $\hat{r}_{f_\theta g}^{M_1 M_2}(n_1, n_2)$ between $f_\theta(n_1, n_2)$ and $g(n_1, n_2)$;
4. calculate $\Theta = \arg \max_{\theta} \{S_1^{M_1 M_2}[f_\theta, g]\}$ to select the rotation-normalized image $f_\Theta(n_1, n_2)$;
5. estimate image displacements (τ_1, τ_2) between $f_\Theta(n_1, n_2)$ and $g(n_1, n_2)$ from the peak location of $\hat{r}_{f_\Theta g}^{M_1 M_2}(n_1, n_2)$;
6. extend the size of $f_\Theta(n_1, n_2)$ and $g(n_1, n_2)$ by τ_1 and τ_2 pixels for n_1 and n_2 directions to obtain $f'(n_1, n_2)$ and $g'(n_1, n_2)$;
7. extract the effective fingerprint regions $f''(n_1, n_2)$ and $g''(n_1, n_2)$ from $f'(n_1, n_2)$ and $g'(n_1, n_2)$;
8. detect the inherent frequency band (K_1, K_2) from the 2D DFT of $f''(n_1, n_2)$;
9. calculate the band-limited POC function $\hat{r}_{f'' g''}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$;
10. compute the matching score $S_P^{K_1 K_2}[f'', g'']$
11. **end.**

Fig. 5 POC 関数を使った指紋照合アルゴリズム

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 $f_\theta(n_1, n_2)$ を作る。ここで、画像回転にはバイキュービック補間を使った。入力画像の回転角度 Θ は、登録画像 $f_\theta(n_1, n_2)$ ($-\theta_{max} \leq \theta \leq \theta_{max}$) と入力画像 $g(n_1, n_2)$ の POC 関数求め、画像間の類似度より次式を使って決定する。

$$\Theta = \arg \max_{\theta} \{S_1^{M_1 M_2}[f_\theta, g]\} \quad (11)$$

実際には、処理時間を削減するために、あらかじめメモリに回転した登録画像を格納しておく。

そして、回転画像 $f_\theta(n_1, n_2)$ と入力画像 $g(n_1, n_2)$ の POC 関数 $\hat{r}_{f_\theta g}^{M_1 M_2}(n_1, n_2)$ を求め、相関ピークを調べる。最大ピークを示した回転画像 $f_\Theta(n_1, n_2)$ を回転を補正した画像とする。

(ii) 位置ずれ補正 (lines 5–6)

続いて、回転補正した登録画像 $f_\Theta(n_1, n_2)$ と入力画像 $g(n_1, n_2)$ との位置ずれ（並進移動） τ_1 と τ_2 をそろえる。POC 関数 $\hat{r}_{f_\Theta g}^{M_1 M_2}(n_1, n_2)$ のピークの位置が位置ずれ (τ_1, τ_2) となっている。2つの画像の位置ずれを補正するために、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 ピクセル拡大させる（図 6(c)）。以上の操作により、登録画像と入力画像を正規化することができる。正規化し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 (line 7)

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（共通部分）を抽出する。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、高精度に照合を行うためには、この部分をなるべく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 $g'(n_1, n_2)$ の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（図 6(d)）。

(iv) 指紋照合 (lines 8–10)

登録画像 $f''(n_1, n_2)$ の 2次元 DFT を計算し、指紋画像の固有の周波数帯 K_1 と K_2 を求める。そして、2つの指紋画像 $f''(n_1, n_2)$ と $g''(n_1, n_2)$ の BLPOC 関数 $\hat{r}_{f'' g''}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ を計算し、照合スコア $S_P^{K_1 K_2}[f'', g'']$ を求める。さきに述べたように、指紋の歪みによっていくつかの相関ピークが現れる。そこで、 P 個のピークを使って照合スコア $S_P^{K_1 K_2}[f'', g'']$ を求める必要がある。実験では、 $P = 2$ とした。

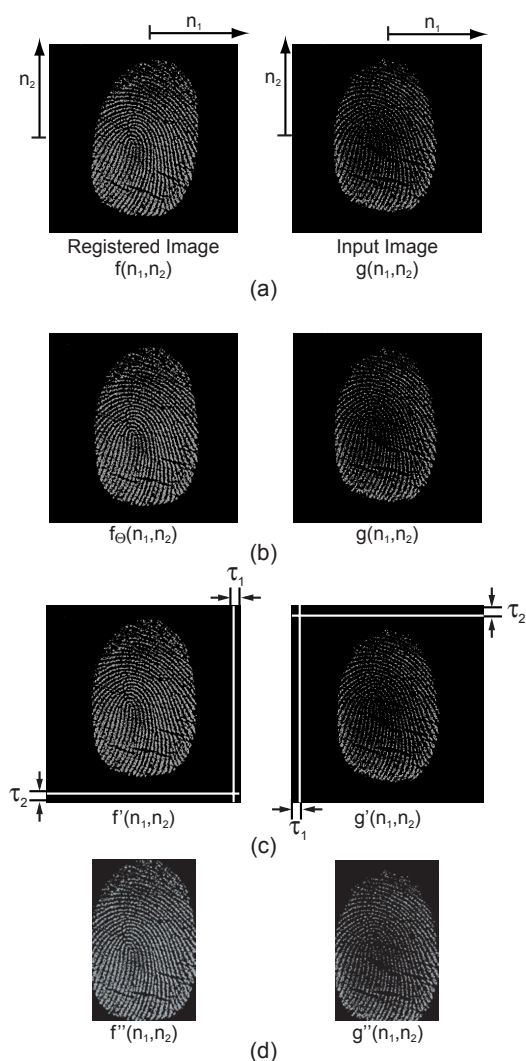


Fig. 6 提案するアルゴリズムによる指紋照合の例：(a) 登録画像 $f(n_1, n_2)$ と入力画像 $g(n_1, n_2)$, (b) 回転補正した画像 $f_{\theta}(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$, (c) 正規化した画像 $f'(n_1, n_2)$ と $g'(n_1, n_2)$, (d) 抽出した指紋の共通領域 $f''(n_1, n_2)$ と $g''(n_1, n_2)$

5. 実験と考察

POC を使った指紋照合アルゴリズムの性能を評価する実験とその結果について述べる。

実験では、指紋照合装置（株式会社山武製：フレンドタッチ・ミニの試作品）⁸⁾で採取した指紋画像を使った。指紋照合装置は、感圧センサを使用したもので、 256×384 ピクセルで指紋画像を採取することができる。被験者は、株式会社山武の工場で働いている 700 人から選んだ。提案アル

ゴリズムと実際に使われているアルゴリズムの性能を比較するために、指紋照合が困難な被験者を選んだ。選んだ被験者は次の 12 人である：(i) 8 人が男性，4 人が女性，(ii) 年齢は 20 代から 30 代まで，(iii) 7 人が状態のよい指紋，3 人が乾燥している指紋，1 人が皮膚が荒れている指紋，1 人が皮膚アレルギーを持っている指紋である。

図 7 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とその振幅特性である。図 7(a) は、状態のよい指紋で、(b)–(d) は、それぞれ乾燥した指紋，皮膚アレルギーを持っている指紋，皮膚が荒れている指紋である。状態のよい指紋は、特徴点がはっきりと現れているが、状態の悪い指紋は、照合を誤ってしまうようなあいまいな特徴点が現れている。POC では指紋全体のテクスチャを利用して照合するため、特徴点を使った照合よりも状態の悪い指紋にロバストである。また、状態の悪い指紋は、高周波成分にも低周波成分にもランダムノイズ成分が含まれることが多い。高周波領域では信号のエネルギーが低いので、位相成分も信頼性が低い。BLPOC 関数は、このような高周波領域に含まれている信頼性の低い位相成分を除去するので、照合精度を向上させることができる。

登録した指紋は、右の人差し指である。False Rejection Test (FRT) は、登録されている人物を間違えて排除してしまう確率である本人排他率 (False Rejection Rate: FRR) を調べる試験である。FRT のために、同じ人物の右人差し指を異なるタイミングで 10 回撮影した。これらの 10 指は、すべて本人であると判定されなければならない。FRT で使用する指紋画像は、120 指 (12 人 \times 10 画像) である。

一方、False Acceptance Test (FAT) は、登録されていない人物を間違えて受け入れてしまう確率である他人受入率 (False Acceptance Rate: FAR)

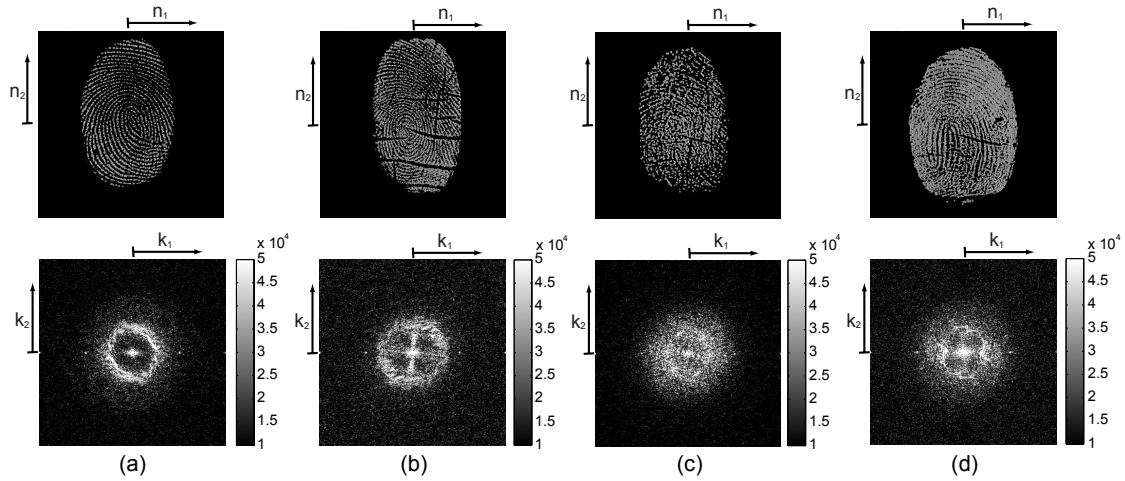


Fig. 7 データベースに格納されている指紋画像の例：(a) 状態のよい指紋，(b) 乾燥している指紋，(c) 皮膚アレルギーを持っている指紋，(d) 皮膚が荒れている指紋

を調べるための試験である．実験では，12人から採取した指紋画像を使用するので，すべての本人に対して11人の他人がいると考えられる．また，同じ12人の右中指も採取して他人の指紋画像として使用した．それぞれの登録されている指紋画像に対して，これらの23指の指紋画像が照合アルゴリズムによって拒否されなければならない．FATで使用する指紋画像は，276指（12人×23画像）である．

上記のように作成した指紋データベースを使い，(A) POCのみを使ったアルゴリズム（共通領域抽出もせず，BLPOCも使っていないアルゴリズム），(B) 典型的な特徴点を使ったアルゴリズム（市販されている指紋照合システムによく搭載されているアルゴリズム），(C) 提案するアルゴリズムの3つの照合アルゴリズムで性能評価を行った．バイオメトリクスを使った個人認証システムの性能は，照合スコアの閾値を変化させてFRRに対するFARをプロットしたReceiver Operating Characteristic (ROC) 曲線を使って評価する．図8に3つのアルゴリズム(A)–(C)のROC曲線を示す．(C)は，(A)および(B)よりもFRRもFARも低いところにROC曲線が位置しているため，最

も性能が高いことがわかる．FARが0のときのFRRは，提案アルゴリズムが2.5%であるのに対し，POCのみを使ったアルゴリズムが18.3%，特徴点を使ったアルゴリズムが14.2%である．

照合アルゴリズムの性能を比較する指標として，FARとFRRが等しい割合であるEqual Error Rate (EER) も一般的に使われている．提案アルゴリズム(C)のEERは，1.7%であるのに対し，POCのみを使ったアルゴリズム(A)は6.0%，特徴点を使ったアルゴリズムは7.0%であった．以上の実験結果より，提案するアルゴリズムは，照合が困難な指紋画像に対して有効であることがわかる．

図9と10に，3つのアルゴリズム(A)–(C)に対する照合スコアの分布を示す．図9は，(A)と(C)の照合スコアを比較した結果である．垂直方向の点線は，POCのみ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．(A)と(C)の照合スコアは，明らかに相関関係にあることがわかる．一般的な指紋照合システムでは，FAR = 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ると，POC のみを使ったアルゴリズム (A) は，本人同士のペアを 81.7% 正しく受け入れ，残りの 18.3% を間違っ 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 97.5% 正しく受け入れ，残りの 2.5% を間違っ て拒否する．

図 10 は，同様の比較を特徴点を使ったアルゴリズムと提案アルゴリズムに対して行った結果である．この場合は，それぞれ異なった指標で照合しているため，照合スコアに全く相関がないことがわかる．FAR = 0 のとき，特徴点を使ったアルゴリズム (B) は，本人同士のペアを 85.8% 正しく受け入れ，残りの 14.2% を間違っ て拒否する．一方，提案するアルゴリズム (C) は，97.5% も正確に受け入れている．

図 11–14 は，指紋画像の状態に対するアルゴリズム (B) と (C) のスコア分布を調べた結果である．それぞれ，状態のよい指紋 (7 指)，乾燥した指紋 (3 指)，皮膚が荒れている指紋 (1 指)，皮膚アレルギーの指紋 (1 指) である．これらの 4 つの図を合わせることで図 10 となることに注意されたい．状態のよい指紋の場合は，どちらのアルゴリズムを使っても正確に照合することができる．それに対し，状態の悪い指紋の場合は，提案アルゴリズムの方が正確に照合することができる．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も高精度な照合を行えることがわかる．

6. まとめ

本論文では，POC 関数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．POC を使った照合アルゴリズムは，指紋画

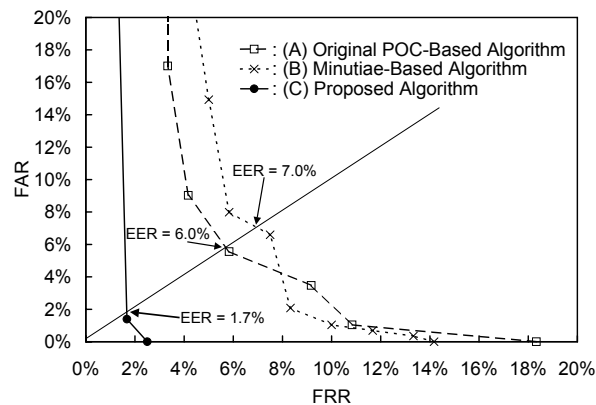


Fig. 8 ROC 曲線と EER

像だけではなく，そのほか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のではないかと期待される．

参考文献

- 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) 浅井 紘, 星野 幸夫, 木地 和夫, "マニューシャネットワーク特徴による自動指紋照合 — 特徴抽出過程 —," *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol. J72-D-II, No. 5, pp. 724–732, May 1989.
- 4) 浅井 紘, 星野 幸夫, 木地 和夫, "マニューシャネットワーク特徴による自動指紋照合 — 照合過程 —," *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol. J72-D-II, No. 5, pp. 733–740, May 1989.
- 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) T. Kenji, 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) <http://www.aoki.ecei.tohoku.ac.jp/poc/>

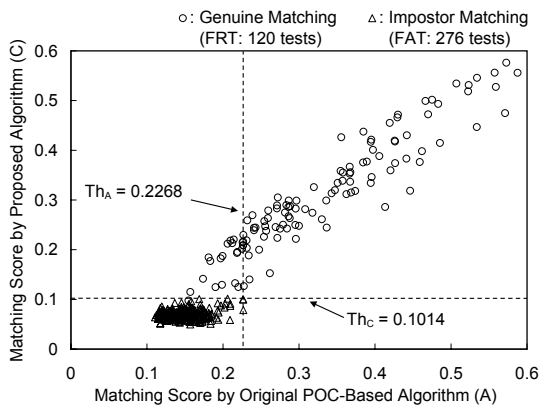


Fig. 9 提案アルゴリズムとPOCのみを使ったアルゴリズムのスコア分布

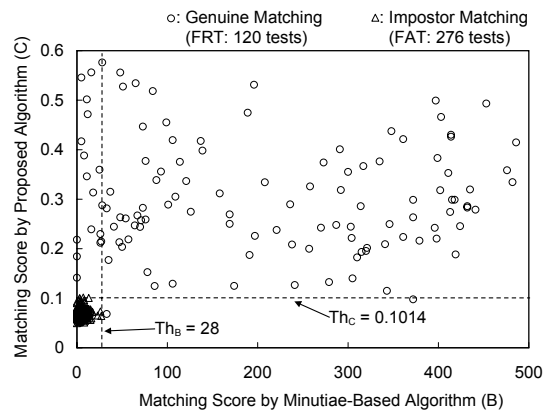


Fig. 10 提案アルゴリズムと特徴点を使ったアルゴリズムのスコア分布

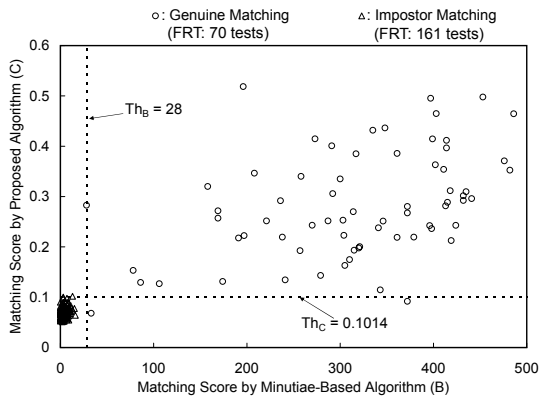


Fig. 11 状態のよい指紋（7指）に対する照合スコアの分布

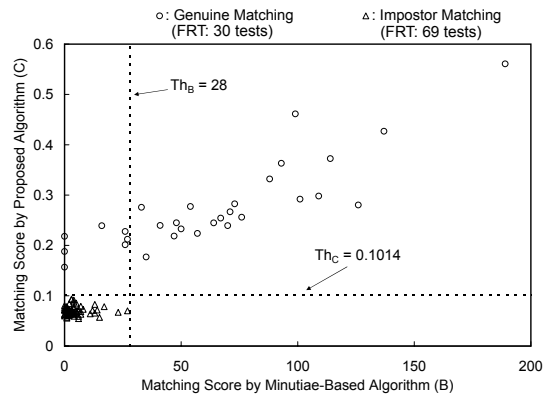


Fig. 12 乾燥している指紋（3指）に対する照合スコアの分布

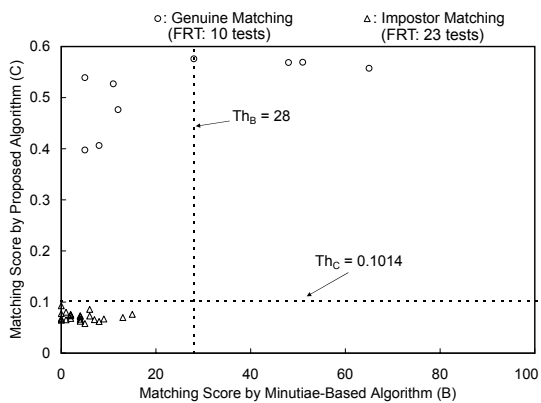


Fig. 13 皮膚が荒れている指紋（1指）に対する照合スコアの分布

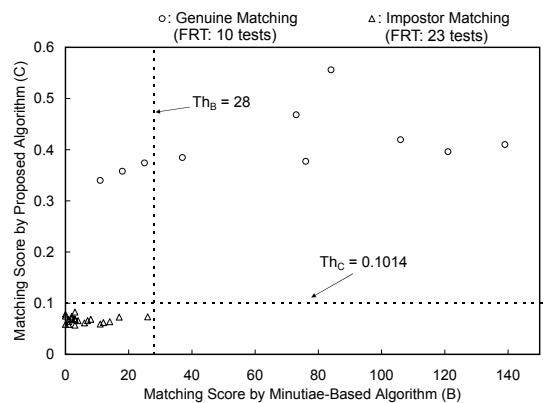


Fig. 14 皮膚アレルギーを持っている指紋（1指）に対する照合スコアの分布