

スマートフォン個人認証のための 非拘束非接触型掌紋認証アルゴリズムの検討

大脇啓吾^{†1} 岡崎直宣^{†1} 山場久昭^{†1}
高塚佳代子^{†1} 久保田真一郎^{†1}

概要: スマートフォンで個人を認証する手法として、指紋や掌紋を用いたバイオメトリクス認証の研究が様々行われている。スマートフォンの個人認証として掌紋画像を用いた認証を行う場合、掌紋画像の特徴を抽出しその特徴間の距離に基づいて認証する手法がある。掌紋画像から特徴を抽出する手法では、掌紋の歪みの影響で高い精度を確保することができない。歪み対策として掌紋画像の位相情報を用いた非接触型掌紋認証の研究が行われている。しかし、これらの研究では、掌紋画像を撮影する際に、手のひらの撮影位置を拘束しなければならないという点が課題である。本研究では、手のひらの撮影画像から抽出した特徴の一部をもとに三角形領域を描き、入力画像の三角形領域を登録画像の三角形領域に射影変換し、位相情報を用いた照合を行うことで画像間の歪みを取り除きつつ、手のひらの撮影位置を拘束しない非接触型掌紋認証アルゴリズムを提案する。

キーワード: 掌紋認証, バイオメトリクス認証, 位相限定相関法, SIFT, Delaunay 三角形分割, 射影変換

1. はじめに

スマートフォンが普及し日常的に使用するデバイスとなっている。使用者は日々たくさんのデータをスマートフォン本体やクラウド上に蓄積していくため、個人が保有するデータの取り扱いが重要になっている。一般的に使用されているスマートフォン認証は PIN(Personal Identification Number)やパターンロックなどが挙げられる。これらの方法は安全性と利便性とを比較した際に、利便性に重きを置く方法であり、安全性は使用者の意識次第で大きく変動する。現在、視き見耐性の無いこれらの手法が主流となっている理由は、使用者の意識次第で向上させることができる安全性よりも、毎日何回も認証する必要から利便性を重視しているためだと考えられる。一方で、今後ますます個人が保有するデータの取り扱いが重要となることは容易に想像でき、利便性だけではなく、安全性に気を配らなくてはならない場面は現在よりも多くなると考えられる。バイオメトリクス認証は、個人が有する生体情報を用いて認証する手法で、高い安全性を保ちつつ利便性の高い認証を可能にしている。バイオメトリクス認証において利用される生体情報の例として、指紋や顔、虹彩や声紋などが挙げられる。

本論文で使用する生体情報は、掌紋と呼ばれる手のひらにある紋様である。これまでに掌紋認証を利用したアプリがスマートフォンに実装され、高い他人拒否率と本人受け入れ率を実現している例がある[1]。掌紋認証に関して避けて通ることのできない課題として、認証に使用する領域(掌紋領域)をどのように選択し切り出すかという点がある。掌紋領域を切り出す代表的な手法として、人差し指と中指の間のくぼみの部分を 1 つのキーポイントとし、薬指と小指の間のくぼみの部分をもう 1 つのキーポイントとし、こ

れらのキーポイントを基準に掌紋領域を切り出す方法がある[2]。この手法なら、撮影方法が接触であっても非接触であっても、キーポイントを得ることができれば同じように掌紋領域を切り出すことができる。ただし、撮影環境によってはキーポイントを得ることができない場合もあることが報告されている[3]。青木らの研究では、左の手のひらを横向きに撮影するといった条件を使用者に課すことで、掌紋領域を切り出す課題を解決している[1]。しかし、「キーポイントを画面上に含むように左の手のひらを横向きに撮影する」[3]、もしくは「キーポイントを撮影画面上のポイントに置く」[1]のように手のひらが拘束される。また、掌紋を登録する際も同様に、手のひらがキーポイントにより拘束される必要がある。キーポイントによる拘束を取り除くことで、掌紋認証の利便性はさらに向上すると考えられ、指紋認証のようにユーザが手軽に利用できるスマートフォン認証になると考えられる。本研究ではキーポイントを利用しない掌紋認証を目指す。

キーポイントを必要としない掌紋認証を実現することができれば、次の 2 つを利点としてあげることができる。

- 登録する手のひらの領域(登録画像)を自由に設定できる。
- 認証時に利用する領域(入力画像)を自由に撮影できる。

1 つ目の利点により、手のひらのどの部分(例えば手のひらの右下など)を登録画像として登録するか選択肢が生まれ、悪意をもって解除しようとする第三者にとって不明な情報を増やす効果が見込まれる。

キーポイントを用いない掌紋認証として、Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) [4]などを利用した、手のひらの特徴を抽出し、特徴点と画像間の対応点との割合から求められる類似度を利用したものが考えられる。しかし、登録画像と入力画像との間の歪みによって十分な類似度が得られない場合がある。本来、SIFT などの特徴を抽出する手法は、特徴

^{†1} 宮崎大学
University of Miyazaki

点の検出とマッチングにより複数の画像をつなぎ合わせるイメージモザイクに利用される[5]ため、この手法のみによる掌紋認証は現実的ではない。本研究では、特徴を抽出することによって得られるいくつかの対応点を利用して、登録する領域を切り出し、画像間の歪みを考慮しつつ、キーポイントを必要としない掌紋認証アルゴリズムを提案する。

ここで、提案アルゴリズムの概要について述べる。

Step 1: 手のひらから抽出した特徴を基に登録画像と入力画像に三角形を描く。既に描かれている三角形の情報と登録画像にのみ描かれている三角形の情報から、入力画像に描かれていない三角形を推定し、入力画像上に描く。

Step 2: 入力画像上の三角形領域を登録画像上の三角形領域に射影変換する。

Step 3: 位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) [6][7]を用いて、手のひらにおける位相情報を用いた照合を行う。**Step1**において、入力画像に描かれる正しい三角形を推定できれば、**Step2**の処理によって画像間の歪みが取り除かれるため、位相限定相関法によって高精度な画像の照合を行うことができる。

2. 位相限定相関法

本研究において、切り出した掌紋領域を照合する処理に位相限定相関法を用いる。ここでは位相限定相関関数の概要のみを述べる。

位相限定相関法は、画像を離散フーリエ変換して得られる振幅情報と位相情報のうち、位相情報のみから相関関数を計算し、相関ピークの位置及び高さを用いて画像マッチングを行う手法であり、掌紋認証において有効であることが先行研究[6][7]により明らかとなっている。

位相限定相関関数の値は、画像間の類似の度合いが高い場合には鋭いピークを示すが、異なる画像間では全くピークが現れない。この特徴を利用して、先行研究や本研究では登録画像と入力画像間の類似の度合いを求め、照合スコアとしている。

先行研究ではキーポイントがあり、事前登録される掌紋画像の領域と認証解除時に入力される掌紋画像の領域とが同一の領域となる。キーポイントなしで掌紋領域のマッチングを行うには、事前登録された掌紋領域をもとに認証解除時に入力される画像から対応する掌紋領域を見つけなければならない。そこで、事前登録画像の特徴点のうち入力画像の特徴点と対応する点を基準として入力画像から掌紋領域を切り出す処理が必要となる。

3. Delaunay 三角形分割の概要

Delaunay 三角形分割[8]とは、二次元平面上に存在する点を基に二次元平面を三角形で「Delaunay 分割である条件」を満たすように分割する手法である。「Delaunay 分割である

条件」は次のように定義される。

- ある三角形の外接円の内部に他の三角形を構成するいかなる点も存在しない。

厳密には、4 点が同一円周上に存在する場合や、3 点が一直線上に存在する場合は Delaunay 分割である条件を満たさないが、本研究においてはこれらの 2 つの状況は考慮していない。

続いて、ある点群を Delaunay 三角形分割する手順を説明する。

Step 1: 外部三角形を作り、その頂点の 1 つを開始点とする。

Step 2: 内部の点を追加する。その後、全ての三角形の外接円を探し、追加した点を含むような三角分割を削除する。

Step 3: 今削除した三角分割の外接円の内部にある新しい点も含めて、グラフを三角分割し直す。

Step 4: 追加する点がなくなるまで、**Step2** に戻って繰り返す。

上の手順に従い、登録側の特徴点と、登録画像の外周 32pixel 間隔で配置した補助点による Delaunay 三角形分割を行った結果は以下ようになる。(図 1)

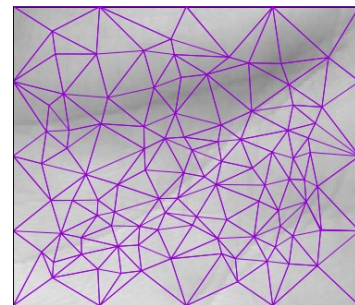


図 1 Delaunay 三角形分割の例

4. 提案アルゴリズム

キーポイントを使用しない場合、得られた対応点を利用して、登録画像に対応する領域を入力画像から切り出す必要がある。提案アルゴリズムでは、対応する三角形領域を射影変換することで対応する領域を切り出しつつ、歪みを補正する。

提案アルゴリズムを適用する際、前提条件として次の二つを設定する。

- 使用者は自分の手のひらを撮影し、あらかじめ認証に用いる領域を選択し、鍵となる画像（登録画像）を登録する必要がある。後の画像処理の便宜上、領域の大きさを、縦と横が 2 のべき乗数となるように登録する。
- 認証を行う際の撮影画像（入力画像）に登録画像の領域が含まれている必要がある。

以下、提案アルゴリズムの処理の流れを、登録画像側の処理と入力画像側の処理、両者の共通の処理と照合に分けて説明する。

4.1 共通の処理

Step 1: 登録画像と入力画像の特徴点を抽出する。特徴点抽

出には多くの手法があるが,本論文では SIFT を使用する.
Step 2: 抽出した特徴点から対応点を探索する.対応点探索には多くの手法があるが,本論文では SIFT を使用する.
Step 3: 対応点を利用して登録画像と入力画像に,対応する三角形(対応三角形領域)を描く(図 2).三角形描画アルゴリズムには Delaunay 三角形分割を用いる.

4.2 登録画像側の処理

Step 1: 共通の処理のみでは,登録画像上に三角形で覆われていない領域があるため,特徴点と,登録画像の外周に設定した補助点を利用して登録画像上に三角形を敷き詰める.ただし,特徴点を間引く処理を行い描画する三角形の数を減らす.三角形描画アルゴリズムには Delaunay 三角形分割を用いる.

Step 2: 対応三角形領域が非連結である場合,ラベル付けを行う.周辺の領域の情報を最も安定して得るために,最も大きな連結な領域のみを残す.他の対応三角形領域は削除する.

Step 3: この時点において存在する対応三角形領域を単連結にした後,入力側との矛盾が無ければ,凸ポリゴンに変形する(図 3).登録画像において凸ポリゴンにするために描いた線分と対応する入力側の線分が,三角形領域と重なる場合を矛盾と定義している.

Step 4: 登録画像上に,4.1-Step3 で描いた登録側の対応三角形領域を重ねる.この際,三角形が重なった領域については対応三角形領域を採用し,4.2-Step3 で描かれている三角形は削除する.

Step 5: この時点において登録画像上に三角形で覆われていない領域が存在する場合,その領域を三角形で敷き詰める.

4.3 入力画像側の処理

Step 1: 登録側に描かれた三角形と対応する入力側の三角形の情報から,まだ描かれていない入力側の三角形を構成する頂点の座標を推定し描いていく(図 4).頂点の座標を推定するアルゴリズムは以下に従う.

- Step 1.1: 入力側三角形の外周の一辺に注目する.
- Step 1.2: その外周を含む入力側三角形のうち,外周を構成しない頂点を取り出す.
- Step 1.3: その頂点を含む三角形を入力側三角形から全て取り出す.
- Step 1.4: 取り出した三角形から,4.3-Step1-Step1.1 で注目した外周を構成する頂点以外を,重複しないように全て取り出す(図 5).
- Step 1.5: 入力側に描く頂点の座標を決定する.(詳しくは 4.5 を参照)
- Step 1.6: 入力側に三角形を描く.

Step 2: 対応する全ての三角形を描き終わると処理を終了する.描き終わっていない場合は Step1 に戻る.

4.4 照合の処理

Step 1: 入力側三角形を射影変換し,登録側三角形と同じ領域に移す.射影変換パラメータを算出するのに用いる 4 点には,三角形の 3 つの頂点と三角形の重心を用いる.
Step 2: 登録画像に対応する領域を入力画像から切り出すことができたので,位相限定相関法を適用し,照合スコアを得る.

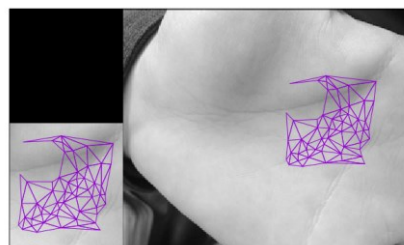


図 2 登録画像上と入力画像上に,得られた対応点を利用して対応三角形を描く.

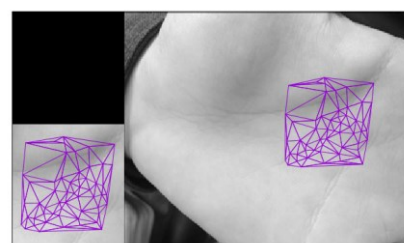


図 3 対応三角形領域を単連結・凸ポリゴンに変形する.

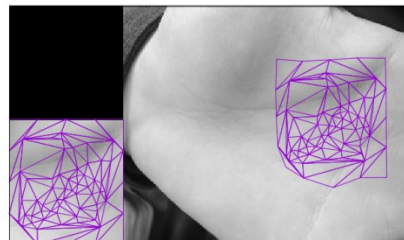


図 4 座標を推定し描かれた入力側三角形領域(右)

4.5 登録側三角形と入力側三角形の対応

ここでは提案アルゴリズム 4.3-Step1-Step1.5 について詳しく説明する.

入力側で注目した外周の 1 辺に対して,入力側で頂点の座標を 1 つ定めることで入力側に三角形を描くことができる.座標を定めるために,

- 入力側の 1 辺 mn と,対応する登録側の 1 辺 $m'n'$
- 重複しないように取り出した入力側の各頂点(図 5)と,対応する登録側の各頂点(図 6)
- これから推定する入力側の頂点を P としたとき,対応する登録側の頂点 P' (図 6)

これらの情報を利用する.

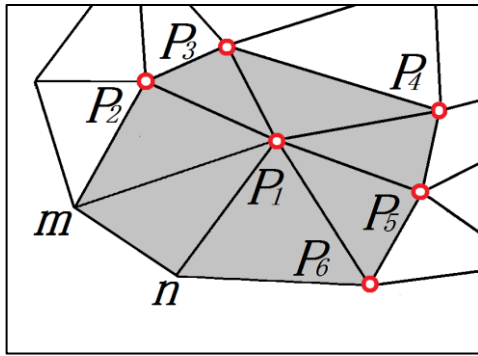


図 5 注目している外周mnに含まれない頂点 P_1 を利用して取り出した入力側の頂点 $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$

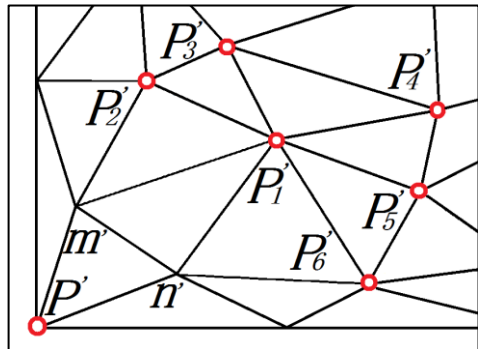


図 6 入力側で推定する頂点 P に対応する登録側の頂点 P' と、入力側で取り出された点 $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ に対応する登録側の頂点 $P'_1, P'_2, P'_3, P'_4, P'_5, P'_6$.

入力側の頂点を推定するために、提案アルゴリズムでは、「手のひらの性質上、ある三角形の対応と、その周辺に描かれる三角形の対応は比較的似ている」という仮説を立てる。この仮説を利用して周辺の三角形の対応関係まで考慮して入力側の頂点の座標を推定する。この仮説の根拠は、提案アルゴリズムで補正することができる歪みの範囲内であるならば、手のひらのある領域は、その周辺の領域と、連続した領域であるとみなすことができるからである。

これから、対応関係をどのように調べていくのか具体的に説明する。 ΔmnP_1 と $\Delta m'n'P'_1$ との関係、 ΔmnP_2 と $\Delta m'n'P'_2$ との関係、 \dots 、 ΔmnP_6 と $\Delta m'n'P'_6$ との対応関係を調べる。それぞれの対応関係を調べることで、入力側に描く頂点の座標の候補がそれぞれ得られる。最後に、全ての候補点の座標の重心を、入力側三角形の頂点の座標とする。対応関係を調べる際に、注目している外周の1辺を x 軸、 x 軸に対する垂直二等分線を y 軸とする座標系を導入する。それぞれの座標において向きを定める必要がある。 x 軸に対して、推定する頂点が存在する領域を y 軸の正の領域とし、 y 軸の向きを設定する。 x 軸は、推定する頂点が存在する領域が左側にあるように向きを設定する。この座標系において x 座標と y 座標を推定することで入力側三角形の頂点の座標を推定することができる。

以下、それぞれの座標を推定する方法を述べる。

4.6 y座標の推定

入力側に描かれる三角形の高さを h_4 とすると

$$h_4 = \left| \frac{h_1 \times h_3}{h_2} \right| \quad (1)$$

と表すことができる。(図7)したがって、推定する座標の y 座標は h_4 となる。

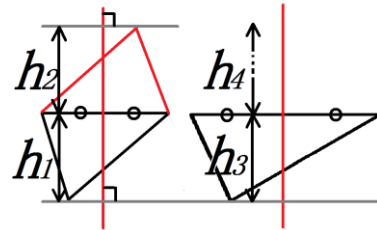


図 7 入力側三角形の頂点の y 座標を推定する。登録側三角形(左)、入力側三角形(右)

4.7 x座標の推定

登録側と入力側の外周の1辺の長さをそれぞれ w_1, w_4 とする。また、垂直二等分線からの符号付距離として w_2, w_3, w_5 が求められる。ここで登録側三角形の頂点 ab 間の符号付距離を w_6 、入力側三角形の頂点 cd 間の符号付距離を w_7 と表すと、 w_6, w_7 は次のように表すことができる。(図8)

$$w_6 = w_3 - w_2 \quad (2)$$

$$w_7 = \frac{w_4 \times w_6}{w_1} \quad (3)$$

よって、推定する頂点 d の x 座標は $w_5 + w_7$ となる。

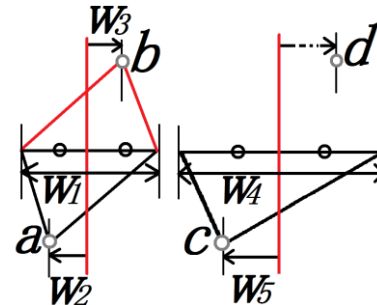


図 8 入力側三角形の頂点の x 座標を推定する。登録側三角形(左)、入力側三角形(右)

5. 評価実験

提案アルゴリズムの評価実験について述べる。提案手法が有効であるということを確認するには、提案する掌紋認証がそもそも認証として利用可能であるかを確認しなければならない。つまり、提案する掌紋認証により、低い本人拒否率と他人受入率が得られる必要がある。提案する掌紋認証が認証として利用できるか確認するために、2つの実験を行った。まず、実験に用いる掌紋画像について説明する。25人の被験者に対して左右6枚ずつの掌紋画像を収集し、そのうち1枚を登録画像とし、残りの掌紋画像を認証のための入力画像として用いた。その枚数は250枚(=25(人)×5(枚)×2[左右])となる。実際の認証時を想定し、スマートフォンに

付属しているカメラで撮影するよう被験者に指示し、その機種での指定は行わなかった。

本研究で行った2つの実験について述べる。

実験1: 1枚の登録画像に対して他の5枚の掌紋画像を入力画像とし、本人拒否率から考察する。

実験2: 1枚の登録画像に対して、他人の掌紋画像を入力画像とし、他人受入率から考察する。ただし、他人の掌紋画像であっても、左(右)手の掌紋画像に対して、右(左)手の掌紋画像は入力画像としない。

これから、実験1において必要となる閾値の設定について述べる。実験によって得られる照合スコアは、対応点によって描かれる三角形群(初期三角形群)の対応の精度に大きく影響を受ける。すなわち、

- 類似度が低い
- 類似度は高いが、初期三角形の数が少ない(特徴点の数も対応点の数も少ない場合)

といった場合には、提案アルゴリズムによる恩恵を受けることができない。そこで、提案アルゴリズムが有効に働くために最低限必要となる類似度と対応点の数の閾値を設定する必要がある。この閾値の設定は、実験に先立って行うことができないので、実験の結果から考察して決定する。また、提案アルゴリズムを適用した結果が本人の掌紋画像ペアであるかを判定するために、照合スコアの閾値を設定する必要がある。そこで本論文では、位相限定相関法について多くの関連論文を公表している青木らの論文[3][6]を基に、0.2を閾値に設定した。

続いて実験1の前処理について述べる。提案アルゴリズムに最低限必要となる類似度と対応点の数を決定するために、掌紋画像の特徴を得る際に前処理を適用することで特徴点の数を変動させる。一般に、特徴点を抽出する過程において鮮鋭化処理と平滑化処理を適用することで、特徴を保持したままノイズを低減することができるため特徴点抽出の精度は高くなる[5]。また、抽出される特徴点の数が変動することを実験的に確認している。今回はこの鮮鋭化処理と平滑化処理を前処理と定義し、この前処理を繰り返すことで特徴点の数を変動させ、それに伴い類似度と対応点の数を変動させる。鮮鋭化処理には、以下のフィルタを用いる。

$$\begin{bmatrix} 0 & -2 & 0 \\ -2 & 9 & -2 \\ 0 & -2 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

また、平滑化処理にはガウシアンフィルタを用い、窓幅を 3×3 、標準偏差を 1.6 とした。

なお、実験を繰り返した結果、前処理を7回繰り返した場合に照合スコアに関して最も良好な結果が得られたため、この場合の実験結果と前処理を行わなかった場合の実験結果を比較、考察する。

続いて実験2について述べる。他人の掌紋画像との照合を行うため、多くのパターンで類似度が低いものになると考えられる。そのため、対応点によって三角形が一つも描か

れなかった場合は提案アルゴリズムを適用せずに別人の掌紋画像ペアであると判定する。しかし、中には別人の掌紋画像ペアであるにも関わらず、似ている掌紋パターンの場合には対応点によって三角形が描かれることもある。そのような場合、対応点付近の類似の度合いが高くなるが、対応点によって描かれた三角形の内部の領域は類似の度合いが低くなるため、照合スコアは閾値 0.2 よりも小さくなると考えられる。したがって、実験2において閾値 0.2 よりも小さい場合は他人の掌紋画像だと正しく判定できたとみなし、0.2 を超えた場合は誤りであるとみなすことで、性能の評価を行う。

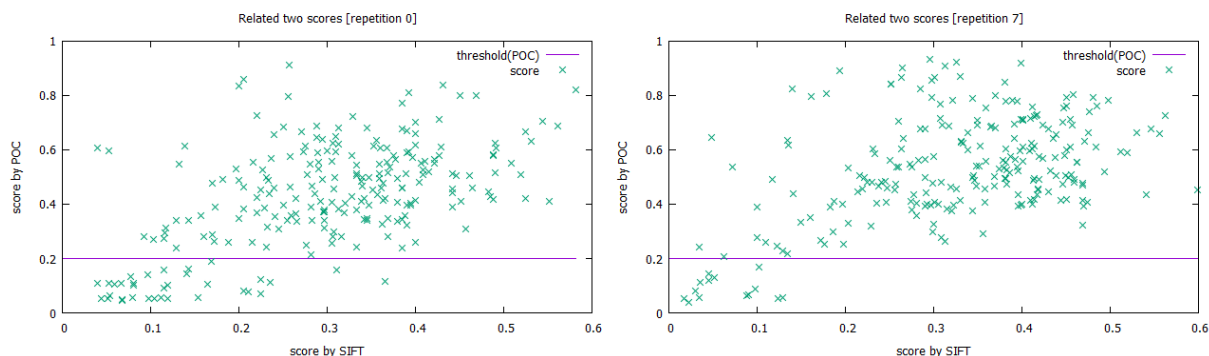
実験の結果は考察と併せて述べる。

6. 考察

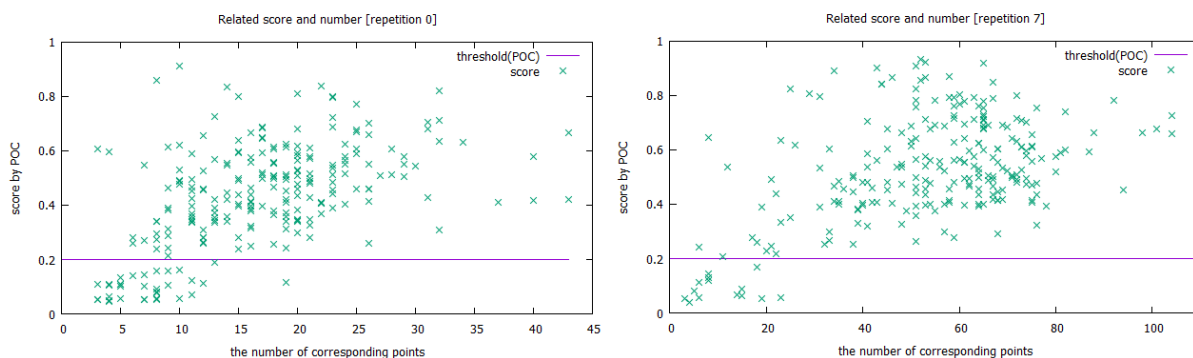
実験1の結果について考察する。繰り返し回数0回の場合の本人拒否率は 16.8%、繰り返し回数7回の場合の本人拒否率は 8.8%となった。これは、前処理の繰り返しにより対応の精度が向上したからである。本人拒否率 8.8%は、キーポイントを用いる手法に比べると低い結果である。この結果を考察するために、グラフ1とグラフ2について考える。横軸に類似度をとったグラフ1では、類似度が高いにも関わらず、照合スコアが 0.2 を下回っているケースが散在している。これは、類似度は高いが初期三角形の数が少ない例であると考えられる。よって、類似度では提案アルゴリズムが有効となる閾値は設定できない。横軸に対応点の数をとったグラフ2では、対応点の数がおよそ 20 個あるならば、照合スコアが 0.2 を超えることを読み取ることができる。この 20 という数は、20 個の対応点を利用して三角形領域を描き、外周を1辺に持つ1つの三角形に注目する際、周辺の三角形の情報を偏りなく利用するために必要な対応点の数であると言える。つまり、提案アルゴリズムが有効に働くためには対応点がおおよそ 20 個存在する必要がある。これは、SIFT 以外の特徴点抽出・対応点探索を行った場合であっても同様であると考えられる。

実験2について考察する。行った実験パターンは $6000(=25(\text{人}) \times 120(\text{枚}) \times 2[\text{左右}])$ である。そのうち、ほとんどのパターンは初期三角形が作れないことによって処理を打ち切り、全体の 99.46%であった。0.54%は別人の掌紋パターンであるにも関わらず三角形を構成し、提案アルゴリズムが適用された。その中で照合スコアの閾値 0.2 未満にとどまったものは 93.75%となり、0.2 以上となったのは 6.25%という結果となった。この結果より、実験における他人拒否率は 99.96%であり、実用的な値であると言える。

以上の考察より、提案アルゴリズムが実用的な認証として利用されるためには、本人拒否率が課題となることがわかる。提案アルゴリズムは特徴点抽出・対応点探索の精度に依存するので、「対応点がおおよそ 20 個抽出された場合」という条件を課さなければ掌紋認証として利用するには実用的ではないことがわかった。



グラフ 1 繰返し 0 回における対応点数と照合スコアの相関(左),繰返し 7 回における対応点数と照合スコアの相関(右)



グラフ 2 繰返し 0 回における類似度と照合スコアの相関(左),繰返し 7 回における類似度と照合スコアの相関(右)

7. まとめ

本論文では,従来の掌紋認証における課題として挙げられる,「手のひらが拘束される」条件を課さない掌紋認証のために,スマートフォンにおける認証を想定した,非接触で非拘束な,キーポイントを用いない掌紋認証アルゴリズムを検討した.手のひらから抽出された特徴の一部を利用して三角形領域を描き,入力画像に描かれた三角形領域を登録画像に描かれた三角形領域に射影変換することで,歪みを取り除きつつ,手のひらの位相情報を用いて認証を行う手法を提案した.実験の結果より,「手のひらが拘束される」条件を課さずに実用的な範囲で認証を行うには,対応点がおよそ 20 個抽出される必要があることがわかった.今後は,入力画像上に三角形を描いていく手法を見直し,より精度を高めることで,必要となる対応点の数を減らすことが課題である.現在,一度大きなズレが生じてしまうと,そのズレを戻す手段が存在しない.1 度の推定のみで座標を決定するのではなく,必要なら既に決定された座標を修正するなどの処理が考えられる.また,ズレが発生する可能性を低減するために,入力画像上に描く三角形の数を,登録画像の特徴点を間引くことによって減らしているが,正確に三角形を描くことができる,もしくは,ズレを戻す方法が存在するならば,入力画像上に描く三角形の数を減らす必要はなくなり,三角形がより細くなることで歪みを補正する能力が向上すると考えられる.また,別の課題として,射影変換している画像における特徴を抽出できない SIFT を利用してい

ることが挙げられる.他の特徴点抽出法・対応点探索法を用いて,提案アルゴリズムが有効に働くために必要となる対応点の数を測定する必要がある.

参考文献

- [1] "Android 端末のロック解除を実現する掌紋認証アプリを開発".
<http://www.kddilabs.jp/assets/files/press/208.pdf>
- [2] 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.
- [3] 青山章一郎, 伊藤康一, 青木孝文, 太田陽基, "携帯電話向け非接触掌紋認証アルゴリズム", 電子情報通信学会論文誌 A, 基礎・境界, Vol. 96, No.5, pp.250-263, may,2013
- [4] "Gradient ベースの特徴抽出-SIFT と HOG-"
http://www.vision.cs.chubu.ac.jp/SIFT/PDF/sift_tutorial.pdf
- [5] デジタル画像処理[改訂新版], 奥富正敏(編), CG-ARTS 協会, 2015.
- [6] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi, "High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correction," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E86-A, no.8, pp.1925-1934, Aug. 2003.
- [7] 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.682-692, March 2004.
- [8] Delaunay Mesh Generation, Siu-Wing Cheng, Tamal K. Dey, Jonathan Shewchuk, CRC Press, 2012
- [9] 田島裕一郎, 宮澤一之, 青木孝文, 勝亦敦, 小林孝次, "3次元位相限定相関法に基づく高精度ボリュームレジストレーション", 電子情報通信学会論文誌.D, 情報・システム, Vol.94, No.8, pp.1398-1409, aug,2011.