

画像中の指紋領域抽出

Fingerprint extraction in an image

佐藤佑飛[†]
Yuhi Sato

小早川倫広[‡]
Michihiro Kobayakawa

1 目的

指紋は、個人によって異なり一生変化しないという特徴を有するため、本人認証手段や犯罪捜査などに生体情報として広く利用されている。その一方で、指紋が写っている写真から指紋の復元が可能であると報告されている [1]。この報告は、スナップ写真から生体情報が抽出できるということを示唆している。つまり、指紋が写っているスナップ写真(画像)をネットワーク上に公開すると、他人がネットワークを経由して生体情報を窃取することが可能となる。他人に生体情報が渡ってしまうと、例えばなりすましなどに悪用される危険がある。したがって、画像中から指紋領域を抽出するアルゴリズムの開発が必須である。

本稿では、画像中から指紋が写っている領域を抽出するための指紋領域抽出アルゴリズムを提案する。また、提案する指紋領域抽出アルゴリズムを実装し、評価を実施する。

2 関連研究

本節では、提案手法の抽出対象である指紋について説明し、指紋が撮影された画像から生体情報が抽出できることを述べる。また、画像に指紋が写っているかどうかの判別に必要となる指紋を表現する手法について述べる。

2.1 指紋が撮影された画像からの生体情報抽出

指紋は指の末節にある表皮が隆起した線(隆線)で形成される紋様である(図 1)。そして、隆線の端点や分岐点のことを特徴点という。

大金ら [2] は、指紋の盗撮を防ぐための指への装着具を提案および実装するにあたって、指の幅が 141 ピクセル以上となる画像からは指紋が抽出される可能性があることを示した。これは、2本の隆線を区別できる最小の隆線間隔が $2\sqrt{2}$ ピクセルであり、デジタルカメラ(2400万画素、焦点距離 135mm)で撮影された指の幅が 591 ピクセルのときに隆線間隔の最頻値が 11.8 ピクセルとなったことによる。また、大金らは、特徴点の位置関係を利用する指紋認証アルゴリズムにおいて、指の幅が 229 ピクセル以上となる画像と指紋センサから取得した指紋画像はマッチングに成功することを実証した。すなわち、指紋が撮影された画像から生体情報の抽出が可能である。

2.2 指紋の表現

指紋(隆線の紋様)を表現する手法には、指紋画像中の局所的な隆線方向にもとづく手法がある [3]。この手法において、

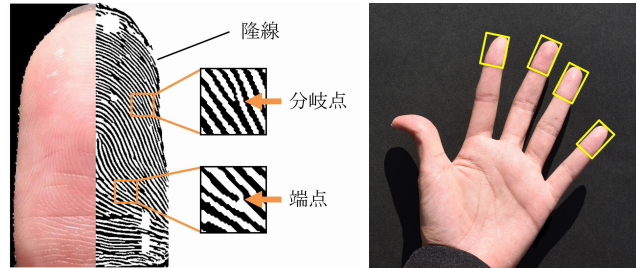


図 1 指紋

図 2 画像中の指紋領域抽出

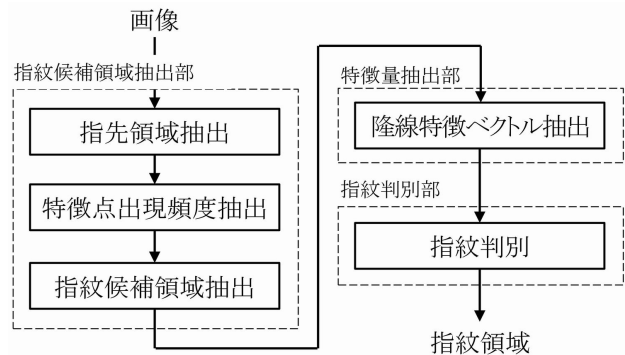


図 3 指紋領域抽出アルゴリズムの構成

隆線の紋様は指紋画像から分割された画素ブロック中での支配的な隆線の方向を要素とするマップとして表現される。

3 指紋領域抽出

指紋領域抽出アルゴリズムは、図 2 に示すように、入力された画像から指紋領域(図中の枠内)を抽出する。このアルゴリズムは、指紋領域を指紋領域ではないと判別するような誤判別をできるだけ避けるため、指紋領域を指紋領域ではないと判別する誤判別を許容するように設計する。指紋領域抽出アルゴリズムの構成を図 3 に示す。指紋領域抽出アルゴリズムは、1) 特徴点の出現頻度に着目した指紋候補領域抽出部、2) 隆線の紋様に着目した特徴量抽出部、3) 2 値分類器を用いた指紋判別部、からなる。

3.1 指紋候補領域抽出部

指紋候補領域抽出部では、画像から指先領域を抽出(指先領域抽出)し、抽出された指先領域から特徴点出現頻度を抽出(特徴点出現頻度抽出)することで指紋候補領域を抽出する。

3.1.1 指先領域抽出

指先領域は、指の先端から最初の関節までの領域である。指先領域を抽出するために、まず、画像から肌色の画素を抽出することで手領域 H をセグメンテーションする(図 4(a))。次に、

[†] 筑波大学, University of Tsukuba

[‡] 東京都立産業技術高等専門学校, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology

手領域に対して Top-Hat 変換を使用した指先検出 [4] を行う。手領域 H に対する Top-Hat 変換 T_w は式 1 で表現される。

$$T_w(H) = H - (H \circ SE) \quad (1)$$

ここで、 $H \circ SE$ はモルフォロジー演算の Opening を H に適用することで得られる領域であり (図 4(b)), $T_w(H)$ は Top-Hat 変換で得られる領域である (図 4(c))。指先は $T_w(H)$ に含まれる独立したそれぞれの領域において $H \circ SE$ の重心から最も遠い点である (図 4(d))。

続いて、検出された指先を上端中央とする正方形内で、面積が最大の領域をそれぞれ指領域として抽出する (図 5(a))。そして、平滑化した指領域を指先から指の付け根に向けて走査することで明度が低い太線がある位置 (関節位置の候補) を列挙し、列挙した関節位置の候補を K-means 法で 2 つのクラスタに分類する (図 5(b))。指先に近いクラスタの重心を関節位置とし、指領域を指先から関節位置までトリミングすることで指先領域を抽出する。

3.1.2 特徴点出現頻度抽出

特徴点出現頻度 m は MINDTCT パッケージ [5] で指先領域から検出される特徴点の総数である。MINDTCT は、NIST (National Institute of Standards and Technology) が開発するオープンソースソフトウェアで、入力された指紋画像から検出した特徴点情報 (位置や方向など) の一覧を出力する。

特徴点出現頻度抽出では、指先領域を 8 ビットグレースケール変換し、指先領域の幅が 300 ピクセルになるようにリサイズしたあと、隆線を強調するために適応ヒストグラム均等化処理を行い、MINDTCT に入力することで特徴点出現頻度 m を抽出する (図 6)。

3.1.3 指紋候補領域抽出

抽出された特徴点出現頻度 m がしきい値 m_t よりも大きくなった指先領域を指紋候補領域とする。しきい値 m_t は実験で決定する。

3.2 特徴量抽出部

特徴量抽出部では、隆線の紋様を表現する特徴量である隆線特徴ベクトルを指紋候補領域から抽出する。隆線特徴ベクトル O を求めるために、指紋候補領域を 300 ピクセル四方にリサイズし、指の概形を除去するトリミングを行う。そして、トリミングした領域をタイリングして得られる 64 個の小領域 $F_{ij} (1 \leq i \leq 8, 1 \leq j \leq 8)$ ごとの隆線方向 $\theta_{index_{ij}}$ を式 (2)-(4) で計算する。ただし、 $G_{x_{ij}}$ と $G_{y_{ij}}$ は F_{ij} をそれぞれ水平方向と垂直方向に Sobel フィルタで 1 次微分した大きさ $w \times h$ の画像勾配行列である。

$$\begin{pmatrix} G'_{x_{ij}} \\ G'_{y_{ij}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{y=1}^h \sum_{x=1}^w (G_{x_{ij}}^2(x,y) - G_{y_{ij}}^2(x,y)) \\ \sum_{y=1}^h \sum_{x=1}^w 2G_{x_{ij}}(x,y)G_{y_{ij}}(x,y) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\theta_{ij} = \frac{1}{2} \left(\pi - \arctan2(G'_{y_{ij}}, G'_{x_{ij}}) \right) \quad (3)$$

$$\theta_{index_{ij}} = \left\lfloor \frac{8}{\pi} \theta_{ij} + \frac{1}{2} \right\rfloor \bmod 8 \quad (4)$$

小領域 F_{ij} についての隆線方向ベクトル O_{ij} は、 $\theta_{index_{ij}}$ 列目のみを 1 としてそれ以外を 0 とする 1×8 行列である。例えば

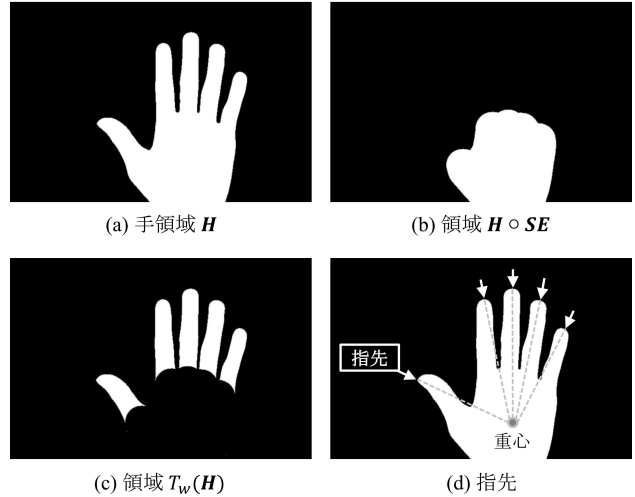


図 4 指先検出

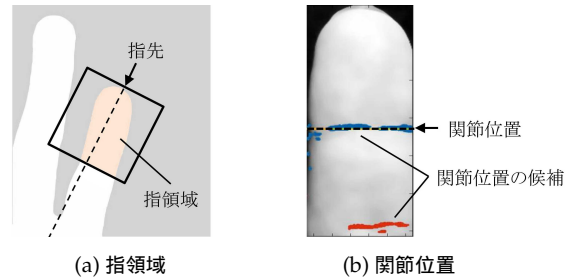


図 5 指先領域抽出



図 6 特徴点出現頻度抽出

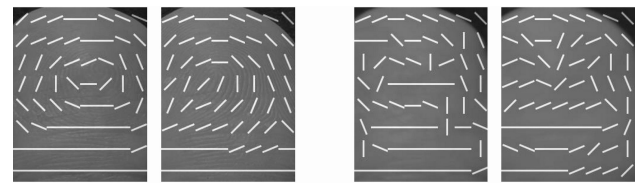


図 7 隆線特徴ベクトル

$\theta_{index_{ij}} = 1$ のとき $O_{ij} = (0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ となる。隆線特徴ベクトル O は O_{ij} を式 (5) のように結合することで得られる。 O の次元は $8 \times 8 \times 8 = 512$ 次元である。

$$O = (O_{11}, O_{12}, \dots, O_{ij}, \dots, O_{88}) \quad (5)$$

図 7 は指紋候補領域から抽出した隆線特徴ベクトルを指先領域上に表示した例である。図中の白線が隆線方向を表している。図 7(a) は指紋にピントを合わせて撮影した画像の指先領域から抽出された隆線特徴ベクトルであり、図 7(b) は図 7(a)

と同じ指に対して指紋にピントを合わせずに撮影した画像の指先領域から抽出された隆線特徴ベクトルである。指紋がある領域においては、隆線の流れに沿って隆線方向が配列している。

3.3 指紋判別部

指紋判別部では、2 値分類器を用いて指紋候補領域が指紋領域であるかどうかの判別を行う。すなわち、教師データから抽出される隆線特徴ベクトルで生成された指紋判別空間に対して、指紋候補領域から抽出される隆線特徴ベクトルを指紋判別空間上に写像することにより指紋領域かどうかを判別する。

4 実験

4.1 データセット

正解データとして、指紋が写っている手の画像を撮影した。図 8 に正解データの例を示す。正解データの枚数は、被験者 8 人 × 両手 × 3 ポーズ = 48 枚である。撮影は、デジタルカメラ (2416 万画素) を使用し、撮影距離 0.5m、焦点距離 40mm、絞り値 $f/10$ 、の環境において実施した。この環境で撮影された画像には、指紋認証アルゴリズムでマッチング可能な解像度の指紋が写っている。

また、判別空間を生成するための教師データとして、Positive (指紋である) 画像と Negative (指紋でない) 画像を用意した。図 9 に教師データの例を示す。図 9(a) の Positive 画像は、指紋データベースである NIST Special Database 4 (NIST-SD4) [6] をもとに構成する。NIST-SD4 には 4,000 枚のグレースケール指紋画像がある。本実験では、NIST-SD4 からシワやかすれが見られる指紋画像を除いた 3,110 枚に対して、指紋画像中に背景と余白が含まれないようにトリミングし、左右反転を加えた合計 6,220 枚を Positive 画像とする。図 9(b) の Negative 画像には、指紋が写っていない指先領域の画像を 3,000 枚、手の一部の画像を 3,000 枚、合計 6,000 枚を用いる。

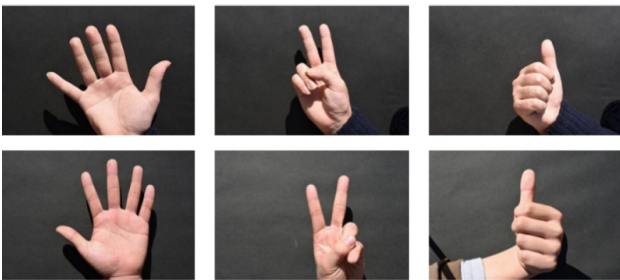
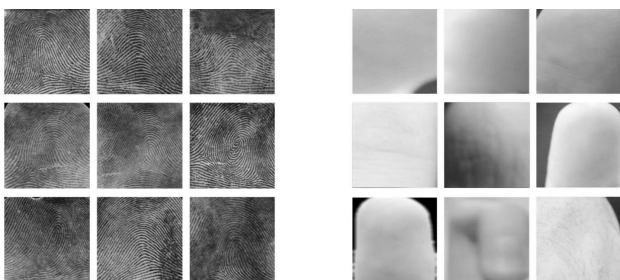


図 8 正解データ (指紋が写っている手画像) の例



(a) Positive 画像

(b) Negative 画像

図 9 教師データの例

4.2 実験方法

実験では、特徴点出現頻度のしきい値が指紋領域の抽出性能に与える影響を検証する。そして、正解データに対する指紋領域抽出性能を評価する。

特徴点出現頻度のしきい値 m_t による指紋候補領域抽出実験

実験の手順は以下の通りである。

- A1. 正解データの指紋領域を計数する。
- A2. しきい値 m_t において、正解データに対する指紋候補領域抽出を行う。
- A3. 指紋候補領域再現率を式 (6) により算出する。また、指紋候補領域抽出率を式 (7) により算出する。
- A4. A2. から A3. をしきい値 m_t を変化させて繰り返す。

$$\text{指紋候補領域再現率} = \frac{\text{抽出された正解データの指紋領域数}}{\text{正解データの指紋領域数}} \quad (6)$$

$$\text{指紋候補領域抽出率} = \frac{\text{抽出された指紋候補領域数}}{\text{正解データの指紋領域数}} \quad (7)$$

指紋領域抽出実験

指紋判別空間の生成には、線形判別分析、SVM(RBF)、Ada-Boost、多層パーセプトロン、Random forest、を用いる。実験の手順は以下の通りである。

- B1. 教師データから抽出された隆線特徴ベクトルに対する指紋判別空間を生成する。
- B2. しきい値 m_t において、正解データに対して指紋領域抽出を行い、抽出された指紋領域の数と抽出されなかった指紋領域の数を求める。
- B3. 指紋領域再現率を式 (8) により算出する。
- B4. B2. から B3. をしきい値 m_t を変化させて繰り返す。

$$\text{指紋領域再現率} = \frac{\text{抽出された正解データの指紋領域数}}{\text{正解データの指紋領域数}} \quad (8)$$

4.3 実験結果

正解データの指紋領域数および指紋候補領域抽出で抽出された領域数を表 1 にまとめる。また、特徴点出現頻度のしきい値 m_t に対する指紋候補領域再現率を図 10 に示す。横軸は特徴点出現頻度のしきい値 m_t であり、縦軸は指紋候補領域再現率である。しきい値が $0 \leq m_t \leq 78$ となる区間では、正解データの指紋領域を指紋候補領域として全て抽出し、指紋候補領域再現率が 1 となった。さらに、しきい値が $0 \leq m_t \leq 78$ となる区間における指紋候補領域抽出率の変化を図 11 に示す。横軸は特徴点出現頻度のしきい値 m_t であり、縦軸は指紋候補領域抽出率である。正解データの指紋領域の数 112 に対して、指紋候補領域抽出によって抽出された領域の数は 1088 ($m_t = 0$) から 686 ($m_t = 78$) に減少した。そのため、指紋候補領域抽出率は 9.71 ($m_t = 0$) から 6.12 ($m_t = 78$) に減少した。

特徴点出現頻度のしきい値 m_t に対する指紋領域再現率を図 12 に示す。横軸は特徴点出現頻度のしきい値 m_t であり、縦軸は指紋領域再現率である。しきい値が $0 \leq m_t \leq 78$ となる区間において、指紋領域再現率は一定であった。また、最も指紋領域再現率が高い分類器は SVM(RBF) であり、SVM(RBF) の指紋領域再現率は 0.893 であった。

表 1 正解データの指紋領域数と指紋候補領域抽出された領域数

	$m_t = 0$	$m_t = 78$
正解データの指紋領域数	112	
抽出された指紋候補領域数	1088	686
抽出された正解データの指紋領域数	112	112
抽出された正解データの指紋領域でない領域数	976	574

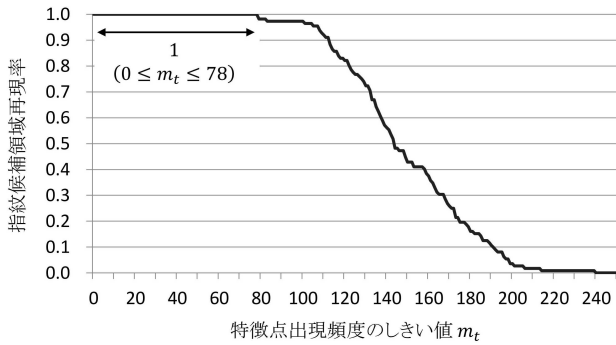


図 10 特徴点出現頻度のしきい値 m_t に対する指紋候補領域再現率

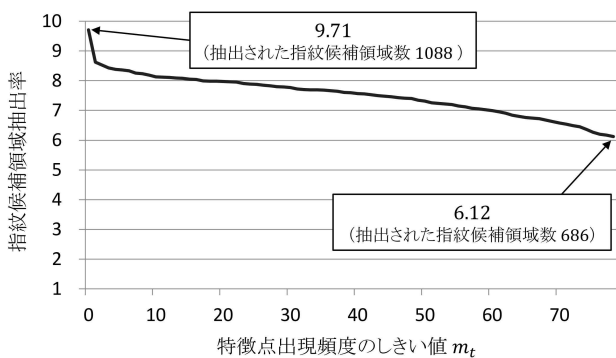


図 11 特徴点出現頻度のしきい値 m_t に対する指紋候補領域抽出率

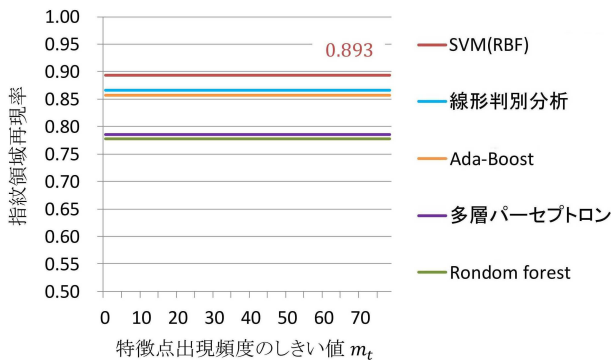
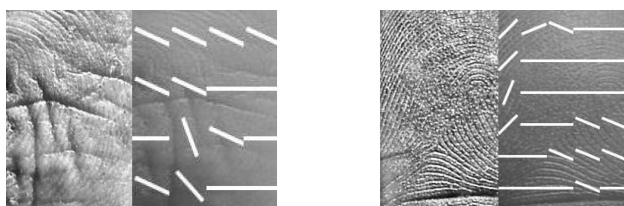


図 12 特徴点出現頻度のしきい値 m_t に対する指紋領域再現率



(a) シワがある部分 (b) かすれている部分

図 13 誤判別された指紋領域とその隆線特徴ベクトル

5 考察

しきい値 m_t が $0 \leq m_t \leq 78$ となる区間では、指紋領域再現率が 0.893 で一定であった (図 12)。このことから、指紋候補領域抽出において特徴点出現頻度のしきい値 m_t を用いて指先領域を棄却することは、画像中の指紋領域を漏れなく抽出する設計において不要であることがわかった。

また、正解データのうち 10.7% の指紋領域が指紋ではないと誤判別された。この誤判別された指紋領域には、シワや傷あるいは隆線がかすれている部分などがあつた。図 13 に誤判別された指紋領域の例を示す。シワや隆線がかすれている部分からは、隆線の方向を正しく求めることができていない。このため、誤判別が発生したと考える。シワやかすれを有する指紋領域から実際に生体情報が抽出できるかどうかを確認するために、誤判別された指紋領域の画像から復元した指紋は指紋センサなどで取得した指紋と一致するかどうかを検証する必要がある。

6 まとめ

本稿では、画像中から指紋が写っている領域を抽出することを目的として、指紋の特徴点出現頻度および隆線の紋様にもとづく指紋領域抽出アルゴリズムを提案した。提案した指紋領域抽出アルゴリズムに対して、特徴点出現頻度と指紋判別空間生成法が指紋領域の抽出性能に与える影響を評価した。その結果、指紋領域を漏れなく抽出する設計においては、隆線特徴ベクトルの判別のみ必要であることがわかった。また、指紋判別空間生成法として SVM(RBF) を用いた場合、指紋領域再現率 0.893 で指紋が写っている画像から指紋領域を抽出した。

参考文献

- [1] Chaos Computer Club, "Fingerprint biometrics hacked again", <https://www.ccc.de/en/updates/2014/ursel>, (参照 2017-01-19).
- [2] 大金 建夫, 越前 功, "BiometricJammer: ユーザの利便性を考慮した指紋の盗撮防止手法", コンピュータセキュリティシンポジウム 2016 論文集, vol.2016, no.2, pp.355-362 (2016).
- [3] Ratha NK, Chen S, Jain AK, "Adaptive flow orientation-based feature extraction in fingerprint images", Pattern Recognition, vol 28, no.11, pp.1657-1672 (1995).
- [4] Pawin Prasertsakul, Toshiaki Kondo, "A New Fingerprint Detection Method Using the Top-Hat Transform", Thammasat International Journal of Science and Technology, vol.20, no.3, pp.19-27 (2015).
- [5] M.D. Garris, C.I. Watson, R. McCabe, C.L. Wilson, "User's Guide to NIST Fingerprint Image Software", NIST, (2001).
- [6] C.I. Watson, C.L. Wilson, "NIST Special Database 4 Fingerprint Database", NIST, (1992).