Gradient Modification of Fingerprint Images using Fingerprint Area and Contour

Hideyo Takeuchi Member (Chuo Spring Co.Ltd, DDS Incorporated)

Masahiro Hoguro Non-member (Nagoya Institute of Technology)

Noriyuki Matsumoto Non-member (Chuo Spring Co.Ltd)

Taizo Umezaki Member (Nagoya Institute of Technology)

Keywords : fingerprint verification, fingerprint identification, tilted fingerprint, gradient modification

In this paper, we describe the way to improve the usability of fingerprint verification devices, especially for users who don't get used to the devices. Beginning users of fingerprint verification devices tend to input his finger tilted on scanner. So, in some cases, he has difficulty for identifying himself by using his finger and fingerprint verification devices. So the function for modifying fingerprint gradient carry great weight for fingerprint verification devices.

Fig 1 shows the fingerprint area and contour extracted by our algorithm, which is utilized for gradient modification of fingerprint images. Our algorithm does not need to extract end points or bifurcation points called minutia from fingerprint images. It takes 3.2[ms] to modify the gradient by personal computer which operates at 1000[MHz] clock frequency. Thus, our algorithm is fast enough to be embedded in fingerprint verification devices that operate at lower speeds.

We evaluate our algorithm by using fingerprint images tilted 0[degree], 5[degree], 10[degree] and 15[degree]. Fig 2 shows recognition rate with respect to each rotation angle, while type II error is fixed at 0.01 [%].

Without gradient modification, recognition rate calculated from non tilted images is 98.4[%]. Recognition rate calculated from 5[degree], 10[degree] and 15[degree] tilted images are respectively 84.7[%], 26.3[%] and 8.2[%]. As tilted angle is larger, recognition rate becomes lower. Especially, recognition rate is 8.2[%] when input images are tilted 15[degree].

By modifying gradient using fingerprint area, recognition rate at 15[degree] tilted images is improved from 8.2[%] to 65.5[%]. Additionary, by modifying gradient using fingerprint area and

contour, recognition rate is improved to 81.6[%].

It is exceptional that input image is tilted at 15[degree] in a real world, when a user identify himself by using the device which has finger guide. But, by adopting this algorithm, usability of fingerprint verification devices will be advanced in a great deal and become more friendly to beginning users.

(a) Fingerprint images before gradient modification

(b) Fingerprint images after gradient modification

Fig. 2. Tilted fingerprint images

Fig. 1. Extraction of fingerprint area and contour for calculating rotation angle

Fig. 3. Recognition rate with respect to each rotation angle

指紋領域・輪郭情報を用いた指紋画像の回転補正法

正員 竹内 英世^{*,**} 非会員 保黒 政大^{***}
非会員 松本 憲幸^{*} 正員 梅崎 太造^{***}

Gradient Modification of Fingerprint Images using Fingerprint Area and Contour

Hideyo Takeuchi^{*,**}, Member, Masahiro Hoguro^{***}, Non-member, Noriyuki Matsumoto^{*}, Non-member, Taizo Umezaki^{***}, Member

In this paper, we propose the way to modify gradient of fingerprint images. We modify the gradient using fingerprint area and contour, without extracting end points or bifurcation points called “minutia” from fingerprint images. It takes 3.2[ms] to modify fingerprint gradient by using a personal computer which operates at 1000[MHz] clock frequency. Our program code is so light weight that it is able to be embedded in fingerprint verification devices which operate at lower speeds. We evaluated our algorithm by using fingerprint images tilted respectively 0° , 5° , 10° and 15° . Without modifying gradient, we achieved 90.8[%] recognition rate by images tilted from 0° to 5° , while false acceptance rate is 0.01[%]. By using our gradient modification algorithm, recognition rate raised from 90.8[%] to 98.2[%]. On the other hand, 19.4[%] recognition rate was achieved by images tilted from 10° to 15° without gradient modification, and the rate raised to 89.2[%] with gradient modification. The users who don't get used to fingerprint devices tend to input his finger tilted on scanner. Thus, it is expected that the fingerprint verification device will be improved to be more friendly for all peoples, by using our gradient modification algorithm.

キーワード：指紋照合，指紋認証，傾き入力，回転補正

Keywords: fingerprint verification, fingerprint identification, tilted fingerprint, gradient modification

1. まえがき

2005年4月より施行された個人情報保護法，近い将来施行される日本版SOX法などの新時代の法律は，我々を取り巻く社会環境に急激な変化を与えようとしている。企業においては，必要な情報を安全に活用するための情報セキュリティ対策やリスク管理が必須の課題となりつつある。重要エリアへの入退出管理は勿論のこと，個人情報や機密情

報に“誰が何時アクセスをしたのか？”“誰がアクセス権を持つか？”を管理できる体制の整備が急務となっている。

このような状況下で，指紋，顔，虹彩，掌紋など，人間の身体的特徴を用いて個人を特定できるバイオメトリック（生体認証）技術の必要性はますます高まっている。生体認証技術の中でも，指紋認証は，万人不同・終生不変という2大特性を持ち，比較的低コストで装置化が実現する。そのため，指紋による個人識別の研究は盛んに行われてきた^{(1)~(21)}。近年では，指紋照合技術は空港や国境における入国管理，企業におけるコンピュータのネットワークセキュリティを強化する技術として採用されている。また，我々の身近なところでは携帯電話の個人認証用途や，住宅に設置される鍵の代わりとして使用されている。

しかし，これらの指紋照合装置を万人が利用できるようになるためには，いまだ以下(1)，(2)の課題が残ることが指摘されている⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾。

- (1) 乾燥指・かすれ等の低品質な指紋画像への対処
老人や水仕事を頻繁に行う主婦からは明瞭な指紋画像が採取されず，照合困難となる問題がある。
- (2) 斜め入力・位置ずれやひずみへの耐性強化

* 中央発條（株）キャブレックス部
〒470-0225 愛知県西加茂郡三好町大字福田字宮下43番地の1
Cablex Division, Chuo Spring Co.Ltd
Technical Center, 43-1 Miyashita Fukuta, Miyoshi-cho
Nishikamo-gun, Aichi-ken, 470-0225 Japan

**（株）ディー・ディー・エス
〒450-0003 名古屋市中村区名駅南一丁目27番2号
日本生命笹島ビル16F
DDS Inc, Nihon Seimei Sasashima Bldg 16F, 1-27-2 Meiekim-inami, Nakamura-ku, Nagoya, 450-0003 Japan

*** 名古屋工業大学大学院工学研究科
〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町
Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

例えば、指紋照合装置に慣れていない初心者は、指を斜めに置くことがあるため、誤認証を起こす確率が高くなる。

我々は、これまで特に(1)の問題に強い指紋照合方式として群遅延スペクトルによる方法を提案してきた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。また、(1)の問題については実環境で動作する指紋照合装置に即組み込み可能な改善手法を提案してきた⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

個人住宅や企業の重要エリアに設置される指紋照合装置は、部屋に入ろうとする人を迅速・確実に認証する必要がある。携帯電話などに搭載される指紋認証機能に比べ、数段高い個人認証性能と装置の完成度が要求される。誰にでも使い易い指紋照合装置を造るためには、さらに(2)の斜め入力・位置ずれやひずみへの耐性強化について検討が必要である。

本論文では、実環境で動作する指紋照合装置への搭載に適した、指紋の斜め入力対策法について述べる。処理が軽いため、ハードウェア資源の限られた組み込み機器のCPUに負担をかけずに対策できる利点がある。

2. 実環境における指紋の傾き入力対策

各社から製品化されている入退出管理用途の指紋照合装置の多くは、ハードウェア・ソフトウェアの両面から指紋の傾き入力対策を施している。ハードウェア的な指紋の傾き入力対策としては、指紋入力部に指ガイドを設けるのが一般的である^{(16)~(20)}。また、指紋センサに静電気対策の指ガイド付きのシャッターを設けた指紋照合装置もある⁽²¹⁾。ガイドに指を当ててシャッターを開ける動作により、指は真っ直ぐに置かれるため、これも傾き入力対策として効果がある。

実環境で動作する指紋照合装置では、ハードウェアによる傾き入力対策を行ったうえで、さらに画像処理技術を用いたソフトウェアによる対策を施しているものが多い。以下、市販の指紋照合装置に採用されているソフトウェアによる傾き入力対策法について説明する。指紋照合技術は、指紋画像から指紋のマニューシャ(端点・分岐点)などの局所的情報を抽出して照合を行うマニューシャマッチング方式と、指紋原画像や周波数特徴量などの大局的情報を抽出して照合を行う方式に大別される。指紋の回転補正法もそれぞれの特徴抽出法に適した方式が提案されている。

マニューシャ特徴量を利用した回転指紋画像への対処法は、多くの研究者により提案され、犯罪捜査用途をはじめとした指紋照合装置に採用されている⁽³⁾⁽⁹⁾⁽¹⁴⁾。これらの方法では、明瞭な指紋画像が採取できれば高い回転角度検出能力、個人認証精度を発揮する。しかし、マニューシャ抽出は処理が複雑で、装置化には高速なCPUや専用LSIが必要なため、装置のコストアップにつながる。また、老人や水仕事を頻繁に行う主婦など“乾燥指”を持つユーザの指からは特徴点や指紋隆線方向の抽出が困難となり、回転補正や個人認証ができない問題がある。

一方、指紋画像の大局的な情報を用いた回転補正方法と

して、回転不変位相限定相関法が提案されている⁽⁵⁾。この方法では、指紋画像を極座標変換して周波数分析を行い、周波数空間上での位相相関を評価することにより回転補正を行う。位相限定相関分析の専用LSIを組み込んだ指紋照合装置の構成にはこの方式は適している⁽⁵⁾。また、乾燥指・かすれ指紋画像に対しても回転補正できる利点がある。しかし、指紋画像の回転補正のために二次元FFT演算が必要となり、計算量が増大するため、汎用の指紋照合装置への組み込み用途には適さない。

また、入力画像または登録画像を回転させた回転指紋画像を生成し、回転補正用の特徴を抽出することで斜め入力に対処する方法もある⁽⁴⁾⁽⁷⁾。これは既存の指紋照合装置にも比較的簡単に応用できる方法ではあるが、複数枚の指紋画像から特徴抽出を行う必要があるため、装置のハードウェア構成によっては、照合速度の面で不利になる場合がある。

本論文では、低速なCPUを搭載した組み込み型の指紋照合装置にも採用できる指紋の傾き入力対策法について検討する。指紋の領域情報・輪郭情報のみを用いて傾きを補正するため、マニューシャ特徴点を抽出できないかすれ気味の指紋画像に対応できる利点もある。

3. 評価用指紋画像データベース

指紋採取は、Authentec社製AF-S2半導体センサが搭載された中央発條(株)製指紋照合装置の指紋読み取り部を使って採取する(図1参照)。指紋照合装置が利用される実環境に最も近い状態を再現し、指紋画像採取を行う。3月の初春に採取した51人分、一人につき25枚の指紋データを照合実験に用いる。128×128[pixel]、白黒256階調のデータである。

一人につき25個の指紋画像のうち、10枚は指を指紋センサ上にまっすぐ置いたもの、5枚は5°の傾きをつけて置いたもの、5枚は10°の傾きをつけて置いたもの、残りの5枚は15°の傾きをつけて置いたものである。図1の右図に示すように、指紋照合装置の指紋読み取り部に0°、5°、10°、15°の目盛りをつけ、被験者にはその目盛りにあわせて指を置いて頂き指紋採取を行った。ただし、被験者全

図1 指紋照合装置と回転指紋採取方法

Fig.1. Fingerprint identification device and capturing rotated fingerprint images

図 2 回転して押捺された指紋画像の例
Fig. 2. Tilted fingerprint images

員が指の傾きと目盛りの傾きを完全に一致させるのは難しい。採取された指紋画像は、目盛りの角度より傾きが小さいものもあれば、大きめのものもある。図 2 に採取指紋画像の例を示す。

4. スペクトルを用いた指紋照合法

図 3 に指紋画像からの特徴抽出例を示す。指紋画像（図 3(a)）に平滑化フィルタ（図 3(b)）をかけた後、群遅延スペクトル（Group Delay Spectrum:GDS）を算出する。GDS の先鋭化を抑制する平滑化係数は 0.92，線形予測次数は 10 次，チャンネル数は 16 とする。GDS は指紋隆線の幅等にみられる指紋らしさの情報を削減し，個人性情報を強める働きがある⁽¹¹⁾。

登録指紋から抽出した GDS と入力指紋から抽出した GDS に対し，移動照合を行ったときの最小距離を 2 つの指紋データの距離（非類似度）とする。図 4 は，同一指から抽出した 2 つの GDS パターンについて照合を行ったときの距離特性である。通常はずらし幅 wd を $[-40:40]$ の範囲で増分 1 でずらして最小距離 $dist(wd_{min})$ を探索する。

x 方向 GDS から算出した距離 $dist_x$ と， y 方向 GDS から算出した距離 $dist_y$ を式 (1) により合成し，距離尺度 D を求める。重み係数 w は 0.7 を用いる。

$$D = w \times dist_x + (1 - w) \times dist_y \dots\dots\dots (1)$$

5. 指紋領域・輪郭情報を用いた回転補正法

〈5・1〉 領域情報による重心と傾き角の算出 指紋画像 $F_{i,j}(i, j = 0, 1, \dots, 127)$ に (2) 式・(3) 式で示される差分フィルタをかけ指紋隆線と谷線を塗りつぶした指紋領域画像 $M_{i,j}$ を作成する。なお，指紋領域 $M_{i,j}$ には 2 値化を行わないため， $M_{i,j}$ は 0～255 の階調値を持っている。図 5(a) に指紋原画像 $F_{i,j}$ ，図 5(b) に指紋領域画像 $M_{i,j}$ の例を示す。

図 3 特徴抽出法

Fig. 3. Feature extraction from fingerprint image

図 4 GDS による距離計算法

Fig. 4. GDS pattern matching and distance

$$G_{i,j} = \sum_{l=j}^{j+3} \sum_{k=i}^{i+2} |F_{k,l} - F_{k+1,l}| \dots\dots\dots (2)$$

$$M_{i,j} = \begin{cases} 255 & (G_{i,j} > 255) \\ G_{i,j} & (0 \leq G_{i,j} \leq 255) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

次に，(4) 式～(8) 式を用いて指紋領域画像の重心 (μ_i, μ_j) と傾き角度 θ_m を算出する。

$$\mu_i = \frac{1}{128 \times 128} \sum_{j=0}^{127} \sum_{i=0}^{127} i M_{i,j} \dots\dots\dots (4)$$

$$\mu_j = \frac{1}{128 \times 128} \sum_{j=0}^{127} \sum_{i=0}^{127} j M_{i,j} \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{128 \times 128} \sum_{j=0}^{127} \sum_{i=0}^{127} j^2 M_{i,j} - \mu_j^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{1}{128 \times 128} \sum_{j=0}^{127} \sum_{i=0}^{127} ij M_{i,j} - \mu_i \mu_j \dots\dots\dots (7)$$

$$\theta_m = \tan^{-1} \left(\frac{\sigma_{ij}^2}{\sigma_j^2} \right) \dots\dots\dots (8)$$

これらの式は $M_{i,j}$ の濃淡を考慮した最小二乗法による直線近似の式である。(4) 式～(8) 式に $M_{i,j}$ の濃淡情報が反映されることで指紋領域が曖昧な指紋画像からも重心と傾き角度を算出することができる。処理が軽い

ハードウェア資源の限られた組み込み機器でも高速に回転角が算出できる利点もある。図 5(c) は、指紋領域の重心 (μ_i, μ_j) と傾き角度 θ_m を示している。指紋センサの面積が指紋に対して十分に大きいときは、 θ_m を用いた傾き補正法は有効である。

〈5・2〉 領域情報を用いた傾き角算出の問題点 図 6 に示すように、指紋センサからは輪郭が欠けている指紋画像が採取されることも多い。輪郭が欠けている場合、(8) 式では正しい傾き角度が算出できない場合がある。そこで、(8) 式の角度算出法に加え、輪郭情報を用いて算出した回転角度を併用して回転補正を行う。

〈5・3〉 輪郭情報による傾き角度の補正 輪郭情報による傾き角度の算出は以下の手順で行う。まず、指紋領域画像より指紋画像と背景画像の境界線を抽出する (図 7 参照)。指紋領域画像 $M_{i,j}$ を水平方向 1 ライン毎に走査したときの指紋領域の左端と右端を求める。水平方向 1 ラインに対して、注目座標 i をセンサ左端から右方向 (→) に走査していったときの近傍画素の平均値 $A_{i,j}$ を (9) 式により算出する。平均画素値 $A_{i,j}$ がしきい値 TH_b を超えたとき

ろを指紋領域の左端 $b_1(j)$ として検出する。なお、本論文では $w = 2$ 、しきい値 $TH_b = 100$ としている。

$$A_{i,j} = \frac{1}{(2w+1)^2} \sum_{v=j-w}^{j+w} \sum_{h=i-w}^{i+w} M_{h,v} \dots\dots\dots (9)$$

同様に、センサ右端から左方向 (←) に探索を行い、指紋画像の右端 $b_2(j)$ を検出する。このようにして検出した $b_1(j), b_2(j)$ を指紋画像の輪郭情報とする。

以下 (1)~(8) の手順により、輪郭情報 $b_1(j), b_2(j)$ から指紋画像の傾き角を算出し、傾き補正を行う。

(1) 図 8 に示すように、輪郭画像を 90° 回転させて考える。以下、 $j \rightarrow x, i \rightarrow y, b_1(j) \rightarrow b_1(x), b_2(j) \rightarrow b_2(x)$ として説明する。指紋の輪郭線 $b_1(x), b_2(x)$ のうち、4 つの直線 $C(y = Y_C), D(y = Y_D), E(x = X_E), F(x = X_F)$ で囲まれた領域 A、領域 B を傾き角算出に利用する。なお、本論文では定数 Y_C, Y_D, X_E, X_F の値は、 $Y_C = 122, Y_D = 5, X_E = 15, X_F = 112$ として用いている。

(2) 図 9 に示すように、領域 A に属する輪郭線 $b_2(x)$ を最小 2 乗法を用いて直線近似する。(10) 式に示す傾き

図 5 指紋領域の抽出
Fig. 5. Extraction of fingerprint area

図 6 指紋領域を用いた傾き補正の問題点
Fig. 6. Weak point of gradient modification using fingerprint area

図 7 輪郭情報の抽出
Fig. 7. Extracting contour of fingerprint

図 8 傾き算出に利用する情報
Fig. 8. Feature for calculating a rotation angle

α_A , y 切片 β_A の直線 A を求める。同様に領域 B の輪郭線 $b_1(x)$ より (11) 式に示す傾き α_B , y 切片 β_B の直線 B を求める。

$$y = \alpha_A x + \beta_A \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$y = \alpha_B x + \beta_B \quad \dots\dots\dots (11)$$

- (3) 以下, 4 つの直線 C,D,E,F で囲まれた領域を領域 CDEF と記す。図 10 に示すように, 直線 A とそれぞれ直線 C, 直線 D, 直線 E, 直線 F が成す 4 つの交点を求める。4 つの交点のうち領域 CDEF 内に存在する 2 つの交点をそれぞれ (x_{1a}, y_{1a}) , (x_{2a}, y_{2a}) とし, 2 つの交点を結んだ線分を sl_a とする。同様に直線 B と 4 つの直線 C,D,E,F の交点を求め, 領域 CDEF 内に存在する 2 つの交点をそれぞれ (x_{1b}, y_{1b}) , (x_{2b}, y_{2b}) とし, 2 つの交点を結んだ線分を sl_b とする。2 つの交点が見つからない場合は, 指紋の境界が領域 CDEF に存在しないことになる。なお図 10 の例では, 交点はそれぞれ 3 つずつしか観察できない。4 つ目の交点はそれぞれ左右の遠方に存在している。

- (4) 図 11 に示すように, 線分 sl_a を x 軸に投影した長さ l_{ax} を (12) 式により求める。同様に, 線分 sl_b を x 軸に投影した長さ l_{bx} を (13) 式により求める。

$$l_{ax} = |x_{2a} - x_{1a}| \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$l_{bx} = |x_{2b} - x_{1b}| \quad \dots\dots\dots (13)$$

線分 sl_a と線分 sl_b の両方が算出可能な場合は, (14) 式で表される L_o を算出する。 L_o は, sl_a と sl_b の x 軸方向の分離度を示す。

$$L_o = |x_{2b} - x_{2a}| + |x_{1b} - x_{1a}| \quad \dots\dots\dots (14)$$

- (5) 次に, 直線 A の信頼性条件を表 1 で定義する。(i), (ii), (iii) の条件が全て満たされたとき, 算出された直線 A は信頼できると考える。

(i) は「領域 CDEF 内に 2 つの交点が存在する」条件 (線分 sl_a が算出可能な条件), (ii) は「直線 A の算出に用いた指紋の輪郭を示す画素数がしきい値 TH_n

より多い」条件, (iii) は「直線 A と直線 D の交点の x 座標が $X_E < x < X_F$ の範囲内に存在しない」条件である。なお, しきい値 $TH_n = 10$ としている。

- (6) 同様に, 直線 B の信頼性条件を表 2 で定義する。(i), (ii), (iii) の条件が全て満たされたとき, 算出された直線 B は信頼できると考える。

- (7) 以下 (a)~(d) の場合分けに従って角度 θ を算出する。

- (a) 直線 A, 直線 B 両方が表 1, 表 2 の信頼性条件を満たさない場合

直線 A, B の信頼性は低いと考えられるため, 角度 θ は, (15) 式により, 指紋領域情報を用いて算出した角度 θ_m で置き換える。

$$\theta = \theta_m \quad \dots\dots\dots (15)$$

- (b) 直線 A が表 1 の信頼性条件を満たし, 直線 B が表 2 の信頼性条件を満たさない場合

- (b-1) $l_{ax} < TH_{LA}$ のとき

直線 A は信頼性条件は満たしているが, l_{ax}

図 10 交点の算出

Fig. 10. Calculating the intersecting points

図 9 直線 A,B の算出

Fig. 9. Calculating the lines A,B

図 11 線分 sl_a と線分 sl_b

Fig. 11. Line Segment sl_a and sl_b

表 1 直線 A の信頼性条件

Table 1. The terms of reliable line A

(i).	$(x_{1a}, y_{1a}), (x_{2a}, y_{2a}) \in CDEF$
(ii).	$l_{ax} > TH_n$
(iii).	$(Y_D - \beta_A)/\alpha_A \leq X_E$ or $(Y_D - \beta_A)/\alpha_A \geq X_F$

表 2 直線 B の信頼性条件

Table 2. The terms of reliable line B

(i).	$(x_{1b}, y_{1b}), (x_{2b}, y_{2b}) \in CDEF$
(ii).	$l_{bx} > TH_n$
(iii).	$(Y_C - \beta_B)/\alpha_B \leq X_E$ or $(Y_C - \beta_B)/\alpha_B \geq X_F$

が一定しきい値 TH_{LA} より短いため、直線 A の傾きを用いて回転補正を行うべきではない。

角度 θ は、(15) 式により、指紋領域情報を用いて算出した角度 θ_m で置き換える。しきい値 $TH_{LA} = 50$ としている。

(b-2) $l_{ax} \geq TH_{LA}$ のとき

角度 θ は、直線 A の傾き α_a を用いて角度 θ は (16) 式により算出する。

$$\theta = \tan^{-1}(\alpha_a) \dots \dots \dots (16)$$

(c) 直線 B が表 2 の信頼性条件を満たし、直線 A が表 1 の信頼性条件を満たさない場合

(c-1) $l_{bx} < TH_{LB}$ のとき

直線 B は信頼性条件は満たしているが、 l_{bx} が一定しきい値 TH_{LB} より短いため、直線 B の傾きを用いて回転補正を行うべきではない。

角度 θ は、(15) 式により、指紋領域情報を用いて算出した角度 θ_m で置き換える。しきい値 $TH_{LB} = 50$ としている。

(c-2) $l_{bx} \geq TH_{LB}$ のとき

角度 θ は、直線 B の傾き α_b を用いて (17) 式により算出する。

$$\theta = \tan^{-1}(\alpha_b) \dots \dots \dots (17)$$

(d) 直線 A, 直線 B 両方が表 1, 表 2 の信頼性条件を満たす場合

(d-1) $L_o < TH_{LO}$ のとき

線分 sl_a と線分 sl_b の x 軸方向の分離度を示す L_o が、一定しきい値 TH_{LO} より小さいとき、 sl_a と sl_b (l_{ax} と l_{bx}) は、指の先端など指紋が細くなる部分を捉えている場合がある。入力画像は図 12 のように回転の小さな画像である可能性があるため、 l_{ax} , l_{bx} から傾きを算出しない。

角度 θ は、(15) 式により、指紋領域情報を用いて算出した角度 θ_m で置き換える。しきい値 $TH_{LO} = 50$ としている。

(d-2) $L_o \geq TH_{LO}$ のとき

l_{ax} , l_{bx} と直線 A, B の傾き α_a , α_b を用いて、角度 θ は (18) 式により算出する。な

(a) Fingerprint image (b) Fingerprint contour and Lines A, B

図 12 L_o が小さい場合の直線 A, B

Fig. 12. Line A and B in the case of L_o is small

■ Modifying the gradient using fingerprint area.
□ Modifying the gradient using fingerprint contour.

図 13 条件 (a)~(d) の分類

Fig. 13. Classification of term (a)~(d)

お、(18) 式では、 l_{ax} と l_{bx} はそれぞれ直線 A, 直線 B の信頼性に比例する尺度として扱っている。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{l_{ax}\alpha_a + l_{bx}\alpha_b}{l_{ax} + l_{bx}} \right) \dots (18)$$

(8) (7) で算出した θ を傾き角、(4) 式・(5) 式で算出した (μ_i, μ_j) を回転中心として、指紋画像の傾き補正を行う。なお、傾き補正に用いるアフィン変換には固定小数点演算による高速化を施してある。

〈5・4〉 条件 (a)~(d) の分類 条件 (a)~(d) の場合分けを図示したものが図 13 である。図中の灰色の領域が『指紋領域を用いて回転補正を行う条件』、白色の領域が『指紋の輪郭を用いて回転補正を行う条件』である。条件 (b-1),(c-1),(d-1) は『指紋輪郭から抽出した直線の信頼性はあるが、その直線を用いて回転補正すべきでない条件』に相当する。

指紋領域を用いて回転補正された指紋画像を図 14 に示す。全指紋データ 1275 枚中に占める (a),(b-1),(c-1),(d-1) の枚数は、それぞれ 0 枚、18 枚、5 枚、791 枚となってい

図 14 指紋領域を用いて回転補正された画像
Fig. 14. Fingerprint images modified gradient using fingerprint area

る。本実験で採取した指紋データ中には (a) に分類される指紋画像は存在しなかった。稀な例ではあるが、条件 (a) に分類される指紋画像は余白がほとんど存在しないため、算出された回転角度は極めて小さな値となる。(b-1) は『指紋画像右側の輪郭の信頼性はあるが、それを回転補正に用いるべきではない』条件、(c-1) は『指紋画像左側の輪郭の信頼性はあるが、それを回転補正に用いるべきではない』条件である。(a),(b-1),(c-1) の例に示すように、余白が小さくなると回転補正角度は小さな値となり、大幅な補正は行われなくなる。(d-1) は『指紋画像両側の輪郭の信頼性はあるが、輪郭よりは指紋領域を利用した方が安全に回転角を算出できると判定した』場合である。(d-1) ①は真っ直ぐに押捺された指紋画像、(d-1) ②は斜めに押捺された指紋画像を回転補正した例である。

図 15 は、指紋輪郭を用いて回転補正された画像である。(b-2) は指紋画像の右側の輪郭を用いて回転補正した例、(c-2) は指紋画像の左側輪郭を用いて回転補正した例である。(d-2) は、指紋画像の左右両側の輪郭を用いて回転補正した例である。全指紋データ 1275 枚中に占める (b-2),(c-2),(d-2) の枚数は、それぞれ 32 枚、36 枚、393 枚となっている。

6. 指紋画像の回転補正実験

〈6・1〉 実験条件 本人 1 名につき 25 枚の指紋画像データのうち、傾き角 0° の画像 5 枚を登録パターンとす

図 15 指紋輪郭を用いて回転補正された画像
Fig. 15. Fingerprint images modified gradient using fingerprint contour

図 16 傾き補正処理の効果
Fig. 16. Effectiveness of gradient modification

る。残りの 0° 、 5° 、 10° 、 15° 回転した画像各 5 枚 (計 20 枚) を照合用パターンとする。しきい値は、他人受率率が $0.01[\%]$ となるように設定した 51 人の登録者全員に共通の値を用いる。51 名全員をそれぞれ本人としたときの距離計算を行い、他人受率率を $0.01[\%]$ としたときの本人受率率を算出する。このときの他人指の総数は $50 \times 20 \times 51 = 51000$ 個、本人の総数は $51 \times 20 = 1020$ 個である。

〈6・2〉 照合精度の評価 図 16 は、指紋画像の傾き角度と、回転補正前・回転補正後の本人受率率を比較した結果である。回転補正前の指紋画像では、入力指の傾き角度が 0° 、 5° 、 10° 、 15° と増加するに従って、照合率は $98.4[\%]$ 、 $84.7[\%]$ 、 $26.3[\%]$ 、 $8.2[\%]$ と急激に低下していく。特に、入力指が 15° 傾いた場合では、 $8.2[\%]$ の低い照合率となっている。指紋領域情報を用いて傾き補正を行うことで、入力指が 15° 傾いたときの照合率は $65.5[\%]$ まで改善される。

図 17 傾き補正前・補正後の ROC カーブ
(入力指の傾き: 0~5°)

Fig. 17. ROC curves (Angle of rotation: 0~5°)

図 18 傾き補正前・補正後の ROC カーブ
(入力指の傾き: 10~15°)

Fig. 18. ROC curves (Angle of rotation: 10~15°)

さらに、指紋領域・輪郭情報を用いた傾き補正では、照合率は 81.6[%] にまで改善される。

図 17 は、傾き角 0° と 5° の入力指について傾き補正前と傾き補正後の ROC (Receiver Operating Characteristic) カーブを比較したものである。他人受率率 0.01[%] のとき、本人受率率は回転補正前で 90.8[%]、回転補正後で 98.2[%] である。回転補正処理により、照合率は 7.4[%] 改善されている。実環境において、装置に慣れたユーザが入力する指紋の傾き角度は 0° ~ 5° に納まる傾向にある。図 17 は、装置に慣れたユーザに対する指入力の受容性が傾き補正により 7.4[%] 向上したことを示している。

一方、図 18 は傾き角 10° と 15° の入力指について求めた ROC カーブである。他人受率率 0.01[%] のとき、回転補正前の本人受率率は 19.4[%]、回転補正後で 89.2[%] である。回転補正処理により、照合率は 69.8[%] 向上している。指ガイドの設けられた入退室管理用途の指紋照合装置では、入力指が 15° 傾くことは稀である。しかし、装置に慣れていないユーザが指を傾き気味に入力することが想定される。回転補正処理により、指紋照合装置の入力受容性は大幅に改善されることが期待できる。

〈6・3〉 照合時間の評価 クロック周波数 1[GHz]、OS に WindowsXp を搭載した PC で、指紋の傾き角算出から回転補正が終了するまでの処理時間は約 3.2[ms] であった。PC の処理時間は 10 万回の回転補正処理を行ったときの平均値として算出した。一方、日立社製の安価なマイクロプロセッサ SH-3e(SH7718R 130[MIPS] 100[MHz]) を搭載した組み込み機器では、回転補正時間は約 150[ms] である。本手法は、CPU に負担をかけることなく非常に高い効果を発揮する斜め入力対策法である。

7. むすび

指紋領域と輪郭情報を利用した指紋画像の回転補正法について述べ、その有効性を示した。指紋照合装置に慣れていないユーザは指を斜めに入力する傾向にあり、照合率の低下を招くことがある。本研究は、実環境で動作する指紋照合装置の指置き受容性を向上させる目的で行った。

指を 0°、5°、10°、15° 傾けて採取した指紋画像データを用いてアルゴリズムの評価を行った。指ガイドの設けられた入退室管理用途の指紋照合装置では、装置に慣れたユーザが指を押捺するときの傾き角は 0° ~ 5° に納まる傾向にある。他人受率率を 0.01[%] に固定したとき、傾き角 0° ~ 5° の指紋画像から算出した本人受率率は 90.8[%] であった。回転補正を行うことにより、本人受率率 98.2[%] にまで改善された。

一方、傾き角 10° ~ 15° の指紋画像から算出した本人受率率は、回転補正なしの場合で 19.4[%] であったが、回転補正を行うことにより 89.2[%] にまで改善された。実環境で指紋の入力角が 15° 傾くことは稀であるが、本回転補正法により、傾き入力の受容性は飛躍的に改善する。より初心者を使い易い指紋照合装置を造ることが可能である。

回転補正処理時間はクロック周波数 1[GHz] の PC で 3.2[ms] と非常に高速である。また、クロック周波数の 100[MHz] の安価なマイクロプロセッサを搭載した組み込み機器では、回転補正時間は約 150[ms] である。本回転補正法は、ハードウェア資源の限られた組み込み機器への搭載にも適している。今後も、『誰にでも使い易い便利な指紋照合装置』の開発を目指した研究を行っていきたい。(平成 18 年 7 月 25 日受付, 平成 18 年 12 月 20 日再受付)

文 献

- (1) K. Sasagawa: "Biometric Security by Fingerprint", *IEICE*, Vol.89, No.1 (2006) (in Japanese)
笹川耕一:「指紋のバイオメトリクスセキュリティ」, 信会誌, **89**, 1, pp.31-35 (2006)
- (2) K. Asai, Y. Hoshino, and K. Kiji: "Automated Fingerprint Identification by Minutia-Network Feature —Feature Extraction Processes—", *IEICE Trans.*, D-II, Vol.J72-DII, No.5, pp.724-732(1989) (in Japanese)
浅井 鉦・星野幸夫・木地和夫:「マニ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—」, 信学論 (D), **J72-D-II**, 5, pp.724-732 (1989)
- (3) K. Asai, Y. Hoshino, and K. Kiji: "Automated Fingerprint Identification by Minutia-Network Feature —Matching

- Processes—”, *IEICE Trans.*, D-II, Vol.J72-DII, No.5, pp.733-740 (1989) (in Japanese)
- 浅井 鮎・星野幸夫・木地和夫:「マニユーシャネットワーク特徴による自動指紋照合—照合過程—」, 信学論 (D), **J72-D-II**, 5, pp.733-740 (1989)
- (4) T. Wakahara, Y. Kimura, A. Suzuki, A. Shio, and M. Sano: “Fingerprint Verification Using Ridge Direction Distribution and Minutiae Correspondence”, *IEICE Trans. D-II*, Vol.J86-DII, No.1, pp.63-71 (2003) (in Japanese)
- 若原 徹・木村義政・鈴木 章・塩 昭夫・佐野睦夫:「指紋隆線方向分布とマニユーシャ対応付けを用いた指紋照合」, 信学論 (D-II), **J86-D-II**, 1, pp.63-71 (2003)
- (5) T. Kobayashi, H. Nakajima, M. Morikawa, and A. Katsumata: “Fingerprint Identification Device for Homes Using Rotation-Invariant Phase-Only Correlation”, *Yamatake Savemation Review*, 8, pp.34-39 (2000) (in Japanese)
- 小林孝次・中島 寛・森川 誠・勝亦 敦:「回転不変相限定相関を用いた住宅用指紋照合装置」, (株)山武 *Savemation Review*, 8, pp.34-39 (2000)
- (6) A.W. Senior and R.M. Bolle: “Improved Fingerprint Matching by Distortion Removal”, *IEICE Trans.*, **E84-D**, 7, pp.825-832 (2001)
- (7) K. Ito, H. Nakajima, K. Kobayashi, T. Aoki, and T. Higuchi: “A Fingerprint Matching Algorithm Using Phase-Only Correlation”, *IEICE Trans.*, **E87-A**, 3, pp.682-691 (2004)
- (8) A.S. Rikin, D. Li, T. Isshiki, and H. Kunieda: “A Fingerprint Matching Using Minutia Ridge Shape for Low Cost Match-on-Card Systems”, *IEICE Trans.*, **E88-A**, 5, pp.1305-1312 (2005)
- (9) Kovacs-Vajna S. M.: “A Fingerprint Verification System Based on Triangular Matching and Dynamic Time Warping”, *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, Vol.22, pp.1266-1276 (2000)
- (10) T. Umezaki, H. Takeuchi, and H. Fujiyoshi: “Comparison of the Fingerprint Verification Methods Based on the Discrete and Continuous Hidden Markov Model”, Vol.118-C, No.6, pp.955-960 (1997-6) (in Japanese)
- 梅崎太造・竹内英世・藤吉弘亘:「離散及び連続出力分布型 HMM による指紋照合法の比較」, 電学論 (C), **118-C**, 6, pp.955-960 (1997-6)
- (11) N. Matsumoto, S. Sato, H. Fujiyoshi, and T. Umezaki: “Evaluation of a Fingerprint Verification Method Based on LPC Analysis”, *Trans. IEE Japan*, Vol.122-C, No.5, pp.799-807 (2002-5) (in Japanese)
- 松本憲幸・佐藤省三・藤吉弘亘・梅崎太造:「LPC 分析に基づく指紋照合法の評価」, 電学論 (C), **122-C**, 5, pp.799-807 (2002-5)
- (12) H. Takeuchi, T. Umezaki, N. Matsumoto, and K. Hirabayashi: “Evaluation of Low Quality Images and Imaging Enhancement Methods for Fingerprint Verification”, *IEICE Trans.*, D-II, Vol.J87-D-II, No.2, pp.574-585 (2004) (in Japanese)
- 竹内英世・梅崎太造・松本憲幸・平林勝巳:「かすれ指紋画像の判定・復元機能を持つ指紋照合法」, 信学論 (D-II), **J87-D-II**, 2, pp.574-585 (2004)
- (13) H. Takeuchi, N. Matsumoto, K. Kuwayama, and T. Umezaki: “Evaluation of Fingerprint Images Captured by Optical Fingerprint Scanner”, *Trans. IEE Japan*, Vol.124-C, No.3, pp.761-768 (2004-3) (in Japanese)
- 竹内英世・松本憲幸・桑山清明・梅崎太造:「光学式指紋スキャナにより採取された指紋画質の評価方法」, 電学論 (C), **124-C**, 3, pp.761-768 (2004-3)
- (14) 星野幸夫・国方純一・高橋良英:「縞パターン照合装置」, 特許第 2944557 号, 6,(1999)
- (15) 木村義政・角越和也・伴野 明:「指紋画像照合方法および指紋画像照合装置」, 公開特許 2001-243465,9,(2001)

- (16) 新崎 卓:「指紋検出センサ」, 公開特許平 06-149983,6,(1994)
- (17) 坂本美津夫:「指紋読み取り装置」, 公開特許平 10-269344,10,(1998)
- (18) 中山武彦:「指紋 照合装置」, 公開特許 2001-229364,8,(2001)
- (19) 斎藤賢一・重松智志・小中信典・岡崎幸夫・山口 力・首藤啓樹:「指紋 照合装置」, 公開特許 2002-83291,3,(2002)
- (20) 井上清寿:「指紋 入力装置」, 公開特許 2006-79502,3,(2006)
- (21) 岩本 彰・渡辺哲幸:「指紋 認証入力装置」, 公開特許 2002-74343,3,(2002)

竹内 英世 (正員) 1973 年 1 月 19 日生。1995 年 中部大・工・電子卒業。1997 同大学院博士前期課程修了。同年 中央発條 (株) 入社, 2004 年 (株) デイー・ディー・エス出向, 現在に至る。指紋照合, 画像処理に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。

保 黒 政 大 (非会員) 1970 年 9 月 20 日生。1993 年 中部大・工・電子卒業。1995 年同大学院博士前期課程修了。2002 年 (株) デイー・ディー・エス入社。2003 年 名工大大学院博士後期課程入学, 現在に至る。画像処理に関する研究に従事。電子情報通信学会, 日本福祉工学会各会員。

松 本 憲 幸 (非会員) 1968 年 5 月 7 日生。1991 年 中部大・工・電子卒業。1993 年同大学院博士前期課程修了。同年 中央発條 (株) 入社, 現在に至る。指紋照合装置の開発, 画像処理の実環境への応用に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。

梅 崎 太 造 (正員) 1959 年 7 月 27 日生。1982 年豊橋技科大・工・情報卒業。1987 年 名大大学院博士課程了。同年 4 月名大助手。1990 年中部大講師, 1992 年同大学助教授。1993~1994 年 カーネギーメロン大学客員研究員。1999 年中部大教授。2003 年 名工大教授。工博。音声・画像情報処理, 聴覚障害児教育, 福祉ロボットの研究に従事。情報処理学会, 日本音響学会, 電子情報通信学会, 日本福祉工学会, ヒューマンインターフェイス学会各会員。