

# 一种新的形变指纹匹配方法

曹国<sup>1)</sup> 孙权森<sup>1)</sup> 毛志红<sup>2)</sup> 梅园<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(南京理工大学计算机科学与技术学院,南京 210094) <sup>2)</sup>(中山大学计算机系,广州 510275)

**摘要** 提出了一种基于细节点局部配准的形变指纹匹配方法。首先,结合细节点的纹理信息以及结构信息获取多个参照点;然后依据选取的多参照点实现模板指纹图像与输入指纹图像的全局配准从而获得指纹之间的公共区域;将公共区域内的细节点与它们最近的参照点聚类组合,形成多个分组,并将各分组内的细节点以对应的参照点为极点转化到极坐标系下建立指纹的局部对应性;最后,采用界限盒约束条件实现指纹匹配。实验结果表明,基于局部配准的指纹匹配方法对形变指纹匹配具有较好的鲁棒性,能较大提升指纹的识别性能。

**关键词** 指纹匹配 局部配准 细节点 多参照点

中图法分类号:TP391 文献标志码:A 文章编号:1006-8961(2010)04-645-05

## A New Algorithm for Distorted Fingerprint Matching

CAO Guo<sup>1)</sup>, SUN Quansen<sup>1)</sup>, MAO Zhihong<sup>2)</sup>, MEI Yuan<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(The School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

<sup>2)</sup>(Computer Science Department, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275)

**Abstract** A novel minutiae-based method using local alignment to match the deformed fingerprints is proposed in this paper. We apply texture-based and structure-based minutiae information to obtain multiple reference minutiae at first, and then globally and evenly align two sets of minutiae to obtain the common overlapping region based on these reference minutiae. Next, we use the minutiae and their closest reference minutia to establish the local correspondence. After the registration of the fingerprints according to the local correspondence, the number of matching minutiae can be counted using bounding box constraints. Experimental results confirm that the proposed algorithm which is based on local correspondence is reliable for fingerprint matching with nonlinear distortions and leads to improvement in identification performance.

**Keywords** fingerprint matching, local alignment, minutia, multiple reference minutiae

## 0 引言

指纹的唯一性、稳定性和终生不变性使指纹识别成为目前应用最为广泛的生物识别技术。目前指纹识别系统最常用的方法是基于细节点的点模式匹配方法,该方法利用指纹脊线的端点和分叉点构成细节点集,然后通过寻找点集之间的相似度来识别指纹。在指纹识别时,即使同一枚指纹,两次采集的指纹也会存在位置、力量以及噪声的变化,使得获得

的细节点集存在一定的平移、旋转和局部变形,如何有效地提出一种针对非线性形变指纹的匹配方法是指纹识别系统中一项重要的研究课题。

目前,针对非线性形变指纹图像匹配已有很多种方法,其中主要包括基于界限盒的方法、基于形变模型的方法、基于局部结构相似性的方法和全局配准方法等。Jain 等人提出了一种固定尺寸的界限盒约束用于指纹匹配<sup>[1]</sup>。罗希平等人在 Jain 等人方法的基础上使用了尺寸可变的界限盒。为了处理形变指纹匹配问题<sup>[2]</sup>,Lee 等人提出了脊线距离规范化以及局

基金项目:国家自然科学基金项目(60773172);中国博士后基金项目(20070411055);江苏省博士后基金项目(0701037B)

收稿日期:2007-10-23;改回日期:2009-02-27

第一作者简介:曹国(1977—),男,讲师。2006年于上海交通大学获得工学博士学位。主要研究方向为图像处理、生物特征识别、计算机视觉。E-mail: caoguo@mail.njust.edu.cn

部配准的方法,但是该方法十分依赖选择的初始参照点对,并且需不断调整搜索的范围。薄板样条(TPS)形变模型<sup>[4]</sup>能够较好地描述指纹的形变量,但是该方法对于来自不同手指的指纹图像也强制进行配准,从而导致指纹识别误识率较高。Ross 利用平均变形量改进了 TPS 模型<sup>[5]</sup>。在已有的基于点模式的指纹匹配方法中,较多地采用了基于局部结构相似性的方法:Tong 提取了邻接特征矢量用于匹配<sup>[6]</sup>,Ratha 采用指纹的局部结构来获取指纹的对应参照点<sup>[7]</sup>,Jiang 在配准两枚指纹图像时通过计算局部结构的相似性测度实现指纹的匹配<sup>[8]</sup>。其他一些方法利用图像细节点组成的三角形划分结构等<sup>[9-11]</sup>。祝恩等人提出了一种全局指纹配准匹配的方法<sup>[12]</sup>,该方法能够较好地实现变形指纹的识别,但是当指纹形变较大时,一些细节点仍不能够正确匹配。

与以上方法不同,本文提出了一种基于多参照点局部配准的形变指纹匹配方法。该方法根据检测的多参照点对实现输入指纹图像与模板指纹图像的全局配准,从而获取指纹的公共区域;然后,公共区域内的细节点与它们各自距离最为接近的参照点分别组合,形成多个分组;最后,各个分组内的细节点以相应的参照点为极点进行极坐标转化,通过界限盒约束实现形变指纹匹配。

## 1 特征提取

### 1.1 细节点提取

指纹细节点提取需要一系列的处理过程,本文采用 Lin 的方法<sup>[13]</sup>计算指纹方向场和频率图并进行图像增强处理,采用实验室已有的算法实现指纹图像细化和细节点提取。提取的每个细节点有 4 个特征: $x$  轴坐标、 $y$  轴坐标、方向  $\alpha$  和频率  $\tau$ 。由于指纹图像局部形变使得细节点类型变化较大,所以文中并没有考虑细节点的类型特征。

### 1.2 细节点纹理特征

基于纹理的细节点特征提取,主要是以细节点为中心,在不同半径的圆上进行采样,利用采样点的方向以及频率信息来描述该细节点。采用文献<sup>[14]</sup>的方法,如图 1,以细节点  $p_i$  为中心,在  $L$  个不同半径的圆上进行采样,半径为  $r_l$  的第  $l$  个圆上均匀采样  $K_l$  个样点。细节点  $p_i$  作为圆心,其方向为  $x$  轴正方向,各参数值设置为  $(r_0 = 27, K_0 = 10)$ ,  $(r_1 = 45, K_1 = 16)$ ,  $(r_2 = 63, K_2 = 22)$ ,  $(r_3 = 81, K_3 = 28)$ 。

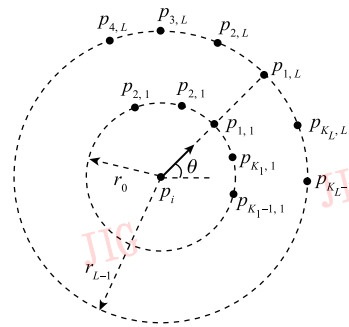


图 1 细节点邻域采样点示意图

Fig. 1 Distribution of sampling points

给定两个细节点  $p_i$  和  $p_j$ , 它们的相似性定义如下:

$$V(p_i, p_j) = \rho v_\theta(p_i, p_j) + (1 - \rho) v_w(p_i, p_j) \quad (1)$$

$$v_\theta(p_i, p_j) = \frac{\sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K_l-1} e^{-|\theta_{ik}^{p_i} - \theta_{jk}^{p_j}|}}{M}$$

$$v_w(p_i, p_j) = \frac{\sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K_l-1} e^{-|w_{ik}^{p_i} - w_{jk}^{p_j}|}}{M}$$

式中,  $M$  是细节点  $p_i$  和  $p_j$  在指纹有效区域内的采样点,  $\rho$  为加权系数, 实验中设置  $\rho = 0.5$ 。

### 1.3 细节点结构特征

指纹局部细节点构成的结构常被用于对应参照点的选择以及指纹匹配<sup>[15-16]</sup>。这些结构不仅容易度量细节点相似性, 而且不易受指纹形变影响。这里采用的细节点结构如图 2 所示, 细节点  $p_i$  以及与之距离最为接近的 5 个细节点共同构成局部结构矢量:  $S(p_i) = (r_{ik}, \phi_{ik}, \varphi_{ik}, \lambda_{ik})$ ,  $k = 1, 2, \dots, 5$ 。  $r_{ik}$  为中心细节点  $p_i$  和邻域细节点  $n_k$  之间的距离,  $\phi_{ik}$  为两个细节点  $p_i$  和  $n_k$  的方向差异,  $\varphi_{ik}$  是线段  $p_i n_k$  与  $p_i$  方向构成的锐角,  $\lambda_{ik}$  是细节点  $p_i$  和  $n_k$  的频率差

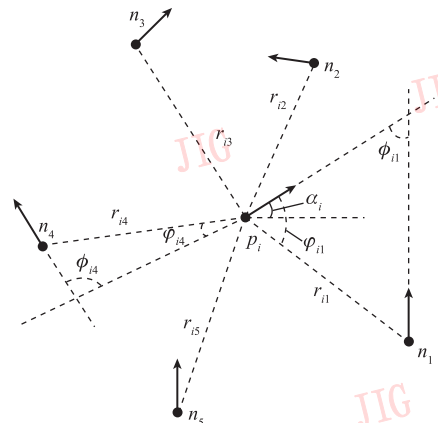


图 2 局部细节点结构

Fig. 2 Local minutia structure

异。细节节点的局部结构也会受到细节节点丢失、伪细节节点存在等的影响,因此,只有当两个细节节点  $p_i$  和  $q_j$  的局部细节节点结构中至少有 2 个邻域细节节点相似时,细节节点  $p_i$  和  $q_j$  才被认为是匹配的细节点对。

## 2 匹配方法

令  $P = \{ (x^{p_i}, y^{p_i}, \alpha^{p_i}, \tau^{p_i}, D^{p_i}, S^{p_i}) \mid 1 \leq i \leq M \}$  表示模板图像中的  $M$  个细节节点,  $Q = \{ (x^{q_j}, y^{q_j}, \alpha^{q_j}, \tau^{q_j}, D^{q_j}, S^{q_j}) \mid 1 \leq j \leq N \}$  表示输入图像中的  $N$  个细节节点。首先,对基于单参照点对的匹配方法<sup>[1-3]</sup>、基于多参照点对的全局匹配方法<sup>[12]</sup>和本文方法进行简要分析。

图 3(a) 为模板点集,有 8 个细节节点  $a, b, \dots, h$ ; 图 3(b) 为输入的细节点集,  $a', b', \dots, h'$  分别与  $a, b, \dots, h$  对应。在基于单细节点对配准的方法中,  $[a, a']$  为选择的参照点对,仅得到 3 对匹配的细节点,  $[c, c']$ ,  $[d, d']$  和  $[e, e']$ , 如图 3(c) 所示。基于多参照点对的全局配准方法中,  $[a, a']$  和  $[b, b']$  为参照点对;在基于单参照点配准方法中无法匹配的细节点对  $[f, f']$  和  $[h, h']$  能够得到正确的匹配,但是依然有两对细节点无法匹配,如图 3(d) 所示。本文方法中,细节点集首先与它们距离最近的参照点组合,从而形成多个分组:细节点  $c', d', e'$  与  $a'$  组合成  $\Omega_A$ ,  $f', g'$  与  $b'$  组合成  $\Omega_B$ ; 模板细节点集中相类似:细节点  $c, d, e$  和  $a$  组成  $\Omega_A$ , 细节点  $f, g, b$  组成

$\Omega_B$ , 然后各组细节点分别配准,如图 3(e) 所示,所有细节点均得到了正确的匹配。

### 2.1 多参照点选取

为了消除指纹细节点集  $P, Q$  之间存在的平移、旋转和局部变形,需要准确地获得点集间的匹配参照点对。提出以下约束来确定细节点  $p_i$  和  $q_j$  是否为对应点:1) 细节点  $p_i$  和  $q_j$  的频率差异要小于  $T_r$  (实验中  $T_r = 0.0125$ ); 2) 细节点  $p_i$  和  $q_j$  的相似性值  $V(p_i, q_j)$  大于给定阈值  $T_D$  ( $T_D = 0.85$ ); 3) 细节点  $p_i$  与  $q_j$  的邻域结构中至少有 2 对细节点满足如下公式:

$$\begin{cases} |r_k^{p_i} - r_m^{q_j}| < f(r) \\ |\phi_k^{p_i} - \phi_m^{q_j}| < \beta \\ |\varphi_k^{p_i} - \varphi_m^{q_j}| < \beta \\ |\lambda_k^{p_i} - \lambda_m^{q_j}| < T_\lambda \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $r = \min(r^{p_i}, r^{q_j})$ ;  $f(r) = \frac{\pi}{20} \left( 1 + \frac{20}{r^2} \right)$ ;  $\beta, T_\lambda$  为给定阈值 ( $\beta = \pi/16, T_\lambda = 0.80$ );  $k, m = 1, 2, \dots, 5$ 。

输入指纹细节点集  $Q$  与模板点集  $P$  中的细节点相互比较后,得到多对参照点。将多对参照点间的旋转平移参数方格化<sup>[17]</sup>后,计算出现频次最多方格中参数的均值 ( $\Delta\theta, \Delta x, \Delta y$ ) 作为  $P, Q$  的全局配准参数,出现频次最多方格内的细节点对作为参照点对。根据计算的全局配准参数,将输入指纹细节点集  $Q$  旋转  $-\Delta\theta$  角度并平移 ( $-\Delta x, -\Delta y$ ) 后,得到点集  $Q' = \{ (x^{q_j}, y^{q_j}, \alpha^{q_j}, \tau^{q_j}, D^{q_j}, S^{q_j}) \mid 1 \leq j \leq N \}$ , 该点集与模板点集  $P$  全局配准,其中细节点的特征  $\tau^{q_j}, D^{q_j}, S^{q_j}$  是旋转平移不变的。点集  $Q'$  和  $P$  配准后,存在公共的重叠区域  $C$ , 利用两个点集中位于区域  $C$  中的细节点进行指纹匹配。

### 2.2 局部匹配

如图 3 所示,基于单参照点对和多参照点对全局配准的指纹匹配方法对于形变指纹并不能得到最优的配准。在基于多参照点局部配准的方法中,细节点与它们距离最近的参照点划分为一组,从而形成了多个分组  $\Omega_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N_r, N_r$  为分组数量),较大程度上降低了指纹形变带来的影响。每一分组内的细节点以各自组内的参照点为极点转化为极坐标系:

$$\begin{pmatrix} r^{p_i} \\ \phi^{p_i} \\ \varphi^{p_i} \\ D(p_i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(x^{p_i} - x_{core})^2 + (y^{p_i} - y_{core})^2} \\ \tan^{-1} \left( \frac{y^{p_i} - y_{core}}{x^{p_i} - x_{core}} \right) - \theta_{core} \\ \theta_i - \theta_{core} \\ D(p_i) \end{pmatrix} \quad (3)$$

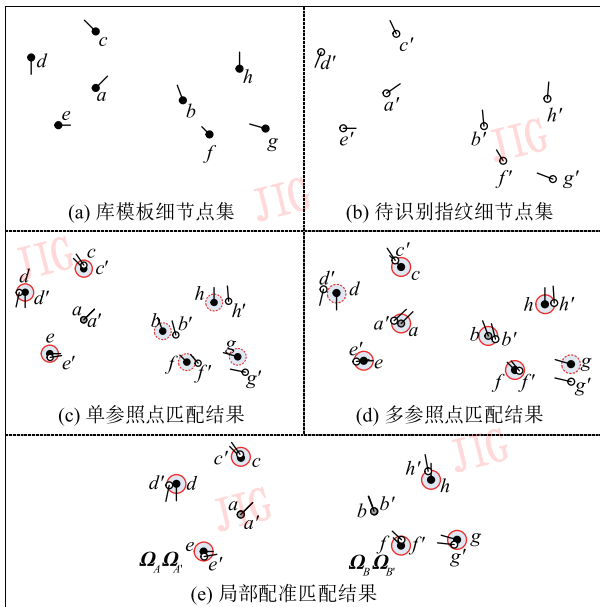


图3 基于不同配准方法的比较

Fig. 3 Comparison of different alignment methods

式中,  $(x^{p_i}, y^{p_i})$  是细节点  $p_i$  的欧氏坐标,  $(x_{core}, y_{core})$  是参照点的欧氏坐标,  $\theta_i$  是细节点  $p_i$  的方向,  $\theta_{core}$  是参照点的方向,  $(r^{p_i}, \phi^{p_i})$  细节点  $p_i$  的极坐标,  $\varphi^{p_i}$  是细节点  $p_i$  规范化后的方向值。

在细节点分组过程中,若细节点  $p_i$  与最近和次近参照点之间的距离差异小于给定的阈值  $T_{dis}$  ( $T_{dis} = 4$ ),则该细节点被划分到由最近参照点和次近参照点分别组成的多个分组中,这样避免了由于指纹形变导致细节点之间距离变化带来的分组错误。

对于划分的各个分组  $\Omega_k$ , 令

$$T_k(p_i, q'_j) = \begin{cases} V(p_i, q'_j) & |r^{p_i} - r^{q'_j}| < (r/12), |\phi^{p_i} - \phi^{q'_j}| \leq f(r) \\ & |\varphi^{p_i} - \varphi^{q'_j}| \leq f(r), V(p_i, q'_j) > T_d \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

如果细节点  $q'_j$  在多个分组中都得到了相应的匹配点,则仅记录相似性最大的  $V(p_i, q'_j)$  值,匹配分值  $S_m$  依据如下公式计算:

$$S_m = \frac{\sum_{k=1}^{N_r} \sum_{j \in \Omega_k} T_k(p_i, q'_j)}{N_{Q'} + N_p} \quad (5)$$

$N_{Q'}$  和  $N_p$  分别为输入指纹图像和模板指纹图像中位于公共区域内细节点的数目,  $N_r$  为分组数。 $S_m$  值越大,细节点集  $P$  和细节点集  $Q$  就越相似,如果该匹配值高于事先给定的阈值,则认为输入的指纹与模

板指纹来自同一手指。

### 3 实验结果

采用 FVC2002 的 4 个指纹数据库进行了实验,每个指纹库包含  $80 \times 10$  幅指纹图像,图像采集分辨率为 500 dot/inch,所有算法均用 C++ 实现。

在评价算法性能时,采用了 FVC2002 测试标准;每个样本与相同手指的其余样本未能配上的比率称为拒检率;每个手指的一个样本与其他手指的同序号样本相匹配的比率称为误识率。比较分析了 3 种不同的匹配算法:基于单参照点的匹配方法<sup>[2]</sup>,基于多参照点的全局匹配方法<sup>[12]</sup>和基于多参照点局部匹配方法。图 4 给出了 3 种不同方法的结果比较,其中,图 4(a)、(b) 为待匹配的指纹图像,图 4(c)、(d) 是采用基于单参照点方法的匹配结果,共匹配 16 对细节点;图 4(e)、(f) 中,经过全局配准后进行匹配,得到 19 对参照点;采用本文方法,利用得到的参照点进行局部配准,匹配了 21 对细节点。在实验结果中,本文方法比基于多参照点的全局匹配方法多匹配 2 对细节点,比基于单参照点的方法多匹配 5 对细节点。从图 4 中可以看出,本文方法较好地匹配了距离参照点较远的细节点,从而改善了匹配性能。

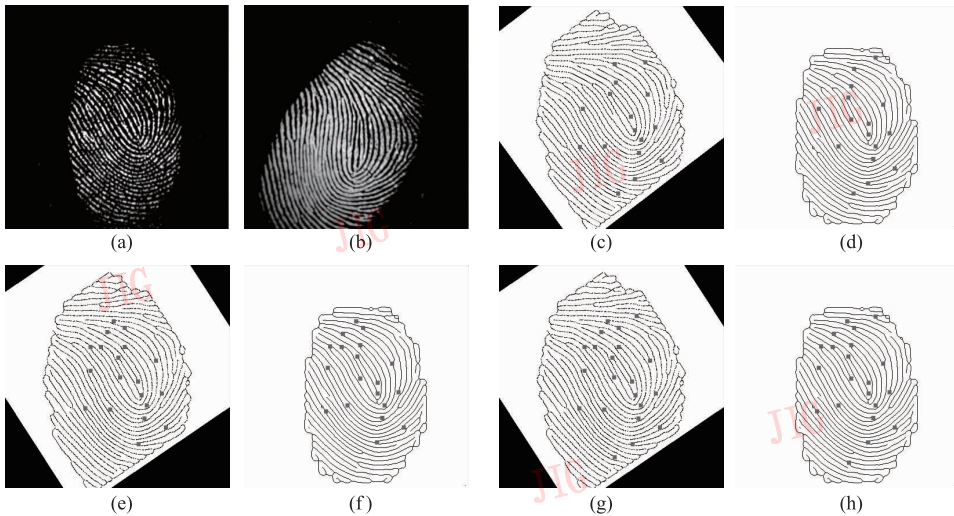


图 4 不同匹配方法比较结果

Fig. 4 Comparison of different matching results

运用指纹数据库 FVC2002 SET A,表 1 列出了相应的等错误率结果,从表中可以看到基于单参照点的方法、基于多参照点全局匹配的方法以及本文方法的平均等错误率分别为 7.40%, 5.12% 和

3.05%。本文所提出的算法的性能在测试的指纹数据库上都是最好的,而基于单参照点对匹配方法的性能总是最差的。该实验证明基于多参照点局部匹配的方法能够改进匹配性能,提高识别效率。

表1 等错误率结果

Tab.1 EER results

| 算法        | Db1  | Db2  | Db3  | Db4  | 平均   |
|-----------|------|------|------|------|------|
| 文献[2]的方法  | 5.79 | 6.47 | 9.46 | 7.86 | 7.40 |
| 文献[12]的方法 | 3.30 | 4.76 | 6.78 | 5.63 | 5.12 |
| 本文方法      | 1.98 | 2.23 | 5.30 | 2.67 | 3.05 |

## 4 结论

针对形变指纹本文提出了一种新的匹配方法。该方法根据选择的多参照点建立起了指纹的局部对应性,通过局部界限盒约束实现了指纹的匹配。实验表明本文提出的方法能够较好地处理形变指纹的匹配,指纹识别性能有了较大地提高。在接下来的研究中,将对指纹多参照点选取的准确性以及指纹局部对应性建立的过程进行深入研究,以期更进一步提高指纹匹配性能。

### 参考文献 (References)

- [1] Jain A K, Lin Hong. Ruud bolle on-line fingerprint verification [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(4):302-313.
- [2] Luo Xiping, Tian Jie. Image enhancement and minutia matching algorithms in automated fingerprint identification system [J]. Journal of Software, 2002, 13(5):946-956. [罗希平, 田捷. 自动指纹识别中的图像增强和细节点匹配算法[J]. 软件学报, 2002, 13(5):946-956.]
- [3] Lee D, Choi K, Kim J. A robust fingerprint matching algorithm using local alignment [C]//Proceedings of the 16th ICPR. Washington: IEEE Press, 2002, 3: 803-806.
- [4] Almansa A, Cohen L. Fingerprint image matching by minimization of a thin-plate energy using a two-step algorithm with auxiliary variables [C]//Proceedings of the 5th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. Washington: IEEE Press, 2000, 35-40.
- [5] Ross A, Dass S, Jain A K. A deformable model for fingerprint matching[J]. Pattern Recognition, 2005, 38(1):95-103.
- [6] Tong Xifeng, Huang Jianhua, Tang Xianglong, et al. Fingerprint minutiae matching using the adjacent feature vector[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26: 1337-1345.
- [7] Ratha N, Bolle R, Pandit V, et al. Robust fingerprint authentication using local structural similarity[C]//Proceedings of the 5th IEEE Workshop on Applied Computer Vision. Washington: IEEE, 2000, 29-34.
- [8] Jiang X, Yau W Y. Fingerprint minutiae matching based on the local and global structures [C]//Proceedings of the 15th ICPR. Washington: IEEE Press, 2000, 2: 1038-1041.
- [9] Miklós Z, Kovács-Vajna. A fingerprint verification system based on triangular matching and dynamic time warping [J]. IEEE Transactions on Pattern Anal. Mach. Intell. 2000, 22 (11): 1266-1276.
- [10] Chen Xinjian, Tian Jie, Yang Xin, et al. An algorithm for distorted fingerprint matching based on local triangle feature Set [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2006, 1(2): 169-177.
- [11] Bebis G, Deaconu T, Georgiopoulos M. Fingerprint identification using delaunay triangulation [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Information Intelligence and Systems. Washington: IEEE Press, 1999, 452-459.
- [12] Zhu En, Yin Jianping, Zhang Guomin. Multiple reference minutiae based fingerprint matching [J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(10): 1733-1739. [祝恩, 殷建平, 张国敏. 基于多参考节点的指纹匹配方法[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(10): 1733-1739.]
- [13] Lin Hong, Wan Yifei, Jain A K. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20 (8): 777-789.
- [14] Feng Jianjiang. Combining minutiae descriptors for fingerprint matching[J]. Pattern Recognition, 2008, 41: 342-352.
- [15] Wei Honglei, Ou Zongying, Gan Shukun, et al. Fingerprint matching using hierarchical alignment and matching score weighting[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2006, 18(6): 832-837. [魏鸿磊, 欧宗瑛, 甘树坤, 等. 采用逐级配准和分值加权的指纹匹配算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(6): 832-837.]
- [16] Liao Kuo, Yang Wanlin. Research and implementation of fingerprint matching method of minutiae[J]. Journal of UEST of China. 2004, 33(2): 154-157. [廖阔, 杨万麟. 点模式指纹匹配算法研究与实现[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(2): 154-157.]
- [17] Jain A K, Hong L, Pankanti S, et al. An identity-authentication system using fingerprints[J]. Proceedings IEEE, 1997, 85(9): 1365-1388.