

基于局部和全局结构的指纹细节点匹配算法

秦 伟,王兆青

(浙江理工大学计算机技术教研部,杭州 310018)

摘 要: 误识率和拒识率是指纹自动识别技术中非常重要的性能指标。使用一种新的基于局部结构和全局结构的指纹细节点匹配算法可以降低指纹自动识别的误识率和拒识率,该算法先对细节点间的相对距离作归一化处理,然后利用细节点的局部 2-邻域结构不变性对指纹进行初步匹配,最后再根据细节点的全局结构进一步匹配指纹,提高指纹匹配的准确性。实验结果表明该算法能够有效降低误识率和拒识率。

关键词: 指纹;细节点;局部结构;全局结构;匹配

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

0 引 言

近年来,指纹技术因其可靠性、唯一性越来越多地应用于身份识别当中。指纹匹配算法是指纹识别系统中极其重要的一部分,匹配算法的优劣性直接影响到系统的两个重要性能指标:误识率 FAR 和拒识率 FRR^[1]。常用的指纹匹配算法是基于细节点的局部结构进行指纹匹配的,大致可分为 3 种算法:a)把指纹图像分割成 $W \times W$ 块区域^[2-3],每一块区域里的细节点数量及类型代表该区域的局部结构,通过局部结构相似性进行两个指纹图像间的匹配;b)Jiang 等^[4]使用的方法为:使用一个细节点和它相邻的细节点之间的相对距离、径向角和方向差的平移和旋转不变性进行匹配处理;c)利用指纹图像的局部方向场、局部脊线频率和脊形状匹配图像^[5-7]。然而,以上几种方法都存在一些不足点:由于手指放置的位置和压力不同,从传感器采集到的图像会产生非线性形变,形变会生成伪细节点或缺失真细节点,还会造成脊线频率^[8]的变化,影响匹配算法的正确性。

针对以上问题,笔者提出一种新的基于局部结构和全局结构的指纹细节点匹配算法,本算法首先对指纹脊线频率作归一化处理,然后结合指纹细节点的局部和全局结构共同完成指纹的匹配工作。期望该算法能够提高指纹图像的质量,降低指纹识别系统的 FAR 和 FRR。

1 脊线频率归一化

从传感器上采集指纹时,由于指纹放置的位置和压力不同使采集到的图像会发生非线性形变,改变细节点的位置和方向,两个细节点之间的距离也会因为脊线方向和频率的形变而改变。两细节点间的距离由细节点的脊线方向、脊线频率与细节点连线相交的脊线数量决定,若两幅指纹图像中的脊线频率不同,当两细节点的脊线方向差越大、与细节点连线的脊线数量越大时,则细节点间的距离误差就越大,反之细节点间的距离误差越小。如图 1 所示,细节点 M 由三个元素组成 (x, y, ϕ) ^[9],其中 x, y 代表 M 在指纹图像中的笛卡尔坐标, ϕ 表示 M 在指纹图像中的脊方向(M 在所在脊线上的切线方向)。从同一手指中采集两次指纹图像,取其中两个细节点 M 与 T, M 与 T 的连线为 d_m ,与 d_m 相交的脊线数越多, d_m 变化越大,反之变化越小。

为了减少由非线性形变引起的 d_{mt} 错误,采用脊线频率对图像进行归一化处理,减小细节点间相对距离、径向角、方向差的误差,为指纹匹配提供更准确的参数。假设在没有非线性形变的情况下,细节点 M,T 处的频率为 f_o ,M 和 T 之间的距离为 d_o 。非线性形变后,测得 M 处的频率为 f_m ,T 处的频率为 f_t ,它们之间的距离为 d_c , ϕ_m, ϕ_t 分别为 M 和 T 的方向($0 \leq \phi_m, \phi_t \leq \pi$),则归一化后 M 和 T 间距离 d'_o ,

$$d'_o = \frac{\theta_{mt} \cdot f_m + \theta_m \cdot f_t}{\theta_{mt} + \theta_m} \cdot \frac{d_c}{f_o} \tag{1}$$

$$\theta_{mt} = \begin{cases} \left| \arctan^{-1} \left(\frac{y_m - y_t}{x_m - x_t} \right) - \phi_m \right|, & \text{若 } \left| \arctan^{-1} \left(\frac{y_m - y_t}{x_m - x_t} \right) - \phi_m \right| \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \left| \arctan^{-1} \left(\frac{y_m - y_t}{x_m - x_t} \right) - \phi_m \right|, & \text{其它} \end{cases} \tag{2}$$

$$\theta_m = \begin{cases} \left| \arctan^{-1} \left(\frac{y_m - y_t}{x_m - x_t} \right) - \phi_t \right|, & \text{若 } \left| \arctan^{-1} \left(\frac{y_m - y_t}{x_m - x_t} \right) - \phi_t \right| \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \left| \arctan^{-1} \left(\frac{y_m - y_t}{x_m - x_t} \right) - \phi_t \right|, & \text{其它} \end{cases} \tag{3}$$

其中 θ_{mt} 和 θ_m 分别代表细节点 M 和 T 的脊线方向与 d_{mt} 方向的方向差。通过脊线频率归一化对指纹图像进行预处理后,指纹图像中的各个细节点的坐标和方向可以得到修正,从而减少指纹匹配参数相对距离、径向角、方向差的误差,使匹配结果更准确。

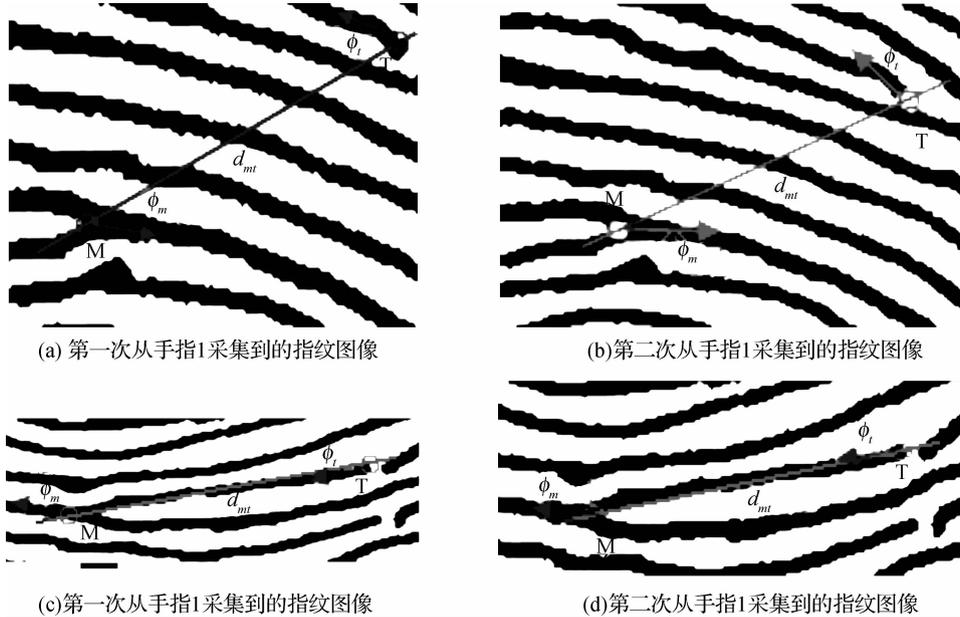


图 1 从同一手指采集到的图像变形后细节点距离的变化
注:(a)(b)的 MT 属于不同脊线,(c)(d)的 MT 属于同一脊线

2 局部结构细节点匹配

指纹图像中的细节点 M_k 可以用特征向量 $V_k = (x_k, y_k, \phi_k, t_k)^T$ 表示,其中 (x_k, y_k) 表示 M_k 的坐标, ϕ_k, t_k 分别是它的局部脊坐标和细节点类型(脊末端或脊分叉),其中 $\phi_k \in (-\pi, \pi]$ 。令特征向量集为 $V, V = \{V_k | k = 1, 2, \dots, N\}$, N 表示指纹图像中的细节点总数。指纹细节点匹配算法的过程是:找出一个指纹模板和另一个待验证的指纹图像中局部细节点结构的相似度,若相似度大于阈值,则匹配成功,两幅指纹图像来自同一个手指。为了简化本算法的描述,定义 $d\phi(\phi_1, \phi_2)$ 表示方向 ϕ_1, ϕ_2 的方向差, $\phi_1, \phi_2 \in (-\pi, \pi]$,见式(4):

$$d\phi(\phi_1, \phi_2) = \begin{cases} \phi_1 - \phi_2, & \text{若 } -\pi \leq \phi_1 - \phi_2 < \pi \\ 2\pi + \phi_1 - \phi_2, & \text{若 } \phi_1 - \phi_2 < -\pi \\ 2\pi - \phi_1 + \phi_2, & \text{若 } \phi_1 - \phi_2 \geq \pi \end{cases} \tag{4}$$

在笛卡尔坐标系中,细节点 M_k 的坐标和脊方向会随着指纹图像的平移和旋转而发生变化,不能直接用作匹配运算。在极坐标中,细节点和它距离最近即相邻的 2 个细节点的欧式距离和径向角则不会因为指纹图像的平移、旋转发生变化。所以笔者选用极坐标变换对细节点和它的相邻结构作描述。如图 2 所示, M_k 为从指纹图像提取出来的细节点, M_i, M_j 表示与 M_k 距离最相近的两个细节点,则 d_{ki}, d_{kj} 分别为 M_k 和 M_i, M_j 的相对距离, θ_{ki}, θ_{kj} 分别为 M_k 与它的 2-邻域细节点 M_i, M_j 的径向角,计算如下:

$$d_{ki} = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} \quad (5)$$

$$\theta_{ki} = d\phi\left(\arctan^{-1}\left(\frac{y_k - y_i}{x_k - x_i}\right), \phi_k\right) \quad (6)$$

$$\phi_{ki} = d\phi(\phi_k, \phi_i) \quad (7)$$

$d_{kj}, \theta_{kj}, \phi_{kj}$ 的计算公式和 $d_{ki}, \theta_{ki}, \phi_{ki}$ 一样,为了减少指纹非线性形变和指纹边界生成的伪细节点的错误匹配,规定 $d_{ki} \in (dl, dh)$, dl 是细节点与其邻域细节点相对距离的下限值, dh 是细节点与其邻域细节点相对距离的上限值。细节点局部结构的另一个特性是与两细节点连线相交的脊线数 n_{ki} 具有平移、旋转不变性。细节点 M_k 的 2-邻域结构用特征向量 E_k 表示:

$$E_k = \{i, j, d_{ki}, d_{kj}, \theta_{ki}, \theta_{kj}, \phi_{ki}, \phi_{kj}, n_{ki}, n_{kj}, t_k, t_i, t_j\} \quad (8)$$

其中 i, j 表示细节点集 V 的第 i, j 个元素。令 $E = \{E_k | k=1, 2, \dots, n\}$, n 表示细节点数,假设 E_i^T 和 E_j^j 分别表示指纹模板中细节点 i 的 2-邻域结构,待验证指纹图像中细节点 j 的 2-邻域结构,则 E_i^T 和 E_j^j 的相似度 $S(i, j)$ 可表示为:

$$S(i, j) = \frac{1}{2}(1 + W(E_i^T - E_j^j)) \quad (9)$$

$$W(E_i^T - E_j^j) = \begin{cases} 1.0, & \text{若 } W(E_i^T - E_j^j) < 2 \\ 0.8, & \text{若 } 2 \leq W(E_i^T - E_j^j) < 3 \\ 0.6, & \text{若 } 3 \leq W(E_i^T - E_j^j) < 3.5 \\ 0.3, & \text{若 } 3.5 \leq W(E_i^T - E_j^j) < 4.5 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

$$W = \{\omega_i, \omega_j, \omega_d, \omega_\theta, \omega_\phi, \omega_\psi, \omega_\varphi, \omega_n, \omega_t, \omega_l, \omega_r\} \quad (11)$$

W 表示特征向量的权重, W 中各参数的值代表特征向量 E_k 各参数的权重,从多次实验中得到 $\omega_i = \omega_j = 1, \omega_d = 1, \omega_\theta = \omega_\phi = \frac{56}{\pi}, \omega_n = 3, \omega_t = 1$ 为最佳权重值。式(10)中 $W(E_i^T - E_j^j)$ 的值越小表明指纹模板中的细节点 i 与输入图像中的细节点 j 的相似度越大。如果 $W(E_i^T - E_j^j) < 2$,则细节点 i, j 在指纹图像中的局部结构相似度非常高,表明 i, j 局部匹配程度极高;反之如果 $W(E_i^T - E_j^j) > 4.5$,表明细节点 i, j 的局部结构相似度非常低,两者完全不匹配。 $S(i, j) \in [0.5, 1], S(i, j) = 0.5$ 表示两细节点的 2-邻域结构完全不匹配, $S(i, j) = 1$ 表示两细节点的 2-邻域结构完全匹配。

3 全局结构细节点匹配

从同一指纹采集到的指纹图像,由于伪细节点的存在,它们的细节点局部结构不会完全匹配,影响了匹配算法的准确性。为了提高匹配算法的可靠性,本算法选出匹配结果值最大的细节点局部结构对作为全局结构的参考基准点,假设匹配分数最高的细节点局部结构对是 $Mg(g1, g2)$,则 $S(g1, g2) = \max_{i,j} (S(i, j))$ 。将其他细节点与参考基准点作极坐标运算,得到特征向量 $Eg, Eg_i = (d_{gi}, \theta_{gi}, \phi_{gi})^T, d_{gi}, \theta_{gi}, \phi_{gi}$ 的运算见式(5),式(6),式(7)。再次计算 $S(i, j)$,通过 $S(i, j)$ 计算全局匹配相似度 $Score$:

$$Score = \frac{\sum_{i,j} S(i, j)}{\max\{m, n\}} \times 1000 \quad (12)$$

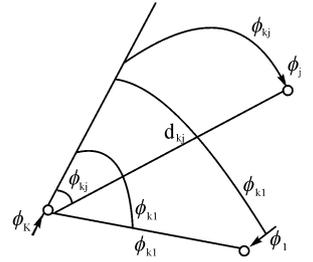


图2 细节点 M_k 的 2-邻域局部结构

式(12)中 m, n 分别为指纹模板的细节点总数和待验证指纹图像的细节点总数。基于 2-邻域局部结构的指纹图像全局结构图如图 3 所示。如果 $Score$ 的值大于阈值,则两幅图像来自同一指纹, $Score$ 的值越大,表示两幅图像的匹配相似度越高,本实验中 $Score$ 的阈值为 $Score = 300$ 。从图 3 可以看到:a)中细节点 10, 9, 11 构成细节点 10 的局部 2-邻域结构,b)中细节点 6, 5, 7 构成细节点 6 的局部 2-邻域结构,a)中的细节点 10 和 b)中的细节点 6 具有完全匹配的 2-邻域局部结构,并且 $S(10, 6) = \max_{i,j}(S(i, j))$,所以将 $Mg(10, 6)$ 作为参考基准点,使两幅图像的其他细节点分别与它们的参考基准点作极坐标运算,计算全局匹配相似度 $Score$,得 $Score = 369$,说明两幅图像匹配成功,两幅图像来自同一个手指。

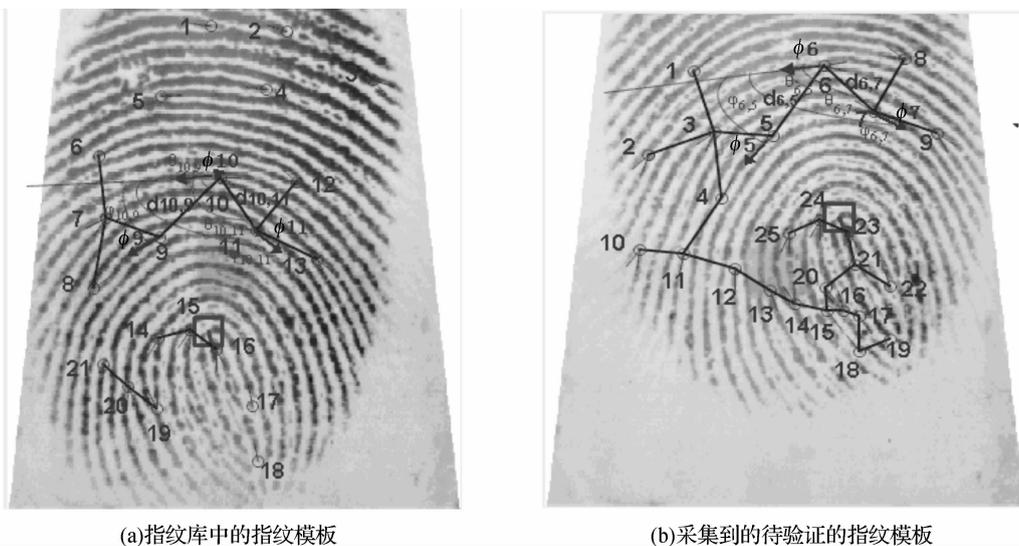


图 3 两幅采集自同一手指的指纹图像的 2-邻域全局结构

4 实验结果

使用细节点局部结构和全局结构的算法能够很好地验证指纹,但同时也会产生误识率和拒识率:匹配结果 $Score$ 超过阈值的两幅图像可能不是来自同一枚指纹造成指纹的误识, $Score$ 未达到阈值的两幅图像可能来自同一枚指纹造成指纹的拒识。本文在嵌入式系统上使用 C 语言实现基于局部结构和全局结构的指纹细节点匹配算法。该系统主要由晟元公司的 32 位 DSP 芯片 AS603^[10] 构成。用该系统对 FVC2004 提供的 DB1、DB2、DB3、DB4^[11] 4 个指纹库进行测试。其中 DB1、DB2、DB3 指纹库中的指纹采集自真人手指,共 100 个手指,每个手指采集 8 副指纹图像;DB4 包含 10 个人工合成的手指,每个手指有 8 副指纹图像,所以数据库总共有 880 枚指纹。本算法对 4 个库中的任意两枚指纹进行测试,计算各指纹库的 FAR 和 FFR,匹配结果如表 1 所示。表 2 表示的是使用文献[12]在系统 FVC2004 中测试得到的匹配结果,表 1、表 2 的实验数据显示,基于局部结构和全局结构的指纹匹配算法的拒识率和误识率比文献[12]低。从表 2 得出,本算法对于合成指纹进行匹配时,拒识率和误识率均比较高,有待改进。从测试结果可以看到,本算法能够有效减少指纹图像旋转、平移、非线性形变、边界对指纹匹配的影响。

表 1 使用文献[12]得到的匹配结果

指纹库	拒识率/%	误识率/%
DB1	2.15	0.16
DB2	1.91	0.15
DB3	2.22	0.15
DB4	2.78	0.12

表 2 本算法匹配结果

指纹库	拒识率/%	误识率/%
DB1	1.21	0.08
DB2	1.47	0.06
DB3	1.25	0.09
DB4	2.30	0.11

5 结 语

描述了如何利用指纹图像细节点的局部结构和全局结构对指纹图像进行匹配,先对指纹图像进行脊频率归一化,有效避免了指纹图像非线性形变对指纹匹配算法的影响。使用细节点 2-邻域局部结构和全局结

构使匹配算法不受指纹图像平移、旋转和边界的干扰。同时本算法的复杂度不高,容易实现,实验测试结果显示本算法具有较低的 FAR 和 FRR,但是算法还是有待改进,以便更有效地降低 FAR 和 FRR。

参考文献:

- [1] Maio D, Maltoni D, Cappelli R, et al. FVC2000: Fingerprint verification competition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligenc, 2002, 24(3): 402-412.
- [2] Hrechak A K, McHugh J A. Automated fingerprint recognition using structural matching[J]. Pattern Recognition, 1990, 23(8): 893-904.
- [3] Willis A J, Myers L. A cost-effective fingerprint recognition system for use with low-quality prints and damaged fingertips [J]. Pattern Recognition, 2001, 34(2): 255-270.
- [4] Jiang X, Yau W Y. Fingerprint minutiae matching based on the local and global structures[J]. Pattern Recognition, International Conference, 2000, 2(9): 1038-1041.
- [5] Chen X, Tian J, Yang J, 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.
- [6] Linag X, Bishnu A, Asano T. A robust fingerprint indexing scheme using minutia neighborhood structure and low-order delaunay triangles[J]. Information Forensics and Security, IEEE Transactions, 2007, 2(4): 721-733.
- [7] Tong X, Huang J, Tang D, et al. Fingerprint minutiae matching using the adjacent feature vector[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(9): 1337-1345.
- [8] Hong L, Wan Y, Jain A. Fingerprint image enhancement algorithm and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on PAMI, 1998, 20(8): 12-13.
- [9] Davide Maltoni, Dario Maio. Handbook of Fingerprint Recognition[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2009: 40-70.
- [10] Synochip. AS603 Processor Datasheet[DB/OL]. (2009-06-23). http://www.synochip.com/cn/download/datasheet/AS603_Datasheet_Ev.
- [11] Raffaele Cappelli, Dario Maio. Performance evaluation of fingerprint verification systems[J]. IEEE Transactions on PAMI, 2006, 28(1): 3-16.
- [12] 朱 宁, 施荣华, 吴科桦. 一种新的点模式指纹匹配方法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 5(23): 74-76.

Fingerprint Minutiae Matching Using Local and Global Structures

QIN Wei, WANG Zhao-qing

(Instructional Division for Computing Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: FAR and FRR are the most important performance indexes in automatic fingerprint technology. This paper applies local and global structures of fingerprint minutiae to match fingerprint images to reduce FAR and FRR. The algorithm firstly normalizes the ridge frequency to decrease the noise, then utilizes the 2-neighborhood local structure of minutiae to match images and gets the best-matched minutiae pair, last matches images according to the global structure of minutiae in advance. Experimental results show the excellent performance of the proposed algorithm and effective reduction of FAR and FRR.

Key words: fingerprint; minutiae; local structure; global structure; match

(责任编辑: 陈和榜)