

基于复合方向特征的快速指纹验证

佟喜峰^{1),2)} 黄剑华¹⁾ 刘松波¹⁾ 唐降龙¹⁾

¹⁾(哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001) ²⁾(大庆石油学院图书馆, 大庆 163318)

摘要 由于对拒真率、认假率、比对时间、模板占用空间等指标都有较严格的要求, 指纹验证是一项复杂且具有挑战性的任务。提出了复合方向特征这一新颖的特征用于指纹验证, 该特征由脊线旋转方向和4个相对方向组成。指纹验证由两个过程组成: 基于复合方向特征的细节点对搜索, 它加速了指纹校准; 基于复合方向特征的匹配分值计算, 它使匹配的鲁棒性增强。用国际指纹验证大赛指纹库中的测试样本进行了测试, 实验结果表明, 该方法能够实现可靠、快速的指纹验证。

关键词 指纹验证 细节特征点 复合方向特征

中图分类号: TP391.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)10-1299-05

Complex Direction Feature Based Fast Fingerprint Verification

TONG Xi-feng^{1),2)}, HUANG Jian-hua¹⁾, LIU Song-bo¹⁾, TANG Xiang-long¹⁾

¹⁾(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

²⁾(The Library of Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318)

Abstract Because of high restriction on False Reject Rate, False Accept Rate, computational time cost and template size, fingerprint verification is a challenging task. A novel feature named complex direction feature is proposed in this paper, which consists of ridge rotation direction and four local relative directions. The fingerprint verification consists of two stages: complex direction feature based minutiae alignment, which speeds up alignment; matching score calculation by complex direction feature, which makes matching more robust. Experiments were performed on the fingerprint database used by Fingerprint Verification Competition, and the experimental results show that the proposed algorithm can achieve reliable and fast fingerprint verification.

Keywords fingerprint verification, minutiae, complex direction feature

1 引言

指纹识别是人体生物特征识别技术中发展最为成熟、应用最广的一个分支。由于指纹具有唯一性、终生不变性、难于伪冒性等特点, 指纹作为法庭证据已经有非常悠久的历史。随着基于计算机的自动指纹识别技术诞生及不断发展完善, 指纹识别技术已应用于越来越广的领域。目前指纹自动识别的主流方法是基于细节点的, 即提取细节点作为特征来表征指纹图像, 通过比对这些细节点进行识别。近年

大量研究工作都是围绕着如何更好更快地提取细节点和匹配细节点进行的^[1]。随着指纹识别应用的推广, 细节特征点方法的不足也越来越显现出来, 质量不好的指纹, 识别效果很不理想, 严重制约了指纹识别在社会保险、银行储蓄等大范围的应用。可以说, 这一问题已成为指纹识别的瓶颈问题。

目前已研究出一些方法使基于细节特征点的指纹匹配具有更强的鲁棒性。如采用三角匹配克服指纹变形并用动态时间规划对匹配进行验证^[2]; 采用细节特征和纹理特征相结合的指纹鉴别方法^[3]; 采用基于 Hough 变换的方法, 通过指定不同的缩放尺

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60332010)

收稿日期: 2004-10-26; 改回日期: 2005-03-07

第一作者简介: 佟喜峰(1974~), 男, 助理研究员。现为哈尔滨工业大学模式识别与智能系统专业博士研究生。主要研究方向包括指纹识别、图像处理等。E-mail: tongxifeng@eyou.com

度、旋转和平移参数来对特征点集进行 Hough 变换,并用最大分值衡量两个指纹的相似度^[4];在匹配过程中采用可变大小的限界合来克服指纹的非线性形变,取得了好的实验结果^[5]。

Bazen 等人提出了通过两步匹配实现指纹验证的方法^[6],在这个方法中首先在第 1 阶段通过严格的阈值使一部分的点匹配上,然后在第 2 阶段通过建立指纹的弹性形变模型使大部分扭曲的特征点匹配上。Tico 等人提出了通过基于方向的细节点描述符来进行指纹匹配的方法^[7]。在该方法中先对特征点求取基于方向的细节点描述符,然后根据基于细节点描述符实现了细节点的匹配。

Jain 等提出了基于点模式校准的匹配方法^[8],在该方法中关联的脊线用来实现模板的校准,并取得了好的实验结果。但是,如果只保存较短长度的脊线,模板校准的精度会较低,如果保存脊线的长度较长,模板会占用很大的存储空间,这是大模板库所不能容忍的。

Jiang 和 Yau 提出了使用局部结构和全局结构信息的匹配方法^[9],在这个方法中局部结构用于确定特征点集的对应关系,而全局结构特征用于确定指纹的唯一性。但是如果局部结构中只包含了较少数目的特征点,在出现伪特征点及漏掉真特征点的情况下容易发生拒识,如果局部结构中包含了较多数目的特征点,则局部结构会过于复杂,从而增加算法的复杂度并同样导致模板占用过大的存储空间。

除细节特征点的位置和方向外,目前已有很多特征被用于指纹验证,例如特征点类型特征^[9,10],特征点间的脊线数目特征^[4,9],与特征点相连的脊线形状特征^[5,8]等。鉴于特征点类型特征、脊线数目特征等在低质量图像中不够稳定,提出了一种新颖且稳定的复合方向特征用于指纹验证,并取得了很好的实验结果。

2 复合方向特征

给定一个指纹图像,假设已通过文献[11]的方法计算纹理方向并进行图像增强,通过文献[5]的方法对图像进行二值化,通过文献[12]的方法得到了细化图像,通过文献[13]的方法提取细节点。如图 1 所示,假设 m 是一幅指纹图像中的一个细节点, mtv 是始于 m 的一段细化的脊线, pt 是以 m 为中心, r 为半径的一段圆弧,并假设 mp 所在直线的方

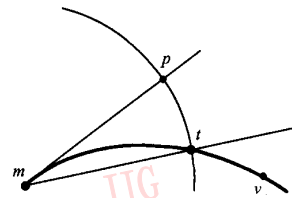


图 1 脊线旋转方向特征示意图
Fig. 1 Sketch map of ridge rotation direction

向为 m 附近指纹的纹理方向,再假设脊线 mtv 与圆弧 pt 相交于 t ,则定义 $\varphi_0 = \angle pmt$ 为细节点 m 的脊线旋转方向。

如图 2 所示,假设 m 是指纹的一个细节点, k 为从 m 开始沿着脊线前进 8 个像素点得到的像素点,定义 \vec{mk} 的方向为当前细节点的方向,以 m 为中心,以 \vec{mk} 所在直线为一条对角线,并假设对角线长度为 d_1 ,可以建立正方形 $abcd$,假设正方形 4 个边的中点分别为 e, f, g, h ,则在指纹图像上 e, f, g, h 4 点处有确定的纹理方向,不妨设为 o_1, o_2, o_3, o_4 ,再假设 \vec{mk} 的方向为 θ ,那么 $\varphi_1 = o_1 - \theta, \varphi_2 = o_2 - \theta, \varphi_3 = o_3 - \theta$ 和 $\varphi_4 = o_4 - \theta$ 构成了 4 个相对方向。假设该指纹图像逆时针旋转 ω 后得到另一幅指纹图像,在旋转后的指纹图像中 $\varphi'_0, \varphi'_1, \varphi'_2, \varphi'_3$ 和 φ'_4 分别对应着旋转前的 $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 和 φ_4 。由于旋转后的指纹图像中 $\angle pmt$ 未发生改变,故 $\varphi'_0 = \varphi_0$ 。由于 $\varphi'_1 = o'_1 - \theta' = (o_1 + \omega) - (\theta + \omega) = o_1 - \theta$,故 $\varphi'_1 = \varphi_1$ 。同理可证 $\varphi'_2 = \varphi_2, \varphi'_3 = \varphi_3$ 和 $\varphi'_4 = \varphi_4$ 。以上证明表明 $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 和 φ_4 具有旋转无关性。

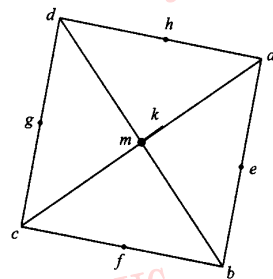


图 2 相对方向特征示意图
Fig. 2 Sketch map of relative directions

最后,定义一个细节点 m 复合方向特征 (complex direction feature) 如下:

$$F_{CDF}(m) = \langle \varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4 \rangle \quad (1)$$

假设 p 和 q 为两个细节点, $F_{CDF}(p)$ 和 $F_{CDF}(q)$

为 p 和 q 的复合方向特征。由上面的获取过程可知,若 p 和 q 为同一个手指的两个指纹图像对应的细节点,则 $F_{CDF}(p)$ 和 $F_{CDF}(q)$ 将会非常类似,若 p 和 q 为非对应的细节点,则 $F_{CDF}(p)$ 和 $F_{CDF}(q)$ 非常类似的可能性很小。所以尝试将复合方向特征用于指纹的细节点匹配。为度量 $F_{CDF}(p)$ 和 $F_{CDF}(q)$ 的相似性,采用了如下距离函数计算两个复合方向特征的距离:

$$D_{CDF}(p, q) = \sum_{i=0}^4 \left(\frac{\sqrt{|\varphi_{pi} - \varphi_{qi}|}}{(\beta + \sqrt{|\varphi_{pi} - \varphi_{qi}|})} \right) \quad (2)$$

式中,当 $\sqrt{|\varphi_{pi} - \varphi_{qi}|}$ 的值小于 β 时,随着 $\sqrt{|\varphi_{pi} - \varphi_{qi}|}$ 增加, $D_{CDF}(p, q)$ 增加较快,当 $\sqrt{|\varphi_{pi} - \varphi_{qi}|}$ 的值大于 β 时,随着 $\sqrt{|\varphi_{pi} - \varphi_{qi}|}$ 增加, $D_{CDF}(p, q)$ 增加较慢。适当的 β 值有助于通过式(2)区分对应的特征点对和非对应的特征点对。

由上面过程可以看出复合方向特征具有很多优良特性,具体表现在:

(1) 复合方向特征是针对各个独立的细节点的,不需要考虑细节点之间的相对关系(Jiang 和 Yau 提出的局部结构特征^[9]需要考虑细节点间的相对位置关系),因此非常容易获取;

(2) 从该特征的距离函数可以看出该特征易于比对,计算量小;

(3) 该特征仅包含了 5 个方向,因此占用的模板空间很小;

(4) 该特征的平移无关性和旋转无关性使得两个复合方向特征可以直接进行比较。

3 细节点匹配

细节点匹配共分为细节点校准、匹配分值计算两个过程。通过细节点校准过程实现一个指纹的细节点集的坐标变换,从而为匹配分值计算做好准备。而匹配分值计算则通过细节点位置、方向等信息对细节点进行匹配,并计算匹配上的细节点对的相似度。

3.1 细节点校准

鉴于在细节点提取过程中有可能存在类型错误,即把分叉点提取为端点或把端点提取为分叉点,因此,在本算法中仅采用了细节点的位置和方向信息。假定 P 和 Q 是从两幅指纹图像中提取到的两个细节点集合,为便于描述,采用如下形式表达:

$$P = \{\dots, [p_{ix}, p_{iy}, p_{i\theta}, F_{CDF}(p_i)], \dots\}, i \in [1, m] \quad (3)$$

$Q = \{\dots, [q_{jx}, q_{jy}, q_{j\theta}, F_{CDF}(q_j)], \dots\}, j \in [1, n] \quad (4)$
 其中, p_{ix} 和 p_{iy} 为第 i 个细节点的横纵坐标, $p_{i\theta}$ 为第 i 个细节点的方向, $F_{CDF}(p_i)$ 为第 i 个细节点的复合方向特征。 Q 的定义与此类似。

为实现细节点校准需要确定参考点,通常由于不能快速找到参考细节点,因此细节点匹配过程计算量往往非常大。为此先通过复合方向特征比对排除掉大多数参考点,大大加速了指纹校准速度。

假设 p_i 是 P 中的一个细节点, q_j 是 Q 中的一个细节点,若满足如下条件,细节点对 $\langle p_i, q_j \rangle$ 添加到集合 S_{CDF} 中。

$$D_{CDF}(p_i, q_j) < T_{CDF} \quad (5)$$

其中, T_{CDF} 为距离阈值。

如图 3 所示,假设 $\langle p_a, q_b \rangle$ 和 $\langle p_c, q_d \rangle$ 是集合 S_{CDF} 中的两对细节点, $\theta_a, \theta_b, \theta_c, \theta_d$ 分别代表 p_a, q_b, p_c, q_d 4 个细节点的方向,而 θ_{ac} 代表 $p_a p_c$ 的方向, θ_{bd} 代表 $q_b q_d$ 的方向。如果 $\langle p_a, q_b \rangle$ 和 $\langle p_c, q_d \rangle$ 满足以下 3 个条件,则认为找到了两对参考点。

$$||p_a p_c| - |q_b q_d|| < T_{pd} \quad (6)$$

$$|(\theta_a - \theta_{ac}) - (\theta_b - \theta_{bd})| < T_{p\theta} \quad (7)$$

$$|(\theta_c - \theta_{ac}) - (\theta_d - \theta_{bd})| < T_{p\theta} \quad (8)$$

其中, T_{pd} 为距离阈值; $T_{p\theta}$ 为方向阈值。

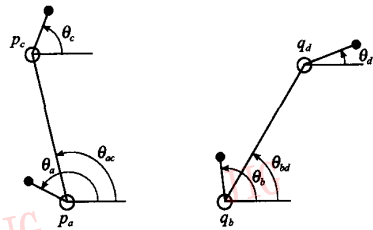


图 3 细节点校准示意图

Fig. 3 Sketch map of minutiae alignment

为了实现精确的指纹校准,采用双细节点校准的方法,通过下面一组公式实现了坐标变换:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{p_{cy} - p_{ay}}{p_{cx} - p_{ax}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{q_{dy} - q_{by}}{q_{dx} - q_{bx}} \right) \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} q'_{jx} \\ q'_{jy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{jx} - q_{bx} \\ q_{jy} - q_{by} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_{ax} \\ p_{ay} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$q'_{j\theta} = q_{j\theta} + \theta \quad (11)$$

由 $F_{CDF}(q_j)$ 的平移和旋转无关性,有 $F_{CDF}(q'_j) = F_{CDF}(q_j)$ 。经过以上过程后,得到坐标变换后的细节点集 $Q' = \{\dots, [q'_{jx}, q'_{jy}, q'_{j\theta}, F_{CDF}(q'_j)], \dots\}, j \in [1, n]$ 。

3.2 匹配分值计算

假定 p 是集合 P 中的一个细节点, q' 是集合 Q' 中的一个细节点。如果满足下面两个条件, 则认为 p 和 q' 能匹配上。

$$|p_\theta - q'_\theta| < T_\theta \quad (12)$$

$$\sqrt{(p_x - q'_x)^2 + (p_y - q'_y)^2} < T_d \quad (13)$$

其中, T_d 为距离阈值, T_θ 为方向阈值。

传统计算指纹相似度的方法一般是计算已匹配的特征点个数或已匹配的特征点个数与特征点总数的比值。新颖的基于复合方向特征的匹配相似度计算, 在细节点匹配时不但考虑细节点的位置和方向, 还计算复合方向特征的相似度, 计算公式如下

$$M_{score}(p, q') = \frac{1 + s_{CDF}(p, q')}{2} \quad (14)$$

其中, $s_{CDF}(p, q')$ 的定义如下:

$$s_{CDF}(p, q') = \begin{cases} 1.2 & D_{CDF}(p, q') < 1.25 \\ 1.0 & 1.25 \leq D_{CDF}(p, q') < 1.875 \\ 0.7 & 1.875 \leq D_{CDF}(p, q') < 2.125 \\ 0.5 & 2.125 \leq D_{CDF}(p, q') < 2.5 \\ 0.3 & 2.5 \leq D_{CDF}(p, q') \end{cases} \quad (15)$$

将所有匹配上的细节点对 $\langle p, q' \rangle$ 按式 (14) 求得的分值进行累加, 即得到了最后的匹配分值。

4 实验结果

由于复合方向特征及对应的距离函数包含 r 、 d_i 、 β 等多个参数, 参数的不同取值将对算法性能产生重要影响。为测试不同的参数值对指纹验证的准确率及速度的影响, 取不同参数值对 2000 年国际指纹验证大赛 (FVC2000) 的指纹库 DB1_a 进行了测试, 并采用了 FVC2000 的测试方法^[14]。定义相等错误率 (equal error rate, EER) 为拒真率 (false non-match rate, FNMR) 和认假率 (false match rate, FMR) 相等时的拒真率。在奔腾 3 主频 866MHz 的 PC 机上进行测试, r 、 d_i 和 β 取不同值时的测试结果如表 1 所示。

通过表 1 可以看出, 随着 β 增加, EER 减小, 但平均比对时间随之增加。当 β 由 0.35 增加到 0.5 时, EER 降低不明显, 但平均比对时间却显著增加。因此, 最后取 $\beta = 0.35$ 。当 $\beta = 0.35$ 时, $r = 40$, $d_i = 170$ 使 EER 达到最小值。

表 1 在 FVC2000 DB1_a 指纹库上的测试结果

Tab. 1 Results on FVC2000 DB1_a with $\beta = 0.2, 0.35, 0.5$

r	d_i	$\beta = 0.2$		$\beta = 0.35$		$\beta = 0.5$	
		EER	平均比对时间 (ms)	EER	平均比对时间 (ms)	EER	平均比对时间 (ms)
20	57	0.078 0	3.68	0.057 2	11.8	0.054 8	27.6
20	113	0.085 6	2.93	0.051 1	8.74	0.050 5	23.6
20	170	0.087 8	2.85	0.050 8	8.06	0.050 1	23.4
40	57	0.085 8	3.63	0.055 7	10.57	0.054 7	24.1
40	113	0.097 3	2.86	0.049 8	7.67	0.050 8	19.9
40	170	0.084 6	3.05	0.049 0	6.81	0.047 1	18.5
60	57	0.087 1	3.28	0.053 9	9.83	0.053 5	22.7
60	113	0.085 4	3.11	0.050 9	6.94	0.049 4	17.4
60	170	0.094 0	2.69	0.050 7	6.13	0.046 5	16.3

用类似的方法确定其他参数如下: $T_{CDF} = 2.81$, $T_{pd} = 5.0$, $T_{p\theta} = 0.3$, $T_d = 8.0$, $T_\theta = 0.4$ 。根据以上参数对 FVC2000 DB2_a 指纹库进行测试, 得到的 ROC (receiver operating characteristic) 曲线如图 4 所示。

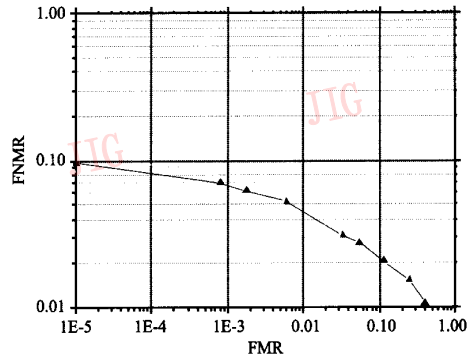


图 4 对 FVC2000 DB2_a 测试得到的 ROC 曲线

Fig. 4 The ROC on FVC2000 DB2_a

通过实验得到本文算法在 DB2_a 上的相等错误率为 0.032 3, 在奔腾 3 主频 866MHz 的 PC 机上的平均比对时间为 8.90ms。使用特征点匹配方法^[6], 对 FVC2000 DB2_a 指纹库的测试结果为相等错误率为 0.06, 在奔腾 3 主频 1000MHz 的 PC 机上的比对时间约为 90ms ~ 100ms。实验结果对比表明, 本文算法在速度与准确率两项指标上均优于特征点匹配方法^[6]。

5 结论

复合方向特征用于指纹验证, 具有易于获取、易于比对、占用模板空间小、平移无关、旋转无关等优

点。通过复合方向特征的比对预选参考细节点,大大加速了指纹校准过程。在细节点匹配时不但考虑细节点的位置和方向,还计算复合方向特征的相似度,使指纹验证鲁棒性增强。在国际指纹验证大赛的标准指纹库上进行测试,保证了测试的客观性和可信度。

参考文献 (References)

- 1 Zhang D. Automated Biometrics: Technologies and Systems [M]. Boston, MA, USA: Kluwer Academic Publisher, 2000.
- 2 Kovács-Vajna Z M. A fingerprint verification system based on triangular matching and dynamic time warping [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2000, 22(11):1266 ~ 1276.
- 3 Ross A. Fingerprint matching using minutiae and texture features [A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing [C], Thessaloniki, Greece, 2001: 282 ~ 285.
- 4 Ratha N K, Karu K. A real time matching system for large fingerprint databases [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(8): 799 ~ 813.
- 5 Luo X P, Tian J. 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匹配算法 [J]. 软件学报, 2002, 13(5): 946 ~ 956.]
- 6 Bazen A M, Gerez S H. Fingerprint matching by thin-plate spline modelling of elastic deformations [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(8): 1859 ~ 1867.
- 7 Tico M, Kuosmanen P. Fingerprint matching using an orientation-based minutia descriptor [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(8): 1009 ~ 1014.
- 8 Jain A K, Hong L, Bolle R. On-line fingerprint verification [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(4): 302 ~ 314.
- 9 Jiang X D, Yau W Y. Fingerprint minutiae matching based on the local and global structures [A]. In: Proceedings of International Conference on Pattern Recognition [C], Barcelona, Spain, 2000, 2: 1042 ~ 1045.
- 10 Bhanu B, Tan X. Fingerprint indexing based on novel features of minutiae triplets [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 616 ~ 622.
- 11 Hong L, Wan Y F, Jain A K. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777 ~ 789.
- 12 Naccache N J, Shinghal R. SPTA: A proposed algorithm for thinning binary patterns [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1984, 14(3): 409 ~ 418.
- 13 Espinosa-Duró V. Minutiae detection algorithm for fingerprint recognition [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2002, 17(3): 7 ~ 10.
- 14 Maio D, Maltoni D, Cappelli R, et al. FVC2000: Fingerprint verification competition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(3): 402 ~ 412.