

一种快速的指纹参照点对选取方法研究

曹国¹⁾ 毛志红²⁾ 梅园¹⁾ 夏德深¹⁾

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

摘要 快速准确地确定匹配参照点对是实现基于点模式指纹识别的一个关键问题,针对该问题本文提出了一种基于脊线校准的确定匹配参照点对的新方法。该方法首先利用细节点间的距离、类型以及细节点与脊线样点之间构成的网状结构来构建新的局部特征向量,然后在这些结构特征向量空间中搜索最为相似特征向量,确定出最优匹配参照点对。实验结果表明,本文提出的算法不仅速度快,而且准确性也有了较大提高。

关键词 指纹识别 细节点 细节点校准 参照点对

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)03-0401-07

A Fast Reference Minutiae Pair Selection Method for Fingerprint Matching

CAO Guo¹⁾, MAO Zhi-hong²⁾, MEI Yuan¹⁾, XIA De-shen¹⁾

¹⁾(The School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

²⁾(Computer Science Department, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275)

Abstract Identifying the minutiae correspondences between two fingerprints is crucial for minutiae-based fingerprint matching. With respect to the matter, this paper proposes a new algorithm for fast reference minutiae pair selection to alignment the minutiae set. Introducing the ridge information into the selection process and finding a novel net structure, we specify the most similar pairs based on each of these net structure pairs. Experiments on two sets of fingerprint images show that the proposed algorithm is fast with high accuracy.

Keywords fingerprint recognition, minutiae, minutiae set alignment, reference minutiae pair

1 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。在已有的利用生物特征进行身份鉴定的不同方法中,指纹识别技术的市场份额在2007年占到了全球的66.7%^[1]。目前指纹识别系统最常用的匹配方法是基于特征点的点模式匹配,该方法利用指纹脊线的端点和分叉点构成特征点集,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,所以,如何准确快速地获得点集间的匹配参照点对是指纹识别系统中的一项关键技术。

确定匹配参照点对的基本思想是:当指纹图像发生平移、旋转或局部变形时,细节点之间的距离、穿越的脊线数目、相对角度以及拓扑结构关系不会改变很大,因此,利用脊线数目、方向差等结构关系建立局部特征向量,消除平移及旋转所引起的问题,然后在特征向量空间搜索从而确定匹配参照点对。很多研究者在这方面做了大量工作,Jain等人提出

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:2007-10-30;改回日期:2008-06-06

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

了一种基于串距离的算法^[2],用最小二乘拟合方法估计两组细节点集的旋转角度和匹配参照点,该方法精度不高且计算量大。Luo 等人则将脊线信息引入到匹配过程中,利用脊线上的采样点形成的拓扑结构建立局部特征向量^[3],该方法选取的参照点对太多,导致不能很大提升匹配速度。王业林等人^[4]只选择比较孤立的纹线端点进行脊线采样,然后利用脊线相似匹配来确定匹配参照点对,可以一定程度上减少匹配参照点对数,但如何确定端点孤立存在一定的问题。文献^[5]利用相交于细节点的 3 条线上的采样点方向信息以及细节点的方向信息来选择匹配参照点,该方法简化了细节点之间的关联关系,但是在选取采样点时计算量较大。文献^[6]针对缺损的指纹图像进行了研究,利用了细节点以及与之距离最近的 2 个点建立特征矢量,并从中选出最优的匹配参照点,该方法比较容易受噪声以及形变影响。Feng^[7]在确定参照点时,结合了基于纹理信息的和基于细节点的信息,虽然这种利用多种信息的方法准确性较高,但是算法十分耗时。文献^[8]运用相邻的细节点构建了邻域特征矢量,不过在全局搜索确定参照点对时,会产生大量的参照点对,导致在匹配时速度较慢。Tico 为了减少参照点对的数目,指出在确定参照点对时不仅要考虑局部特征矢量的相近性,同时还要考虑细节点与点集中其他点差异大的准则^[9]。Gu 等人^[10]采用 Hough 变换的算法计算两组细节点集的匹配分数,主要考虑坐标平移和旋转参数,然后用估计出的参数调整点集,该方法的缺点也是计算量很大。廖和杨^[11]用 5 个最近邻细节点共同建立局部邻域特征向量,在建立指纹对应性时,该方法能够稳健地得到较少的参照点对,但是搜索过程比较耗时。文献^[12]分析了单参照点对存在的匹配对应误差问题,提出了多参照点对匹配的思想,能最大程度地使得后续匹配中所有相对应的点对都在允许的误差范围内,但该方法计算较为复杂。

为了加快速度,Shi 等人^[13]首先从图像中检测到核心点,然后根据细节点与核心点的距离,对细节点进行不同标记,只有满足给定条件的细节点才可以形成参照点对,这样就大大降低了选择参照点对的时间,但该方法对核心点的位置较为敏感,并且受指纹形变的影响较大。文献^[14]为了追求最快的速度,将检测到的核心点直接作为参照点,来解决指纹图像的旋转和平移所带来的问题,很显然,如果核

心点定位不准确,匹配误差将会很大。Ying 等人则缩小参照点对的范围,仅考虑核心点周围一定半径的邻域圆内的细节点^[15],该方法还是会产生很多参照点对,从而降低匹配速度。

针对前面文献中存在的问题,本文在文献^[3]的基础上进行了改进,构建局部特征向量时,细节点所在脊线的采样点与细节点距离最近的细节点互连构成网状结构,这样不会产生大量参照点对,同时缩小配对范围,从而提高匹配速度。

2 匹配参考点确定算法

令 $\mathbf{P} = ((x_1^p, y_1^p, \theta_1^p)^T, (x_2^p, y_2^p, \theta_2^p)^T, \dots, (x_M^p, y_M^p, \theta_M^p)^T)$ 表示模板图像中的 M 个细节点, $\mathbf{Q} = ((x_1^q, y_1^q, \theta_1^q)^T, (x_2^q, y_2^q, \theta_2^q)^T, \dots, (x_N^q, y_N^q, \theta_N^q)^T)$ 表示输入图像中的 N 个细节点。匹配时需要把细节点转化到极坐标中,首先需要确定模板细节点集和输入细节点集的匹配参照点对。如果将所有可能的点对分别当作参照点对计算,则可能的参考点对数目是 $M \times N$,这使得后续的匹配计算量非常大。Luo 等人^[3]提出的解决方法如下:在每个细节点所在的脊线上进行等间隔采样,如图 1 所示,利用距离差异以及角度差异来确定 2 条脊线是否相似。只有满足脊线相似的条件,即如式(1)中 $dist < Td, ang < Ta$ 时,来自不同指纹的细节点才有可能成为参照点对。在本文中称该参照点对选取方法为脊线方法。

$$\begin{cases} dist = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^L |d_i - d'_i| \\ ang = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^L |\alpha_i - \alpha'_i| \end{cases} \quad (1)$$

式中, $dist$ 表示距离差异, ang 为方向差异, L 表示采样点数, d_i 为细节点 P_i 与其第 i 个脊线样点的距离, α_i 表示细节点 P_i 与其第 i 个脊线样点的方向差异, d'_i 和 α'_i 为输入指纹中细节点 Q_j 与其第 i 个脊线样点的距离差异及方向差异。

如图 1 左边两幅图所示,脊线弯曲程度较大,利用距离差异和方向差异能够较好地对待脊线加以区分。但是当脊线曲率较小时,如图 1 右边两幅图所示,由于采样点数有限,许多脊线方向变化不大,从而导致方向差异很小,距离差异同样也很小,Luo 等人^[3]提出的方法不能较好地处理这种情况,将许多不同细节点所在的脊线判断为相似,从而产生大量的参照点对。文献^[4]只选择孤立的端点进行脊线

采样,这虽在一定程度上减少了参照点对数,但是在实际的指纹匹配中,来自不同手指的指纹还是会产生很多参照点对。

为了增大细节点所在脊线的可区分性,一方面

要使真正的参照点对方向以及距离差异很小,同时使得不能成为参照点对的脊线采样距离和方向差异大,建立了如下的脊线采样点距离以及方向计算方法,称之为半网状方法,如图2所示。

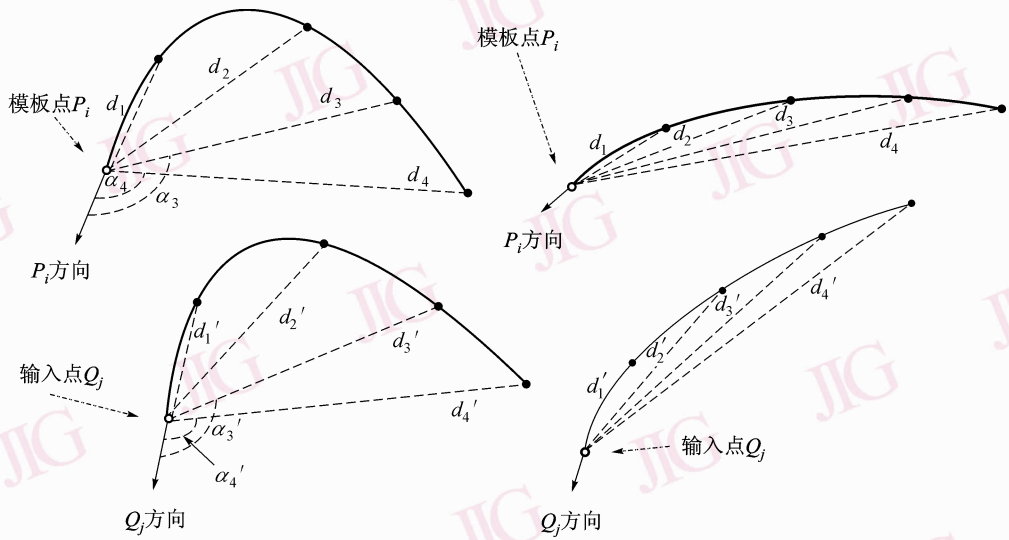


图1 脊线样点示意图

Fig. 1 Illustration image of ridge points

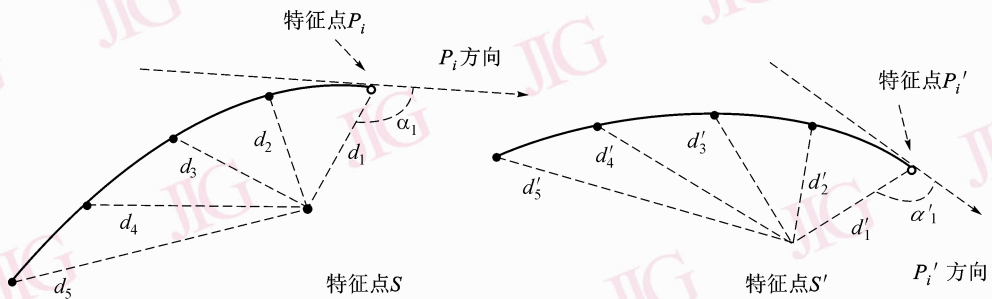


图2 脊线样点示意图

Fig. 2 Illustration image of ridge points

对于细节点 P_i ,在其所在的脊线上进行等间隔 λ 采样,直至达到预先定义好的最大抽样点数 L ,若在跟踪过程中遇到端点或分叉点,则采样过程结束,然后在细节点集中寻找与 P_i 最近的细节点 S ,将脊线上的采样点与 S 相连,构成网状结构,判断网状结构的相似性时,仍然以式(1)为准则,从这种网状结构可以看出,虽然细节点脊线曲率很小,但由于其最近的细节点 S 位置并不固定,对于来自不同手指的指纹图像,计算得到的距离差异以及方向差异均比较大,具有相似网状结构的概率大大降低,得到的参照点对数相应地会减少很多。当然,网状结构的约束条件还可以再苛刻一些,如图3所示,对于细节点 P_i ,在其脊线上等间隔采样 L 个点,同样在与其距离

最近的细节点 S 的脊线上,也采样 L 个点,按照采样序号将 2 个细节点和对应的采样点连接起来,构成网状结构,称该方法为网状方法。对于不同手指的指纹,出现这种相似情况的概率会更小。当然,也有可能对于同一手指的不同指纹由于受噪声等影响,没有一组参照点对满足相似准则,从而导致指纹拒检。

为了进一步提高匹配速度,可以减小指纹参照点对的搜索空间,只考虑指纹核心点邻域内的细节点。在检测核心点时,采用了文献[16]的方法并对其进行了略微改进,该方法对各种不同类型不同质量的指纹图像均能检测到核心点。如图4所示,图中的白点,对于拱形、双螺旋形、涡形及左右旋形检

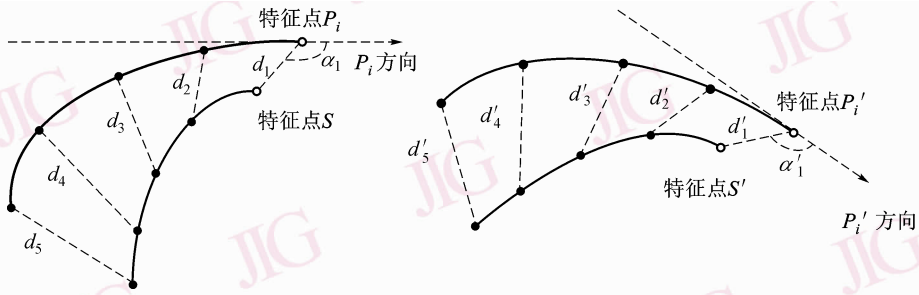


图 3 脊线样点网状结构图
Fig. 3 Net structure of ridge points

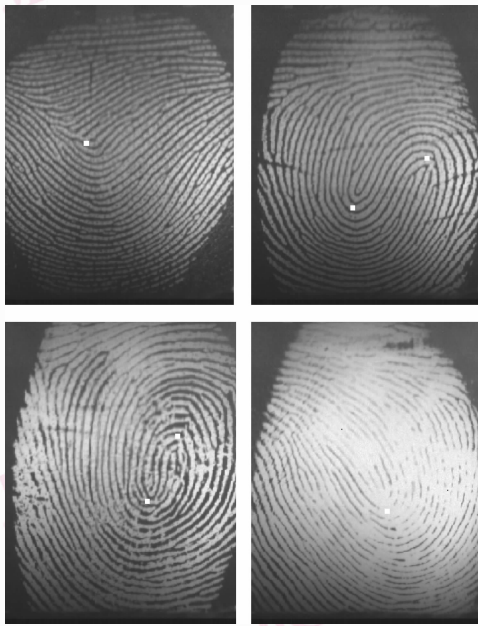


图 4 核心点检测
Fig. 4 Core point detection results

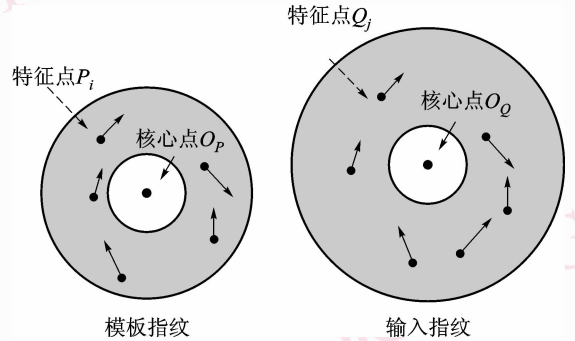


图 5 核心点邻域的参考圆区域
Fig. 5 Reference circle area near core point

3 特征点集匹配

指纹匹配过程中涉及大量细节点集的坐标旋转,而在极坐标系统中可以方便地实现坐标旋转且易于刻画指纹的局部变形,因此这里采用基于极坐标系统的坐标校准方法。确定匹配参照点对后,输入图像与模板图像间的旋转角度即可计算,而不需要考虑图像间的平移。匹配时,将输入图像和模板图像的细节点集分别相对于参照点 P_i 和 Q_j 转换到极坐标系中,极径、角度进行如式(2)的变换:

$$\begin{pmatrix} r_i \\ e_i \\ t_i \\ \phi_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2} \\ \arctan\left(\frac{y_i - y_r}{x_i - x_r}\right) \\ t_i \\ \theta_i - \theta_r \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, (x_r, y_r, θ_r) 为中心点坐标及方向, $(x_i, y_i, t_i, \theta_i)$ 为待转化的细节点坐标、类型和方向, (r_i, e_i, t_i, ϕ_i) 是转化后的极径、极角、类型以及细节点脊线与中心点脊线的方向差。

坐标经校准后得到的点集记为 $P' = (P'_1, P'_2, \dots,$

测效果均较好,且准确性较高。直接以检测到的核心点为极点,进行细节点集转化并匹配,速度虽然快,但误差也很大;而 Ying 等人^[15]所采用的方法,对于核心点邻域内的参考圆内,每一组参考细节点对都有可能是参照点对,这样参考点数目也会很多。本文则在给定的参考圆内,进行脊线网状结构条件约束,以保证来自不同手指的指纹参照点对数达到极少,甚至为零,来自同一手指的参照点对数尽量与参考圆内细节点数目一致。当然由于受噪声以及指纹形变等因素的影响,参照点对数可能会比参考圆内细节点数少很多。如图 5 所示,确定的参照点对区域为灰色区域 $R_1 \leq R \leq R_2$, 在中心的白色圆域 $R < R_1$ 内,由于脊线方向变化剧烈,细节点的方向变化也比较大,经过滤波、细化等处理会产生较大误差,因此不予考虑。

P'_M), $Q' = (Q'_1, Q'_2, \dots, Q'_N)$,把这2个点集按极角以升序排列,将 P' 中的每个点与 Q' 中的每个点进行基于界限盒^[3]的一一匹配。在判断2枚指纹的匹配程度时可以有不同的衡量依据,本文算法采用以下几种信息作为判定条件:(1)成功的匹配点对数,如果大于阈值 T_1 ,则直接认为2枚指纹来自同一手指;(2)配对点数与相应指纹细节点总数的比值,如果超出给定门限,也认为比对成功;(3)每个手指注册3枚指纹,比对时,如果输入指纹与相应的3个模板配对点数都大于 T_2 ,也认为2枚指纹来自同一手指。

4 实验比较分析

为验证提出的方法的性能,我们运用FVC2002 DB1_a库以及采集的指纹库进行了实验。采集的指纹库包含1 080幅指纹图像,来自108个不同的手指,每个手指采集10幅图像,图像采集分辨率为500 dpi,图像大小为 512×294 (图像存在梯形失真,

采用反向采集指纹,校正后大小为 302×232),256色灰度图像,采集器为Digital Persona公司的U. are. U4 000B,FVC2002 DB1_a库包含 100×8 幅图像。实验测试平台为奔IV3.2G。

在实验中,共比较了6种不同的参照点对选取方法:Luo等人^[3]提出的脊线方法A,改进的半网状方法B,网状方法C,加参考圆约束的半网状方法D,加参考圆约束的脊线方法E,廖和杨^[11]提出的方法F。实验参数设置为:脊线采样间隔 $\lambda = 10$,样点数 $L = 8$, $Td = 4$, $Ta = 0.3925$ 弧度。

实验1 在1:N的指纹识别系统中,一枚待检指纹需要与指纹库中成百上千的指纹模板匹配,获取比对结果。对于来自同一手指的待检和模板指纹,采用不同的方法,得到的参照点对数虽然很多,但是基本上任选其中一组参照点对进行极坐标转化,以及后续全局匹配,均能够获得正确结果,匹配时间很快,一次匹配平均时间不会超过0.25 ms。我们关注的是来自不同手指的指纹比对,参照点对数目的多少极大地影响匹配的速度。

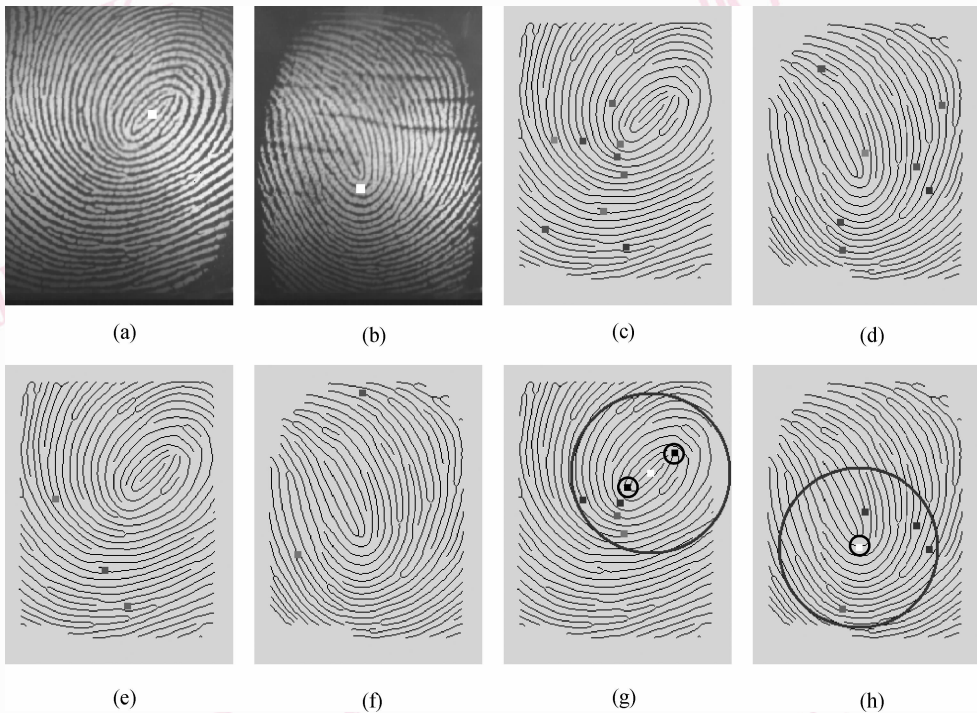


图6 参照点对检测结果

Fig. 6 Reference minutiae pair selection results

如上图所示,图6(a),(b)为待比对图像,图6(a)为涡形指纹,图6(b)为左旋形指纹,图中白色点为检测到的核心点。对于涡形和双螺旋形指纹,

会检测到2个核心奇异点,然后取该两点坐标平均值作为新的核心点的坐标。经过滤波细化,提取细节点并去除伪细节点后进行比对,图6(a)有34个

细节点,图 6(b)有 38 个细节点。图 6(c),(d)是采用 A 方法得到的参照点对结果,共有 16 个参照点对,图中有的细节点相互构成了多组参照点对,将两图进行一次匹配所需时间为 0.890 ms;采用半网状方法 B 得到的参照点对结果如图 6(e),(f)所示,共得到 3 个参照点对,完成一次匹配所需的时间为 0.250 ms;由于条件比较苛刻,方法 C,D 没有得到参照点对;采用方法 E,在图 6(a)的参考圆内存在 15 个细节点,图 6(b)有 19 个细节点,图 6(g),(h)中白点为核心点,其他深色点为匹配的参照点对,共得到 5 个参照点对,所需要的匹配时间为 0.306 ms。

从上述比对结果可以看出,即使对于不同手指不同类型的指纹,Luo 方法依然检测到了过多的参照点对,使得匹配时间较长,而本文提出的改进方法则使匹配速度有了较大的提高。

实验 2 自动指纹识别系统的性能评价参数有:识别速度,误识率 FAR 和拒检率 FRR。计算公式如下:

$$FAR = \frac{Na}{Nt}, FRR = \frac{Nr}{Nt} \quad (3)$$

式中, Nt 是总的匹配次数, Na 是不该识别而识别的次数, Nr 是该识别而没有识别的次数。FAR 和 FRR 变化趋势相反,在本文实验中,为了便于比较不同方法的性能,设置相同的参数: $T1 = 11$, $T2 = 10$,参考圆大小 $15 \leq R \leq 80$,得到实验结果见表 1 和表 2,其中表 1 为采集指纹库的实验结果,表 2 是 FVC2002 DB1 库的实验结果。从表 1 和表 2 中可以看出,在选取参照点对时,网状结构 C 方法最为苛刻,所以拒检率最高;加参考圆约束搜索特征空间的半网状方法 D,搜索得到最少的参照点对,所以平均一次匹配时间最小;表 1 中采用脊线信息方法 A 和 E 均有误识存在,加入参考圆约束后,拒检率增加并不多,但误识率减少了很多;采用半网状信息的方法 B 和 D,加入参考圆约束,虽然使得匹配速度提高了几十倍,但是拒检率也增大了一倍左右,方法 F 由于能够稳健地得到参照点,该方法的拒检率是最低的,但是也是比较耗时的。从表中不难看出,匹配时间与参照点对数存在着正比关系,在正确找出参照点对的前提下,参照点对数越少则匹配时间也越少,如比较方法 A 和 B,采用半网状方法虽然得到的参照点对数少,但包含真正的参照点对数的概率也更大一些,所以与脊线方法相比,不仅性能提升约一倍左右,而且速度也大大提高。

表 1 采集指纹库实验结果

Tab. 1 Matching results on collected fingerprint images

实验结果	误识率	拒检率	平均一次匹配
	FAR (%)	FRR (%)	时间 (ms)
方法 A	0.004 40	9.316 9	0.928 1
方法 B	0	5.411 1	0.034 5
方法 C	0	19.534 4	0.016 1
方法 D	0	10.359 1	0.004 7
方法 E	0.000 95	11.048 3	0.142 4
方法 F	0	3.853 1	2.884 0

表 2 FVC2002 Set A DB1 库实验结果

Tab. 2 Matching results on FVC2002 Set A DB1

实验结果	误识率	拒检率	平均一次匹配
	FAR (%)	FRR (%)	时间 (ms)
方法 A	0.011 49	11.615 6	2.188 0
方法 B	0	8.724 1	0.133 2
方法 C	0	19.590 6	0.063 0
方法 D	0	15.518 9	0.015 2
方法 E	0	15.637 1	0.228 0
方法 F	0	5.357 3	5.854 0

5 结 论

本文研究了基于脊线校准的指纹点模式参照点对选取方法,在 Luo 等人工作的基础上,利用细节点与脊线上的采样点互联形成的网状结构,构建了新的细节点局部特征向量,并对特征向量的搜索空间进行了限定分析,使得基于点模式的指纹匹配参照点对数大大减少。实验表明,虽然应用改进的方法,多数情况下拒检率有所增加,但是指纹匹配的速度却得到了很大提高,采用半网状结构信息的方法不仅大大提升了性能而且也极大地提高了速度。

参考文献 (References)

- 1 International Biometric Group, Biometrics Market and Industry Report 2009- 2014 [EB/DL]. http://www.biometricgroup.com/reports/public/market_report.php,2008-10-16/2008-12-15.
- 2 Jain A K, Lin Hong, Pankanti S, *et al.*, An identity authentication system using fingerprints [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, **85**(9):1365-1388.
- 3 Luo Xi-ping, Tian Jie, Wu Yan. A minutiae matching algorithm in fingerprint verification[A]. In: Proceeding of the 15th International Conference on Pattern Recognition[C], Barcelona, Spain, 2000, **4**:

- 833-836.
- 4 Wang Ye-lin, Ning Xin-bao, Ying Yi-long. A new fingerprint matching algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, **8**(2): 203-208. [王业林, 宁新宝, 尹义龙. 一种新的指纹匹配方法[J]. *中国图象图形学报*, 2003, **8**(2):203-208.]
 - 5 Qi Jin, Wang Yang-sheng. A robust fingerprint matching method [J]. *Pattern Recognition*, 2005, **38**(10):1665-1671.
 - 6 Jea Tsai-Yang, Venu Govindaraju. A minutia-based partial fingerprint recognition system [J]. *Pattern Recognition*, 2005, **38**(10):1672-1684.
 - 7 Feng Jian-jiang. Combining minutiae descriptors for fingerprint matching[J]. *Pattern Recognition*, 2008, **41**(1):342-352.
 - 8 Tong Xi-feng, Huang Jia-hua, Tang Xiang-long, *et al.* Fingerprint minutiae matching using the adjacent feature vector [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2005, **26**(9):1337-1345.
 - 9 Marius Tico, Pauli Kuosmanen. Fingerprint matching using an orientation-based minutia descriptor [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(8):1009-1014.
 - 10 Gu Jin-wei, Zhou Jie, Yang Chun-yu. Fingerprint recognition by combining global structure and local cues[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(7):1952-1964.
 - 11 Liao Kuo, Yang Wan-lin. Research and implementation of fingerprint matching method of minutiae[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology 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.]
 - 12 Zhu En, Yin Jian-ping, Zhang Guo-min. Fingerprint matching based on global alignment of multiple reference minutiae [J]. *Pattern Recognition*, 2005, **38**(10):1685-1694.
 - 13 Shi Peng, Tian Jie, Xie Wei-hua, *et al.* Combining the singular point with its neighborhood minutiae[A]. In: *Proceedings of the 11th Iberoamerican Congress in Pattern Recognition*, Cancun, Mexico, 2006: 804-813.
 - 14 Chan K C, Moon Y S, Cheng P S. Fast fingerprint verification using subregions of fingerprint images[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, **4**(1): 95-101.
 - 15 Ying Jie, Yuan Yi-fang, Zhang Ren-jie, *et al.* Fingerprint minutiae matching algorithm for real time system[J]. *Pattern Recognition*, 2006, **39**(11):143-146.
 - 16 Jiang Xu-dong, Liu Man-hua, Alex Chichung Kot. Reference point detection for fingerprint recognition[A]. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition [C]*, Cambridge, UK, 2004, **1**: 540-543.