

基于细节点与方向场信息的指纹残缺区域重建算法

张 洁^{1,2}, 景晓军^{1,2}, 张 博^{1,2}, 王 栋^{1,2}

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 可信分布式计算与服务教育部重点实验室, 北京 100876)

摘 要: 由于指纹的残缺区域缺失有效信息, 使得通过细节点和脊线信息来进行指纹匹配的工作难以进行. 本文针对指纹残缺区域中脊线断裂和细节点缺失的现象, 提出了一种重建算法. 融合邻域中的细节点和方向场信息对残缺区域的方向场进行估计; 然后基于估计出的方向场并结合先验知识来分析残缺部分的脊线与细节点分布情况, 对其进行修复; 最后, 引入信息熵对多种重建方案进行评估, 从而确定残缺部分的最佳重建结果. 实验结果表明, 该算法能够对面积较大并可能包含细节点的残缺区域进行较好的重建, 进而提高后续匹配过程的准确率.

关键词: 残缺指纹; 重建; 细节点; 方向场; 信息熵

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)10-2112-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.10.035

An Algorithm for Fingerprint Incomplete Regions Reconstruction from Minutiae and Orientation Field

ZHANG Jie^{1,2}, JING Xiao-jun^{1,2}, ZHANG Bo^{1,2}, WANG Dong^{1,2}

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing 100876, China; ,

2. Key Laboratory of Trustworthy Distributed Computing and Service (BUPT), Ministry of Education, Beijing 100876, China)

Abstract: An incomplete fingerprint is one which contains noise and cannot be recognized in some areas. In some cases, it may not provide sufficient minutiae or ridge details for undertaking a normal matching process. This paper proposes an algorithm to reconstruct incomplete regions. The nearest minutiae and orientation field of neighborhood are combined to estimate the unknown orientation field. Previous outcome is used to connect disrupted ridges and recover missed minutiae based on ridge topology features, and arrive several rational schemes. They are measured by using entropy and the best is chosen. The experimental results demonstrate that proposed algorithm is effective in reconstructing incomplete fingerprint, and hence improve the performance of matching.

Key words: incomplete fingerprint; reconstruction; minutiae; orientation field; entropy

1 引言

随着指纹识别技术的不断发展, 在对完整与清晰的指纹进行识别方面所做的研究已经取得了很高的识别准确率和效率^[1,2]. 目前, 制约指纹识别技术发展的瓶颈之一, 是对残缺指纹的识别. 残缺指纹主要是由于采集过程中的设备问题或是手指状态不佳等原因而产生的, 由于缺失了过多的可用于进行有效识别的特征, 其识别的准确率会大幅下降. 而数据统计表明, 残缺指纹图像在指纹数据库中约占 10% 的比例^[3], 因此针对其进行的识别又是非常必要的. 残缺指纹识别的性能很大程度上依赖于指纹图像质量增强的效果和性能, 因此, 如何对指纹残缺区域进行准确和有效的重建, 以增强指纹图像的质量, 从而保证后续匹配过程的准确性和可靠

性, 是提高残缺指纹识别性能的关键.

近年来, 大多数针对指纹中的残缺区域进行重建的方法, 旨在对面积较小的区域中的断裂脊线进行修复. 如文献[4]提出的采用数学形态学对断裂的指纹脊线进行重连的方法, 对近距离、方向近似的断裂点有较好的修复效果. 文献[5]不仅对断裂脊线进行重连, 并分析了残缺区域中可能包含细节点的情况, 简单列出了几种细节点与脊线的分布方式. 但由于重建算法只采用了先验知识, 输入信息太少, 也不容易用计算机模拟人工经验, 因此很难对面积较大并包含细节点的残缺区域进行重建.

针对以上问题, 本文提出一种对面积较大并包含细节点的指纹残缺区域进行重建的算法. 本算法摒弃了传统算法只简单的基于图像增强方法和先验知识对残缺

区域的脊线分布方式做分析的模式,而是先对残缺区域的方向场做估计,然后利用这个重要信息重建断裂脊线并加入可能存在的细节点,并对修复结果进行评估.

2 残缺区域方向场的估计

对指纹重建所取得的较新进展表明,指纹中大部分的信息都能够仅通过细节点集来进行重建^[6~8],并提出了不同的重建方法.但这些方法都是针对完整指纹来进行的,目的是为了通过重建方向场来生成新的指纹模板或提高后续匹配过程的准确率.然而,对于残缺指纹,存在细节点缺失较多,或邻域中细节点可靠性较低的现象,使得仅依靠细节点信息进行的重建结果较差.因此,结合邻域方向场信息对残缺区域的方向进行估计,可以得到更加精准的处理结果.

2.1 基于细节点的残缺区域方向场估计

首先,改进文献[7]中提出的基于细节点信息计算指纹方向场的方法,来对残缺区域的方向场进行估计:

(1)从指纹图像中提取细节点集 $\{x_i, y_i, \theta_i\}$, $1 \leq i \leq N_m$,其中 x_i, y_i 是第 i 个细节点的位置坐标, θ_i 是它的方向, N_m 是整幅指纹图像中所包含的细节点个数^[3].

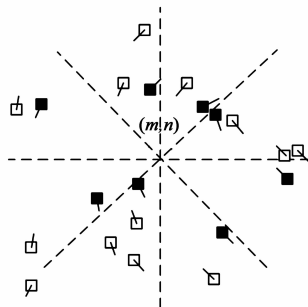
(2)将指纹的残缺区域划分成 $M \times N$ 个大小为 $w \times w$ 的不重叠的方块.对以像素点 (m, n) 为中心的块,用其周围8个方向中最靠近块中心点的 $K(K \leq 8)$ 个细节点信息来预测其方向(如图1),采用下面的公式计算

$$u = \sum_{k=1}^K \cos(2\theta_k) \omega_k \quad (1)$$

$$v = \sum_{k=1}^K \sin(2\theta_k) \omega_k \quad (2)$$

$$\omega_k = [(x_k - m)^2 + (y_k - n)^2]^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中, ω_k 是权值函数,建立它的目的是为了考虑细节点的分布位置对所要估计的块方向场的影响程度.细节点距离块中心越近, ω_k 就越小,该点对所计算的块方向场的贡献就越大.于是,利用细



节点估计出的块 (m, n) 的方向为

$$O_m(m, n) = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \quad (4)$$

奇异点是指纹图像中一类很重要的特征点,描述指纹的宏观走向.在没有奇异点的邻域内,局部方向场是基本一致并且缓慢变化的;而在奇异点附近,指纹图像的方向场变化剧烈.因此,在利用细节点信息对残缺

区域的方向场进行估计时,还应考虑指纹图像中包含奇异点的情况,来避免因存在奇异点而导致估计出的方向场产生偏移的情况.

按照 Poincare 索引的方法^[9]求出指纹图像中的 N_s 个奇异点.对于奇异点集 $\{x_{s_i}, y_{s_i}, t_{s_i}\}$, x_{s_i}, y_{s_i} 为第 i 个奇异点的位置坐标, t_{s_i} 是它的类型(中心点: $t_{s_i} = 1$,三角点: $t_{s_i} = -1$).通过去除奇异点附近变化剧烈的方向值对采用细节点估计的方法进行修正

$$O_s(m, n) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_s} t_{s_i} \arctan\left(\frac{n - y_{s_i}}{m - x_{s_i}}\right) \quad (5)$$

在文献[7]中,同时考虑细节点和奇异点最后计算出的方向场为两种情况的简单叠加 $O_m(m, n) + O_s(m, n)$.本文加入权值函数 α 对其进行改进,考虑了奇异点的影响范围,使对方向场进行估计的模型更加灵活和可靠.改进后的利用细节点与奇异点估计出的方向场为

$$O_{ms}(m, n) = (1 - \alpha) O_m(m, n) + \alpha O_s(m, n) \quad (6)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0, & N_s = 0 \text{ 或 } \sum_{i=1}^{N_s} \alpha_i \geq 1 \\ 1 - \sum_{i=1}^{N_s} \alpha_i, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$\alpha_i = 1 - \frac{[(m - x_{s_i})^2 + (n - y_{s_i})^2]^{\frac{1}{2}}}{\sum_{i=1}^{N_s} [(m - x_{s_i})^2 + (n - y_{s_i})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

2.2 基于邻域方向场的残缺区域方向场估计

在对较大的残缺区域的方向场进行估计时,由于细节点缺失或是可靠性较低,仅基于细节点信息进行估计是不够的,可能无法建立可靠的方向场.由于指纹图像中相邻区域之间的方向具有一致性,因此通过分析,我们同时考虑残缺区域邻域的方向场对其进行估计,使用下面的公式计算方向场

$$O_j(m, n) = \begin{cases} \frac{1}{n_b} \sum_{(i', j') \in D} O(i', j'), & C(m, n) \geq T_c \\ O_{\text{nearest}}(i', j'), & C(m, n) < T_c \end{cases} \quad (9)$$

$$C(m, n) = \frac{1}{n_b} \left[\sum_{(i', j') \in D} |O(i', j') - O(i, j)|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$|O(i', j') - O(i, j)| = \begin{cases} d, & \text{其他} \\ d - 180^\circ, & d < 180^\circ \end{cases} \quad (11)$$

$$d = (O(i', j') - O(i, j) + 360^\circ) \bmod 360^\circ \quad (12)$$

其中, $C(m, n)$ 是块 (m, n) 邻域方向场的一致性, D 表示块 (m, n) 的局部邻域(大小为 5×5), n_b 是 D 中块的数目.

2.3 融合后的残缺区域方向场估计结果

将残缺区域分成大小为 $w \times w$ (本文取6)的不重叠

的方块,按照由外至内的顺序计算每块的方向场.这样做的原因是,在残缺区域中,越靠近周围非残缺邻域的块包含的信息越接近真实指纹,越能够得到好的估计值.融合利用两种信息算出的估计值,得到指纹中残缺区域的最终估计方向场

$$O_{com}(m, n) = \beta O_{ms}(m, n) + (1 - \beta) O_f(m, n) \quad (13)$$

其中, β 是经验值,通过实验,取值为 0.7.

至此,本文已经估计出指纹残缺区域的方向场.其中,残缺区域的外侧更靠近用来进行估计的邻域块,算出的方向场可靠性较高;而越靠近区域中心的块,其方向场越不容易通过邻域的信息来预测.但总体来说,只要能通过此方法初步估计出方向场,就可以为后续的脊线修复过程提供丰富有效的信息,以得到准确全面的重建结果.

3 残缺区域的修复和评估

3.1 基于方向场的残缺区域修复

如图 2 所示的残缺区域中, R_{T1}, R_{T2}, \dots 是残缺区域一边的脊线,对应的脊线断裂点是 Q_{T1}, Q_{T2}, \dots ; R_{B1}, R_{B2}, \dots 是残缺区域另一边的脊线,对应的脊线断裂点是 Q_{B1}, Q_{B2}, \dots . 每个小块中的方向 $O_{com}(m_i, n_j)$ 由上一步的方法估计得出. 我们提出以下算法进行断裂脊线与细节节点的修复:

(1) 断裂点配对

首先需要对两边脊线的断裂点进行配对,确定对应的应该被重连的断裂脊线.具体的方法为:分别计算两边脊线在断裂点处的切线方向 ϕ_{T_i} 和 ϕ_{B_j} . 对于一个 Q_{T_i} , 分别计算它所对应的 ϕ_{T_i} 和每个 Q_{B_j} 所对应的 ϕ_{B_j} 之间的方向差 $\Delta\phi_{i,j}$, 如果 $\Delta\phi_{i,j} < T_\phi$, 则将 Q_{B_j} 加入候选

重连断裂点集 E_i . 遍历所有的 Q_{T_i} , 获得多个候选重连点集合. 其中 T_ϕ 是经验值.

(2) 断裂点初步重连

对每个 Q_{T_i} 与它的候选重连点集 E_i 中对应的 Q_{B_j} , 基于估计出的方向场信息,依照以下办法进行重连.对 Q_{T_i} 与残缺区域相交的块 (m_i, n_j) , 计算 $\Delta\phi = |O_{com}(m_i, n_j) - \Delta\phi_{i,j}|$. 如果 $\Delta\phi \leq T_\phi$, 则经过点 Q_{T_i} , 以方向 $O_{com}(m_i, n_j)$ 做穿过该方块的线段交下一个小块

于点 J_{i1} ; 否则,以方向 $\Delta\phi_{i,j}$ 做穿过该方块的直线.继续从交点出发做穿过小块的线段来修复脊线 R_{T_i} , 直到到达残缺区域另一边.

(3) 断裂脊线拟合

至此,已获得图中虚线表示的初步重连后的脊线.为了能够让其更加平滑而符合指纹脊线的特征,对重连脊线上的所有转折点,单独提取和标记,并在与该脊线相连的非残缺区域中脊线上采样 4 个离散点,会同转折点一起,用多项式曲线做拟合(实验证明用二次曲线就能得到较高的准确度),最终得到一条拟合后的平滑脊线.

(4) 基于先验知识的重连脊线筛选

为了使得脊线弥补的鲁棒性更强,在符合残缺区域方向的前提下考虑多种重连情况,为每个 Q_{T_i} 找到了包含一个或多个 Q_{B_j} 的 E_i , 这样对于一个 Q_{T_i} 会得到一条或多条重连后的脊线.本文分析指纹图像脊线分布的特点,对这些脊线进行筛选,并同时合理加入细节点.筛选准则为:

①除了中心点或三角点区域的分叉点,其他分叉点与邻近的脊线基本呈近似平行关系并保持不变.因此如果某个断裂点能同时与残缺区域另一边的两个断裂点重连,并能保证两条重连线 and 周围脊线平行时,则可以利用这三条脊线加入一个分叉点.

②端点的存在会打破相邻脊线之间的距离保持不变是规律.因此如果某个断裂点找不到任何的重连点,并能保证周围脊线平行时,则用该断裂点产生一个端点.

③如果区域两边断裂点数的和为偶数,则区域中可能没有细节点,或细节点数为偶数;如果和为奇数,则存在细节点,并且数目为奇数.

④如果相邻两个小块的方向差太大,则根据周围脊线分布的情况,直接终止脊线连接过程而产生端点;或是将某个小块的方向看作估计错误的方向,利用周围小块的方向做出判断.

3.2 基于信息熵的残缺区域修复结果评估

通过上述方法,已经初步分析确定指纹残缺区域内的几种脊线分布方式.如何从中选取一种最符合实际指纹情况的分布,是本文接下来需要完成的工作.在同一幅指纹图像中,脊线的分布应该是平滑、一致和稳定的.许多图像处理和模式识别的方法以信息论为基础进行探讨和研究,并取得了很好的效果^[10].因此,本文引入信息熵对几种脊线分布方式做评估,根据它们和周围非残缺区域方向场的一致性,来最终确定残缺区域脊线的分布方式.

信息熵是对系统不确定性的一种度量.在某个指纹区域中,方向的熵值衡量了区域中方向的一致性,熵

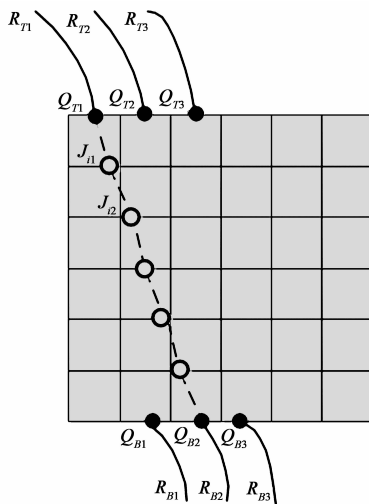


图2 脊线弥补方法示意图

越大,不确定性越大,方向一致性越差.定义局部区域中 D 中方向的熵为

$$H(O) = - \sum_D p_{O_i} \log(p_{O_i}) \quad (14)$$

p_{O_i} 是区域内方向值 i 出现的概率.

使用熵对残缺区域脊线分布情况进行评估,是为了使重建后的残缺区域与周围邻域结合区域中方向熵的值最小,即各块方向场的一致性最好.最后,选择满足这个条件的脊线分布方式作为对残缺区域最终的重建结果.

为了对区域中方向变化较为剧烈的情况具有鲁棒性,以残缺区域为中心,将周围区域划分成 N_B 个部分分别计算每个部分的方向熵,方法如下:

将每部分划分为大小为 $w \times w$ 的不重叠的方块,计算每个小块的块方向场.为了方便计算,连续的方向被均匀的离散化到 n 个方向

$$\theta_0 = \left[180^\circ - \frac{\Delta\theta}{2}, 180^\circ \right] \cup \left[0^\circ, \frac{\Delta\theta}{2} \right] \quad (15)$$

$$\theta_i = \left[i \times \Delta\theta - \frac{\Delta\theta}{2}, i \times \Delta\theta + \frac{\Delta\theta}{2} \right], i = 1, \dots, n-1 \quad (16)$$

$$\Delta\theta = \frac{180^\circ}{n} \quad (17)$$

利用式(14)计算每部分的方向熵,它们的和作为整个区域的方向熵

$$p_{O_i} + = 1, \text{if } O(u, v) \in \theta_i \quad (18)$$

$$H_D(O) = - \sum_{j=1}^{N_B} \sum_{i=0}^{n-1} p_{O_i} \log(p_{O_i}) \quad (19)$$

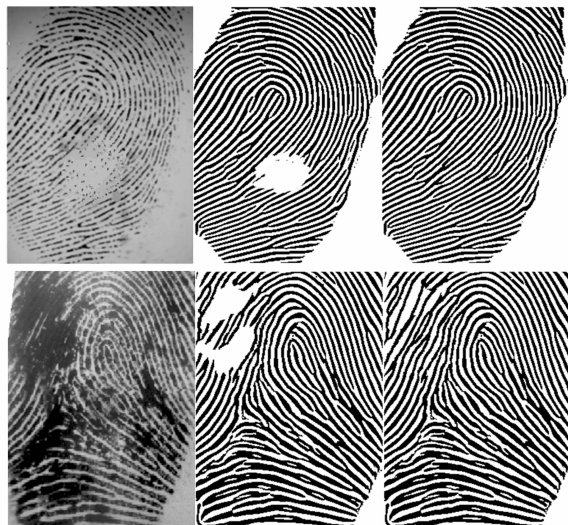
4 实验结果

为验证本文算法的有效性和可靠性,采用 FVC2004 指纹库来设计实验.

图 3 给出了使用本文提出的重建算法修复指纹图像残缺区域的部分实验结果.其中(a)是原始的残缺指纹图像,(b)是利用已有方法^[3]对其进行增强、分割后的二值化图像,(c)是用本文提出的算法对残缺区域进行重建后得到的图像.可以看出,对残缺面积较大的指纹图像,经本文算法重建后,被修复的断裂脊线符合脊线的分布情况;对难以恢复的细节点进行重建时,也有比较令人满意的结果.

为了验证算法的可靠性,选择 FVC2004 的 DB2 和 DB4 数据库,来评估采用本文算法进行指纹匹配时是否能够提高匹配性能.采用文献[3]中提出的基于细节点的指纹匹配算法,分别在匹配前用本文算法对指纹中的残缺区域进行重建和不进行重建两种条件下,计算 Equal Error Rates(EER),结果如表 1 所示.实验数

据表明,对于所含图像质量稍好的数据库 DB4,利用本文提出的重建算法对匹配性能有一定的提高;而对于所含图像质量较差的数据库 DB2,利用本文提出的重建算法对匹配性能的提高尤其显著.



(a) 原始的残缺指纹图像 (b) 增强、分割并二值化后的图像 (c) 经本算法重建后的图像

图3 本算法效果图

表 1 采用本文算法后的匹配结果比较

数据库	EER (%)	
	未进行残缺区域重建	采用本文算法重建后
FVC2004 DB2	9.714	9.108
FVC2004 DB4	2.914	2.793

5 结束语

本文提出了一种采用细节点和方向场信息对指纹残缺区域进行重建的算法,相比传统的残缺区域修复方法,具有以下优点:(1)不仅针对面积较小的脊线断裂区域,同时针对面积较大并可能包含细节点的残缺区域,所修复的断裂脊线具有距离较远和方向偏差较大的特点;(2)在对残缺区域进行重建时,不仅考虑脊线分布的先验知识,更重要的是先利用周围区域的信息估计残缺区域的方向场,然后基于方向场信息并采用有效的修复算法以得到更加精准和全面的多种修复结果;(3)引入信息熵来对于多种修复结果进行评估,选择与周围区域一致性最好的结果作为整个残缺区域的重建结果.实验结果表明,本算法可对指纹中的残缺区域进行准确与有效的重建,在此基础上做后续的指纹匹配工作,可以提高匹配的准确率.

参考文献

- [1] J Gu, J Zhou, C Yang. Fingerprint recognition by combining global structure and local cues [J]. IEEE Transactions on Im-

- age Processing, 2006, 15(7):1952 – 1964.
- [2] Xiaoguang He, Jie Tian, Liang Li, Yuliang He, Xin Yang. Modeling and analysis of local comprehensive minutia relation for fingerprint matching [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2007, 37(5): 1204 – 1211.
- [3] D Maltoni, D Maio, A K Jain, S Probhaker. Handbook of Fingerprint Recognition [M]. New York: Springer-Verlag, 2003.
- [4] M A Oliveira, N J Leite. A multiscale directional operator and morphological tools for reconnecting broken ridges in fingerprint images [J]. Pattern Recognition, 2008, 41: 367-377.
- [5] K Mieloch, A Munk, P Mihailescu. Improved fingerprint image segmentation and reconstruction of low quality areas [A]. Proc IEEE ICPR' 10 [C]. Istanbul: IEEE Press, 2010. 1241 – 1244.
- [6] E Liu, H Zhao, L Pang, K Cao, J Liang, J Tian. Method for fingerprint orientation field reconstruction from minutiae template [J]. Electronics Letters, 2011, 47(2): 98 – 99.
- [7] J Feng, A K Jain. Fingerprint reconstruction: from minutiae to phase [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(2): 209 – 233.
- [8] Chen F, Zhou J, Yang C. Reconstructing orientation field from fingerprint minutiae to improve minutiae-matching accuracy [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(7): 1665 – 1670.
- [9] 聂桂军, 吴陈, 叶锡君, 徐荣青. 基于连续分布方向图和改进的 Poincaré Index 的指纹分类 [J]. 电子学报, 2006, 34(5): 947 – 952.
- Nie Guijun, Wu Chen, Ye Xijun, Xu Rongqing. Fingerprint classification based on both continuously distributed directional image and modified version of poincaré index [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(5): 947 – 952. (in Chinese)
- [10] 张博, 景晓军, 孙松林, 张少乐. 基于梯度离散度和互信

息准则的残缺指纹方向场重建融合算法 [J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2130 – 2134.

Bo Zhang, Xiaojun Jing, Songlin Sun, Shaole Zhang. Fusion algorithm for incomplete fingerprint orientation field reconstruction based on gradient dispersion and mutual information [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9): 2130 – 2134. (in Chinese)

作者简介



张洁 女, 天津人, 现为北京邮电大学信息与通信工程学院博士研究生. 主要研究方向: 模式识别、图像处理、信息融合.

E-mail: jiezhangsice@gmail.com



景晓军 男, 北京人, 现为北京邮电大学信息与通信工程学院教授, 博士生导师. 1999 年获国防科技大学通信与信息系统专业博士学位. 研究方向: 信息融合、模式识别、图像处理.

E-mail: jxiaojun@bupt.edu.cn

张博 男, 陕西宝鸡人, 北京邮电大学信息与通信工程学院博士研究生. 主要研究方向: 信息融合、信号处理、图像处理.

E-mail: zb_bupt@gmail.com

王栋 男, 山东人, 现为北京邮电大学信息与通信工程学院硕士研究生. 研究方向: 图像处理、模式识别.