

一种基于交点权重图的指纹焦点检测方法

郭西风 祝 恩 周思航 申小龙 殷建平

(国防科学技术大学计算机学院 长沙 410073)

摘 要 指纹参考点在指纹注册和识别过程中非常重要,能够有效减少拥有大规模指纹库的自动指纹识别系统的识别时间。指纹焦点是一种很稳定的参考点,而现有检测指纹焦点的方法的精度还有很大提升空间。基于从方向场生成的交点的权重信息,提出了一种精确的指纹焦点检测方法。首先,提出了交点权重图的概念以及从指纹方向场计算该图的方法。在分块方向场上,各个块中经过块中心垂直于块方向的直线两两相交得到一些交点,为每个交点根据其期望焦点位置的贡献赋予一个权重,得到交点权重图。该图基本能保证理想的焦点位于其最大密度区域,从而提高焦点检测算法的精度和稳定性。然后将交点权重图用于迭代算法中,实现对焦点的精确检测。最后,在 FVC2000 Db2a 指纹库上进行了实验,结果表明提出的方法在精度上比其他方法有明显优势,时间开销也在可接受的范围内。

关键词 指纹对齐,焦点,参考点,交点权重

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.2.007

Fingerprint Focal Point Detection Method Based on Map of Cross Points' Weights

GUO Xi-feng ZHU En ZHOU Si-hang SHEN Xiao-long YIN Jian-ping

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The reference point is essential for fingerprint registration and recognition since it can effectively reduce the identification time on automatic fingerprint identification system with large scale database. As an extremely stable reference point, the fingerprint focal point still needs more accurate detection methods. In this paper, an accurate fingerprint focal point detection method based on map of cross points' weights was proposed. First, the definition and characteristics of the proposed map of cross points' weights are introduced. For the block-wise orientation field, from each block's center, a straight line perpendicular to the block's direction is produced, and each pair of such straight lines may have a cross point. By giving each cross point a weight according to its contribution to the expected position of fingerprint focal point, the map of cross points' weights is finally determined. The proposed map improves the accuracy and stability of focal point detection method since it can generally ensure the ideal focal point to be included in its maximum density region. Then an iteration scheme is utilized on map of cross points' weights to locate the focal point precisely. Experimental results on FVC2000 Db2a fingerprint database validate that the proposed method outperforms the others in terms of accuracy with acceptable cost of computational time.

Keywords Fingerprint alignment, Focal point, Reference point, Cross point's weight

1 引言

自动指纹识别系统(Automatic Fingerprint Identification System, AFIS)已在政府机关、公安系统、教育系统、医疗系统和金融系统等领域广泛用于安全管控和身份认证,且指纹库规模逐年增大。例如,到 2010 年,美国 FBI 的集成自动指纹识别系统已包含六千万人的指纹^[1]。在如此庞大的指纹库上如何实现快速识别还有待研究。

目前常用的缩短识别时间的途径有两种。其一是通过多级分类缩小搜索空间,该方法比较成熟,广泛应用于大规模指纹识别系统;但当经过多级分类后需要进行精确匹配的指纹

数量仍然很大时,就需要通过另一种方法,即提高指纹特征模板的平均匹配速度来减少识别时间。绝对预对齐试图通过将一个统一的坐标系应用到不同的指纹中来提高平均匹配速度,而构建有效坐标系的关键在于参考点的精确检测。

指纹参考点主要用于对齐两个指纹。最常用的参考点是奇异点,包括核心点和三角点。核心点是指纹最里面纹线最上端的终点,三角点是 3 个方向流相遇形成的三角形区域的中心^[2]。检测奇异点的方法有基于 Poincare 指数的方法^[2-4]、基于方向图的局部特性的方法^[5]、基于划分的方法^[6]和其他方法。虽然这些方法能很好地检测奇异点,但由于拱型指纹不存在奇异点,一些文献专门研究了用于检测拱型指纹的参

到稿日期:2015-03-15 返修日期:2015-05-08 本文受国家自然科学基金(61170287,61232016)资助。

郭西风(1990-),男,硕士生,主要研究方向为模式识别与人工智能,E-mail:guoxifeng1990@163.com;祝 恩(1976-),男,博士,教授,主要研究方向为模式识别、图像处理和信息安全等;周思航(1991-),男,博士生,主要研究方向为机器学习和人工智能;申小龙(1988-),男,博士生,主要研究方向为体系结构;殷建平(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为算法设计、人工智能、模式识别和信息安全等。

考点的方法^[7,8]。为了实现统一,定义适用于所有类型指纹的参考点也是个研究热点。有些文献为所有类型的指纹定义凸纹线上的最大曲率点为参考点^[9,10]。这些方法在图像质量较低或部分缺失的情况下精度下降很快。Tams^[11]定义了一种新的有向参考点,通过尖拱型模型去匹配局部方向场来得到,对非拱型指纹具有高精度的性能,但对拱型指纹效果不是太好,而且匹配算法比较耗时。还有些采用指纹焦点作为参考点^[12]。指纹焦点定义为一些垂直于纹线的直线两两相交得到的所有交点的均值,实验证明该焦点对各种类型以及平移、旋转、形变的指纹都很稳定。最经典的检测方法由Areekul和Boonchaiseree^[12]提出,该方法效率很高,但精度易受噪声影响,仍有很大的提升空间。

为了通过预对齐技术提升大规模 AFIS 的识别速度,本文通过分析检测指纹焦点过程中不同交点的重要程度提出一种基于交点权重图的指纹焦点检测算法,以牺牲少许时间为代价,使检测精度和稳定性得到大大提升。

本文第 2 节详述交点权重图的定义和特性;第 3 节描述焦点检测算法即第 4 节给出实验结果和相关讨论;最后进行总结。

2 交点权重图

假设指纹图像 I 的尺寸为 $w \times h$, $I(i, j)$ ($0 \leq i < w, 0 \leq j < h$) 表示 I 在 (i, j) 处的灰度。用 F 来标识 I 的前景和背景;若 $F(i, j) = 1$, 则 (i, j) 为前景;若 $F(i, j) = 0$, 则 (i, j) 为背景。 F 的计算参考 Yin 等人^[13]的方法。用 $O(i, j)$ 表示 (i, j) 处的纹路方向,方向场 O 分成 $b \times b$ 的小块,参考 Zhu 等人^[14]的计算方法。

首先从方向场生成所有交点,然后根据重要程度给每个交点赋予一个权重,最后收集所有权重形成交点权重图 M_{cpw} ,其尺寸与 I 相同。如果 $F(i, j) = 1$, 则 $M_{cpw}(i, j)$ 的值等于落在 (i, j) 处的交点的权重之和;否则, $M_{cpw}(i, j) = 0$ 。下面进行详述。

如图 1(a) 所示,从方向场某个块的中心点 P_m 可引出与该块方向垂直的直线 l_m ,以同样方式从另一个块的中心 P_n 引出直线 l_n ,这两条直线若不平行则必相交,记交点为 Q_{mn} ;而且每两个块都可能产生一个交点。

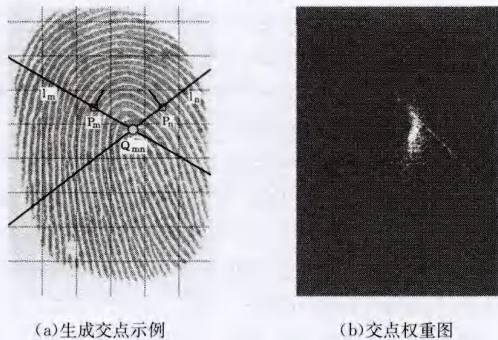


图 1 交点与交点权重图

生成交点之后,接下来介绍交点的权重。直观上,我们希望焦点落在拥有最大曲率的一些纹线的中心,因此应该考虑不同曲率的贡献。曲率越大,贡献也应该越大。另外,凹纹线(形状为开口向上的抛物线的纹线)易产生很多噪声而影响焦点的稳定性,斗型和箕型指纹尤为明显,因此这类纹线不应赋

予太大贡献值。在方向场上,定义交点 Q_{mn} 的曲率半径为

$$R(Q_{mn}) = \max(\| \overline{Q_{mn}P_m} \|, \| \overline{Q_{mn}P_n} \|) \quad (1)$$

如果交点 Q_{mn} 位于 P_m 和 P_n 的上方,即 Q_{mn} 的纵坐标比 P_m 和 P_n 的纵坐标小(这里用的图像坐标系,原点在左上角),用 $Q_{mn} < P_m, P_n$ 表示,则认为 P_m 和 P_n 位于凹纹线上。基于上述两点,交点 Q_{mn} 的权重定义为

$$w(Q_{mn}) = \begin{cases} 1, & Q_{mn} < P_m, P_n \\ 1 + Ke^{-\lambda R(Q_{mn})}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $K, \lambda \in \mathbb{R}$ (实验中 $K = 20, \lambda = 0.06$), 于是

$$M_{cpw}(i, j) = \begin{cases} \sum_{Q_{mn}=(i,j)} w(Q_{mn}), & F(i, j) = 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

收集所有交点的权重,便得到了 M_{cpw} ,如图 1(b) 所示。

3 焦点检测算法

本节描述基于交点权重图的焦点检测算法。算法借鉴 Areekul 和 Boonchaiseree^[12]的迭代步骤,流程如图 2 所示。首先,收集所有可能的焦点作为候选点。然后对每个候选点,通过改变有效区域来定位新的焦点。重复该过程直到收敛,便得到最终焦点。

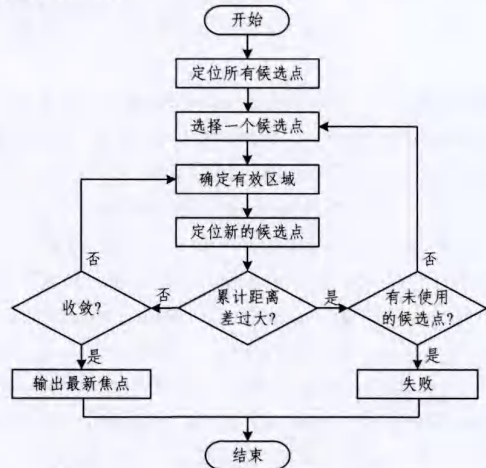


图 2 交点检测算法流程

算法详细步骤如下。

第一步:为了找到所有候选点,需要利用整个方向场的信息来得到交点权重图 M_{cpw} ,这个过程比较耗时。为了提高效率,按步长为 2 对分块的方向场间隔采样,用采样的方向块计算 M_{cpw} ,然后将其按方向场的分块方式和大小进行分块,并找到全局最大密度块和其他局部最大密度块,在这些块中按式(4)来计算候选点。

$$x_F = \frac{\sum_{(i,j) \in \Omega} i \cdot M_{cpw}(i,j)}{\sum_{(i,j) \in \Omega} M_{cpw}(i,j)} \quad (4)$$

$$y_F = \frac{\sum_{(i,j) \in \Omega} j \cdot M_{cpw}(i,j)}{\sum_{(i,j) \in \Omega} M_{cpw}(i,j)}$$

其中, (x_F, y_F) 是候选点的坐标, Ω 是对应的最大密度块。最后将这些候选点按所属的块的密度从大到小排序。

第二步:从未使用过的候选点中选择拥有最大密度的候选点。

第三步:在方向场上,以当前焦点所在的块为中心, R 为半径(单位是块,实验中 $R = 10$),选取一个上半圆区域作为有

效区域,用该区域的方向场计算交点权重图。这里有效区域选取上半圆而非整个圆是为了消除凹纹线的影响;另外这里的交点权重图根据有效区域计算,而第一步是根据采样的方向块进行计算。

第四步:用式(4)计算新的焦点位置,注意需要将 Ω 表示的区域改为

$$\Omega = \{(i, j) | (i - x_F(t))^2 + (j - y_F(t))^2 \leq (bR)^2\}$$

其中, $(x_F(t), y_F(t))$ 表示当前焦点坐标。这里选择 Ω 为整个圆而非半圆,是考虑到新的焦点可能较当前焦点向下移动。如果新的焦点为 $(x_F(t+1), y_F(t+1))$,那么移动距离 $\delta(t+1)$ 和累计移动距离 $S_\delta(t+1)$ 可分别由以下公式计算。

$$\delta(t+1) = \sqrt{(x_F(t+1) - x_F(t))^2 + (y_F(t+1) - y_F(t))^2}$$

$$S_\delta(t+1) = S_\delta(t) + \delta(t)$$

第五步:给定累计移动距离的阈值 S_T (在实验中 $S_T = 100$),那么如果 $S_\delta(t+1) > S_T$,则认为累计移动距离差过大,以当前候选点作为初始点的迭代过程失败,选择新的候选点重新迭代,即回到第二步,如果没有可用的候选点,则宣告失败。如果 $S_\delta(t+1) \leq S_T$,则判断是否收敛($\delta(t+1)$ 作为收敛的条件),如果尚未收敛,则回到第三步继续迭代;如果已经收敛,则将第四步得到的新焦点作为最终焦点输出。

4 实验结果与讨论

在 FVC2000 Db2a 指纹库上对提出的方法进行了测试。每个指纹库都有 800 个指纹,包括 100 个手指,每个手指有 8 个指纹。将提出的方法与方法 A (Tams^[11] 的方法)、方法 B (Areekul 等人^[12] 的方法)进行了对比。其中方法 A 使用一种尖拱型模型来得到有向参考点,方法 B 是检测指纹焦点的最新方法。实验环境为 i5-3470 处理器核,3.2GHz 主频,4GB RAM,编程语言为 C++。

4.1 精度和处理时间

焦点不像奇异点一样可以人工标定,由于参考点的主要作用是辅助对齐两个指纹,因此距离误差 (DE) 按如下方式评估。对每个手指的 8 个指纹,选择其中一个作为模板,记录其他 7 个指纹分别与模板匹配成功时的仿射参数 (旋转参数和平移参数)。根据仿射参数将非模板的指纹焦点映射到模板中,将模板中 8 个焦点 (其中 7 个是非模板指纹焦点的映射点) 的均值作为真实焦点。某个焦点的距离误差定义为该焦点与焦点均值的欧氏距离。

方法 A、B 和提出的方法的实验结果如表 1 所列。给定允许的距离误差 T_{DE} ,将 $DE \leq T_{DE}$ 的指纹个数占总个数的百分比作为准确率。表 1 中的准确率是在 $T_{DE} = 20$ 像素的条件下得到的。可以看出,提出的方法在准确率上远超其他方法,处理时间为 15.42ms,大概为方法 B 的 3 倍,但从后面的讨论可以看出,在大规模指纹库上进行识别时,这点时间的影响微乎其微。

表 1 在 FVC2000 Db2a 指纹库上的准确率和平均处理时间

方法	$DE \leq 10$	$DE \leq 20$	$DE > 20$	失败	准确率 (%)	时间 (ms)
本文方法	750	791	9	0	98.88	15.42
方法 A ^[11]	727	751	35	14	93.88	694.47
方法 B ^[12]	662	762	38	0	95.25	4.69

图 3 示出不同方法的稳定性。当允许的距离误差 T_{DE} 小

于 10 像素时,提出的方法与方法 A 有近似的准确率;当大于 10 像素时,提出的方法的准确率高于其他方法。方法 A 在 $T_{DE} < 10$ 像素时取得较高的准确率,但由于该方法对于拱型指纹效果较差,其精度并未随着 T_{DE} 的增大而足够快地提升,且有很多参考点检测失败。因此,提出的方法在稳定性上也具有最好的性能。

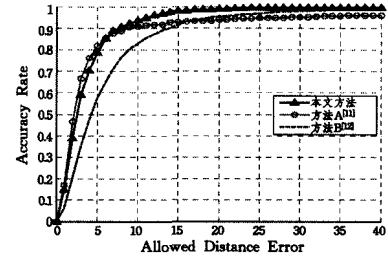


图 3 方法 A、B 和所提方法的稳定性对比

4.2 讨论

对于大规模指纹库,提取参考点的时间是次要因素。例如,对于容量为 N 的指纹库,识别时间为

$$T_{id} = T_{extract} + NT_{match} \quad (5)$$

其中, $T_{extract}$ 表示特征提取 (包括检测参考点) 的时间, T_{match} 表示匹配两个指纹特征的时间。当 $N > 10^6$ 时,即使 T_{match} 能小到 10^{-4} s,识别时间 T_{id} 也会大于 100s,而提出的方法的处理时间约为 0.02s,显然是微不足道的。另外,使用参考点进行指纹预对齐,即使能降低 1% 的匹配时间,也能使 T_{id} 降低 1s。总之,定位参考点所花费的时间是值得的。

综上所述,与处理时间相比,参考点的精度才是最重要的。因此,本文提出的方法适合于提升 AFIS 在大规模指纹库上的运行性能。

结束语 本文提出了一种基于交点权重图的指纹焦点精确检测方法。首先在分块方向场上,每两个块引出的垂直于对应块的方向的直线相交得到一个交点;然后考虑不同交点对最终理想焦点位置的贡献不同,赋予每个交点一个权重,收集所有权重值构成交点权重图,基于该图运行迭代算法确定精确焦点位置。在 FVC2000 Db2a 数据库上的测试结果表明,提出的方法能在时间开销不太大的情况下精确检测焦点。后期工作包括:1) 为焦点设计方向,使指纹预对齐更加高效;2) 利用交点权重图的结构信息实现指纹分类。

参考文献

- [1] Jain A K, Feng J, Nandakumar K. Fingerprint matching [J]. Computer, 2010(2): 36-44
- [2] Bazen A M, Gerez S H. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 905-919
- [3] Zhou J, Chen F, Gu J. A novel algorithm for detecting singular points from fingerprint images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(7): 1239-1250
- [4] Li Y, Mandal M, Lu C. Singular point detection based on orientation filed regularization and poincaré index in fingerprint images [C] // 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013: 1439-1443

(下转第 46 页)

(近似理想同态)。信息系统结构可以看作是信息系统的语义结构。

3. 计算对象同态的像系统,需要对全体论域对象做扫描比较,其开销会随着信息系统数据量的增加而增加;计算属性同态的像系统,需要计算各种像系统的信息系统结构,以找到近似理想同态,但不需要扫描论域对象,其开销取决于系统属性的个数。一般来说,与论域对象相比较,信息系统的属性较少且更稳定(不易改变),而对象数目会动态增加,变化范围很大,因此对于数据量很大的信息系统,利用属性同态做数据压缩在计算开销上会优于对象同态。

由例4可以看出,应用信息系统属性同态的概念实现属性压缩,其过程与信息系统中论域对象的数目(行数)无关,只需考虑属性上的函数依赖以及由其决定的信息系统结构。当信息系统论域对象的数目较大时,特别是在大数据的环境下,该方法更具有优势。

结束语 本文根据属性集上的函数依赖关系定义了信息系统属性同构与信息系统属性同态的概念。一般而言,信息系统中的论域对象(行)数目远远大于属性(列)的数目,利用本文所提出的属性同态的方法能够直接对信息系统属性集进行压缩,因为没有考虑信息系统的其他要素,并且不涉及对论域对象的扫描比较,某种程度上简化了对信息系统同态问题的研究。

本文通过第3、4节的工作给出了信息系统理想同态存在的条件以及任意属性同态理想程度的度量方法,第5节给出了应用实例。进一步的工作可以更加深入地研究属性同态的性质;将信息系统属性同态与属性约简进行比较研究。

参考文献

- [1] Graymala-Busse J W. Algebraic properties of knowledge representation systems[C]// Proceedings of the International Symposium on Method for Intelligent Systems. 1986:432-440
- [2] Li De-yu, Ma Yi-chen. Invariant characters of information systems under some homomorphisms[J]. Information Sciences, 2000, 129(1-4): 211-220
- [3] Qu Kai-she, Zhai Yan-hui, Li De-yu, et al. Some Characters of Information System Homomorphism and Invariance of Upper and Lower Approximations[J]. Computer Science, 2005, 32(12): 168-174(in Chinese)
- [4] 曲开社, 翟岩慧, 李德玉, 等. 信息系统同态的性质及上下近似的不变性[J]. 计算机科学, 2005, 32(12): 168-174
- [5] Wang Chang-zhong, Wu Cong-xin, Chen De-gang, et al. Some properties of relation information systems under homomorphisms[J]. Appl. Math. Lett., 2008, 21(9): 940-945
- [6] Wang Chang-zhong, Wu Cong-xin, Chen De-gang, et al. Communicating between information systems[J]. Information Sciences, 2013, 178(16): 3228-3239
- [7] Zhu Ping, Wen Qiao-yan. Some improved results on communication between information systems[J]. Information Sciences, 2010, 180(18): 3521-3531
- [8] Wang Chang-zhong, Chen De-gang, Zhu Liang-kuan. Homomorphisms between fuzzy information systems[J]. Appl. Math. Lett., 2009, 22(7): 1045-1050
- [9] Zhu Ping, Wen Qiao-yan. Homomorphisms between fuzzy information system revisited[J]. Appl. Math. Lett., 2011, 24(19): 1548-1553
- [10] Wang Chang-zhong, Chen De-gang, Wu Chong, et al. Data compression with homomorphism in covering information systems[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2011, 52(4): 519-525
- [11] Wang Chang-zhong, Chen De-gang, Sun Bai-qing, et al. Communication between information systems with covering based rough sets[J]. Information Sciences, 2012, 216(24): 17-33
- [12] Liu Xiao-juan, Mi Ju-sheng, Li Zhong-ling. Date Compression with Homomorphism in Neighborhood Information Systems[J]. Computer Science, 2012, 39(11): 230-232(in Chinese)
- [13] 刘晓娟, 米据生, 李仲玲. 邻域信息系统基于同态的数据压缩[J]. 计算机科学, 2012, 39(11): 230-232
- [14] Armstrong W W. Dependency structures of data base relationships[C]// Proceedings of IFIP Congress. North-Holland, Amsterdam, 1974: 580-583
- [15] Mora A, Cordero P, Enciso M, et al. Closure via functional dependence simplification[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2012, 89(4): 510-526
- [16] Katona G O H, Sali A. On the distance of databases[J]. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 2012, 65(2/3): 199-216
- [17] (上接第37页)
- [18] Park C-H, Lee J-J, Smith M J, et al. Singular point detection by shape analysis of directional fields in fingerprints [J]. Pattern Recognition, 2006, 39(5): 839-855
- [19] Chua S C, Wong E K, Tan C, et al. Singular point detection in fingerprint images: An investigation on quantization approach [C]// 2014 IEEE Region 10 Symposium. 2014: 606-611
- [20] Bahgat G, Khalil A, Abdel Kader N, et al. Fast and accurate algorithm for core point detection in fingerprint images [J]. Egyptian Informatics Journal, 2013, 14(1): 15-25
- [21] Ma J, Jun Jing X, Zhang B, et al. An effective algorithm for fingerprint reference point detection [C]// 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC). 2010: 200-203
- [22] Liu M, Jiang X, Kot A C. Fingerprint Reference-Point Detection[J]. EURASIP J. Adv. Sig. Proc., 2005, 2005(4): 498-509
- [23] Le T H, Van H T. Fingerprint reference point detection for image retrieval based on symmetry and variation [J]. Pattern Recognition, 2012, 45(9): 3360-3372
- [24] Tams B. Absolute fingerprint pre-alignment in minutiae-based cryptosystems [C]// 2013 International Conference of the Biometrics Special Interest Group (BIOSIG). 2013: 1-12
- [25] Areekul V, Boonchaiseree N. Fast focal point localization algorithm for fingerprint registration [C]// 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2008 (ICIEA 2008). 2008: 2089-2094
- [26] Yin J, Zhu E, Yang X, et al. Two steps for fingerprint segmentation [J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(9): 1391-1403
- [27] Zhu E, Hancock E, Yin J, et al. Fusion of multiple candidate orientations in fingerprints [M]// Image Analysis and Recognition. Springer, 2011: 89-100