

检验配准模式的指纹匹配算法*

陈宏^{1,2}, 田捷^{1,2+}

¹(中国科学院 自动化研究所 复杂系统与智能科学重点实验室 生物特征认证与测评中心,北京 100080)

²(中国科学院 研究生院,北京 100049)

A Fingerprint Matching Algorithm with Registration Pattern Inspection

CHEN Hong^{1,2}, TIAN Jie^{1,2+}

¹(Center for Biometric Research and Testing (CBRT), Key Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

²(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62532105, Fax: +86-10-62527995, E-mail: tian@doctor.com, <http://www.fingerpass.net>

Received 2003-08-21; Accepted 2005-01-06

Chen H, Tian J. A fingerprint matching algorithm with registration pattern inspection. *Journal of Software*, 2005,16(6):1046–1053. DOI: 10.1360/jos161046

Abstract: The “registration pattern” between two fingerprints is the optimal registration of each part of one fingerprint with respect to the other fingerprint. Registration patterns generated from imposter’s matching attempts are different from those patterns from genuine matching attempts, although they may share some similarities in the aspect of minutiae. This paper presents an algorithm that utilizes minutiae, associate ridges and orientation fields to determine the registration pattern between two fingerprints and their similarity. The proposed matching scheme has two stages. An offline training stage derives a genuine registration pattern base from a set of genuine matching attempts. Then, an online matching stage registers the two fingerprints and determines the registration pattern. Only if the pattern makes a genuine one, a further fine matching is conducted. The genuine registration pattern base is derived using a set of fingerprints extracted from the NIST Special Database 24. Experimental results on the second FVC2002 database demonstrate the performance of the proposed algorithm.

Key words: registration pattern; fingerprint feature representation; automatic fingerprint matching

摘要: 两幅指纹之间的“配准模式”是由所有局部最优配准决定的,由假匹配产生的配准模式与真匹配的配准模式是不同的,尽管假匹配的两幅指纹图像从细节点的角度来看有很高的相似度.提出一种用细节点、联系脊线和方向场特征信息确定配准模式并进行指纹匹配的算法.算法由两部分组成:离线学习部分从一组真匹配数据中获得一个真配准模式集;在线部分对待匹配的指纹作配准并确定其配准模式,仅当该模式构成一个真模式

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60332010 (国家自然科学基金); the Project for Young Scientists’ Fund of National Natural Science Foundation of China under Grant No.60303022 (国家自然科学基金青年科学基金); the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China under Grant No.60225008 (国家杰出青年科学基金)

作者简介: 陈宏(1976—),男,福建泉州人,硕士,主要研究领域为自动指纹识别技术;田捷(1960—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为医学图像处理,生物特征识别.

时,才做进一步的精细匹配.真配准模式集是由对 NIST 24 连续指纹影像数据集的计算获取的.在 FVC2002 DB2 数据库上的测试显示,算法有很高的准确率.

关键词: 配准模式;指纹特征表示;自动指纹匹配

中图法分类号: TP18 **文献标识码:** A

近年来,指纹图像的非线性形变问题已经引起了广泛的重视,许多研究者开始深入研究这个问题.指纹图像的非线性形变是由两种原因构成的.一方面由于指纹采集是一个三维到二维的映射过程,每一次采集指纹,指尖与采集平面接触的部位都会有所不同,这样就造成了不同的映射方式.另一方面,由于用户在采集指纹的过程中对采集面施加不规则压力而产生了不规则形变.平行于采集面的力导致图像的压缩和拉伸;而沿着接触中心的扭力则引起图像的扭曲.图 1 显示了这种形变带来的严重后果.

针对过度形变的指纹难以匹配的问题,Ratha 等人^[1]提出在指纹采集仪上增加辅助设备测量使用者在采集指纹时施加的扭力和拉力,Dorai 等人^[2]提出从连续指纹影像中估计形变的方法.但是这两种方法通过在采集指纹的环节上检测过分扭曲和拉伸的行为并拒绝注册来减少匹配的形变,需要辅助设备,并且运算量也很大.同时,对于已经采集并保留下来的指纹数据库(如法律机关的档案),这种方法没有效果.Cappelli 等人^[3]提出了一个弹性形变模型来描述指纹在采集的过程中发生的形变.模型对于理解指纹的形变过程很有帮助,但是由于单独的指纹图像提供的信息十分有限,要确定该模型中定义的各项参数是很困难的.还有许多学者提出一些弹性匹配的算法.Senior 等人^[4]假设一个“理想的”指纹脊线应该是以均匀的间隔分布的.因此,偏离平均脊线宽度的局部就反映了形变的发生.他们提出一种算法使得脊线以均匀的间距分布.该算法在一定程度上改善了非线性形变指纹的识别效果.但是,当施力的方向平行于脊线的方向时,脊线的间距并不会发生改变,因而这种方法检测不出形变.同时,该方法也无法解决由于采集区域不同引起不同映射模式的形变问题.Bazen 等人^[5]用薄板样条模型^[6](thin-plate spline,简称 TPS 模型)描述两幅指纹之间的形变.他们将其中一幅指纹作为模板,通过 TPS 模型对另一幅指纹的可能对应的细节点作“纠正”.该方法使得算法可以使用一个更小的界限盒检查两幅指纹的匹配细节点,从而提高了匹配的准确率.但是,TPS 模型的目的在于依据一些离散的控制点对图像作平滑插值.应用这个模型对待匹配的指纹进行“纠正”会导致不论两枚指纹是否来自同一个手指,两个指纹都会变得更相似.Kovács-Vajna^[7]用一系列的三角形来描述指纹的局部特征分布.每个单独三角形的形变量都很小,但是累积下来却可以有很大的形变,这一特点和指纹的形变十分相似.但是局部小三角形形变可以组合成各种各样的形变模式,这些形变模式可能完全无法在真实的指纹匹配中实现,却可以符合某些本来来自不同手指的指纹的(错误的)匹配情况,从而出现误识的可能.

综合以上研究我们发现,目前关于非线性形变指纹匹配的研究只侧重于寻找和描述局部的配准,对于这些局部匹配构成的全局“配准模式”的合理性没有考虑.这样,当应用这些方法对“局部形变”进行“纠正”时,既可以将来自同一个手指的两枚指纹(真匹配)作合理的形变恢复,也可能将一部分来自不同手指的相似指纹(假匹配)变得更加相似.我们认为,来自真匹配的配准模式是由人手指的特点和指纹采集时的施力状况决定的.由相同指纹匹配的“真配准模式”之间会有一些共性,而由虽然相似但实际来自不同手指的指纹匹配产生的“假配准模式”与“真配准模式”会有一些区别.如图 2 所示,本文提出一种配准模式的计算方法,由离线阶段和在线阶段两部分组成.离线阶段从一组模拟的指纹匹配数据获得一个真配准模式知识集;在线阶段,依据该知识集对待匹配的两幅指纹考察其配准模式的合理性,并据此给出进一步的匹配结果.

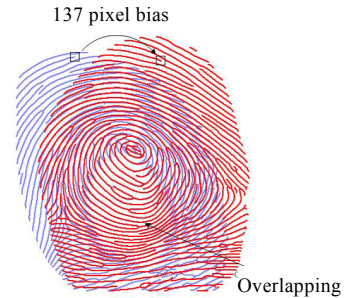


Fig.1 Overlapping two deformed fingerprints

图 1 两幅形变指纹图像的叠加结果

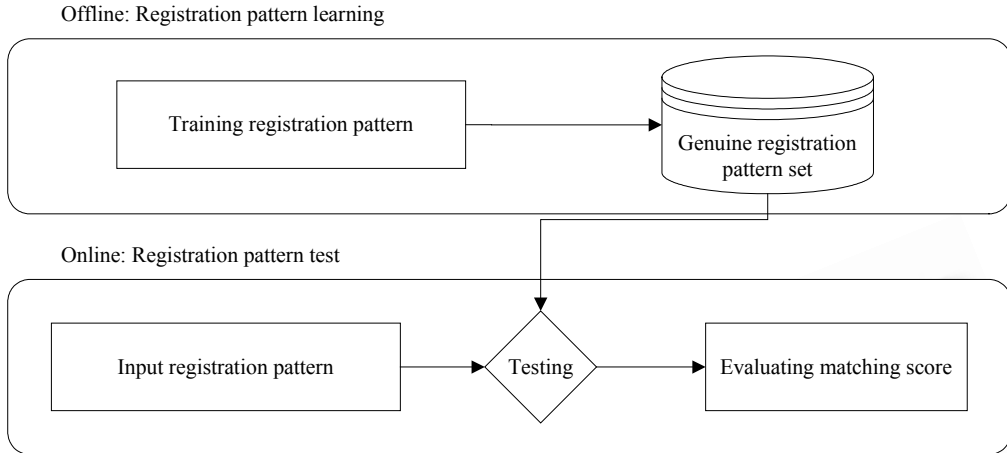


Fig.2 Flowchart of registration pattern matching

图2 配准模式检验的流程

1 定义配准模式

首先定义最优配准.如果把两幅指纹的匹配问题看成是它们对应的特征点的配准,则匹配问题转化为点模式的匹配问题.理想条件下,可以认为是求解两组离散的特征点的变换最优化问题:

给定两个离散的特征点集 $V_i = \{v_1, v_2, \dots, v_{n_i}\}$, 其中 $v_j = (x_j, y_j)^T$ ($j=1, 2, \dots, n_i, i=a, b$), 且 $n_a = n_b$. 存在一个最优的变换 $t_{opt}(v)$ (式(1)) 和一个一一映射: $m: \{i\} \mapsto \{i'\}$, 使得目标函数 $d = \sum_j |v_j^a - t_{opt}(v_j^b)|^2$ 达到最小.

$$t_{opt}(v) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & \Delta x \\ \sin \alpha & \cos \alpha & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \tag{1}$$

实际上,待匹配的两幅指纹可能不完全重叠,而且由于图像噪声、特征提取算法的不完善等因素的影响,提取的指纹特征往往会有部分丢失,甚至生成伪特征.除了坐标信息以外,特征点还包含了方向、类型等丰富的信息,特征点的相似度也应该重新定义.因此,上述最优化问题转化为如下的形式:

给定两个离散的特征点集 V_a, V_b (不要求 $n_a = n_b$), 求一个变换 t_{opt} 和一个不完全映射 $m: \{i_j\} \mapsto \{i'_j\}$ ($j \in N_m$), 其中 $N_m = \{1, 2, \dots, n'\}$, $n' \leq \min(n_a, n_b)$, 使得满足

$$sim(v_j^a, v_{j'}^b) < thr_{bound_box} \quad (\forall j \in N_m) \tag{2}$$

其中, $v_{j'}^b = t_{opt}(v_j^b)$ 的 $|N_m|$ 最大.我们将两幅指纹的可能重叠区域划分为 7 个互不相交的正六边形区域,分别计算最优配准参数,图 3 给出了一个分格示意图.这 7 个局部最优配准参数描述了全局配准模式:

$$RP = (t_0, t_1, \dots, t_6)^T \tag{3}$$

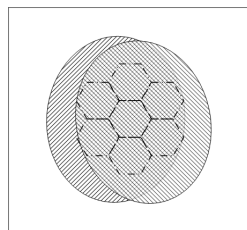


Fig.3 Overlapping area of two fingerprints

图3 两幅指纹可能重叠区域的分格示例

下文首先介绍我们提出的一种指纹描述方案和一种改进的指纹配准算法,接着介绍配准模式的计算方法

以及从 NIST 24^[8]连续指纹影像数据库中学习真配准模式集,然后是配准模式的检验方法和匹配分数的计算.最后给出算法在 FVC2002 DB2^[9]上的实验结果,并作总结与讨论.

2 检验配准模式的指纹匹配

2.1 指纹特征的表达

由于细节点信息是指纹最显著也是最稳定的特征,所以许多指纹识别算法采用细节点信息表示指纹特征.但是这种方法丢失了指纹丰富的脊线结构信息,而且算法的识别效果严重依赖于细节点的数量和准确性,识别率难以进一步提高.Jain 等人^[10,11]提出用 Gabor 纹理描述指纹的特征,Fan 等人^[12]用 20 种预定义的几何形状来记录局部脊线特征.罗希平等人^[13,14]用细节点结合部分联系脊线信息的方法取得了一定的效果.但是这些方法都难以对含有较大形变的指纹作匹配.我们采用细节点特征,联系脊线的采样点以及全局的方向场信息来描述指纹的方法.图 4 给出了一幅指纹图像记录的特征信息.

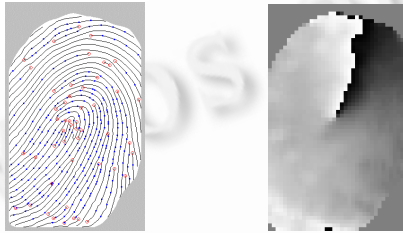


Fig.4 Fingerprint features

图 4 指纹图像的特征

2.2 带反馈的配准方法

我们把指纹的特征用局部的特征点(细节点和采样点)来描述,这样指纹图像的配准问题就转化为点模式匹配问题.这是一个 NP-完全问题,已经有大量的研究者提出许多解决方法.Jiang 等人^[15]提出一种利用局部特征结构进行指纹匹配的方法.该方法由于巧妙地引进了邻近细节点距离、方向夹角等具有旋转和平移不变性的局部特征,大大减小了配准参数计算的搜索空间.但是这种方法应用于求解小区域的局部配准参数时效果不佳.这是由于局部配准覆盖的面积小,涉及的指纹细节点数目太少,难以构造足够多的特征结构用以匹配.在 Jiang 的方法的基础上,我们提出增加联系脊线的采样点用于构造局部特征结构,并引入方向场匹配作为反馈函数检验配准参数的有效性,提高算法的鲁棒性.我们对细节点的类型不作区分,对采样点则根据追踪的距离作区分,如图 5 所示.

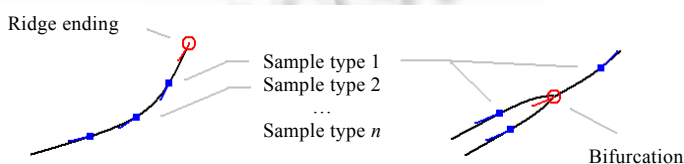


Fig.5 Minutiae and sampled points on their associated ridge

图 5 细节点和联系脊线采样特征点的定义

对构造的两组特征结构集进行逐对比较,获得若干变换参数和对应的相似度.不同于 Jiang 的方法直接选择相似度最高的参数,我们对变换参数进行聚类并求平均,得到一组候选变换参数 t_k ,权重为相似度之和 Σs_l .

指纹图像是一种特殊的纹理图像,指纹图像中的所有脊线轨迹可用图像的方向场来描述,而且仅仅只与图像的旋转有关,与同图像的平移等变换无关.对非线性形变而言,估计出来的指纹图像的块方向场信息也变化不大.因此,引入方向场匹配作为变换参数检验的目标函数,能够快速地从全局上衡量变换参数的有效性.我们的实验也证明了引入方向场信息能加快对最优变换参数估计、匹配模式的建立.

基于方向场信息的具体匹配方法是将指纹分为 $w \times w$ 的块,定义方向矩阵 $O = (o_{i,j})$ 和块方向相似度:

$$sl_{bo}(o_{i,j}, o'_{p,q}) = \begin{cases} bo - d\phi(o_{i,j}, o'_{p,q}), & d\phi(o_{i,j}, o'_{p,q}) < bo \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (4)$$

将变换作用于方向场 $O'_T = t'_k(O'_T)$,则方向场相似度为

$$sl_O(O, O') = \sum_{i,j} sl_{bo}(o_{i,j}, o'_{i,j}) \quad (5)$$

将候选配准参数按照权重由大到小排序,逐个对应方向场相似度,直至获得一个最优的参数.图 6 描述了这一过程.为方便描述,给定两组特征点集 F_{input} 和 $F_{template}$,记上述步骤:

$$t_{opt} = align(F_{input}, F_{template}) \quad (6)$$

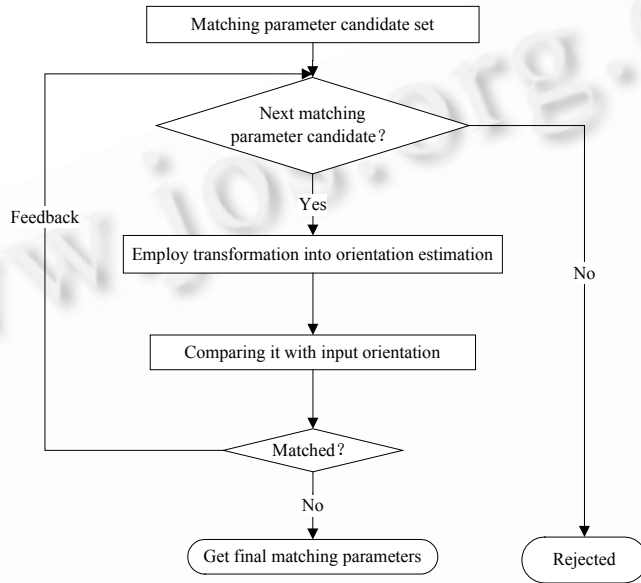


Fig.6 Matching method with feedback

图 6 带反馈的配准方法

2.3 配准模式的计算

给定两幅指纹图像的特征 F_{input} 和 $F_{template}$,先求粗配准参数 $t_{global} = align(F_{input}, F_{template})$,作用于模板 $t_{global}(F_{template})$,确定(可能的)重合区域 Rgn_i, Rgn_t ,作区域划分 $F'_{input,i} (i=0,1,\dots,6)$.求中心区域 $F'_{input,0}$ 与 $F_{template}$ 的最优配准 $t_0 = align(F'_{input,0}, F_{template})$,将模板按照 t_0 变换 $F'_{template} = t_0(F_{template})$,分别求其他 6 个区域的最优配准 $t'_i = align(F'_{input,i}, F'_{template}) (i=1,2,\dots,6)$.注意,此时有 $t'_0 = 0$.得到归一化的配准模式 $RP = (0, t'_1, t'_2, \dots, t'_6)$.

2.4 真配准模式学习

我们从美国标准局(NIST)出版的专门数据库 NIST 24 指纹影像库中抽取形变指纹图像进行两两匹配来获取“真配准模式”知识.NIST 24 数据库包含了 100 段连续指纹影像.数据库记录了从手指接触采集仪表面到离开的全过程,以 MPEG-2 压缩格式记录.提供指纹的志愿者被要求在采集仪上故意作各种各样的动作使得被采集的指纹有各种各样扭曲的形式.这 100 段指纹影像包含了各种各样的指纹类型和指纹特点.可以认为它覆盖了几乎所有的真实匹配情况中可能发生的形变.

我们将影像中包含指纹的帧解压缩,并对来自同一手指的指纹图像作两两匹配,记录所得的配准模式 $RP=(t_0, t_1, \dots, t_6)^T$.这样,所有的配准模式组成了一个真配准模式集 $GRPB = \{RP_k\}$.图 7 给出了对两幅含有较大形变指纹进行匹配所得的配准模式.



Fig.7 Genuine matching pattern
图 7 真配准模式

2.5 配准模式检验

不同手指的指纹是不同的,但是它们的形状、表面皮肤的柔韧性、用户所能完成的动作却是相似的.因此,由真匹配产生的真配准模式之间也应该有相似性.而对于伪匹配,虽然在较大的数据库中可能出现不同指纹的细节点信息十分相似的情况,但是从配准模式的角度来分析,它们与真配准模式会有一定的区别.

为检验匹配模式变换的效果,即需要定义一个匹配模式之间的相似测度函数.在本文中用公式(7)来测度配准模式之间的差异.从实验结果可以得知,公式(7)中的方法要好于用 RP_i 和 RP_j 之间的欧式距离测度的方法.

$$d(RP_i, RP_j) = \sqrt[3]{\sum_k |\Delta x_k^i - \Delta x_k^j|^3 + |\Delta y_k^i - \Delta y_k^j|^3 + (R \times |\alpha_k^i - \alpha_k^j|)^3} \quad (7)$$

并由公式(7)得到一个真配准模式空间:

$$S_{GRP} = \{RP | \exists RP_i \in GRPB, d(RP, RP_i) < thr_{gspace}\} \quad (8)$$

所有属于该空间的配准模式我们认为是真模式,而该空间以外的,则认为是假模式,将被拒绝匹配,不进入下一步的计算.图 8 给出了在配准模式检验阶段,算法成功检测出的部分伪匹配.



Fig.8 Imposter matching pattern
图 8 算法检测到的伪匹配

2.6 匹配分数的计算

如果产生的配准模式包含在真模式空间内,我们用下面的方法来计算最终匹配分数:

$$M = \frac{m}{\max(n_{input}, n_{template})} \times \sum sl \quad (9)$$

m 是重叠区域内匹配上的特征点个数, n_{input} 是输入指纹在重叠区域内的特征点个数, $n_{template}$ 是模板在重叠区域内的特征点个数, $\sum sl$ 是匹配上的特征结构的相似度总和.否则,匹配分数为 0.

3 实验结果

在 FVC2002 的第 2 个数据库上测试我们的算法.FVC2002 的设计者在这次竞赛中侧重于检验指纹识别算

法对于较大形变指纹的识别能力.为了单独考察我们的算法对于形变问题的解决能力,尽量减少其他因素的影响,我们选择在图像质量较好而且面积较大的第 2 个数据库上进行测试.

对原始图像我们用如下方法做增强:先采用 Lin Hong 等人^[16]提出的基于 Gabor 滤波方法对指纹图像作增强处理,接着是二值化和细化,然后采用罗希平等人^[17]提出的基于知识的增强方法去除伪细节点.图 9 给出了一幅指纹图像的处理结果.在细化图像上,我们从检测到的细节点出发,沿着联系脊线追踪,每隔 20 个像素的距离记录下一个采样点.在细节点稀疏的区域,脊线采样点可以提供额外的信息用以配准和区别.对方向场则按照 16×16 的间隔进行离散化记录,这部分信息很好地描述了指纹的整体结构.

FVC2002 DB2 共有 880 幅指纹,来自于 110 个不同手指,每个指纹采集 8 幅图像.与 FVC 对于不同手指的指纹图像仅用第 1 幅作匹配的测试方法不同,我们对所有指纹图像作两两匹配.这样共需要测试 $(110 \times 8 \times 7) / 2 = 3080$ 次真匹配和 $(880 \times 872) / 2 = 383680$ 次假匹配.



Fig.9 Enhancement performance

图 9 指纹图像的增强处理结果

为了检验算法,我们设计了两个实验.第 1 项实验单独检查细节点结合联系脊线采样的特征描述方案的效果.我们采用文献[15]中描述的方法,用全局统一的变换参数和固定的界限阈值来做匹配.测试结果的 ROC 曲线如图 10 所示.从测试结果来看,带有方向场匹配反馈的校准算法能够对绝大多数的真匹配计算出正确的校准参数,同时因为联系脊线采样提供了更丰富的信息,算法的 EER 较好(1.1%).但是,由于这个数据库的图像含有很大的形变,刚性匹配算法很难在准确性和识别率之间作较好的折衷,算法的 ZFMR 比较高(17%).

第 2 项实验检验配准模式方法的性能.仍然采用同样的特征描述方案,但是对每个重叠局部求最优配准并检验配准模式.注意到这个数据库采用的采集仪分辨率为 569dpi,不同于 NIST24 数据库所用的采集仪分辨率(500dpi).我们对真配准模式集作如下调整:

$$t'_i = \left(\Delta x \times \frac{569}{500}, \Delta y \times \frac{569}{500}, \alpha \right) \quad (10)$$

第 2 项实验测试结果 $EER=0.51\%$, $ZeroFMR=2.3\%$.图 10 给出测试的 ROC 性能曲线.从两个结果的对比可以看出,检验配准模式的算法可以有效匹配含有较大形变的指纹,同时有效地鉴别高度相似的假匹配(如图 8 所示).FVC2002 公布的测试报告^[9]给出了他们在同一数据库上对来自 31 个不同的商业公司、研究机构和学院提供的算法进行的测试.与该结果相比较可知,我们的算法有较高的性能.

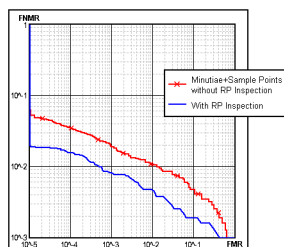


Fig.10 ROC curve of our matching over the DB2 fingerprint database of FVC2002

图 10 算法在 FVC2002 DB2 上的 ROC 曲线

4 总结与讨论

本文提出了一种新颖的指纹匹配算法,其特点是重叠区域的分区局部最优配准与引用方向场等信息进行

全局配准模式检验相结合.一方面,有效地实现了对含有很大形变的指纹图像的匹配,另一方面,又从配准模式有效性的角度检验出一些单纯从细节点角度难以区分的相似指纹.而这也正是传统的指纹匹配算法误识率较高的原因所在.

但是我们也发现,目前的方法仍然有许多不足:首先,采用方向场的匹配作为配准计算的反馈函数有一定的效果,但是,在实验中发现仍然有少数真匹配的首选变换参数是错误的,然而方向场吻合得相当好,这样导致最终的配准模式是错误的而被拒绝接受.显示方向场的区分能力有限,需要进一步寻找合适的反馈函数.其次,现在的这种检验配准模式的方法运算量大,当检验某个可能的配准模式时,我们需要将它与已知的真模式作逐个的比较.进一步的工作可以对这些真模式作约简,或者规则提取.当然,对于质量很差的图像,算法无法可靠地提取细节点,从而也无法正确地确定配准参数.进一步的工作可以研究这部分图像的其他配准方式.

References:

- [1] Ratha NK, Bolle RM. Effect of controlled acquisition on fingerprint matching. In: Proc. of the 14th Int'l Conf. on Pattern Recognition. Brisbane: IEEE Computer Society, 1998. 1659–1661.
- [2] Dorai C, Ratha N, Bolle R. Detecting dynamic behavior in compressed fingerprint videos: Distortion. In: Proc. of the Computer Vision and Pattern Recognition. Hilton Head: IEEE Computer Society, 2000. 13–15.
- [3] Cappelli R, Maio D, Maltoni D. Modelling plastic distortion in fingerprint images. In: Singh S, Murshed NA, Kropatsch WG, eds. Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Advances in Pattern Recognition. London: Springer-Verlag, 2001. 369–376.
- [4] Senior A, Bolle R. Improved fingerprint matching by distortion removal. IEICE Trans. Information and System, Special Issue on Biometrics. 2001,E84-D(7):825–831.
- [5] Bazen AM, Gerez SH. Elastic minutiae matching by means of thin-plate spline models. In: Proc. of the 16th Int'l Conf. on Pattern Recognition. Quebec: IEEE Computer Society, 2002. 985–988.
- [6] Bookstein F. Principal warps: Thin-Plate splines and the decomposition of deformations. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989,11(6):567–585.
- [7] Kovács-Vajna ZM. A fingerprint verification system based on triangular matching and dynamic time warping. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence, 2000,22(11):1266–1276.
- [8] Watson CI. NIST Special Database 24 Digital Video of Live-Scan Fingerprint Data. National Institute of Standards and Technology, 1998. <http://www.nist.gov/srd/nistsd24.htm>
- [9] Maio D, Maltoni D, Cappelli R, Wayman JL, Jain AK. FVC2002: Second fingerprint verification competition. In: Proc. of the 16th Int'l Conf. on Pattern Recognition. Quebec: IEEE Computer Society, 2002. 811–814.
- [10] Jain AK, Prabhakar S, Lin H, Pankanti S. Filterbank-Based fingerprint matching. IEEE Trans. on Image Processing, 2000,9(5): 846–859.
- [11] Ross A, Jain AK, Reisman J. A hybrid fingerprint matcher. Pattern Recognition, 2003,36(7):1661–1673.
- [12] Fan KC, Liu CW, Wang YK. A randomized approach with geometric constraints to fingerprint verification. Pattern Recognition, 2000,33(11):1793–1803.
- [13] Luo XP, Tian J. Image enhancement and minutia matching algorithms in automated fingerprint identification system. Journal of Software, 2002,13(5):946–956 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/946.pdf>
- [14] He YL, Tian J, Luo XP, Zhang TH. Image enhancement and minutia matching in fingerprint verification. Pattern Recognition Letters, 2003,24(9-10):1349–1360.
- [15] Jiang XD, Yau W. Fingerprint minutiae matching based on the local and global structures. In: Proc. of the 15th Int'l Conf. on Pattern Recognition. Barcelona: IEEE Computer Society, 2000. 1038–1041.
- [16] Lin H, Wang Y, Jain AK. Fingerprint image enhancement: Algorithms and performance evaluation. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998,20(8):777–789.
- [17] Luo XP, Tian J. Knowledge based fingerprint image enhancement. In: Proc. of the 15th Int'l Conf. on Pattern Recognition. Barcelona: IEEE Computer Society, 2000. 783–786.

附中文参考文献:

- [13] 罗希平,田捷.自动指纹识别中的图像增强和细节匹配算法.软件学报,2002,13(5):946–956. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/946.pdf>