

直接提取指纹特征算法的优化研究

王芙蓉 程鹏 邹璇

(华中科技大学电子与信息工程系, 通信软件与交换技术研究中心, 武汉 430074)

摘要 在对 Maio 与 Maltoni 于 1997 年提出的指纹特征灰度图直接提取算法进行分析的基础上, 提出了一种改进的指纹特征提取算法, 即在前景模板分割部分采用 Canny 算子和数学形态学相结合的方法; 在终结点判定部分提出跟踪角度和灰度变化相结合的新方法; 在滤波和去除伪节点等方面也进行了改进。实验证明, 这些改进在很大程度上克服了原算法阈值过多, 易提取出虚假脊线的问题。这样不仅使算法健壮性和准确性得到了很大的提高, 而且更有利于实际应用。

关键词 指纹验证 细节提取 指纹图像分割 Canny 算子 数学形态学 指纹后处理

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2004)05-0557-08

A Novel Improved Approach of Direct Minutia Extraction from Gray-level Fingerprint Image

WANG Fu-rong, CHENG Peng, ZOU Xuan

(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Communication Software and Switch Technology Research Center, Wuhan 430074)

Abstract Minutiae has been considered as the most distinctive feature of a fingerprint and thus widely used in finger reconstitution/verification. Instead of using those conventional extraction methods based on binarization and ridgeline thinning, D. Maio and D. Maltoni proposed a totally different approach to detect the minutiae directly in gray-scale images in 1997. In this approach minutiae were extracted based on ridge tracing directly in gray images, so it showed more robust performance by avoiding the errors introduced by binarization and thinning. However, there are also drawbacks of this approach, such as the difficulties to decide the 7 thresholds, inaccurate ridge ending determination and etc. In this paper, an approach with several important improvements on D. Maio and D. Maltoni's method is presented. A novel method based on canny operator and morphology is used for fingerprint foreground segmentation, and both ridge tracing angle and the change of gray-level are introduced into the stop criteria of ending point. Other improvements include the selection of a better filter, and a post-processing to eliminate the spurious ridgelines and false minutiae by considering the length of ridgeline and the local structure of ridgelines where minutiae are detected. The efficiency and robustness of the proposed algorithm have been shown in the experiments.

Keywords fingerprint verification, minutiae extraction, segmentation, Canny operator, morphology, post-processing

1 引言

指纹识别技术是一门古老的技术, 近年来, 由于计算机技术的飞速发展, 指纹识别技术的应用越来越广泛。

其中细节特征点(minutiae)的提取是极为关键的技术, 因为大多数指纹匹配的技术都要基于提取

的细节特征点(即终结点和分叉点)的匹配, 本文采用的是美国联邦调查局提出的细节指纹模型。

特征提取的传统方法^[1,2]是基于指纹图像二值化和基于数学形态学的细化方法, 然而二值化、细化都会带来一系列问题, 包括二值化后细节信息的丢失, 二值化和细化过程中引入的伪节点以及处理耗时过多等, 而现有算法的改进也多是局限在去除伪节点和滤波参数的选取等方面。

Maio 和 Maltoni 于 1997 年提出了一种基于脊线跟踪的直接从灰度图获取细节信息的新颖算法^[3], 这种方法是传统方法本质上的一个突破, 其实验结果表明, 这种方法比起传统方法无论在准确性, 还是在健壮性上都有优越性, 然而文献中却出现了高达 7 个阈值参数, 这些参数如何选取极大地限制了这种方法的普适性和实用性, 而且当指纹图脊线与谷线的结构不很清楚时, 实验结果不是很好。此外, 从原文给出的实验结果看, 这种方法对终结点的判定并不很准确, Lin Hong 在其博士论文^[1]中也有相应的论述。

Jiang 等在文献[3]方法的基础上做了自适应步长的改进^[4], 其方法是利用沿着脊线跟踪方向上脊线灰度的连续性来动态获得跟踪步长, 然而, 实际的指纹图由于噪声的干扰, 致使某些区域上(在指纹灰度图中往往是普遍存在的)脊线方向上脊线灰度的连续性遭到了不同程度的破坏, 对于这种情况, 从实验结果看, 效果并不令人满意。

Liu Jinxiang 等也提出了在终结点判定上的一些改进^[5], 其方法是利用脊线两边法向上最近的两个谷线位置的关系来判定终结点, 两个脊谷重合即为终结点, 这样使终结点的判定更为准确, 然而, 如果指纹灰度图上存在大量“空洞”时, 则某些区域容易产生一些对终结点的错判。

基于以上工作, 本文在前景模板分割、终结点的判定以及伪节点的去除方面做了有效与新颖的改进, 实验结果表明, 本文提出的这种新颖的算法不仅提高了直接灰度提取算法的准确性和健壮性, 而且没有增加算法的时间复杂度和空间复杂度, 这一切都使本算法更有利于应用到实际系统中去。

2 改进的直接灰度提取方法

2.1 基本方法

本文提出的方法在主要思路与文献[3]相似, 其流程如下:

- (1) 对指纹灰度图进行归一化和前景模板的分割;
- (2) 对灰度图进行分块, 并将找到的当前块的灰度局部最大点作为跟踪起始点;
- (3) 寻找以起始点为中点, 长度为 9 的法向直线上的一个像素集;
- (4) 对得到的法向点集进行局部滤波增强处理;
- (5) 以灰度为依据寻找距离中心点最近的局部

灰度最大点和最小点, 同时计算两处的灰度落差 d , 并将其作为下一步自适应跟踪的终止判据;

(6) 计算出局部最大点的方向估计值 θ , 并以一定的步长 μ , 沿 θ 的方向进行探测来求出该点的延伸步长;

(7) 对求出的下一个跟踪点和延伸步长的终止条件进行检查, 如果满足终止条件, 则结束沿一个方向的跟踪, 回到起始点, 再沿反方向继续跟踪, 当另一方向的跟踪也结束后, 就得到了一条脊线, 同时对找到的脊线上的每个点进行相应的标注;

(8) 对已找到的脊线进行检查, 去除伪脊线;

(9) 从下一个块开始, 按上述步骤跟踪, 直到遍历完整个指纹图像;

(10) 对上述得到的脊线图和细节点按一定的规则进行去伪操作。

其中用到的终止条件为:

- ① 接触到背景区;
- ② 探测到一条已标记过的脊线, 标记为分叉点;
- ③ 延伸步长为 0, 并且满足角度的动态阈值条件, 则标记为终结点。

与文献[3]的方法比较, 本文算法的改进主要体现在以下几个方面:

(1) 采用 Canny 算子来分割前景模板, 同时采用数学形态学中的方法来修正边界。以往的分割方法大多是基于点方向场一致度的计算, 而本文的方法则在准确性和效率上有明显优势;

(2) 终结点的判定方法 首先增加了一个角度的判定法则, 其次在灰度比较中, 不是仅仅比较近邻像素, 而是采用综合比较若干像素灰度的方法来增强判定条件。结果表明, 此方法在终结点判定的准确性上有明显的提高;

(3) 法向点集的局部滤波增强处理 这是一个十分重要的步骤, 通过对现有滤波方法的研究, 最终采用了结合窗函数和类高斯模板的方法来滤波;

(4) 伪脊线的去除 就文献[3]中的方法而言, 由于每个分块都要找出一条相应的脊线, 因此, 即使在无脊线存在的分块内, 也会找出一条虚假的脊线来, 这必然会对细节节点的提取造成很大的影响, 本文提出的去伪方法则可以有效地去除这些伪脊线;

(5) 伪节点的去除 现有伪节点的去除方法大都是基于传统的二值化及细化方法, 本文针对直接灰度提取的方法, 提出了适用于这种方法的去伪算法, 其中不仅考虑了细节节点的局部结构, 而且考虑到了相应的脊线结构。

2.2 前景模板的分割

由于传统的前景模板分割算法大都是基于点方向场的一致度^[6]的,一般计算量很大,因而影响到它在实时鉴定系统的应用,而直接灰度提取算法的优势就在于没有必要计算所有点的方向,因而不必采用传统的方法。本文提出了一种利用 Canny 算子进行粗分割,然后再用数学形态学的方法进行修正边界的新颖方法。

Canny 算子^[7]是使用两个阈值来分别检测强边缘和弱边缘,当且仅当强边缘与弱边缘相连时,弱边缘才会包含在输出中,这种方法可以有效地去除随机噪声的干扰,并可先提取出指纹前景区的边界(见图 1(b)),然后对处理后的边界图从上到下进行检测,最后将最外边界内的所有点都定为前景模板上的点,这样就完成了前景模板的粗分割。利用该方法

对多幅指纹灰度图进行处理,均取得了理想的效果(见图 1(c))。

粗分割后得到的前景模板,由于其边界上存在大量的毛刺和断裂线,因此还需要采用数学形态学的方法对处理图进行一次闭运算和一次开运算,其中闭运算用于去除断裂的边界线,开运算用于去除毛刺,这样最终就可以得到效果很好的前景模板(见图 1(d))。

从处理图可以看出,用 Canny 算子和数学形态学相结合的方法由于可以有效地抑制原始指纹灰度图中随机噪声的干扰,从而可有效而准确地提取出前景模板来。

本文提出的方法不仅省掉了逐个计算点方向场的烦琐计算,而且避免了因为点方向场计算错误所带来的影响。实验证明,这种方法不论从准确性还是从效率上说,都比以往的方法有很大提高。

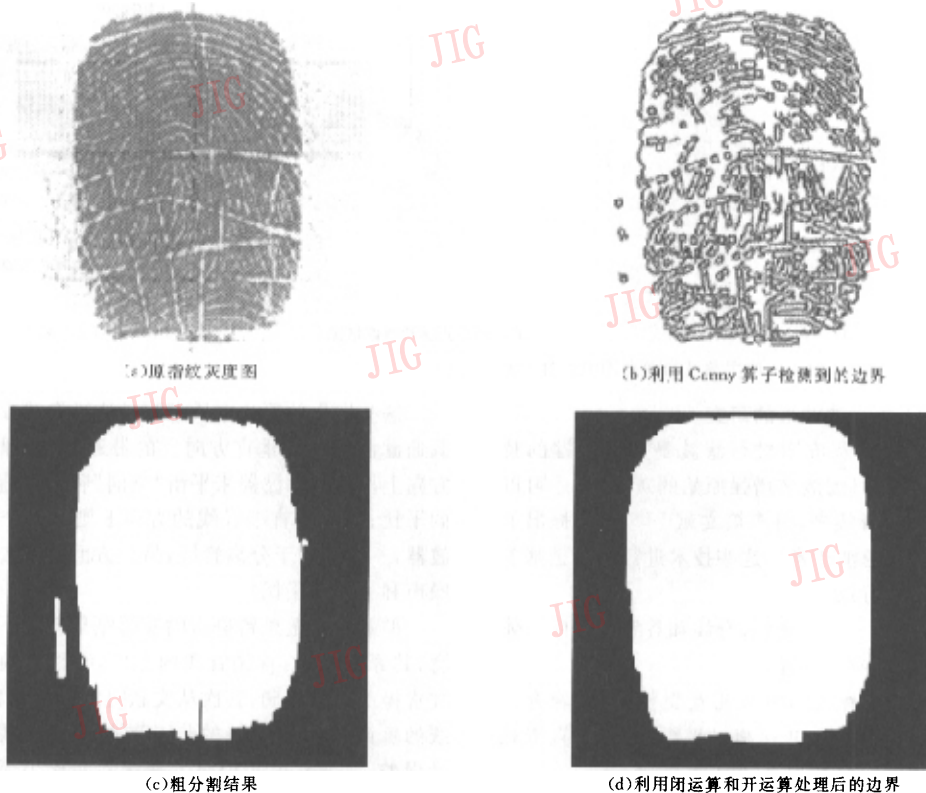


图 1 指纹图的分割

2.3 终结点判定条件

终结点的判定是以往方法^[3~5]都没有很好解决的一个问题,从实验结果来看,终结点的判定有很大的错误率。

本文提出了一种新颖的终结点判定算法,其具体的判定条件由如下两部分组成:

(1)沿脊线方向进行逐点探测,直到满足下面两个条件之一的时候才将该点的延伸步长取为 0:①探

测点落在背景区域;②在脊线方向上取5个点,并将它们与跟踪起始点的灰度逐个做差比较,如果这5个差值中有3个大于 $d \times r (0 < r < 1)$ 。那么,采用这种脊线上5个点综合比较的方法不仅可以有效去除随机噪声的干扰,并且对脊线方向上存在的“空洞”也有比较好的抑制作用。

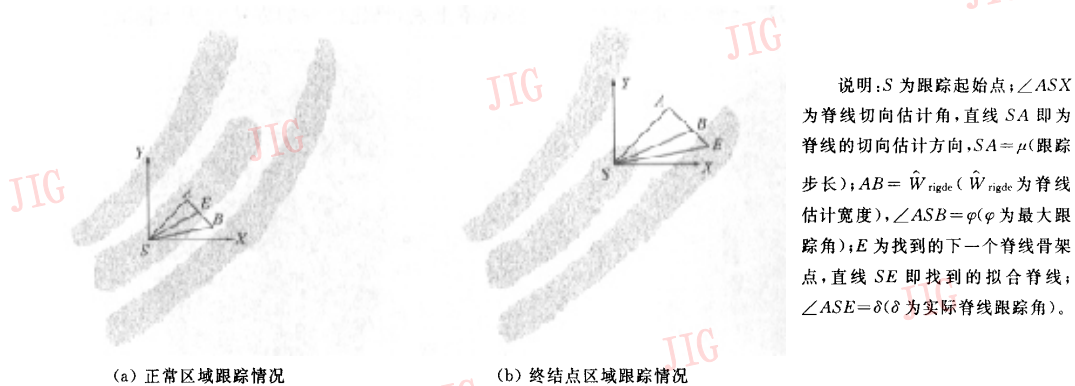
(2)增加了一个角度的动态阈值条件。首先定义一个新的角度参量——实际脊线跟踪角 δ ;然后将找到的下一个脊线骨架点与当前点的连线同水平轴的夹角定义为 δ ,即

$$\delta = \arctan((i_{k+1} - i_k) / (j_{k+1} - j_k)) \quad (1)$$

再定义一个角度参量——最大跟踪角 φ 。这个参量的计算需要利用到根据脊线频率求出的脊线宽度 W_{ridge} ,其公式为

$$\varphi = \arctan(W_{\text{ridge}} / \mu) \quad (\mu \text{ 为跟踪步长}) \quad (2)$$

上述两个参量的定义如图2所示,下面对图中如下的两种跟踪情况进行讨论:(1)在正常区域跟踪脊线(图2(a)), S 为脊线中一点,此时找到的下一个脊线骨架点 E 还在原来的脊线上, E 的取值应当在 AB 之间(实际上 E 点的取值区域应当在直线 AB 上,且关于 A 点对称,但为了讨论方便,可限定 E 点在 A 点的右边),显然 $\delta \leq \varphi$;(2)在终结点区域跟踪脊线(图2(b)), S 为终结点,此时找到的下一个脊线骨架点 E 落在旁边的脊线上, E 点的取值区域在 B 点的右边,显然此时应当有 $\delta \geq \varphi$ 。这样利用这两种区域中 δ 和 φ 不同的关系就可以比较精确地找到终结点的位置。



说明: S 为跟踪起始点; $\angle ASX$ 为脊线切向估计角,直线 SA 即为脊线的切向估计方向, $SA = \mu$ (跟踪步长); $AB = \hat{W}_{\text{ridge}}$ (\hat{W}_{ridge} 为脊线估计宽度), $\angle ASB = \varphi$ (φ 为最大跟踪角); E 为找到的下一个脊线骨架点,直线 SE 即找到的拟合脊线; $\angle ASE = \delta$ (δ 为实际脊线跟踪角)。

图2 使用角度的动态阈值条件示意图

2.4 法向点集滤波方法的研究

由于对指纹灰度图进行滤波是十分关键的技术,因此必须通过滤波来增强原始的灰度图,才可以准确地提取出脊线来,有多篇文献^[1,2,8~12]都提出了指纹灰度图的滤波技术。这些技术进行滤波是基于指纹图下面的特点:

(1)在任何一个小区域,脊线和谷线的方向大体相同,而且方向有唯一性。

(2)指纹的脊线与谷线相互交替,在沿着脊线和谷线的方向上灰度变化相对平缓,而在垂直于此方向上的灰度变化则相对剧烈。

Mehetre等在文献[8,9]中提出基于指纹方向图统计特性的增强算法;

Gorman和Nickson在文献[10,11]中提出了根据脊线和谷线的特征参数来设计匹配滤波器的方法。

Lin Hong在文献[1,2]中提出了基于分块自适应Gabor滤波的指纹图像预处理法。

这些增强的算法本质上都是进行脊线方向上的低通滤波和脊线垂直方向上的带通滤波,即在脊线方向上用低通滤波器来平滑“空洞”和去除随机噪声的干扰;而在垂直于脊线的方向上则用一个带通滤波器,一方面用于分离脊线,另一方面用于去除随机噪声和毛刺的干扰。

但基于以上思路进行的实验结果却并不令人满意,其原因在于:首先脊线的方向,特别是频率场往往求得不是很准确,其次从文献[12]中可以看到,脊线的垂直方向上,脊线的非正弦波结构、脊线频率估计误差、滤波器尺寸相对于基线周期较小等都容易引起滤波后虚假脊线结构的产生。具体说,若将二维偶对称Gabor滤波器分解为两个方向上的一维滤波器来分析,则其主要分析的是脊线垂直方向上的Gabor滤波效果,但由于噪声的存在,X-signature往往并非单一频率的正弦波,还有二次,三次或者更高次的谐波,所以对于这种信号,Gabor滤波器往

往容易由于频率估计不准和滤波器尺寸相对脊线周期较小而产生虚假结构。文献[12]中生成了些模拟的 X-signature 信号,其可用一个高斯滤波器直接进行滤波,并可与 Gabor 滤波比较,其中高斯滤波器的模板大小可根据频率来动态变化,其结果是 Gabor 滤波器有可能产生虚假的脊线结构,而且不能解决将连接的脊线结构分开的问题。

文献[12]也提出在脊线垂直的方向上用一个小高斯滤波器(此高斯滤波器的模板大小可根据频率来动态变化)来直接作滤波,其效果好于 Gabor 滤波,但实际上这样做同样也不能克服由脊线频率估计误差所带来的影响。由于本文提出的算法在跟踪过程中需要滤波的点集个数相对较少(法向点集个数的典型值为 9),因此,用一个定长度(典型值为 7)的类高斯模板来进行滤波取得的效果反而更好,而根据频率来动态改变高斯滤波器模板大小的方法,由于脊线频率局部估计的错误,所以取得的效果比较差。下面就是本文提出的新的滤波方法。

(1)在脊线方向上用一个小长度为 11 的 Hanning 窗进行低通滤波。

(2)在脊线垂直的方向上用一个小长度为 7 的类

高斯模板来进行法向上的低通滤波。类高斯模板的模板参数如下:

$$[1/23, 2/23, 5/23, 7/23, 5/23, 2/23, 1/23]$$

上述的滤波方式是通过大量的实验找到的一种应用于本文的算法效果最好的滤波方式。与文献[3]的方法(即①在脊线方向上取 3 个点进行均值平滑;②在脊线垂直方向上用一个小高斯模板进行法向滤波)相比,本文提出的滤波方法效果较好。

2.5 去除伪节点

通过本文提出的方法可以得到单像素脊线图以及相关细节点的信息(如图 3(c)所示),从这幅处理图可以很容易地看出,产生了很多伪脊线和伪细节点,下面将针对这些伪脊线和伪细节点进行分析。

(1)由图 3(c)可以看出,在每个分块内都会找到一条脊线,而且在那些没有脊线存在的块内,也都找到了一条相应的伪脊线,由于有伪脊线的存在,因此将提取到很多伪细节点(由于伪细节点过多,超过 500 个,其对细节点标记意义不大,因而没有在图 3(c)中对细节点进行标注)。去除伪脊线的方法基于如下思路:由于所有的伪脊线都会在跟踪后马上与其他的真实脊线相交,所以伪脊线的长度都比较短,这样

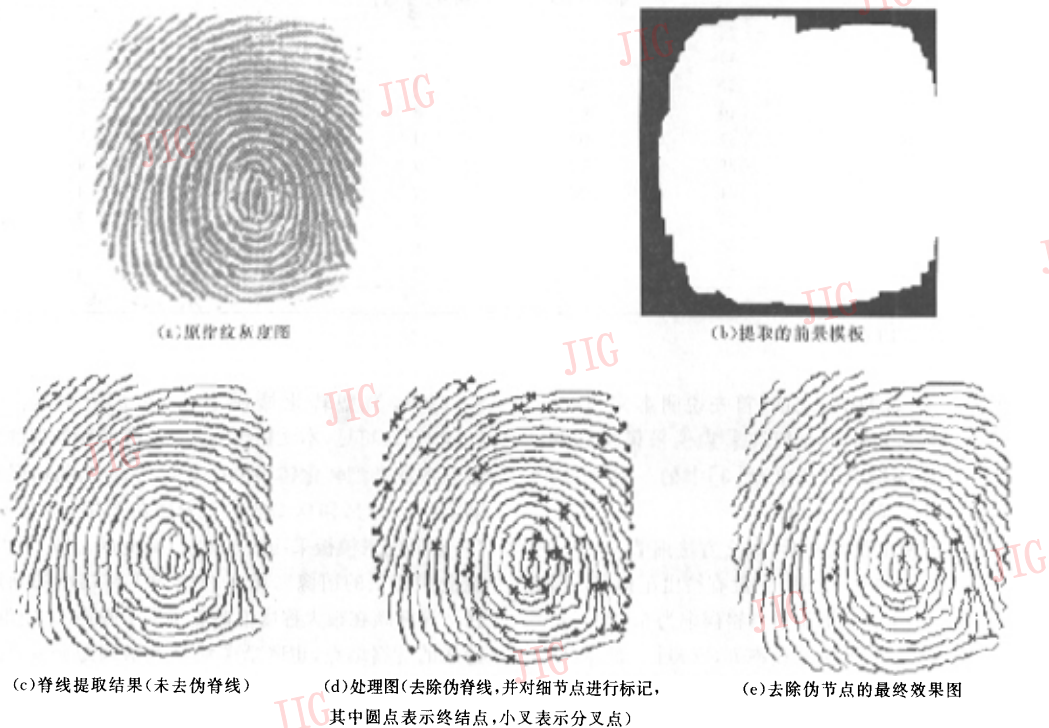


图 3 本文算法对表 1 中图 1 的指纹进行提取过程示例

在跟踪脊线时只要记录跟踪步数,并将跟踪步数小于一个阈值的所有脊线去掉就可以了。

(2)将传统的提取细节点的方法应用到去伪中来,来进行粗去伪,即:对找到的每一个节点 (i, j) ,将其八邻域内的像素点灰度值标记为 N_i (某点灰度值为0,相应的 $N_i = 1$,否则 $N_i = 0$)求和 $\sum_{i=1}^8 N_i$,如果 $\sum_{i=1}^8 N_i = 1$,说明此点为一终止点;如果 $\sum_{i=1}^8 N_i \geq 3$,说明此点为一分叉点。若该判断结果与已经标记的节点类型相符,则保留该节点,否则认为是伪节点,将它们去除。

(3)对剩下的点集进行细去伪。

① 去掉位于图像有效区域边缘附近的特征点。

② 去掉指纹断点、小桥以及岛型区域等伪细节点。本文参考了Xiao等提出的同时考虑了细节点的局部结构和相应的脊线结构的去伪方法^[13]。这里主要是根据细节点数组中记录的细节点信息以及点方向信息。其中断点 $a(i_a, j_a)$ 和 $b(i_b, j_b)$ 的判断标准为:

$l_a = l_b = E$ (E 表示类型为终止点),

$d_{ab} = \sqrt{(i_a - i_b)^2 + (j_a - j_b)^2} < D$ (两终止点的欧拉距离小于一门限值,门限取两块局部脊线距离的均值), $\varphi_a = \varphi_b$ (两终止点的方向一致)。另外,小桥等其他虚假的细节点的去除工作,基本和断点一样,只需将细节点类型和方向做相应的调整就可以了。

本文提出的算法表述如下:

(1)按规则去除伪脊线(见图3(d))。

(2)根据细节点邻域的像素灰度关系进行粗去伪。

(3)对剩下的细节点进行细去伪,除去边缘点和指纹断点、小桥以及岛型区域等伪节点,见图3(e)。

3 实验结果

本文从用Veridicom指纹录入仪采集到的多幅指纹灰度图中随机挑选了10幅指纹图进行了实验,提取结果如表1所示,图3给出了对其中一幅指纹图的完整处理过程。

表1 10幅取样图的提取结果

指纹图号	细节点总数	正确提取的细节点数目	未提取出细节点的数目	伪细节点数目	类型错误的数目
1*	24	19	2	2	3
2*	36	28	2	3	5
3	27	22	1	2	3
4	40	32	3	4	4
5	37	31	1	1	5
6	38	32	2	2	4
7*	24	18	2	2	4
8	26	22	1	1	3
9*	32	25	0	3	4
10*	30	23	2	3	4
平均正确/错误率(%)	—	80.1	5.1	7.4	12.6

注: *表示图像质量较差

在进行下面的比较之前,首先说明本文测试的指纹图都是用Veridicom指纹采集仪采集得到的,本文还将自建的指纹库与文献[3]中的一般质量指纹库的测试数据进行了比较。

从表1的提取结果来看,本文方法细节点的平均提取正确率为80.1%,文献[3]没有给出正确率,无法比较。本文方法未找到的细节点错误率为5.1%,这个数字要比文献[3]的方法错误率高(文献[3]的未找到错误率为4.51%),但是就虚假错误率和类型转化错误率来说,本文提出的方法错误率是比较小的,对应关系分别为:虚假细节点错误率7.4%(文献[3]为

8.52%),类型转化错误率为12.6%(文献[3]为13.03%)。可见,本文提出的方法在实验中获得虚假错误率和类型转化错误率比文献[3]给出的错误率分别要小1.12%和0.43%。其原因在于以下3个方面:(1)分割前景模板采用新的方法,首先就去掉了可能造成错误的图像区域;(2)增强了终结点的判定条件。这样就在很大程度上避免了由于噪声和“空洞”所造成的伪终结点,也降低了终结点错判为分叉点的可能,这都使得文献[3]中类型转化的错误率得到了降低,当然这是以未找到细节点错误率的提高为代价的(由于如果某些终结点附近有比较严重的噪声时,则其

判定条件比较强,因此可能无法检测出相应的终结点),然而这个代价是值得的,因为这样可以使已找到细节点是可靠的可靠性提高,也提高了下一步匹配的正确率(只要找到一定数量的细节点就可以正确匹配了);(3)文献[3]的去伪方法过于简单,仅仅用到了细

节点的距离(还没有根据细节点的类型分别讨论)和图像质量信息,而本文则针对直接灰度提取的方法提出了相应的去伪算法,这一切都使提取伪细节点的错误率得到了降低。

文献[3]方法与本文方法的提取结果比较见图4。

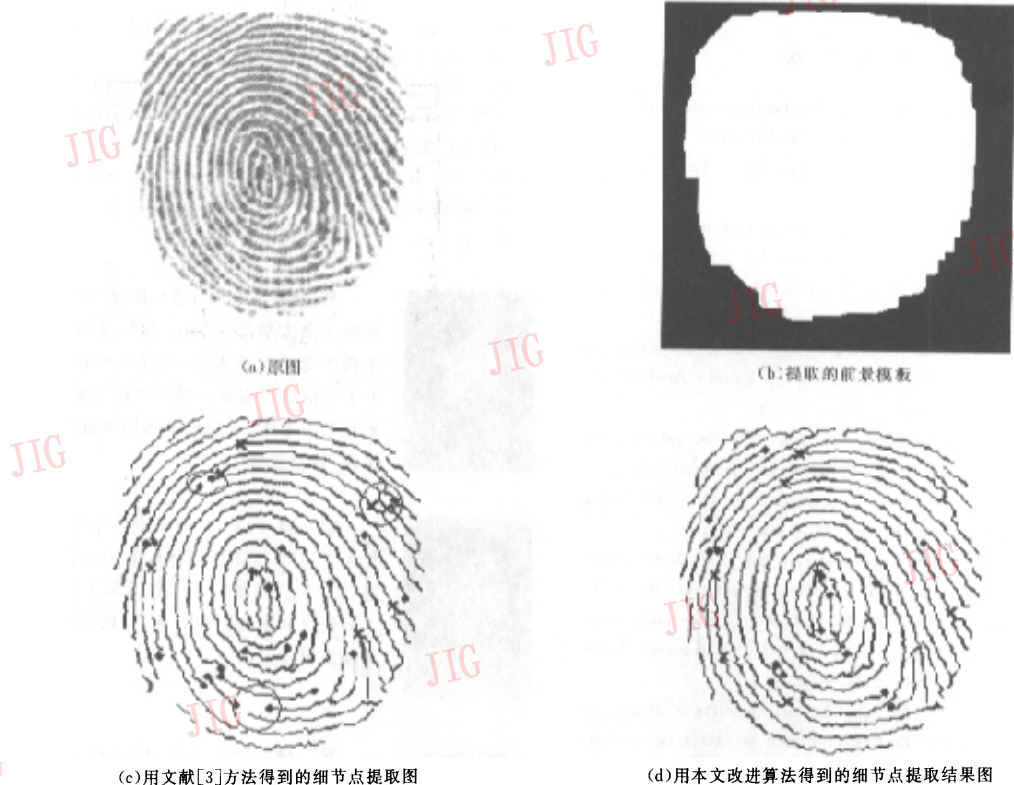


图4 本文方法与文献[3]方法提取的指纹细节点结果对比

从图4中可以看出:采用文献[3]中的终结点判定条件提取出来的终结点的效果不是很好,且在图像质量较差的区域有很多伪终结点(图4(c)中圈出的部分),而采用本文提出的改进算法,则提取效果有了明显改观,具体体现在:(1)前景模板提取新方法的高效和准确性;(2)在细节点判定上,抗“空洞”和噪声的能力得到了增强,在图4中,通过这两种算法处理结果的比较可以明显的看出这一点;(3)提出了针对本文提出算法的去伪方法,从图3可以看出,这种去伪方法的效果是很好的。

4 结论及今后的工作

本文以指纹的直接灰度提取算法为基础,针对

这种方法存在的阈值过多和易提取出虚假脊线的问题,并在预处理前景模板分割、终结点的判定以及去除伪节点等方面提出了相应的改进算法,实验结果表明,本文提出的方法不仅提高了灰度提取算法的准确性和健壮性,而且并没有增加算法的时间复杂度和空间复杂度,这一切都使该方法更有利于应用到实际系统中去。

今后的工作应着重于:

(1)算法中跟踪起始点的确定是一个十分关键的问题,本文采用的是先将原指纹灰度图分块,然后在每个块内找一个灰度最大的点做跟踪的起始点,但是这样不可避免地会带来伪脊线、遗漏脊线的问题,而且每个块都找一条脊线必然效率会比较低,今后将寻找一种效率更高、更智能化、更为准确的确定

起始跟踪点的方法。

(2)实验的最终结果表明,按本文算法提取出的伪细节点有很大一部分都是类型上的错判,这样传统的基于单像素图的去伪方法就失去了作用,如果能将找到的细节点位置回到原始的指纹灰度图去进行去伪,应该可以取得更好的效果。

参考文献

- Lin Hong. Automatic personal identification using fingerprints [D]. PhD thesis, Department of Computer Science and Engineering, Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA, 1998.
- Lin Hong, Wan Yifei, Jain. A. Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777~789.
- Miao D, Maltoni D. Direct gray-scale minutiae detection in fingerprint [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(1): 27~39.
- Jiang Xudong, Yau We Yun, Ser Wee. Minutiae extraction by adaptive tracing the gray level ridge of the fingerprint image[A]. In: IEEE Sixth International Conference on Image Processing (ICIP'99)[C]. Kobe, Japan, 1999, 2: 852~856.
- Liu Jinxiang, Huang Zhongyang, Chan Kap Luk. Direct minutiae extraction from gray-level fingerprint image by relationship examination[A]. In: IEEE Proceedings International Conference on Image Processing [C]. Varcourer, British Columbia, Canada, 2000, 2: 427~430.
- Bazen Asker M., Gerez Sabih H. Segmentation of fingerprint images[A]. In: [ly1]ProRISC[ly2]2001 Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing [C]. Veldhoven, The Netherlands, November, 2001.
- Canny J F. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679~698.
- Mehetre B M, Chatterjee B. Segmentation of fingerprint image-a composite method[J]. Pattern Recognition, 1989, 22(4): 381~385.
- Mehetre B M, Murthy N N, Kapoor S, et al. Segmentation of fingerprint image using the directional image [J]. Pattern Recognition, 1987, 20(4): 429~435.
- L. O'Gorman, J V Nickerson. An approach to fingerprint filter design[J]. Pattern Recognition, 1989, 22(1): 29~38.
- L. O'Gorman, J V Nickerson. Matched filter design for fingerprint image enhancement [A]. In: IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. New York, 1988: 916~919.
- Jiang Xudong. A study of fingerprint image filtering[A]. In: IEEE 2001 International Conference on Image Processing [C]. Thessaloniki, Greece, 2001, 3: 238~241.
- Xiao Q, Raafat H. Fingerprint image postprocessing: a combined statistical and structural approach [J]. Pattern Recognition, 1991, 24(10): 985~992.

王芙蓉 1966年生,教授,1987年获西安交通大学学士学位,1990年硕士毕业于西安电子科技大学,现任华中科技大学电子与信息工程系任通信软件与交换技术研究中心主任。研究兴趣为图像处理、图像编码、移动通信。



程鹏 1981年生,2003年获华中科技大学电子与信息工程系学士学位,现为浙江大学信息与电子工程系硕士研究生。主要研究兴趣为图像处理、生物特征识别、无线多媒体通信。



邹璇 1979年生,1998年获华中科技大学电信系工学学士学位,2001年获华中科技大学图象识别与人工智能研究所工学硕士学位,现在英国SURREY大学攻读博士学位。主要研究兴趣为生物特征识别、图像处理、模式识别、计算机视觉。

