

一种结合方向信息的指纹图像二值化算法

楚亚蕴¹⁾ 詹小四¹⁾ 孙兆才^{1),2)} 王峰¹⁾ 陈蕴¹⁾

¹⁾(阜阳师范学院计算机系, 阜阳 236032) ²⁾(山东大学计算机学院, 济南 250100)

摘要 指纹图像二值化是指纹细化处理的前提,是指纹识别预处理的一个重要部分。为利用指纹图像所具有的纹理特性,将指纹的方向信息引入到二值化处理过程中,综合考虑指纹的方向信息和自适应选择局部阈值,提出了一种结合方向信息的自适应局部阈值二值化算法。与自适应阈值法做了对比实验,实验结果表明,该算法具有更好的二值化效果。算法本身还具有一定的连接指纹图像中断线的能力,这对提高细节特征提取结果的准确性具有重要的意义。

关键词 指纹 自动指纹识别 二值化 方向信息

中图分类号: TP391.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)06-0855-06

A Novel Fingerprint Image Binarization Algorithm Based on Orientation Information

CHU Ya-yun¹⁾, ZHAN Xiao-si¹⁾, SUN Zhao-cai^{1),2)}, WANG Feng¹⁾, CHEN Yun¹⁾

¹⁾(Computer Department, Fuyang Normal College, Fuyang 236032)

²⁾(School of Computer Science & Technology, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract Fingerprint image binarization, as one key step of fingerprint image preprocessing, is the precondition of fingerprint image thinning. In order to utilize the texture character of the fingerprint image effectively, the paper introduces the orientation information in fingerprint image binarization. After considering the fingerprint image orientation information and self-adapt local threshold synthetically, this paper brings forward a kind of self-adapt local threshold binary algorithm using the orientation information. The contrastive experimental results indicate that the presented algorithm can achieve more exact binarization results than the self-adapt binarization algorithm. Moreover the algorithm can repair the disconnected line in the fingerprint image in a certain extent. The algorithm is important for improving the minutia extraction precision.

Keywords fingerprint, automatic fingerprint identification, binary processing, orientation information

1 引言

指纹作为人体的基本特征之一,它具有唯一性、不变性和排列分布规律性等特点,很久以来一直作为个人身份鉴别的一种手段。由于计算机技术,特别是图像处理与模式识别技术的迅速发展,以及大量快速有效、价格相对低廉的数字信号处理器件(DSP)的出现,指纹识别技术的应用日趋广泛,它不

仅应用于公安、司法等作为查证的一种手段,而且还应用于银行、保安、汽车等需要验证个人身份的场合和需要严格控制出入的地方^[1,2]。

指纹图像二值化作为指纹预处理过程的一部分,是进行指纹图像细化处理的基础。目前指纹细化方法都是基于二值指纹图像进行的^[3-5]。图像二值化就是通过设定阈值,将一幅图像变为只用两阶灰度表示的黑白图像。通常黑像素表示指纹前景区(指纹的脊线),而白像素表示指纹的背景区。图像

基金项目:安徽省教育厅自然科学基金项目(2002KJ234、2005KJ089)

收稿日期:2005-07-18;改回日期:2006-01-04

第一作者简介:楚亚蕴(1962~),女,讲师,主要研究方向为信号处理、图像处理与模式识别等。E-mail: chuyayun. fync@163.com

二值化可根据下列的阈值处理来进行:

$$G(i, j) = \begin{cases} 1 & G(i, j) \leq T \\ 0 & G(i, j) > T \end{cases}$$

二值化指纹图像的方法很多,阈值的选择是图像二值化的关键。阈值主要可以分为两类:全局阈值和局部阈值。全局阈值是对整个图像采用一个阈值进行划分,例如非零像素置 1 二值化、固定阈值法二值化、判断分析法二值化、基于灰度差直方图的阈值法等。局部阈值是将图像分成一些子块,对于每一子块选定一个阈值,例如,动态阈值法。当指纹图像灰度不均匀、指纹图像质量并不是很理想时,固定阈值的二值化方法容易使得处理后的二值化指纹图像中的指纹纹线易产生断线;判断分析法二值化效果与固定阈值法相差较小。

目前,自动指纹识别系统中常用的二值化算法一般为全局固定阈值法和自适应动态阈值法两种。全局固定阈值法一般根据整幅指纹图像的灰度直方图分布选择一个合适的判断阈值,对整幅指纹图像进行二值化处理。在指纹图像对比度较好的情况下,由于统计直方图的两个峰值比较明显,从而能够选择合适的阈值对指纹图像进行二值化处理。但该判定阈值的选择完全依赖于统计直方图,该方法抵抗噪声干扰的能力较弱。另外,现有的指纹采集仪器一般都是接触式的,受按压力度的不同,指纹图像中心区域和边缘区域的灰度分布并不一致,一般而言,图像中心区域的按压力度较大,所采集到的指纹图像较深。因此,全局固定阈值二值化算法并不能很好地适应实际处理的要求。

相比之下,自适应动态阈值法根据指纹图像的实际纹理特点,在确定某区域指纹图像的二值化阈值的过程中,首先假定该阈值能够将该区域像素划分为数量大致相等的两个集合,然后根据统计规律,选择一个合适的判定阈值,将对应区域的指纹图像划分为大致相等的两个区域:前景区域和背景区域。该方法能根据图像的局部灰度自动选择合适的阈值,在选择合适的分块大小情况下(与图像的分辨率有关,本文的图像分辨率为(500dpi)),能够取得最佳的二值化效果^[2,6]。一般而言,最佳分块尺寸应该是指纹图像纹线距离的整数倍。但是,纹线距离的求取本身就是一个难点,一般很难精确确定指纹图像的纹线距离。同时,指纹图像各区域的纹线距离并不一致,甚至偏差很大,选择合适的分块尺寸非常困难。

阈值二值化方法只是简单的设定一个阈值,将指纹图像中的每个像素点分为两类(亮、暗)。完全不考虑指纹的纹理特性,没能有效地应用指纹图像的方向信息对指纹图像进行二值化处理,使得二值化过程对一些噪声的抗干扰能力较差,尤其是对较差质量的指纹图像,将严重影响指纹特征点的正确提取。因而,通常在指纹图像二值化之前,还要进行图像增强^[7,8]。有时在二值化处理之后还要对断线进行必要的连接^[9]。

本文综合考虑二值化过程的阈值选择和指纹图像的方向信息,提出了一种结合指纹方向信息的自适应动态阈值二值化算法,充分利用指纹纹线的方向信息,考虑纹线本身所具有的连续性、方向一致性等特征,在原始图像基础上(没有进行图像增强),直接进行二值化处理。实验结果表明,该方法能有效地提高二值化的精度,并对断线具有一定的连接效果。

2 动态阈值法描述

在指纹图像二值化处理过程中,为尽可能减少信息丢失,一般采用局部阈值法,即将整幅指纹图像分块,结合各块图像的自身特点,为每块图像分别选取不同的阈值,对各块指纹图像区域进行二值化处理。若块内像素灰度值大于所选定的阈值,则认为该像素为谷线上的点,将该像素点的灰度值置为 255(白点);否则,认为该像素为脊线上的点,将其灰度值置为 0(黑点)。一般而言,分块尺寸的不同,其二值化处理的结果也不完全一样。该算法的主要思想描述如下:

(1) 将指纹图像划分为不重叠的大小为 $w \times w$ 的块,对分辨率为 500dpi 的指纹图像,分块尺寸 w 一般选择为 16;

(2) 对每一块进行如下处理:

求平均灰度值

$$T = \frac{\sum_i \sum_j \text{灰度值}}{w \times w}$$

二值化:若灰度值 $> T$ 则置 255,为谷线上的像素;若灰度值 $\leq T$ 则置 0,为脊线上的像素点。

一般而言,在指纹图像质量较好时,动态阈值二值化方法能够有效地对指纹图像进行二值化处理。但在指纹图像质量较差时,该方法由于仅仅依靠统计特征数据而没有充分利用指纹图像的纹理特征,

没能有效地应用指纹图像的方向信息,使得二值化过程对一些噪声的抗干扰能力较差。

为此,本文将指纹图像的方向信息引入到二值化处理过程中,在求取到指纹图像的方向场之后,选取沿指纹纹线方向上的点集合作为考察对象。理论上而言,该点集合应该具有近似一致的灰度值,点集合中的各点间的灰度变化很小。如果某点为噪声,则该点和点集合中的其他像素点之间的灰度值不能保持一致,它们之间的灰度变化相对较大。

3 结合方向信息的自适应动态阈值二值化算法

首先对指纹图像进行指纹方向信息求取。其方法是采用 Hong 等人提出的改进的 Rao 方法^[3],计算每块指纹图像的方向信息,并在此基础上对指纹图像方向信息进行一次低通滤波,然后根据指纹图像具有非常良好的纹理特性,对方向信息进行可靠性判断,对所求取的方向信息进行平滑处理,以求取更加准确、可靠的方向信息。

然后在阈值的求取过程中,分别使用了区域中值、区域均值和自适应局部阈值二值化算法,对指纹图像进行了处理,并分析、比较了3种算法的分割效果。从实验结果看,自适应局部阈值二值化算法的图像分割效果最好。该算法的核心思想是:对每块图像,选取的阈值应尽量使该块图像内的大于该阈值的像素点数和小于该阈值的像素点数相等,而这一思想和指纹图像脊线、谷线间隔均匀出现的特征正好吻合。

3.1 指纹方向信息求取

对指纹图像进行指纹方向信息的求取分以下4个步骤:

(1) 计算方向信息 采用由 Hong 等人提出的改进的 Rao 方法,计算每块指纹图像的方向信息。

$$V_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} 2\partial_x(u, v) \partial_y(u, v) \quad (1)$$

$$V_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} (\partial_x^2(u, v) - \partial_y^2(u, v)) \quad (2)$$

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{V_y(i, j)}{V_x(i, j)}\right) \quad (3)$$

式中, $\partial_x(u, v)$ 、 $\partial_y(u, v)$ 分别为点 (u, v) 在 x 、 y 方向上的一阶偏导,这里采用 Sobel 算子来计算指纹图

像的每一点 (u, v) 的 x 、 y 方向上的一阶偏导。

(2) 低通滤波 由于噪声、纹线结构不准确、细节特征等因素的影响,所求得的方向信息可能不准确,为此需对其进行平滑滤波处理。仍采用 Hong 等人提出的基于连续方向场的低通滤波器对其进行滤波。首先将方向角转化为 x 和 y 方向上的连续向量场,基本公式如下:

$$\varphi_x(i, j) = \cos(2\theta(i, j)) \quad (4)$$

$$\varphi_y(i, j) = \sin(2\theta(i, j)) \quad (5)$$

其中, φ_x 和 φ_y 分别为向量场在 x 、 y 方向上的分量,针对 φ_x 和 φ_y ,选用的低通滤波器的一般形式如下:

$$\Phi_x(i, j) = \sum_{u=-\frac{w_\phi}{2}}^{\frac{w_\phi}{2}} \sum_{v=-\frac{w_\phi}{2}}^{\frac{w_\phi}{2}} h(u, v) \varphi_x(i - u, j - v) \quad (6)$$

$$\Phi_y(i, j) = \sum_{u=-\frac{w_\phi}{2}}^{\frac{w_\phi}{2}} \sum_{v=-\frac{w_\phi}{2}}^{\frac{w_\phi}{2}} h(u, v) \varphi_y(i - u, j - v) \quad (7)$$

其中, h 为一个 2 维低通滤波器元件,且有 $\sum_{u=-\frac{w_\phi}{2}}^{\frac{w_\phi}{2}} \sum_{v=-\frac{w_\phi}{2}}^{\frac{w_\phi}{2}} h(u, v) = 1$, $w_\phi \times w_\phi$ 是滤波器尺寸,这里选取低通滤波器的尺寸为 5×5 。最后,根据滤波后的向量场分量求取更加准确的方向信息,其基本公式如下:

$$\varphi(i, j) = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\Phi_y(i, j)}{\Phi_x(i, j)}\right) \quad (8)$$

(3) 计算纹线方向可靠性 在对指纹纹线方向信息进行滤波操作以后,所得到的方向信息基本准确,但在一些强噪声区域,尤其是在黑斑、暴皮严重的区域,所求取的方向仍然存在偏差。为此依据局部区域纹线方向的一致性对其进一步做平滑处理。首先求取每一块纹线方向信息的可靠性,计算公式如下:

$$C(i, j) = \sqrt{\frac{\sum_{(i', j') \in D} |\varphi(i', j') - \varphi(i, j)|^2}{n}} \quad (9)$$

其中, D 为以块 (i, j) 为中心的局部区域,是一图像块的集合,选取 D 的尺寸为 5×5 ; n 为区域 D 内图像块的数目,这里为 24; $\varphi(i', j')$ 、 $\varphi(i, j)$ 为 (i', j') 块、 (i, j) 块的方向。

(4) 基于可靠性纹线方向平滑 如果 $C(i, j)$ 大于一个预先设定的阈值 T_c ,则认为所求得的方向信息不可靠,需要根据该块周边区域的方向信息对其进行如下调整:首先求取该块所在的局部区域的主体方向 $\varphi_{\max}(i, j)$ 和该块所在的局部区域的平均方向 $\varphi_{\text{Avg}}(i, j)$,如果有

$$|\varphi_{\max}(i, j) - \varphi_{\text{Avg}}(i, j)| < T_c,$$

即该块所在区域的平均方向和它的主导方向基本一致,则取 $\varphi_{Avg}(i, j)$ 为该块的方向;否则,分别计算该块的上下、左右和对角块之间的方向角度改变量,如果存在一个最小的方向角度改变量 $\varphi_{Min}(i, j)$,使得 $\varphi_{Min}(i, j) < T_c$,则根据纹线流的连续特性,该块的方向角度应该使得相邻间的角度变化最小,所以取最小角度变化的两块的角度平均值作为该块的方向角度值。由于指纹纹线方向的局部一致性,对于 8×8 分块尺寸,其相邻块之间的方向变化在 $[-\pi/8, \pi/8]$ 范围内,根据算法的实际处理结果,取 T_c 为 $\pi/8$ 时能很好地对相关强噪声区域进行方向信息平滑处理。

3.2 结合方向信息的自适应动态阈值算法

在指纹方向信息的求取之后,即可结合方向信息进行自适应动态阈值计算,最后根据所选定阈值对原始图像进行二值化,其具体算法如下:

(1) 求取块区域的阈值

对给定的一幅指纹图像 G , 对其中的任一像素 (i, j) 点,令其为 p_0 , 选择一个以 p_0 点为中心、尺寸为 $w \times w$ 的区域。对于 500dpi 采集分辨率图像,该区域尺寸一般选择为 16×16 。

求取块区域的阈值步骤:

① 求取该区域内所有像素的灰度平均值:

$$T = \frac{\sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} G(u, v)}{w \times w} \quad (10)$$

② 分别计算该区域内大于等于阈值 T 的像素点个数 N_h 和小于阈值 T 的像素点个数 N_l ;

③ 如果 $|N_h - N_l| \leq \alpha$ ($\alpha = w \times w \times 10\%$), 则 T 为阈值, 否则进行下一步;

④ 如果 $N_h > N_l$, 则 $T = T + 1$, 返回到上一步; 否则 $T = T - 1$, 返回到上一步。

(2) 二值化的两个判断依据的求取

由指纹纹线的纹理特征可知,沿指纹脊线方向上的像素灰度阶近似一致,即如果某点 p_0 为脊线上的点,则沿纹线方向上与 p_0 点相邻的 N 个点也为脊线上的点,反之亦如此。如果该点为噪声点,则可以根据其相邻点集对该点进行平滑处理,以消除局部强噪声的干扰。为此,定义如下两个二值化判断依据:

判断依据 1 沿纹线方向上与像素点 p_0 相邻的像素集合中灰度值大于 T 的像素点数目;

判断依据 2 以上述像素集合对 p_0 点进行平滑

处理后的像素灰度值。

两个判断依据的具体求法如下:以 p_0 点为中心,沿着指纹纹线的方向在 p_0 两边各取得 N 个点,则形成了 $2N + 1$ 个像素点的集合,这里设为 $P = \{p_{-N}, p_{-N+1}, \dots, p_0, \dots, p_{N-1}, p_N\}$ 。统计该点集 P 中所有灰度值大于 T 的像素点数目 S , 并将其作为二值化的判断依据之一。以 P 中的所有元素,对 p_0 点作一次加权均值滤波,则

$$g_{p_0} = \frac{1}{\sum w_i} \sum_{i=-N}^N w_i \times g_{p_i} \quad (11)$$

其中, w_i 为点集 P 中第 p_i 点的权重, g_{p_i} 为点集 P 中第 p_i 点的灰度值, g_{p_0} 为滤波后的当前点 p_0 的像素的灰度值,将其作为二值化的判断依据之二。

由指纹图像的纹理特征可知,这两个判断依据可以有效地降低局部强噪声对二值化处理结果的影响。同时,通过对邻域区间的考察、分析,可以更精确地确定像素点 p_0 是否真正属于脊线,对于干燥指纹中的断线具有良好的连接能力,有效地提高了二值化的精度。

(3) 二值化处理 综合考虑二值化处理的两个判断依据,选择适当的阈值,完成对指纹图像的二值化处理。根据指纹图像的纹理特征可知:

① 若判断依据 S 的值很大,则说明 p_0 点的邻域像素点集 P 中分布于脊线上像素占主导地位,根据像素分布的一致性, p_0 点也属于脊线,将其定义为脊线上的点;

② 若判断依据 g_{p_0} 的值较小,则说明平滑滤波处理后的像素灰度值远小于灰度平均值 T , 说明该点所在的邻域区间内的像素点都支持该点 p_0 成为脊线上的像素点;

③ 在不能满足上述两个条件后,若 S 较大且 g_{p_0} 的值不是很大,则可以认为支持 p_0 点成为脊线上的点的主要因素仍然存在,可定义该 p_0 点为脊线上的像素点。

为此,根据经验阈值,定义以下公式完成对指纹图像的二值化处理:

$$G(i, j) = \begin{cases} (S > T_{k1}) \text{ 或} \\ 255 & (g_{p_0} > T + T_{k3}) \text{ 或} \\ (S > T_{k2}) \text{ 且 } (g_{p_0} > T) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

这里, T_{k1} 、 T_{k2} 和 T_{k3} 分别为 3 个经验阈值,在确定了 3 个经验阈值后,根据判断条件完成对指纹图像的

二值化处理过程。

4 实验结果及结论

在 Visual C++ 编程环境下,对本文所提出的二值化方法进行验证,并调试通过,实现了该算法的基本思想,针对山东大学指纹数据库和南京大学指纹数据库对该算法进行了大量的测试。这里选择了两幅典型指纹图像,将其与自适应阈值二值化方法进行比较,以便针对本文所提出的算法进行定量、直观的说明。为了能够更加清晰地表示本文方法在二值化过程的有效性,这里基于原始指纹图像(而不是在增强后的指纹图像)进行二值化处理,如图 1 所示。

从算法的实际处理结果来看,针对于噪声区域,本文二值化算法的处理结果要明显优于自适应阈值二值化算法的处理结果。针对由于干燥所形成的图像中局部断线以及由于指纹太脏所形成的叉连等不符合基本指纹纹线结构的区域,只要能求取相对准确的纹线方向场信息,本文算法就能够很好地实现对噪声信息的局部平滑处理,同时对指纹纹线中的微小断线,本文算法就能够起到连接作用。由此可以看出,本文算法具有平滑噪声、连接由于干燥等原因所形成的局部断线的能力。这就为指纹增强过程中无法很好处理的指纹图像区域的二值化提供了一种很好的解决方法,可以进一步提高细节特征提取的准确率。

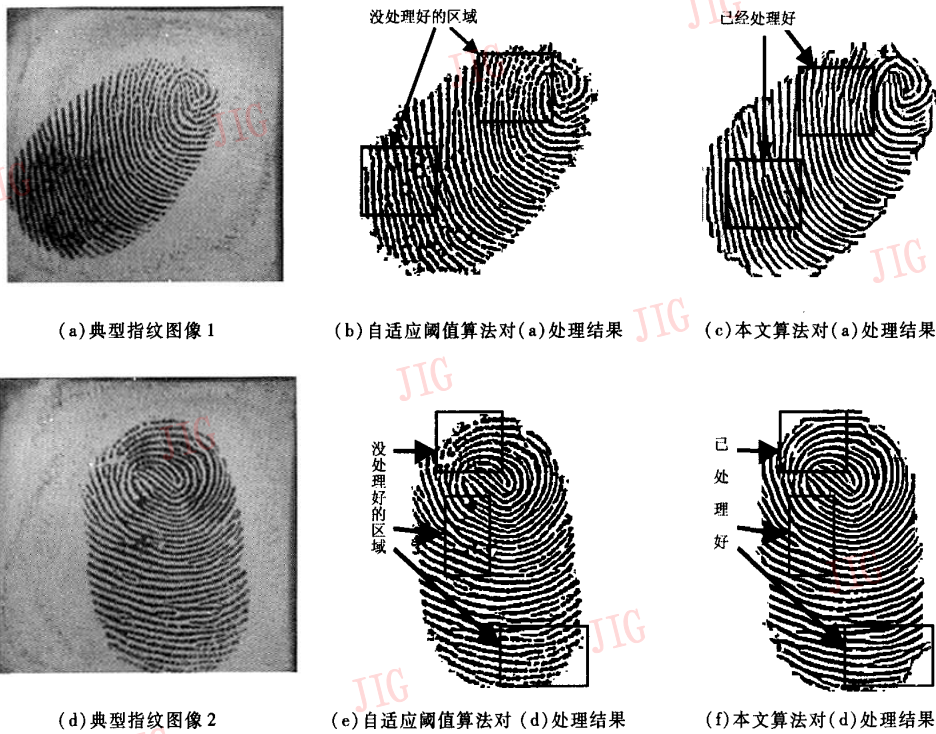


图 1 自适应阈值二值化算法和本文算法对两块典型指纹图像处理结果

Fig. 1 The processing results about two typical fingerprint images utilizing the self-adapted fingerprint image binarization algorithm and our method respectively

为了更好地说明本文算法的实际效果,选取了 10 幅典型指纹图像(5 幅良好指纹图像,3 幅一般质量指纹图像,2 幅低质量指纹图像)分两种情况分别与 Hong 等人新提出的自适应阈值二值化算法进行对比测试。首先人工提取有关的细节特征点,作为准确的细节特征点集,同时选择 4 组测试算法分别

提取细节特征点,并和人工提取结果进行比较,结果如表 1 所示。其中,算法 1 为 Hong 等人提出的自适应阈值二值化算法,前端未对图像进行增强处理;算法 2 为本文二值化算法,针对未增强的指纹图像进行处理;算法 3 为结合 Hong 等人提出的基于 Gabor 滤波器增强算法和自适应阈值二值化算法,在增强

表 1 4 种方法测试结果

Tab.1 Experimental results of four methods

测试算法	处理时间(s)	总的特征点数	准确特征点数	错误特征点数	丢失特征点数	准确率(%)
算法 1	0.07	589	436	153	54	67.8
算法 2	0.14	493	421	72	33	80.0
算法 3	0.42	482	443	39	12	89.7
算法 4	0.47	469	448	21	8	93.9

后的指纹图像上进行二值化处理;算法 4 为本文算法对已进行 Gabor 增强处理后的指纹图像进行二值化处理。

由表 1 可以看出,相比于自适应阈值二值化算法(算法 1 和算法 3)而言,本文算法(算法 2 和算法 4)具有更强的适应性,无论是否对指纹图像进行增强处理,该算法所提取的细节特征点的准确率都要高于自适应阈值二值化算法。

从该算法的实际处理结果及其和自适应阈值二值化算法的对比中可知,该算法具有良好的鲁棒性和一定的抵抗局部噪声的能力,对指纹图像中所普遍存在的断线具有良好的连接能力。在增强后的指纹图像上采用该算法能有效地提高所提取的细节特征点的准确率,从而保证最终指纹匹配结果的准确性。

从实际处理结果的分析可以得出,本文算法在未进行增强处理的指纹图像上所提取的细节特征点也相当准确,可以达到比较好的效果,而其算法处理时间相对很少。而低质量指纹图像的引入是产生特征点错误的主要因素。

参考文献 (References)

1 Jain A K, Uludag U, Hsu R L. Hiding a face in a fingerprint image

[A]. In: Proceeding of International Conference Pattern Recognition [C], Quebec City, Canada, 2002:756 ~ 759.

2 Zhan X S. Research on Several Key Issues in Automatic Fingerprint Identification System[D]. Nanjing: Nanjing University, 2003. [詹小四. 验证模式下的自动指纹识别系统中若干关键问题的研究[D]. 南京:南京大学, 2003.]

3 Jain A K, Hong L, Bolle R. On-line fingerprint verification [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(4): 302 ~ 314.

4 Mehtre B M, Murthy N N, Kapoor S, et al. Segmentation of fingerprint images using the directional images [J]. Pattern Recognition, 1987, 20(4): 429 ~ 435.

5 Mehtre B M, Chatterjee B. Segmentation of fingerprint images—a composite method [J]. Pattern Recognition, 1995, 28 (12): 1657 ~ 1672.

6 Hong L, Wan Y, Jain A K. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20 (8): 777 ~ 789.

7 Sherlock D, Monro D M, Millard K. Fingerprint enhancement by directional Fourier filter [J]. IEE Proceeding Vis. Image Signal Processing, 1994, 141(2): 87 ~ 94.

8 Hong L. Automatic Personal Identification Using Fingerprint [D]. East Lansing, USA: Michigan State University, 1998.