

基于信息熵的指纹图像二值化算法^①

张理想^{1,3} 詹小四^{2,3} 张修如¹

(1.中南大学 信息科学与工程学院 湖南 长沙 410075; 2.山东大学 计算机科学与技术学院 山东 济南 250100; 3.阜阳师范学院 计算机与信息学院 安徽 阜阳 236032)

摘要: 指纹图像的二值化处理是指纹图像预处理中的关键步骤,直接影响到指纹图像细化的质量和细节特征提取的准确性。在深入分析指纹图像信息熵的基础上,将信息熵引入到指纹图像二值化算法中,通过求取对应指纹图像区域的最大信息熵估计二值化阈值,并依据此阈值实现对指纹图像的二值化处理。实验结果表明,文中算法对噪声具有鲁棒性,能够有效实现对指纹图像的二值化,提高了细节特征提取结果的准确率。

关键字: 信息熵; 阈值分割; 二值化; 指纹识别

Fingerprint Image Binarization Algorithm Based on Information Entropy

ZHANG Li-Xiang^{1,3}, ZHAN Xiao-Si^{2,3}, ZHANG Xiu-Ru¹

(1. School of Information Science & Technology, Central South University, Changsha 410075, China;

2. School of Computer Science & Technology, Shandong University, Jinan 250100, China; 3. School of Computer Science & Information, Fuyang Normal College, Fuyang 236032, China)

Abstract: In fingerprint image pre-processing, fingerprint image binarization processing is a key step in a direct impact on the quality of fingerprint image thinning and accuracy of the extraction of the minutiae. After an in-depth analysis of information entropy of fingerprint images, information entropy is introduced to the fingerprint image binarization algorithm. Through calculating a maximum entropy of the corresponding the region in fingerprint image, binarization threshold is estimated, and based on the achievement of this threshold fingerprint image binarization processing is done. The experimental results show that the algorithm is robust to noise and able to effectively realize the fingerprint image binarization.

Keywords: information entropy; threshold segmentation; binarization; fingerprint identification

指纹作为人体的生理特征,具有唯一性、不变性和排列的规律性等特点,从古至今一直作为身份认证的一种常用手段。

目前,自动指纹识别技术多采用基于细节特征的匹配算法,而指纹的二值化处理是获取准确、可靠的细节特征信息的关键步骤之一^[1]。一般而言,指纹图像二值化处理就是通过设定阈值,将灰度指纹图像变

换为 0-1 表示的黑白图像。二值化方法的实际处理效果直接受二值化阈值的影响,准确、可靠的阈值有助于有效提高细节特征提取结果的准确度,提高自动指纹识别系统的准确率。由于指纹图像的灰度并不均匀,且不同区域之间的分布形态并不完全一致,因此提出了局部自适应动态阈值二值化算法。相比之下,该算法能够根据指纹图像局部区域的灰度分布自动选择合

^① 基金资助:安徽省自然科学基金(090412072);山东省博士后基金(200602014)

收稿时间:2009-10-30;收到修改稿时间:2010-01-25

适的阈值,在选择合适的分块大小的情况下(与图像的分辨率有关,本文的分辨率为(500dpi),分块尺寸为 8×8),能够取得比较理想的二值化效果^[2-4]。

近年来,信息熵理论被引入图像的二值化处理过程中,用于指导对二值化阈值的选取。由 Pun^[4]首先提出的基于最大熵原则选取阈值是常用的阈值选择方法之一。张二虎^[7]等人提出一种基于熵的图像分割方法,用于图像的分割。吴谨^[6]等人提出的基于最大熵的灰度阈值选取方法,用于对图像的二值化处理。周鲜成^[7]等人提出了基于微粒群和最大模糊熵的图像分割方法,用于实现对图像的二值化处理。这些方法可以很好的实现对相关图像的二值化处理,取得了较为理想的处理效果。但是,在指纹图像处理领域,信息熵作为一种有效的二值化阈值判断准则,仍未被有效的用于指纹图像的二值化处理的过程中。

本文在深入分析信息熵的基本原理及信息熵在指纹二值化阈值选取中的意义的基础上,将信息熵引入到指纹图像的二值化处理过程中,利用最大信息熵确定合理的二值化阈值,并在此基础上实现对指纹图像的二值化处理。

1 信息熵及其对阈值选择的意义

1.1 信息熵理论

熵(Entropy)是由 Clausius 于 1865 年提出的,用以描述热力学系统的无序状态,用熵值大小表示系统的无序度。后来,Shannon 在 1948 将熵概念推广应用于信息理论中,提出信息熵(Information Entropy)用以表示系统(信源)的不确定性。在此基础上,E.T.Jaynes 提出最大信息熵原理,用以确定各种系统的随机态变量的概率分布函数。

1.1.1 随机变量的概率分布函数

对于离散型随机变量 A 而言,假设其有 N 种随机值,分别定义为 $a_i (i=1,2,\dots,N)$, a_i 且发生的概率为 $P_i (P_i \in [0,1] \text{ 且 } \sum_{i=1}^N P_i = 1)$,则可以定义对应的信息熵为:

$$H(A) = \sum_{i=1}^N P_i \times \log\left(\frac{1}{P_i}\right) = -\sum_{i=1}^N P_i \times \log(P_i)$$

其中, $H(A)$ 表示对应随机变量 A 的信息量, $-\log(P_i)$ 表示对应于随机值 a_i 的自信息量,当 $P_i = 0$ 时,自信息量 $-\log(P_i)$ 取值为 0。

1.1.2 最大熵原理及其对指纹图像分割的指导意义

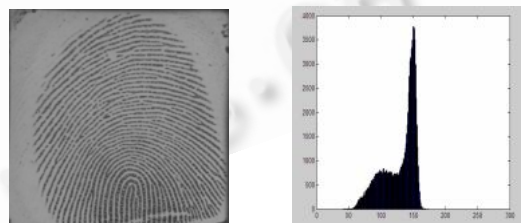
信息论中有一个关于熵重要的结论:对于孤立系统,熵的最大值可以确立系统的稳态。E.T.Jaynes 提出:“在根据部分信息进行推理时,我们应使用的概率分布,必须是在服从所有已知观察数据的前提下使熵函数取得最大值的那个概率分布。这是我们能够做出的仅有的无偏分配。使用其他任何分布,则相当于对我们未知的信息做了任意性的假设。”对于指纹图像分割来说,要得到最佳的分割阈值,应该选择使得系统熵值最大的概率分布。

1.2 指纹图像的信息熵及其意义

对于一幅指纹图像,计算其信息熵的方法如下:

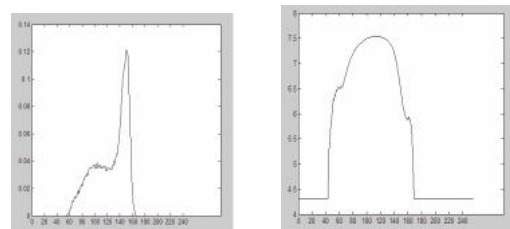
- 1) 计算其灰度阶对应像素的分布概率。
- 2) 根据信息熵公式计算各个灰度阶对应的信息熵值。
- 3) 计算指纹图像所对应的一维信息熵分布。
- 4) 确定信息熵值取最大值时所对应的灰度阶,并以此作为指纹图像的分割阈值,对图像进行二值化处理。

接下来将详细分析信息熵的具体计算过程。这里我们首先分析具体指纹图像信息熵的分布模型,如图 1 所示:



(a) 原始指纹图像

(b) 灰度直方图



(c) 各灰度阶的信息熵

(d) 一维信息熵

图 1 指纹图像及其对应的直方图、信息熵

图 1 中,(a)是给定的一幅指纹图像。(b)是对应于

(a)的灰度直方图。(c)是对应于各灰度阶的信息熵。各灰度阶的信息熵根据信息熵公式 $-p_i \log(p_i)$ 计算的,其中 P_i 表示灰度阶 i 的概率。(d)是对应的一维信息熵。一维信息熵即前景区信息熵和背景区信息熵的总和。下文有介绍,不再赘述。(c)图表示各灰度阶所代表的信息量。由(d)图可以看出,当熵值取最大值时,对应的灰度阶正好处于直方图的波谷位置,这和二值化阈值的选取原则一致。

根据信息论可知:熵代表图像中的信息量。对于离散型的信息熵,当其概率相等时,信息熵的取值最大^[8]。对于一幅指纹图像,其脊线和谷线相隔出现,脊线上的点和谷线上的点数目大致相等,即它们在指纹图像中的分布概率相差不大,而且谷线和脊线上的像素点的灰度值的起伏比较均匀^[7],这种性质刚好满足取得最大信息熵条件。

信息论还指出:熵是代表系统无序程度的量。当系统越有序时,其熵值越小;相反,当系统越不确定,越混乱时,其熵值越大。同时,王学忠,肖斌^[9]提出:在图像中灰度概率分布越模糊,范围越大,越难以判断,熵值越大。对于一幅指纹图像,由于在脊线和谷线的分界处,其灰度的变化最大,其不确定性最高,而且,用该处灰度阶作为阈值分割指纹图像,前景区和背景区的分布都最广的,因此以脊线和谷线分界处灰度阶作为分割阈值将使系统的混乱程度达到最高,得到的信息熵最大。我们知道用脊线和谷线分界处的灰度值作为分割阈值可以将图像很好的二值化。而用最大熵得到的分割阈值刚好是脊线和谷线分界处的灰度值,因而对于一幅指纹图像无论其直方图是单峰还是双峰,都能较好的对其进行二值化处理。并且,最大熵法对不同目标大小和信噪比的图像均可产生很好的分割效果,受目标大小的影响小,可用于小目标的分割^[10]。通过以上分析可知:最大信息熵准则可以用于二值化阈值的选择,且所确定的二值化阈值可以使指纹图像更好的被分割为前景(脊线)和背景(谷线)两个区域。

2 基于最大信息熵的指纹图像二值化算法

对于一幅 256 阶灰度的指纹图像而言,其灰度阶的变化范围是从 0 到 255。首先,提取指纹的有效区域,这样可以使脊线上的前景点和谷线上的背景点的数目更接近,从而使得前景点概率和背景点概率更

趋于相等,更适用取得最大信息熵的条件。由于指纹图像灰度分布不均,各部分的分布形态并不完全一致,所以对指纹图像进行适当分块。计算块图像中每一灰度阶的概率。然后,根据概率求解对应于最大信息熵的灰度阶(分割阈值),方法如下:

对于一幅给定的指纹图像,假设存在一个分割阈值 $t, 0 \leq t \leq 255$,将指纹图像分为两个区域:前景区和背景区。其中,前景区灰度取值范围为 $G_{oF} = \{0, 1, \dots, t\}$;背景区灰度取值范围为 $G_{oB} = \{t+1, t+2, \dots, 255\}$ 。分别计算前景区和背景区中灰度阶在本区中分布概率和信息熵。然后,求前景区的信息熵和背景区的信息熵之和,这样就可以求得对应于这个给定 t 的总信息熵 H_t 。据经验知:最大熵得到的阈值和其他方法得到的阈值相差不大。为了优化算法,可将最大熵阈值的选取限定在均值阈值(最大最小灰度值的均值)左右 30 个灰度值的范围内。选取该范围内最大信息熵 $H_t, (t = 0, \dots, 255)$ 所对应灰度值作为阈值。

具体算法如下:

- 1) 对指纹图像进行适当的分块处理,提取指纹图像有效区域。
- 2) 对于指纹图像中所有图像块,采用以下算法对其进行二值化处理:
 - ① 计算图像块中灰度阶 i 概率,计算公式如下:

$$p_i = \frac{N_i}{w \times w} \quad (2)$$

式中, p_i 表示灰度阶为 i 时所对应的概率; N_i 表示分块图像中灰度阶为 i 的像素数目; $w \times w$ 是分块尺寸。

- ② 假定给定一个灰度阶 $t (t = 0, 1, \dots, 255)$, 将对应图像块分为谷线(背景)和脊线(前景)两个区域,计算对应于 t 的总信息熵 H_t , 计算公式如下:

$$H_t = HB_t + HF_t \quad t = 0, 1, \dots, 255 \quad (3)$$

其中, HB_t 是背景区像素对应的信息熵, HF_t 是前景区像素对应的信息熵,计算方法如下:

$$HF_t = -\sum_i (p_i/P_t) \log(p_i/P_t) \quad i = 0, 1, \dots, t \quad (4)$$

$$HB_t = -\sum_i [p_i/(1-P_t)] \log[p_i/(1-P_t)] \quad i = t+1, t+2, \dots, 255 \quad (5)$$

式中, P_i 表示灰度阶为 i 所对应的概率; P_i 表示前景区灰度阶所对应的概率之和, 即 $P_i = \sum_{l=0}^i p_l$

③ 求取使得信息熵取最大值时所对应的灰度阶 t , 将该值确定为块图像最终的二值化分割阈值 T ;

$$T = t \text{ st. } \max(H_t), \quad t = 0, 1, \dots, 255$$

④ 采用该阈值 T 对该块指纹图像进行二值化处理:

$$G(x,y) = \begin{cases} 255 & G(x,y) \geq T \\ 0 & G(x,y) < T \end{cases} \quad (6)$$

式中 $G(x,y)$ 表示块图像中 (x,y) 位置处的灰度值。

3 实验结果分析

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。这里选取了三幅典型的图像,将其与 Hong 等人提出的自适应分块阈值二值化算法进行比较,以便对本文的算法进行直观定量的说明。为了充分的说明本文二值化的有效性,分别对原指纹图像和增强后的指纹图像进行了二值化的处理,如图 2 所示。



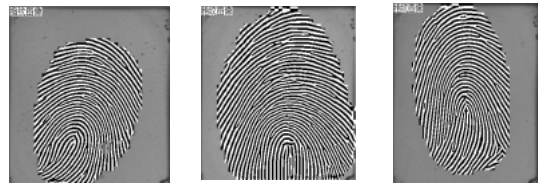
(a) 原始指纹图像



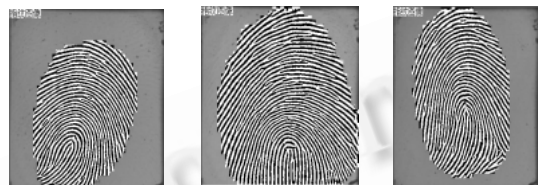
(b) 算法 1 对原始图像二值化处理结果



(c) 算法 2 对原始图像二值化处理结果



(d) 算法 1 对增强图像二值化处理结果



(e) 算法 2 对增强图像二值化处理结果

图 2 本文算法和自适应阈值二值化算法比较

算法 1 为图 2 Hong^[11]等人提出自适应分块阈值二值化算法; 算法 2 为本文提出的基于信息熵的指纹图像二值化算法。在图 2 中, (a)表示三幅原始指纹图像; (b)表示算法 1 未增强的二值化处理结果; (c)表示算法 2 未增强的二值化处理结果; (d)表示算法 1 用 Gabor 算法增强后的二值化处理结果; (e)表示算法 2 用 Gabor 算法增强后的二值化处理结果;

对比两种算法二值化处理结果可以看出: 用本文提出的算法得到二值化处理的结果在很好的保留脊线原有骨骼特征的前提下, 处理后的脊线比用自适应分块阈值二值化算法处理后的脊线更加细而且更加均匀, 有助于进一步提高脊线细节特征提取的准确度。这点可以从特征点提取的准确度上得到证实。同时, 对于自适应分块阈值二值化算法未能处理的粘连部分, 本算法在一定程度上对其进行了消除。

为了进一步说明本算法的实际效果, 选取了 10 幅典型的指纹图像(5 幅良好质量的指纹图像, 3 幅低质量的指纹图像, 2 幅高质量的指纹图像)与 hong 等人提出自适应分块阈值二值化算法进行了对比测试, 结果如表 1 所示。算法 1 为 hong 等人提出的基于 Gabor 增强算法和自适应分块阈值二值化算法, 对指纹图像进行的二值化处理的结果。算法 2 为本文算法对采用 Gabor 增强算法处理后的指纹图像进行二值化的结果, 为了有效提高本文算法的运行效率, 本文在算法设计过程中对文中算法进行了适当优化处理。

表1 本文算法和自适应分块阈值二值化处理的

测试 算法	平均处理 时间(a)	提取 特征点	准确 特征点	错误 特征点	准确率 (%)
算法1	0.015	266	246	20	92.48
算法2	0.179	262	249	13	95.04

4 结论

从实验的结果看,该方法能够有效实现对指纹图像的二值化处理,所选取的二值化阈值更为合理、有效,可以更准确的提取指纹图像中脊线的骨骼特征,细化的效果更好,有效降低了错误细节特征点的出现,提高了细节特征信息提取结果的准确度,从而有效提高了自动指纹识别系统的准确率,使自动指纹识别系统的可应用领域。

参考文献

- 1 楚亚蕴,詹小四,孙兆才,等.一种结合方向信息的指纹图像二值化算法.中国图像图形学报,2006,11(6):855-860.
- 2 Mehtre BM, Chatterjee B. Segmentation of fingerprint images a composite method. Pattern Recognition, 1995, 28:1657-1672.

- 3 Mehtre BM, Murthy NN, Kapoor S, Chatterjee B. Segmentation of fingerprint images using the directional images. Pattern Recognition, 1987,20(4):429-435.
- 4 Pun T. A new method for gray 2 level picture thresholding using the entropy of the histogram. Signal processing, 1980,2:223-237.
- 5 张二虎,刘世昌,胡涛.一种基于熵的图像分割方法.微电子学与计算机,1998,4:43-45.
- 6 吴谨,李娟,刘成云,夏贝贝.基于最大熵的灰度阈值选取方法.武汉科技大学学报,2004,5(27):58-60.
- 7 周鲜成,申群太.基于微粒群和最大模糊熵的图像分割.计算机仿真,2008,25(4):221-223.
- 8 Robert J. McEliece. The Theory of Information and Coding. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- 9 王学忠,肖斌.一种基于图像信息熵的自适应滤波算法.计算机应用,2008,10(28):2643-2644.
- 10 Liu WP, Wu LD. Comparison of threshold selection for image segmentation. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1997,10(3):271-277.
- 11 Hong L. Automatic Personal Identification Using Fingerprint. East Lansing, USA: Michigan State University, 1998.