

一种指纹图像奇异点检测的方法*

谭台哲¹⁺, 宁新宝¹, 尹义龙², 詹小四¹, 陈 蕴³

¹(南京大学 电子科学与工程系, 江苏 南京 210093)

²(山东大学 计算科学与技术学院, 山东 济南 250100)

³(阜阳师范学院 计算机系, 安徽 阜阳 236032)

A Method for Singularity Detection in Fingerprint Images

TAN Tai-Zhe¹⁺, NING Xin-Bao¹, YIN Yi-Long², ZHAN Xiao-Si¹, CHEN Yun³

¹(Department of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

²(College of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan 250100, China)

³(Department of Computers, Fuyang Normal College, Fuyang 236032, China)

+ Corresponding author: Phn: 86-25-3593256, E-mail: tantaizhe@263.net

Received 2002-07-06; Accepted 2003-01-28

Tan TZ, Ning XB, Yin YL, Zhan XS, Chen Y. A method for singularity detection in fingerprint images. *Journal of Software*, 2003,14(6):1082~1088.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1082.htm>

Abstract: It is very important to detect singularities (core and delta) accurately and reliably for classification and matching of fingerprints. In this paper, a method for singularity detection in fingerprint images is presented to improve accuracy of the position and reliability of the singularity. Firstly, the singularities are detected based on block images through shifting position of the whole image time after time at the same block size and the concentrative region of singularities detected under different positions is got and the centroid of the region is computed to gain the accurate position of singularities. Then, the reliability of singularities detected above is determined with multilevel block sizes. In this method, the characteristics of the relative concentration of the position of singularities detected through image shift and of the corresponding relationship of the singularities detected with multilevel block sizes are used and the singularities are detected accurately and reliably. Experimental results show that the method performs well and it is robust to poor quality images.

Key words: fingerprint; singularity; dividing into blocks with image shift; multilevel block size

摘 要: 准确、可靠地检测奇异点(core 点和 delta 点),对指纹分类和指纹匹配具有重要的意义.针对低质量指纹图像奇异点检测中精确定位和可靠性判断的难题,提出了一种检测指纹奇异点的方法.首先,对于一幅指纹图像,在同一分块尺寸下进行多次图像错位分块,并且分别在不同的图像错位分块情况下检测指纹的奇异点,得到区域相对集中的奇异点位置的集合,并计算其质心,以精确地确定奇异点的位置.然后,再在不同的分块尺寸下检

* Supported by the Natural Science Research Project of Anhui Province Education Office of China under Grant No.2002KJ234 (安徽省教育厅自然科学研究项目)

第一作者简介: 谭台哲(1970-),男,山东莱阳人,博士生,讲师,主要研究领域为模式识别,图像处理,生物特征识别.

测奇异点,并进一步判断上一步所检测到的奇异点的真伪.该方法利用了多次图像错位分块检测的奇异点位置相对集中和各级分块尺寸下检测的奇异点位置相互关联的特性,能够从指纹图像中较精确、可靠地检测出奇异点.在部分典型低质量指纹图像上的实验结果验证了该方法的有效性,对低质量指纹图像具有良好的鲁棒性.

关键词: 指纹;奇异点;图像错位分块;多级分块尺寸

中图分类号: TP391 文献标识码: A

近年来,自动指纹识别技术受到了人们的普遍关注,已成为各国学术界和工业界的一个研究热点^[1].一般来讲,自动指纹识别系统主要由指纹采集、指纹分类、特征提取和指纹匹配等部分组成.指纹分类大多是根据奇异点的数目、类型和位置等信息来实现的^[2-8].在指纹匹配中,基于奇异点的匹配方法也有着重要的应用.所以,准确、可靠地检测奇异点的位置,对于自动指纹识别系统具有重要的意义.

模式区是指指纹上包括了总体特征的区域,它是由典型线围绕而成的指纹区域.典型线是指指纹中形成圆形或环绕趋势的最外层纹线.在模式区中,有两类特殊的点可以用于指纹分类.一类叫做三角点(delta 点),另一类叫做核心点(core 点).指纹奇异点(core 点和 delta 点)如图 1 和图 2 所示.

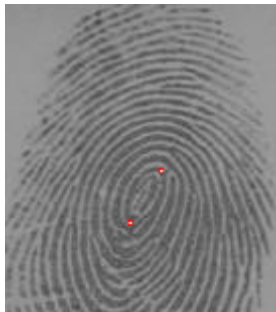


Fig.1 Example of core point
图 1 Core 点示例



Fig.2 Example of delta point
图 2 Delta 点示例

人们已经对奇异点的定义和检测进行了大量的研究和探讨.V.S.Srinivasan 和 N.N.Murthy^[9]提出,用一种纹线方向直方图的方法来检测奇异点.Asker M.Bazen^[10]等人提出一种通过检测纹线方向变化梯度的方法来检测奇异点.张伟伟等人^[11]提出了一种通过角点检测确定奇异点所在区域,然后利用跟踪灰度纹路的方法来确定奇异点的位置.目前,进行奇异点检测的主流方法是用 Poincare index^[3]确定指纹中 delta 点和 core 点的位置和数目,它是将指纹图像看成一个方向场来实现的.

对于质量良好的指纹图像,奇异点检测中的主要问题是如何精确地确定奇异点的位置.在固定分块尺寸下,如果分块尺寸较大,检测到的奇异点位置经常会出现很大偏差;反之,算法抗干扰性又比较差.而对于受噪声干扰比较严重的低质量图像,由于可靠地计算纹线方向本身就比较困难,因而不仅奇异点的精确定位比较困难,在纹线方向计算有误的地方,还往往容易检测到许多虚假的奇异点.因为存在这样一些问题,使得从指纹图像中准确、可靠地检测奇异点成为一项艰巨的任务.本文在常用的检测奇异点方法(Poincare index 计算)的基础上,通过采用对指纹图像进行多次错位分块处理后检测奇异点和多级分块尺寸下提取的奇异点位置整合来准确定位奇异点的方法,以提高指纹奇异点检测的定位精度和可靠性.

本文第 1 节给出了基于 Poincare index 的指纹奇异点检测的基本思想.第 2 节是算法描述.第 3 节是实验结果与讨论.

1 基于 Poincare index 的奇异点检测

Poincare index 早就被 Kawagoe 和 Tojo^[3]用来检测奇异点.设 O' 是指纹图像的方向场,在方向场中的给定点 (i,j) 的 Poincare index 计算如下:

$$\text{Poincare}(i, j) = \frac{1}{2\delta} \sum_{k=0}^{N_Y} D(k), \quad (1)$$

$$D(k) = \begin{cases} d(k), & \text{if } |d(k)| < \frac{\delta}{2} \\ \delta + d(k), & \text{if } d(k) \leq -\frac{\delta}{2} \\ \delta - d(k), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$d(k) = O'(Y_x(i'), Y_y(i')) - O'(Y_x(i), Y_y(i)), \quad (3)$$

$$i' = (i+1) \bmod N_Y, \quad (4)$$

其中 $Y_x(i)$ 和 $Y_y(i)$ 分别是以给定点为中心的具有 N_Y 个像素的封闭曲线上第 i 个点的 x 和 y 坐标. 如果 Poincare index 值为 $1/2$, 那么该给定点 (i, j) 就被确定为 core 点, 如果 Poincare index 值为 $-1/2$, 那么该给定点 (i, j) 就被确定为 delta 点.

K. Karu 等人^[5]与程建刚等人^[8]均采用 Poincare index 进行奇异点检测, 他们都基于每一个像素点进行纹线方向计算, 然后确定分块图像方向, 并用低通滤波器对块方向进行平滑处理, 最后, 利用给定的计算模板, 以块方向为计算单元计算指纹图像中每一像素点的 Poincare index 值, 并据此确定奇异点的类型和位置. 这两种方法的不同之处在于: (1) 计算方向场的方法不同; (2) 采用预先固定分块的图像的分块尺寸不同; (3) 计算每一像素点的 Poincare index 所用的模板不同; (4) 对前面检测的奇异点进行去伪的方法不同.

以上情况存在各自的优缺点. 本文的方法是, 采用多级尺寸对指纹图像进行分块处理, 然后在某一固定的分块尺寸下分别沿着 x 和 y 方向进行多次错位分块, 针对每次错位分块的结果, 以块图像为单元计算各图像块的 Poincare index 值, 据此确定奇异点的类型和位置, 并以同一分块尺寸下经多次错位分块后检测的奇异点集中分布区域的质心位置作为该分块尺寸下检测的奇异点位置. 这样既可以避免因 Poincare index 模板选取的不同和预先固定分块位置的原因而造成的奇异点丢失, 也可以在减少运算量的情况下保证奇异点定位的相对精确. 采用多级分块尺寸的原因是, 由于分块尺寸越大, 其抗噪声干扰的能力越强, 检测到的奇异点也就相对可靠, 但是检测的奇异点位置精确度会有所降低; 反之, 奇异点定位精确, 但算法抗干扰能力会有所下降. 为了使奇异点定位精确, 我们将小的分块尺寸下检测的奇异点作为奇异点的实际位置, 同时根据各级分块尺寸下检测到的奇异点位置的相关性, 对所检测的奇异点进行去伪存真, 从而兼顾了奇异点检测的定位精度和可靠性. 图 3 是在同一分块尺寸 (8×8) 下进行多次错位分块后检测的奇异点情况, 图 4 和图 5 是各级分块尺寸下检测的奇异点的关联情况, 其中, 图中不同尺寸的方格中心对应于该分块尺寸下检测的奇异点位置.



Fig.3 Singularities detected by block images through shifting position of the whole image time after time at the same block size (8×8)
图 3 在同一分块尺寸 (8×8) 下进行多次错位分块后检测的奇异点



Fig.4 Corresponding relationship of the singularities detected with multilevel block sizes
图 4 各级分块尺寸下检测的奇异点的关联情况



Fig.5 Corresponding relationship of the singularities detected with multilevel block sizes
图 5 各级分块尺寸下检测的奇异点的关联情况

2 算法描述

本文的方法主要包括以下几个步骤:(1) 指纹图像的背景分离;(2) 在各级分块尺寸下对多次错位分块的指纹图像进行奇异点检测;(3) 奇异点在各级分块尺寸下提取的奇异点的相互位置关系中的最终准确定位。

2.1 指纹图像的背景分离

从采集到的图像中分离出有效的指纹区域是指纹处理的第 1 步,因为所有的后继处理都是针对有效指纹区域进行的.本文采用 Ratha 等人^[12]提出的方法实现指纹图像与背景区域的分离。

2.2 各级分块尺寸下多次错位分块的指纹图像的奇异点检测

2.2.1 指纹图像错位分块

我们将分块尺寸分为 m 级,各级分块尺寸的大小分别为 $W_0 \times W_0, W_1 \times W_1, \dots, W_{m-1} \times W_{m-1}$ (本文中取 $W_0=8, W_i=W_0 \times (i+1), i=0, 1, \dots, m-1$).每一级分块尺寸下的指纹图像的各次错位量分别为 $ST_{ij}(i=0, 1, \dots, m-1, j \in \{0, 1, \dots, n-1\})$.

$$ST_{ij} = \frac{W_i}{n} \times j, \tag{5}$$

其中 $\frac{W_i}{n}$ 是指在分块尺寸 $W_i \times W_i$ 下,每一次相对于上一次的错位步长, n 为每一级分块尺寸下沿 x 或 y 方向的错位次数($0 \leq n \leq W_i, i=0, 1, \dots, m-1$).对于每一级分块 $W_i \times W_i$,分别将指纹图像沿着 x 方向或 y 方向错位 ST_{ij} 后,将新的指纹图像区域重新进行分块.这样,各个新的分块的位置就相对于图像不进行错位分块情况下每一个对应的分块的位置沿着 x 方向或 y 方向移动了 ST_{ij} .

2.2.2 指纹图像方向场的估计

每次错位分块后,都会得到一个块图像的集合.采用 A.K.Jain,L.Hong 和 R.Bolle^[13]提出的方法计算各块图像的纹线方向,但是没有对计算的方向场进行平滑处理。

2.2.3 各级分块尺寸下的奇异点检测

对于某一分块尺寸,通过错位分块的方式进行奇异点检测,都会得到一组奇异点的集合.设不同分块尺寸下各次错位分块后检测的奇异点集合为 $Singular_{i,j}$,其中, i 表示不同的分块尺寸($i=0, 1, \dots, m-1$), j 表示不同的错位次数($j \in \{0, 1, \dots, n \times n-1\}$).某一分块尺寸下的奇异点检测主要分为以下几步:

第 1 步.根据以上得到的指纹图像的方向场信息计算每一分块尺寸下指纹图像不同错位分块后确定的各个分块(u,v)的 Poincare index 值,并根据各个分块的 Poincare index 值将块内感兴趣的点确定为 core 点或 delta 点.我们计算 core 点的 Poincare index 值的模板为 2×2 模板,计算 delta 点的 Poincare index 值的模板为 3×3 ,感兴趣的点均取为模板中心点.分别如图 6 和图 7 所示.取此模板的主要原因是模板尺寸越小,则图像边缘处的奇异点越易检测到,且计算量较少。

u,v	$u,v+1$
$u-1,v$	$u-1,v+1$

Fig.6 Mask of detecting core point

图 6 检测 core 点使用的模板

$u+1,v-1$		$u+1,v+1$
	u,v	
$u-1,v-1$		$u-1,v+1$

Fig.7 Mask of detecting delta point

图 7 检测 delta 点使用的模板

第 2 步.对由 Poincare index 值确定的奇异点所形成的相对集中的区域求其质心得到的奇异点集合 $Singular_{i,j}$.

第 3 步.对同一分块尺寸不同错位分块情况下检测的大于一定阈值($threshold_i$,表示不同分块尺寸的阈值

值)数目的奇异点所形成的集中连通区域求质心,得到该分块尺寸下的位置较准确且相对可靠的奇异点集 $\{Singular'_{i,j} | i \text{ 表示分块级数}, j \text{ 表示此分块尺寸下检测的第 } j \text{ 个奇异点}, i=0,1, \dots, m-1, j=0,1, \dots\}$.

2.3 奇异点的最终准确定位

在得到各级分块尺寸(我们取 $m=4$)的奇异点集以后,根据各级分块在同一幅指纹图像中提取的各奇异点之间存在的位置相互关联的特性(如图 4 和图 5 所示),以最小分块尺寸确定的奇异点位置作为奇异点的实际位置,将其中虚假的奇异点进行剔除.各分块尺寸间的奇异点整合的步骤和原则如下.

2.3.1 Core 点的准确定位

第 1 步.以分块尺寸 $W_{m-2} \times W_{m-2}$ 下检测的 core 点为基准,对此分块尺寸下的每一 core 点 $Singular'_{m-2,u}$,看是否与下一级分块尺寸 $W_{m-3} \times W_{m-3}$ 的 core 点所在块重叠.所谓重叠是指

$$Singular'_{m-2,u} \cdot x - Singular'_{m-3,v} \cdot x \leq Dx, \quad (6)$$

并且

$$Singular'_{m-2,u} \cdot y - Singular'_{m-3,v} \cdot y \leq Dy, \quad (7)$$

其中 $Singular'_{m-2,u} \cdot x$ 表示在分块尺寸 $W_{m-2} \times W_{m-2}$ 下检测的第 u 个 core 点的 x 坐标,类似地, $Singular'_{m-2,u} \cdot y$ 表示在分块尺寸 $W_{m-2} \times W_{m-2}$ 下检测的第 u 个 core 点的 y 坐标, Dx 和 Dy 分别表示 x 和 y 方向上的阈值(以下的重叠概念与此类同).

第 2 步.

(1) 如果存在符合重叠条件的 $W_{m-3} \times W_{m-3}$ 分块对应的 core 点,则对于每一符合重叠条件的 core 点 $Singular'_{m-3,v}$ 为新的基准,确定符合重叠条件的最小分块尺寸 $W_{m-4} \times W_{m-4}$ 对应的 core 点 $Singular'_{m-4,w}$,并从中找出其位置坐标与 $W_{m-2} \times W_{m-2}$ 分块下作为基准的 core 点 $Singular'_{m-2,u}$ 和 $W_{m-3} \times W_{m-3}$ 分块下作为基准的 core 点 $Singular'_{m-3,v}$ 的位置坐标最符合三者基本呈一直线(或者说它们基本趋向同一方向)关系的一个最小分块对应的 core 点作为真 core 点(如图 5 所示).设点 $Singular'_{m-3,v}$ 到点 $Singular'_{m-4,w}$ 和点 $Singular'_{m-2,u}$ 所确定直线的距离为 d ,则

$$d = \frac{|A \times Singular'_{m-3,v} \cdot x + B \times Singular'_{m-3,v} \cdot y + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad (8)$$

$$A = Singular'_{m-4,w} \cdot y - Singular'_{m-2,u} \cdot y, \quad (9)$$

$$B = Singular'_{m-2,u} \cdot x - Singular'_{m-4,w} \cdot x, \quad (10)$$

$$C = -Singular'_{m-2,u} \cdot x \times A - Singular'_{m-2,u} \cdot y \times B. \quad (11)$$

如果

$$d < DisThreshold, \quad (12)$$

则认为 core 点 $Singular'_{m-4,w}$ 就是真 core 点,其中 $DisThreshold$ 是经验阈值.如果不存在符合三级分块尺寸下的 core 点位置坐标基本呈一直线这一条件的最小块对应的 core 点,则将与分块尺寸 $W_{m-2} \times W_{m-2}$ 下为基准的 core 点 $Singular'_{m-2,u}$ 所在块重叠面积最大的 $W_{m-3} \times W_{m-3}$ 分块对应的 core 点作为新的基准,从中找出与此基准所在块重叠面积最大的最小块对应的 core 点作为真 core 点.

(2) 如果不存在符合重叠条件的 $W_{m-3} \times W_{m-3}$ 分块对应的 core 点,则再以此 $W_{m-2} \times W_{m-2}$ 分块对应的 core 点 $Singular'_{m-2,u}$ 为基准,看是否有最小分块 $W_{m-4} \times W_{m-4}$ 和最大分块 $W_{m-1} \times W_{m-1}$ 对应的 core 点所在块分别与基准所在块重叠,且它们之间基本呈一直线关系,如果是,则最符合此条件的最小分块对应的 core 点为真 core 点.其余情况则检测不到真 core 点.

2.3.2 Delta 点的准确定位

第 1 步.以分块尺寸 $W_{m-2} \times W_{m-2}$ 下检测的每一 delta 点为基准,看是否与下一级分块尺寸 $W_{m-3} \times W_{m-3}$ 对应的 delta 点所在块重叠.

第 2 步.如果存在符合重叠条件的 $W_{m-3} \times W_{m-3}$ 分块对应的 delta 点,则从中找出重叠面积最大的 $W_{m-3} \times W_{m-3}$ 分块对应的 delta 点,并以此 delta 点为新的基准,在符合重叠条件的最小分块尺寸 $W_{m-4} \times W_{m-4}$ 对应的 delta 点中,找出符合重叠面积最大条件的 delta 点作为真 delta 点.

3 结果与讨论

为验证本文的方法的性能,我们选择南京大学活体指纹库(包含 1 200 幅活体指纹图像,120 个不同手指,每个手指 10 幅图像,图像采集分辨率为 500dpi,图像大小为 320×320,256 色灰度图像,采集器为中国科学院光机所方圆公司生产的 ZY202-B 型)中的 40 幅质量较低的图像,将本文方法和基于 Poincare index 思想直接进行奇异点检测的方法进行了对比实验.为提高奇异点检测的可靠性,我们在基于 Poincare index 的方法中纹线方向获取后做了一次平滑处理.但纹线方向的平滑会使得指纹图像的方向场发生一定程度的改变,会造成奇异点位置出现较大偏差,且分块尺寸越大,方向场的平滑次数越多,奇异点位置偏移越大.同时,也可能造成图像边缘处的奇异点难以被检测到.本文方法则不需要对纹线方向进行平滑.两种方法使用了相同的奇异点检测模板.部分奇异点检测结果如图 8 所示.图中黑色方块的中心对应的奇异点是本方法的检测结果,白色椭圆的中心对应于基于 Poincare index 方法检测到的奇异点的位置.

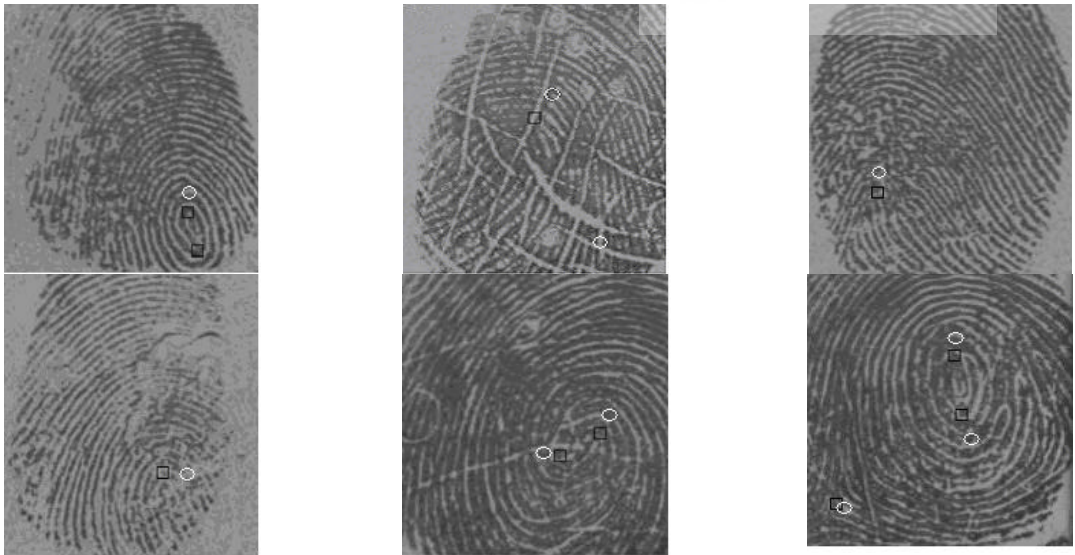


Fig.8 Examples of the singularities detected
图 8 部分奇异点检测结果示例

从实验结果可以看出,与直接使用基于 Poincare index 方法相比,使用本文的方法奇异点检测的可靠性和奇异点的定位精度都有明显提高.即使对质量较差的指纹图像,本文的方法仍能较为准确、可靠地进行奇异点检测.

本文提出的一种求取模式区奇异点的新方法是基于指纹图像分块位置多次错切和多级分块尺寸间奇异点整合的思路.该方法利用了对指纹图像多次错位分块提取的奇异点位置存在相对集中和各级分块尺寸下提取的奇异点位置相互关联的特性,从指纹图像中检测奇异点.该方法可以有效地提高奇异点的定位精度和可靠性,对低质量指纹图像具有一定的鲁棒性.

本文的方法由于采用了多级分块尺寸和多次错位分块,计算复杂度比较高.在如何平衡奇异点检测的可靠性和算法的计算复杂度之间的矛盾的问题上,尚需进一步加以研究.此外,当指纹图像中存在两个距离很近的 core 点时,检测到的奇异点的集合容易重叠在一起而难以对两个 core 的位置加以区分,这也是需要进一步完善的问题.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行表示感谢.

References:

- [1] Yin YL, Ning XB, Zhang XM. Development and application of automatic fingerprint identification technology. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 2002,38(1):29~35 (in Chinese with English abstract).
- [2] Jain AK, Prabhakar S, Hong L. A multi-channel approach to fingerprint classification. In: *Proceedings of the Indian Conference on Computer Vision, Graphics, and Images Processing (ICVGIP'98)*. New Delhi, 1998. 153~158. <http://biometrics.cse.msu.edu/publications.html#finger>.
- [3] Kawagoe M, Tojo A. Fingerprint pattern classification. *Pattern Recognition*, 1984,17(3):295~303.
- [4] Maio D, Maltoni D. A structural approach to fingerprint classification. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*. Vienna, 1996. 578~585. <http://bias.csr.unibo.it/maio/>.
- [5] Karu K, Jain AK. Fingerprint classification. *Pattern Recognition*, 1996,29(3):389~404.
- [6] Jain AK, Prabhakar S, Pankanti S. Matching and classification: A case study in fingerprint domain. *Proceedings of the INSA-A (Indian National Science Academy)*, 2001,67(2):67~85.
- [7] Lumini A, Maio D, Maltoni D. Continuous vs exclusive classification for fingerprint retrieval. *Pattern Recognition Letters*, 1997,18(10):1027~1034.
- [8] Cheng JG, Tian J, Ren Q, Zhang TH. Singular point-based fingerprint classification. In: *Proceedings of the 2nd Workshop on Biometrics in Conjunction with the 6th International Conference for Young Computer Scientists*. Hangzhou: 2001. S4-27~S4-34 (in Chinese with English abstract).
- [9] Srinivasan VS, Murthy NN. Detection of singular points in fingerprint images. *Pattern Recognition*, 1992,25(2):139~153.
- [10] Bazen AM, Gerez SH. Extraction of singular points from directional fields of fingerprints. In: *Annual CTIT Workshop*. Enschede, 2001. <http://utwente.nl/cgi-bin/sabih/ctit01.pdf?sendfile=ctit01.pdf>.
- [11] Zhang WW, Wang S, Wang YS. Corner detection based singularity detection of fingerprint image. In: *Proceedings of the 2nd Workshop on Biometrics in Conjunction with the 6th International Conference for Young Computer Scientists*. Hangzhou: 2001. S4-51~S4-56 (in Chinese with English abstract).
- [12] Ratha N, Karu K, Chen S, Jain AK. A real-time matching system for large fingerprint database. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996,18(8):799~813.
- [13] Jain AK, Hong L, Bolle R. On-Line fingerprint verification. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997,19(4):302~314.

附中文参考文献:

- [1] 尹义龙, 宁新宝, 张晓梅. 自动指纹识别技术的发展与应用. *南京大学学报(自然科学版)*, 2002,38(1):29~35.
- [8] 程建刚, 田捷, 任群, 张堂辉. 基于奇异点的指纹分类. 见: 第 6 届国际青年计算机工作者会议暨第 2 届生物特征识别研讨会会议论文集. 杭州: 2001. S4-27~S4-34.
- [11] 张伟伟, 王森, 王阳生. 基于角点检测的指纹图像奇异性检测. 见: 第 6 届国际青年计算机工作者会议暨第 2 届生物特征识别研讨会会议论文集. 杭州: 2001. S4-51~S4-56.