

摘要

自动指纹识别作为具有良好发展前景的生物识别技术之一得到了广泛的关注和研究。本论文主要针对光学传感器采集到的低质量指纹图像，特别是过干或过湿的指纹进行增强，主要内容包括如下：

1. 系统地介绍了自动指纹识别系统的计算方法、原理、主要实现方式，对指纹图像预处理方面的研究现状和主流算法进行了比较全面的介绍。
2. 设计了一个自动指纹识别系统，包括训练和识别两部分，其中指纹图像二值化、图像细化、指纹特征提取模块利用现有的主流算法进行设计，图像增强模块为重点内容，实验证明图像增强后识别率有明显提高。
3. 指纹图像分割是指纹图像预处理的一个重要部分，本文根据手指与传感器中接触区的位置差异，用分割阈值将图像分为前景和背景。试验结果表明，该方法可以快速高效地对该种指纹图像进行轮廓分割。
4. 针对指纹图像局部区过干或过湿的问题，提出了一种基于 Gabor 函数的小波域指纹增强算法。实验证明该算法对低质量指纹图像的增强效果明显，且处理速度明显快于传统的 Gabor 增强方法。

关键词： 生物识别，自动指纹识别系统，小波变换，Gabor 增强

IMAGE ENHANCEMENT RESEARCH BASED ON AUTOMATIC FINGERPRINT IDENTIFICATION SYSTEM

ABSTRACT

In today's complex, geographically mobile and increasingly electronically inter-connected information society, accurate personal identification is becoming more and more important and difficult. The aim and object of this paper is to improve the quality of poor fingerprint from optical sensor, especially the over or under inking or incomplete images.

This paper mainly discusses follows:

1. Discuss and summarize the method, the principle, the main realizing method, of Automatic Fingerprint Identification System. A comprehensive preview is presented on fingerprint image preprocessing on the state of the core algorithm related to AFIS.
2. The paper design an automatic fingerprint identification system, included test and identification module. Binarization, thinning, minutia detection module are designed using exiting method. The enhancement module is the core content. The test result has proved identification rate improved highly after image enhancement.
3. The segmentation of fingerprint area from image background is one of the important module in image preprocessing. Based the position difference between finger and sensor, the huge average of four corner is used as segmentation threshold. The test result has proved that this method can segment the fingerprint image from background quickly.
4. Gabor-based fingerprint image enhanced algorithm in wavelet domain was proposed based on the idea that the dry and wet can be looked as high-frequency disturbance. The using above estimated ridge orientation, each direction coefficient images were enhanced based on Gabor function and further reconstruction.

KEY WORDS: biometric recognition, automatic fingerprint identification system, wavelet transform, Gabor function

独创性（或创新性）声明

本人声明所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名: 李艳梅 日期: 2008.3.25

关于论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解北京邮电大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京邮电大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后遵守此规定）

保密论文注释：本学位论文属于保密在__年解密后适用本授权书。非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

本人签名: 李艳梅 日期: 2008.3.25
导师签名: 今文 日期: 2008.3.25

第一章 绪论

指纹识别已经有了很长的发展历史。随着社会的日益信息化，人们对身份鉴别提出了越来越高的要求。作为最为成熟的身份鉴别方法，指纹无论在研究领域还是在工业界都受到了人们的广泛关注。尽管指纹识别的研究和开发已取得重大进展，但是指纹识别系统并未能满足日益增长的需求，这是因为指纹识别在识别率、识别速度、稳定性等方面还远远不能满足很多实际应用的要求。设计一个高鲁棒性、高识别率的基于指纹的自动身份鉴别系统无论在理论还是在应用上都具有十分重要的意义。

1.1 课题研究背景与研究意义

身份鉴别是指通过某种方法确定人的身份。从根本上说，身份鉴别的问题可以划分为两类：身份验证和身份识别。身份验证是指确认个人声称的身份是否与其真实身份一致；身份识别是指识别出个人的真实身份。

现代社会是一个高度复杂的、信息交互的社会，身份鉴别已经渗透到日常生活的每一个方面。同时，由于交通、通讯和网络的飞速发展，人类的活动范围越来越大，身份鉴别的难度和重要性也越来越突出。以美国为例，基于这项技术的产业规模已经达到几百亿美元^[1]。

在美国，每年约有上亿美元的福利款被人以假冒的身份领取；据MasterCard公司估计，每年约有价值八亿美元的信用卡诈骗案发生其中包括利用丢失和被盗的信用卡的犯罪，如果销售场所可以准确的鉴别持卡人的身份就会大大减少这种诈骗案的发生；由于使用盗窃来的身份识别码（PIN），造成移动电话通讯的损失高达百亿美元；随着网络的发展，非法登录的计算机的案件日趋上身，有效的身份鉴别可以防止这类案件的发生。以上的这些数据表明，有效地鉴定个人的身份有着重大的社会和经济意义，它可以有效的防止犯罪和诈骗、提高办公效率、节约资源。

传统身份鉴别方法把问题转化为对标识个人身份的事物的鉴别，这些事物分为两类^[1-2]：1) 身份标识物品：比如钥匙、证件和ATM卡等；2) 身份标识知识：比如用户名和密码。有时也将两者结合使用以增强安全性，比如ATM取款机要求用户同时提供ATM卡和密码。传统方法存在着一个明显的缺陷：即个人拥有的物品容易丢失或被伪造，密码容易遗忘或记错。更为严重的是，一旦别人获取了这些标识身份的知识或财产，系统往往无法区分真正的拥有者和取得身份标识物的冒充者，冒充者具有与原拥有者相同的权利，从而可能造成严重的财产损失。

在很多应用领域，如金融、证券交易和网络安全中，需要准确地鉴定用户的身份。计算机科学的迅猛发展为这种需求的实现提供了可能性，以达到和超过人对事物的识别能力作为研究目标的计算机自动识别技术逐渐形成了一门独立的学科——模式识别。现在，计算机可以使用人自身所固有的多种生物特征来鉴别个人身份，这种技术成为生物特征鉴别（Biometrics）。可用于身份鉴别的生物特征分为两类：与生俱来的生物特征（如指纹、虹膜等）和后天形成的行为特征（如笔迹、步态等）。与传统的特征相比，生物和行为特征的优点是他们不会被丢失和遗忘，也不易被伪造。目前，生物特征鉴别已成为自动身份鉴别的重要工具。

一般来说，如果某个生物特征满足如下条件，就可以用来鉴定身份^[2]：

- 普遍性：每个人都具有这种特征；
- 独特性：每个人所拥有的特征各不相同；
- 稳定性：所选择的特征不随时间发生变化；
- 可采集性：所选择的特征便于测量；

为了满足身份鉴别系统的实用性要求，选择生物特征时还应考虑如下问题：

- 性能：所选择的生物统计特征所能达到的识别率，对系统资源的要求，识别的效率；
- 可接受性：用户在多大程度上愿意接受此种的生物特征作为身份鉴别的手段；
- 安全性能：系统是否能够识别出冒充者；

到目前为止,还没有任何一种生物特征可以很好地满足上述的全部要求。基于各种不同生物特征的身份鉴别系统都各有其优缺点,因而仅适用与一定范围。表1-1给出了一些常见生物特征的简单比较^[1]。

表1-1 各种生物特征的比较

生物统计特征	普遍性	唯一性	稳定性	可采集性	准确性	可接受性	安全性
脸形	高	低	中	高	低	高	低
指纹	中	高	高	中	高	中	高
手形	中	中	中	高	中	中	中
虹膜	高	高	高	中	高	低	高
视网膜	高	高	中	低	高	低	高
笔迹	低	低	低	高	低	高	低
声音	中	低	低	中	低	高	低

从表1-1中可以看出,相对于其他生物特征,指纹有如下两个突出的优点:

1. 稳定性: 指纹具有很强的相对稳定性。从胎儿六个月指纹形成到尸体腐烂,指纹纹线类型、结构、统计特征的总体分布等始终没有明显变化。尽管随着年龄的增长,指纹在外形大小,纹线粗细上会产生一些变化,局部纹线上也可能出现新的特征。但从总体上看,指纹是相对稳定的。即使手指皮肤受伤,只要不伤及真皮层,伤愈后纹线仍能恢复原状;即使伤及真皮,伤愈后形成的伤疤虽然破坏了原有的纹线,但伤疤本身也形成新的稳定特征。

2. 独特性: 指纹具有明显的独特性。至今仍找不出两个指纹完全相同的人。由于皮肤表皮上的纹路是在胎儿六个月的时候形成的,因此即使是同卵双胞胎的指纹也是不同的。不仅是人与人之间,同一个人的十指指纹也有明显的区别。

指纹的这两个特点,为指纹用于身份鉴定提供了客观依据。从19世纪末英国医生Henry提出使用指纹鉴定犯罪身份开始,指纹识别在刑侦领域已经有很长的发展历史,并且得到了官方的接受,在法律界成为一种有效的身份鉴定手段。而自动指纹识别系统(AFIS)的研究室二十世纪六十年代在一些发达国家

率先开始的，而其真正成熟则得益于八十年代电脑的发展和光学扫描技术的革新。目前，现代电子集成制造技术的飞速发展使得低价位、小体积的成像设备成为可能，而快速可靠的比对算法的研究更为指纹身份识别应用的增长提供了舞台，使其在欧美等发达国家率先开始了规模化应用，并逐渐从传统的公安刑侦领域扩展到了民用领域。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 传统的图像增强方法

为了增强图像，人们已经提出了各种增强方法。传统的图像增强的技术主要包括直方图修改处理，图象平滑化处理，图像尖锐化处理及彩色处理技术等。图像增强的技术基本上可以分为两大类：频域处理法和空间域处理法^[3]。

空间域处理法是直接对图像中的像素进行处理，基本上是以灰度映射变换为基础的。用数学公式来表达就是： $g(x, y) = T[f(x, y)]$ ， T 是所选择的变换。空间域处理方法主要有点运算（反转变换、对数变换、对比度拉伸）、代数运算（算术运算加减乘除，逻辑运算与或非）、直方图均衡化（把原始图的直方图变换为均匀分布的形式）、直方图规范化（按照指定的灰度比例，进行图像灰度之间的映射）。

频域处理法的基础是卷积定理。它采用修改图像 Fourier 变换的方法实现对图像的增强处理。由于频率成分和图像外表之间的存在一定的对应关系，一幅图像的边缘、跳跃部分以及颗粒噪声对应着图像信号的高频分量，而大量的背景区则对应着图像信号的低频分量。因此，可以用高通滤波（使高频通过而使低频衰减）的方法来衰减其低频分量，可以相对的调高其高频分量使图像锐化，同样可以用低通滤波（使低频通过而使高频衰减）的方法滤除高频部分，去掉噪声，从而使图像平滑。具体实现时，既可以把图像变换到频率域，在频率域进行滤波处理后再变换回空间域，也可以在频率域指定滤波器，做反 Fourier 变换，然后在空间域使用结果滤波器作为在空间域构建小滤波器模板的指导。常用的滤波器有：理想高通（低通）滤波器、巴特沃思高通（低通）滤波器、高斯高通（低通）滤波器。

Fourier 变换将图像从空间域转换到频率域进行分析，存在着不能同时进

行时间-频率局部分析的缺点，1946 年 Gabor 提出一种加窗的 Fourier 变换方法，它在非平稳信号分析中起到了很好的作用。Gabor 变换对于时-频窗口的选择遵循如下规律：对于宽带信号，由于频率变化激烈，为了能够准确提取高频信息需要有足够的时间分辨率， t_0 应选小值，可这样会造成样本点多，计算量大，难于获得快速高效算法。为了获取高频分量，时窗应尽量窄，频域窗口适当放宽。对于满变的低频信号，时窗可适当加宽，而频窗应尽量缩小，保证有较高的频率分辨率和较小的测量误差。

但 Gabor 变换的时-频窗口是固定不变的，窗口没有子适应性，不适合于分析多尺度信号过程和突变过程。

小波分析 (Wavelet Analysis) 或多分辨分析 (Multiresolution Analysis) 是建立在泛函分析、傅立叶分析、样条分析、调和分析与数学分析基础上的一门新兴学科。小波分析继承和发展了 Gabor 变换的局部化思想，采用可变窗口的伸缩和平移。它的应用性很强，近十多年来，其理论和方法在许多领域，如信号处理、语音分析、模式识别、数据压缩、图像配准、数据融合、数字水印、量子物理等，取得了重要的应用，在工具与方法上取得了突破性的进展。小波分析的理论和方法是从傅立叶分析演变而来，它通过牺牲部分频域内定位精度来取得时-频局部性的折衷，不仅能够提供较精确的时域定位，也能够提供较精确的频域定位，从而成为处理非平稳信号的有力工具，在图像处理上得到了广泛的应用。

在数学上，基于小波变换的图像增强（去噪）本质上说是一个函数逼近问题，即如何在由小波母函数伸展和平移到所展成的函数空间中，根据提出的衡量准则，寻找对原信号的最佳逼近，以完成原信号和噪声信号的区分。由此可见，小波增强方法也就是从实际信号空间到小波函数空间的最佳映射，以便得到原信号的最佳恢复。小波去噪的方法，主要可以分成小波萎缩法、投影方法、相关方法 3 类，其中小波萎缩法是目前研究最为广泛的方法，尤其对于高斯白噪声的消除。小波去噪方法的成功，主要得益于小波变换具有如下特点：（1）低熵性：小波系数的稀疏分布，使得图像变换后的熵变低；（2）多分辨率：由于采用了多分辨率的方法，所以可以很好的刻画边缘、尖峰、断点等；（3）去相关性：因为小波变换可以对信号去相关，且噪声在变换后有白化趋势，因此小波域比时域更有利于去噪；（4）选基灵活性：由于小波变换可以灵活选择变换基，从而针对不同的应用场合，不同的研究对象，可以选用不同的小波母函

数达到最优的效果。

1.2.2 指纹图像增强国内外研究现状

由于指纹图象有着其独特的纹理特性，传统的图像增强算法没有利用指纹图象的特征，增强效果不明显。上世纪 60 年代以来，许多学者一直研究适合指纹图像的增强算法，取得不少成绩。现有的指纹识别算法主要包括基于频率域的和基于空间域的增强算法^[5]：

➤ 基于频率域的指纹图像增强算法

指纹图像的增强可以在两个域里进行增强：空域和频域，空域和频域各有自己的特点，有些指纹图像适合在频域里进行增强。例如，背景噪声为规则线条的指纹图像，这种图像若在空域里进行增强就很难把这些规则线条去掉，若把图像转换到频域上，规则线条噪声表现为幅值谱上的几个亮点，只要把这些两点频率去掉，就可以轻松去掉这些噪声了。在频率域里做指纹增强的优点有：一是速度快。由于在空域里做指纹增强一般都是做卷积，时间花费比较多，而在频域里只要做乘积即可；二是增强效果好。频率上增强利用的是指纹的全局信息，但是在频率域做指纹增强对指纹上的疤痕、折皱的修复功能较弱，需要解决。

➤ 基于空间域的指纹图像增强算法

指纹图像是由连续脊线和谷线组成的（在细节点处除外），具有丰富纹理信息的图像。对于灰度指纹图像，脊线和谷线在局部的小领域内可以认为具有正弦波形状，具有一定的频率和方向。空间滤波正是基于指纹图像的数学模型的。基于空间域的增强算法主要包括：

1) 基于 Gabor 滤波的图像增算法

Gabor 滤波顺着极限的方向使用滤波函数去过滤图像，使脊线的信息得到增强。由于是顺着脊线的方向滤波，在顺着脊线方向上有平滑的作用，因此能将一些断裂的脊线恢复到原来的状态，同时一些滤波器具有良好的频率选择性，因此可以在有效的去除脊线上的噪声的同时，保持脊线的结构。但是在空域上进行指纹图像增强速度慢，对计算机的性能要求比较高，不适于在线实时处理。

2) 非线性扩散模型及其滤波方法

非线性扩散模型利用指纹图像的结构张量构造扩散张量，使得滤波沿着指纹脊线方向扩散。非线性扩散滤波算法在分析纹理模式及边缘提取中取得了很好的效果。在图像处理中，保存边缘和连接断裂的纹线是非线性滤波的主要原因。而低效率是其主要的问题。

3) 基于知识的指纹图像增强算法

基于知识的指纹图像增强算法的核心思想使用计算机来模拟人工图像增强的做法。由于指纹图像有它自身的特点，有可以利用来进行图像增强的两方面主要的先验知识，一是指纹的脊线在一个较小的局部内可以用第次（一次或二次）曲线拟合，二是指纹图像中脊线和谷线互相交替出现且宽度大致相等。指纹的脊线连接、局部脊线方向和脊线的光滑度等都有相当大的限制，人们常常可以依靠这些视觉信息来准确地恢复脊线和谷线的结构。而且指纹的脊线连线、局部脊线方向和脊线的光滑度等结构信息也是有可能在计算机中表示出来的。把人对指纹结构的认识引入指纹图像处理的过程中，用计算机来模拟人工对图像增强的做法是必要的，也是可能的。这种图像增强算法正是以规则的形式基于人们对指纹结构的认识，利用指纹图像的结构信息来引导图像增强的过程。

4) 在灰度图上直接跟踪脊线提取细节点的算法

由于指纹增强的目的是提取指纹特征点，Maio 等提出在灰度图象上直接跟踪脊线提取细节点的方法，但是对于质量的的指纹图像其提取细节点的效果并不理想。

指纹图像增强在指纹识别系统中是一个难点，尽管存在许多方法，但指纹增强中的一些问题仍然没有得到很好地解决，特别是对一些质量比较低的图像，以及指纹中疤痕的处理。在数字图像处理中，已存在许多方法对图像进行去噪，它们都可以应用到指纹图像增强中来，但是这些方法需要与指纹图像的特性结合起来才能取得较好的效果。

1.2.3 自动指纹识别系统目前存在的问题

指纹识别以其独特的优势成为目前人体生物特征识别技术市场上占有率最高的方式之一，这种识别方式也是目前生物识别技术中发展最成熟的。但是这并不代表指纹识别技术没有漏洞，由于细节特征提取算法的性能及比对的

结果严重依赖于输入指纹图像的质量，然而源指纹图像同真实指纹由于图像的形变而会导致不同，这些形变主要包括：

➤ 待识别指纹与样本之间存在水平、垂直、旋转差异

指纹识别系统在进行识别比对时，待识别指纹图像与样本指纹图像之间往往并不重合，存在着一定程度的垂直、水平位置差异和旋转差异，这必然会影响着问得识别比对。一个指纹识别算法对垂直和水平位移，还有对其位置旋转所造成的差异应该有一定容忍程度。这是指纹图像增强的首要任务与目标。

➤ 手指从三维到二维的映射由于压力、角度不同等造成图像的扭曲形变

人体手指的皮下组织与皮肤是一个弹性体，在不同的场合、不同的按压力度和角度都会引起不同的指纹扭曲变形，导致无论如何进行平移与旋转的调整，待识别指纹图像与样本指纹图像之间始终不能精确重叠。因此，指纹图像预处理算法应该对图像扭曲变形不敏感和具有一定的容忍能力。由于模拟指纹的扭曲变形的数学模型较为复杂，因此抗图像扭曲干扰是指纹图像增强的一个难点。

➤ 时间跨度大的指纹图像存在拉伸形变

指纹识别系统面对的是一个大范围的应用群体，其中包括了多个生理年龄段的人，在这些项目的运作期间，难免有一些人处于生理变化的敏感期，导致其指纹图像产生变化。这也是指纹图像增强算法应该考虑的。

➤ 由于环境、气候变化等原因存在亮度、对比度失真

在实际使用中由于操作环境、气候变化等种种原因，所采集的指纹图像会含有一定程度的亮度失真或者对比度失真，良好的指纹图像增强算法应该将各种原因所造成的图像失真加以补充和矫正。

➤ 指纹图像中有明显的断线、桥、毛刺、伤疤等噪声

我们把因各种原因而叠加到指纹图像前景和背景上的各种与指纹纹路不同的线条和斑点统称为图像的纹路噪声。它的存在会使指纹特征提取时丢失特征点或额外获得许多虚假的特征点，严重时甚至会导致特征提取的失败。

这些因素将导致待分析的指纹图像产生一定数量的可疑特征点以及大量真实特征点被忽略并引入大量的错误信息。为了确保细节特征算法的性能及整个系统的性能，我们需要进行指纹图像增强，使其纹线结构清晰化，尽量突出和

保留固有的特征信息，而避免产生伪特征信息，保证特征信息提取的准确性和可靠性。

1.3 论文主要研究内容

本课题的研究目的是根据指纹自身的纹理特性，找到指纹真实特征点不丢、伪特征点尽量减少的图像增强方法，提高指纹识别率。本课题的研究内容主要包括：

首先对自动指纹识别系统研究历史和研究现状作了总结；为了验证指纹图像增强的有效性，该论文搭建了一个指纹识别系统，包括训练模块和识别模块，其中训练模块中的图像二值化、细化、特征提取部分采用现有算法，图像增强模块为重点内容，同时为了处理图像的非线性形变问题，对识别模块进行了改进。实验证明增强后识别率有明显提高。

第二章 自动指纹识别系统结构

自动指纹身份鉴别系统是典型的模式识别系统。特征选择、特征提取和特征匹配是系统的关键问题。本章主要从指纹识别系统的组成及特征选择、特征提取和特征匹配等方面介绍指纹身份鉴别系统核心算法的研究现状。

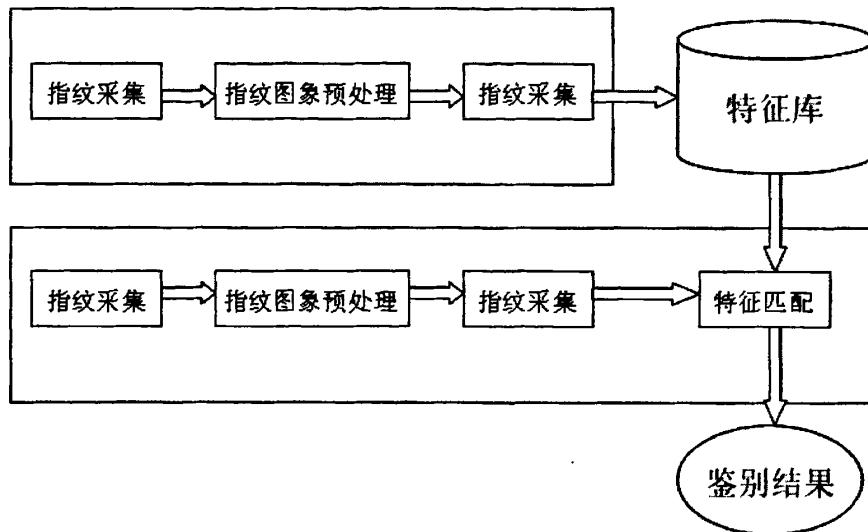
2.1 自动指纹识别系统的组成

基于指纹的身份识别系统是典型的模式识别系统。它包含两个主要模块^[8]：训练模块和鉴别模块，如图 2-1 所示。训练模块采集指纹数据，提取这些数据的特征，将特征模板和相关的信息存入数据库；鉴别模块采集待识别样本的指纹数据，提取特征模板，并在数据库中进行检索，找到最佳匹配或者根据用户所宣称的身份，从数据库中调出相应的特征，决定他们是否匹配。

指纹身份鉴别系统有两种工作模式：验证模式和识别模式。身份验证是指确认用户声称的身份是否与其真实身份一致；身份识别是指识别出用户真实身份。对于身份验证系统来说，如何定义是否匹配，即阈值的选取，是一个重要问题。因为系统只能给出两种可能答案：是与不是，如果阈值选择得过大，真正的用户可能会被系统拒绝；阈值过低，又识别不出冒充者。而身份识别系统往往需要在大量数据中寻找匹配，因此算法的效率是一个值得重视的问题。

除了验证的一对一比对和识别的一对多比对模式之外，在实际应用中还有“一对几个匹配(one-to-few matching)”模式。所包含的数目一般为5至20人。一对几个匹配主要应用于只有少数用户的系统中，比如家庭用的指纹锁。一对几个匹配一般使用与一对一匹配相同的方法，也可以采用每个用户多个指纹模板的方式提高可靠性。

图 2-1 基于指纹的鉴别系统



2.2 指纹的特征选择

手指表面皮肤的凸凹不平产生的纹路就是指纹。从生理上看，纹路是手指皮肤凸起的部分(脊)，纹路之间是凹下的部分(谷)。因此，理想的指纹图像是幅黑白相间的二值图像。但是，由于指纹通常是用按压的方式得到的，油墨不均匀、纸张不均匀、按压力量的不均匀、按压位置和方向的不同、手指的状况以及皮肤的形变等都会导致指纹图像不理想，从而形成灰度图像。通过扫描仪或者摄像机等进行数字化的时候，由于光照、快门速度的影响，也会引入各种噪声。因此，灰度图像本身不是稳定的特征，不宜直接用来匹配，有必要选择更为合适的表示方式。

特征，在模式识别系统中是指能够唯一反映输入对象本质的数据量，因此特征选取是模式识别中的重要问题，对分类器的设计和性能具有深远的影响，同时也将影响特征的提取过程。为了使指纹能够用于身份鉴别系统，指纹特征(描述)应具有如下性质^[9-10]：

- 保持指纹的独特性；
- 易于进行匹配；
- 对噪声具有一定的鲁棒性，对旋转、平移和非线性形变具有不变性；

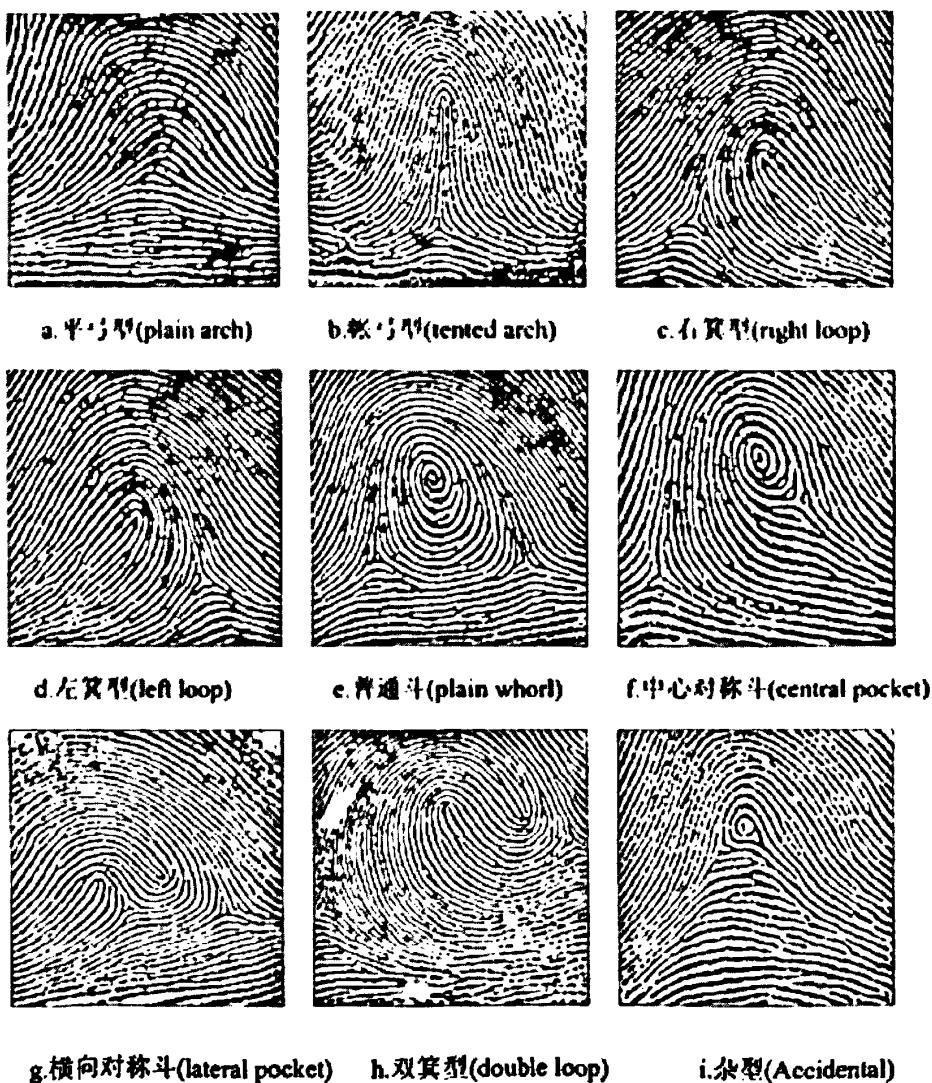
➤ 对不完整指纹具有鲁棒性；

常用的指纹描述方法是基于纹路结构特征的^[10]。指纹结构特征分为全局特征和局部特征两个大类：

全局特征：全局特征是对指纹全局纹路结构的描述，有时也称为Herry特征。通常，对Herry特征的匹配就构成了指纹分类问题。Herry将指纹分为四大类：

弓型(Arch)、箕型(Loop)、斗型(Whorl)和杂型(Accidental)，后人又划分了一些子类，具体可参考图2-2

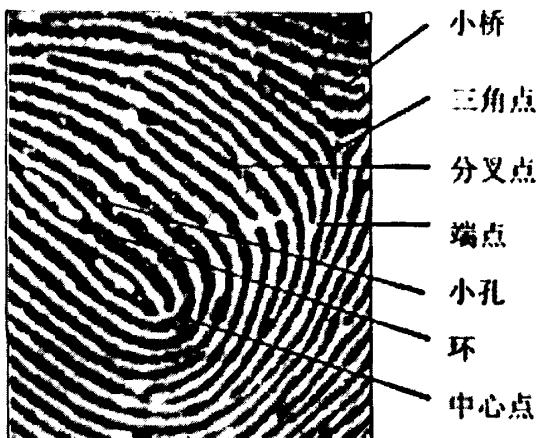
图2-2指纹全局特征



局部特征：Galton最初定义了四种局部结构特征：纹路的起始点和终止点、分叉点、小桥和环，它们也同称为Galton特征。后人在此基础上又进行了一些扩展，到目前为止，已定义的特征类型已达到150余种^[10]。但是这些扩展的特征往往不易提取和相互区分，并且他们都可以用纹路端点和分叉点的组合进行描述。这使得端点和分叉点成为最常用的结构特征，也成为细节特征(minutia)采用这种特征的例子是细节一坐标模型（也成为FBI模型），该模型使用指纹细节特征点的坐标来描述指纹^[10]。

指纹还有两个非常重要的结构特征：三角点和中心点，它们被统称为奇异点。根据Herry的定义，中心点是指纹最中心纹路上最上面的点，而三角点是纹路整体结构产生分叉的点^[11]。而从纹路的形状看，中心点是纹路形成字母U或O形状的点，三角点是形成字母Y形状的点。三角点和中心点的广泛应用于指纹的分类，同时也可作为描述指纹特征的基准点。

图2-3指纹的结构特征



尽管结构特征已为大部分人所接受，人们仍然没有停止对其他特征的尝试。比如纹理特征：纹理特征反映了图像在不同频段、不同方向的能量分布，对不同的手指能够表现出一定的可分性。同时，由于人群中大约有5%的人手指上是没有细节特征的，因而纹理特征也为这种情况提供了一个解决方案。这方面的尝试包括：Jain、Lee^[12-13]采用的Gabor滤波器方法、Tico^[14-15]使用的小波特征以及Coetzee^[16]提出的方法。采用纹理特征在对指纹图进行描述的同时，难免会损失图像中的细节，因而这种特征的可区分型不如结构特征。

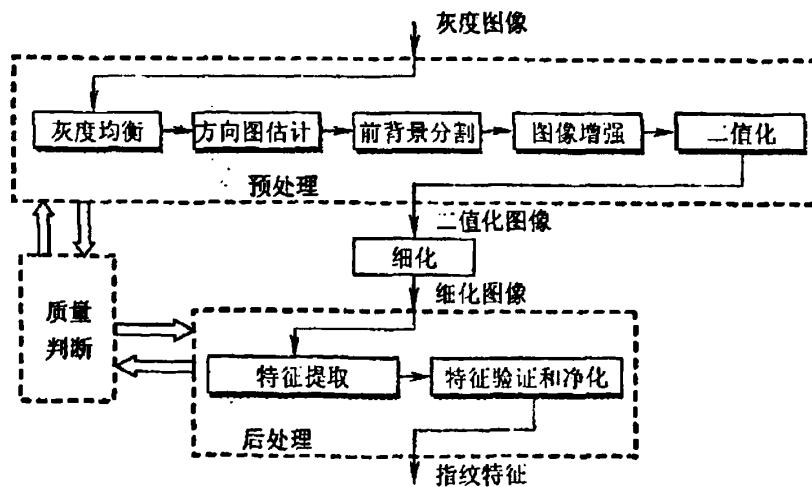
有少数系统使用一种很特别的特征：毛孔。毛孔是指纹纹路上独立的空洞。除了这些系统外，纹路上的毛孔会在预处理的时候被当作噪声曲调。毛孔作为指纹的描述方法的生理基础在于：胎儿在五个月的时候形成汗腺；六个月的时候，表皮上才形成凹凸不平的纹路。即指纹。此时，汗腺会通过一些导管从真皮层扩展到表皮层，形成毛孔。研究表明，毛孔一旦形成以后，其位置就是固定不变的。采集指纹样本时，毛孔表现为纹路上独立的空洞。Roddy 和 Stoze^[17]的工作表明：这些毛孔可以在图像上被稳定提取出来，并且小孔的分布在不同手指上也表现出一定的独特性。采用小孔作为特征的系统对采集仪提出了较高的要求，并且这种特征的独特性和有效性仍然需要大规模试验的检验。

2.3 指纹特征提取

指纹特征提取涉及的主要方法是数字图像处理。由于指纹区域比较小、纹路比较密，而指纹录入时又有各种噪声，指纹灰度图像往往不甚清晰。因此，采用图像处理的方法来减小噪声、增强指纹脊和谷之间差异，从而提高特征提取的鲁棒性是非常必要的。

图2.3是一个完整的指纹特征提取流程图。在提取过程中往往需要前面处理得到的中间结果，因此该图只表示了处理的流程，而非数据流图。在实现的过程中，可以根据具体的应用背景和输入数据的情况选取所需要的处理环节。图中的质量判断模块通过分析中间结果，判断指纹的方向性、干湿程度、位置、有效区域大小以及特征点数目，确定图像的质量并据此控制整个图像处理过程。

图2-4指纹处理流程图



2.3.1 灰度均衡和归一化

灰度均衡是指将 p 个灰度值映射到 q ($p \leq q$) 个灰度上, 以便灰度分布更为均匀; 灰度归一化是使图像灰度的均值和方差为给定值。在指纹中使用灰度均衡和归一化是为了增强指纹图像的对比度, 以便于方向图估计和纹路的增强。为了自适应地调整图像的各个小同区域, 灰度归一化和均衡一般是在图像的局部区域进行的^[18]。在全图进行统一的归一化往往是出于数据归一化或者进行纹理分析的需要^[19]。

2.3.2 方向图估计

指纹图像具有很强的方向性, 因而对图像上每个区域的方向进行估计能够为后续的处理提供有效的信息: 如在指纹增强的过程中, 需要根据方向图调整滤波器的方向以实现定向平滑或锐化; 由于方向反映了局部区域内纹路的信息, 也可以作为细节特征的一个属性^[19-20]; 在指纹分类中, 往往将方向图或其变换(如K-L变换)作为分类器的输入^[21]。

由于指纹的方向性只有在适当大小的区域内才能观察出来, 并且方向在相邻区域表现出了很好的连续性。因此, 常见的方向图估计方法都是基于区域或分块的, 而不是基于象素的。

在指纹图像中, 灰度沿纹路的切线方向变化最为缓慢; 而沿法线方向变化最为剧烈。利用这一性质, 计算象素的方向时, 在当前点的邻域计算灰度沿若干个方向(4个、8个或者16个方向)最大值、最小值、平均值、灰度差值和方差等从而估计出灰度沿每个方向的变化情况, 变化最小的就是纹路的方向^{[10][21-25]}。而计算局部或者分块方向时, 则需要综合分块内每个点的方向信息。如Mehtre^[26-28]利用方向直方图的最大值; Jain, Hong^{[10][19-20]}和Tico^[24]首先计算区域中每个点沿水平和垂直方向的梯度, 然后用最小二乘的方法估计局部方向, 并给出了这个方向的置信度。尽管用这些方法能够很好地估计处分块的方向, 但是当指纹中出现与窗口大小相当的噪声时(如发生运动模糊或者手指上有划痕), 估计误差都会比较大。此时, 除了设计合适算法来融合分块内每个像素点的方向外, 还应考虑分块大小的选择。

由于噪声和分块位置选择的原因,某些局部区域可能不存在主导方向,这些区域内得到的方向与其邻域内的方向不一致。为了使方向图更为连续Wilson等^[21-23]提出了一种低通滤波的方法,并被广泛采用^{[10] [19-20]}。

上面的方法都是用向量场表示方向,无法解决方向的模糊性问题,即在方向图中,0度和180度是无法区分的。Sherlock^[29]提出用微分几何中的方向场概念表示区域方向的模型,在该模型中,奇异点的数量和位置发挥着重要作用,而这也构成了该模型的弱点:并不是所有的图像中都有奇异点,同时奇异点的估计也可能会有误差。

2.3.3 背景分割

图像处理中,通常需要把感兴趣的区域和图像其他部分区分开来,这个问题称为前背景分割。在指纹图像中,感兴趣的区域就是指纹所在的区域。好的指纹分割算法应当具有如下特点:

- 对输入图像的灰度分布不敏感;
- 能够检测出信噪比低的有效区域;
- 能够有效分离残留指纹;

指纹的分割往往和方向图估计结合在一起,这是因为背景区域通常是录入仪上指纹没有接触到的部分的成像结果,这些区域通常不具有明显的方向性。典型的方法如Mehtre^[26-28]将方向直方图的最大值和最小值相减,如果差值很小,则认为所该区域为背景;而Jain, Hong^{[10] [19-20]}在得到局部方向的置信度后,简单进行阈值分割后即可得到前背景。由于置信度是根据局部方向的显著程度定义的,因此将其归一化后也可作为区域的质量评价指标。由于前背景是以区域为单位求得的,因此可能形成的独立前景或背景区域,用简单的平滑即可去除。

目前,指纹分割中遇到的最大问题就是残留指纹。残留指纹是指采集后残留在录入仪上的汗迹等在后续采集时所成的像。残留指纹同样具有较好的方向性和对比度。目前对这个问题尚无很好的解决办法。

一般的分割算法不限制指纹前景的大小,但是也有例外。Watson等^[30]根据先验知识将前景拟合为固定大小的矩形,这样做的目的是为了使得后面的分类器能够有一个固定维数的输入。

2.3.4 图象增强和二值化

指纹的细节特征是平行的纹路上出现的异常情况,如何使纹路清晰、减少纹路上和纹路间的噪声,从而提高特征提取的可靠性是图像增强需要解决的问题。归纳起来,纹路上只有两种类型的噪声:一种是由于录入指纹时的压力过大、墨水过浓或非线性变形等原因造成本来分开的纹路之间的豁连;另一种是本来连在一起的纹路由于墨水过稀、压力过小、手指过于干燥等原因造成原本相连的纹路断为若干段。这两种情况引起的虚假特征都是需要去除的。手指上的划痕也属于第二种噪声,但是不同系统对它的处理方式不同。一种处理方法是:划痕造成的纹路断裂是器质性的变化,因此不作任何处理或者在伤痕上提取新的特征(如长的伤疤可以用来提取直线等^[31]),这种处理方式需要结合较多的信息才能将划痕和噪声引起的纹路断开相区别;另一种方法将断开的纹路看作是由暂时的疾病或者噪声引起的,需要在增强的过程中去除^[10],这种处理方式可能会损失划痕形成的永久性特征。

增强后的图像经过一个自适应取阈值的过程,就可以转化为二值化图像。因此,这里认为图像增强的结果就是二值化图像。

在80年代末,由于计算机的运算能力所限,人们采用的都是相对简单的增强算法,如闭值分割、边缘检测算子和中值滤波等^[32-36]。而Verma^[37]结合使用模糊集理论、动态闭值和自适应闭值方法进行指纹图像的增强,并规定每个邻域上的0和1的数目均等;Coetzee^{[17][25]}则用边缘信息和灰度图像相结合的方法进行二值化。这些方法都没有考虑到指纹纹路互相平行并且具有方向的特性,因此所能够达到的效果是有限的。

到了90年代,计算机处理能力的增强使得研究者开始尝试一些更为复杂的方法,滤波器增强被广泛采用,到目前为止仍然是主流方法。一般来讲,指纹增强滤波器应当满足如下几个要求:

- 增强图像中脊和谷的对比程度,即滤波特性应为带通。
- 沿着指纹图像的方向进行增强,即滤波器应是定向的。
- 由于指纹录入时可能产生灰度的不均匀,因此滤波器应依赖于当前像素周围点的灰度值。

在滤波器的选择上，可以在纹路的切向使用具有频率和方向特性的Gabor滤波器、匹配滤波器和一些特殊的滤波矩阵^{[19-20][23][28][38-41]}，甚至汉宁(Hanning)窗和布莱克曼Blackman窗^[42]等窗函数作为低通滤波器减少纹路上的噪声。对这些滤波器进行旋转，使其沿着纹路的方向进行平滑，就可以实现定向增强。还有一类滤波器作用在纹路的法向，通过对法向进行锐化，来达到增强纹路之间差异的目的，这种方法的例子有Jain等提出的水平和垂直方向的滤波器^[20]。这两类滤波器比较起来，后者引入噪声的可能性大一些。

滤波器的方法是根据局部纹路方向调整滤波器的方向，这可能引起滤波图像在区域边界处不连续。为了解决这个问题，Wilson等^{[22][30]}提出使用若干个滤波器在全图滤波后再用投票的方法综合各个滤波结果。

为了避免把本来分开的纹路连在一起，同时消除短距离的纹路断裂，滤波矩阵的大小非常重要，这个问题和方向图估计中的分块大小的选择是类似的。小的滤波矩阵对应于较高的截止频率，但是截止频率过高将不能去除高频噪声，达不到滤波的效果；大的矩阵滤波特性比较好，但是计算量大。因此滤波矩阵的大小选择需要在这两者之间取一个折衷，一般的选择是矩阵的大小刚好对应一个周期的图像。

上述方法在选择滤波器的时候存在如下一些问题^[43]：

- 假设纹路的灰度按照某种规律分布，如正弦、高斯或者一些自定义的分布等^{[19][37-38][41]}，但这些假设往往只是一种估计；
- 参数需要估计并且滤波结果依赖于参数估计：

为了提供更为灵活的滤波方法，Ghosal^[43]提出用最小二乘法进行滤波器设计：从数学的角度来看，滤波函数可以看作是一个映射，把灰度指纹空间映射到增强指纹空间。如果针对所有的输入，均由指纹专家给出理想的输出结果，并用最小二乘的方法求输入输出之间的映射，在这种映射下得到的结果的均方误差是最小的，但是需要较大的训练集来保证滤波器的性能；而倪林等^[45]则首先采用基于小波变换的多尺度边缘表示方法(MMR)表示图像，然后在尺度空间中基于多种先验知识对MMR表示进行非线性滤波，最后再通过反变换得到增强后的图像，该方法不仅不需要指纹的方向图，而且还可以自适应地估计出方向图；Abutaleb^[46]使用遗传算法估计图像每一行上脊和谷的位置，相当于对图像作了一个加窗处理。由于该方法没有考虑行与行之间的关系，仍然无法处理噪

声较大的情况。除此而外，研究者也尝试了尺度空间的自适应滤波方法^[47]、扩散滤波器^[48]和CNN (Cellular Neural Networks)^[49]等等，尽管这几种方法的有效性还没有得到大规模试验的证实，但是作者认为这几种方法的出发点将成为未来图像处理的发展方向，即：首先对图像进行分析，判断应采取的方法，然后再进行具体的操作。可以想象，这些方法的计算代价是非常高的。

图像录入时在灰度图像上产生的噪声，有时候会反映到二值化图像上，因此有必要对二值化图像作一些平滑处理。Rao, Fitz等分别用逻辑运算符、形态学方法等平滑二值化图像^[50-52]，Coetzee采用边缘信息与灰度图像相结合的方法进行二值化，并用平滑的方法去除纹路上的小孔和纹路间的缝隙^{[25][37]}。Luo^[53]定义了一系列规则来增强二值化图像，该方法需要对所有的情况，包括对纹路的噪声，建立模型并进行区分。

一般情况下，可以用增强前后识别率的变化或者直接观察增强图像来估计增强的效果。Hong^[19]提出一个定量判断增强算法好坏的标准，但这个方法仍然需要人工判断提取出来的特征的可靠性。

2.3.5 细化

细化也称为骨架化，就是抽取二值化图像中每一个连通区域的骨架，从而得到一系列单像素宽的曲线段。在指纹图像中，指纹纹路的宽度不提供任何有用信息并且特征点的寻找和虚假特征点的去除在细化图像上更容易进行，因此需要对二值化图像进行细化。

总得来说，细化是一种标准操作，可以使用任何一个已有算法，如Pavlidis细化算法、Deutsch细化算法和Hilsirh细化算法^{[32][37][51]}等。但是这些常用的方法可能会对指纹特征的位置产生影响，因而特征的精确定位往往需要对二值化图像进一步分析。为了提高效率，减少细化时间，Mehtre^[27]提出了一种并行算法。

2.3.6 特征提取和后处理

最常用的指纹特征是纹路端点和分叉点。虽然部分文献中采用较复杂的特

征^[32]，如孤立点、小桥、短分叉、交叉和环等。但仔细观察后会发现，这些复杂特征中的大多数都是由噪声引起的。因此，大多数系统都只提取纹路分叉点和端点。在细化图像上，如果其它部分用0表示，则特征点可以通过计算CN (Crossing Number) 得到

$$CN = 0.5 \sum_{i=1}^8 |p_i - p_{i+1}| \text{ 其中, } p_1 = p_9$$

图 2-5 8领域实例

P4	P3	P2
P5	P	P1
P6	P7	P8

CN为1，表示该点为端点；为2表明该点是正常的纹路点；为3表明该点是一个分叉点。这种方法在按照4邻域进行细化的图上不适用，因而Leung[33]用神经网络的方法提取特征，网络输入是8邻域内的9个点，输出为0表示非特征，为1表示特征。

除了在细化图上提取特征的方法外，Bhanu^[55]尝试了在二值化图像上使用逻辑模板提取特征点，而Maio^[54]和Jiang^[42]直接在灰度图像上采用纹路跟踪的方法提取细节特征，其中Jiang的算法在FVC2000测试中获得了第二名。

由于指纹图像录入时产生的噪声和增强算法可能引起的毛刺和空洞等原因，细化后的纹路上会产生虚假细节特征，大大影响匹配的精度。因此有必要对细化图上提取出的细节特征进行处理，这个过程称为后处理。

大部分后处理方法都是根据细节特征周围的统计或结构特征去除虚假细节点的。如Ratha去除两个距离很近的端点而且方向一致端点、由很短的纹路连接在一起的分叉点和端点和离背景距离很近的特征点；Bhanu^[55]在特征点邻域内检查方差和均值，并和全图的均值方差作比较，以验证其正确性；Jiang^[42]在后处理过程中加入了特征的置信度信息；Hung^[56]利用脊和谷在脊纹路和谷纹路图上的对应关系连接断开的纹路和并去除小桥；O' Gorman和Wilson等^{[21][39]}用逻辑判断或者权值函数计算特征的统计特征以去除虚假细节；Hong^[41]定义了一个目

标函数来描述相对的细节特征，并用对目标函数取阈值方法来去除虚假细节;Farina^[67]根据小桥的位置、长度、平均纹路间距以及拓扑准则验证端点和分叉点的正确性，并去除环状特征;Xiao^[58-59]通过统计数据描述细节结构特征，如邻域中与当前特征相对和相连的特征数目与类型等，然后分析这些性质并去除虚假细节。这些方法在本质上都是基于规则的，在去除某种类型噪声的同时，会相应的引起其他类型的噪声。实际使用的时候，应在所期望达到的结果和可能带来的噪声之间进行一个折衷。Prabhakar^[60]则率先尝试监督的学习向量量化器(Learning Vector Quantization)对特征和非特征进行学习以验证特征的有效性，取得了较好的效果。与以上方法相比，该方法的最大优点在于它对特征与非特征的判断是基于灰度图像的，因而损失的信息少，而其制约因素在于训练样本是32x32的图像，特征与非特征的信息都包含在这些图像中。对于比较复杂的情况，如遇到划痕或者纹路的粘连则很难处理。

细节特征提取出来之后，最直观的表示方法是用坐标和方向^[20]。很显然，这种特征一坐标表示方法是和位置相关的。为了使特征信息不随指纹的旋转和平移而改变，相对信息被大量使用:如根据周围特征与当前特征的位置关系、方向差、两特征点连线上的纹路数目以及周围特征的类型分布等构造平移和旋转不变量^{[32-33][42][58-59]}。需要注意的是:采用相对量的时候，基准是很重要的;如果基准是估计出来的，设计分类器的时候就应该将估计误差考虑进去。

2.4 指纹特征匹配

由于大部分指纹鉴定系统采用的特征都是特征一坐标模型，两枚指纹的匹配就转化为点模式匹配的问题。文献^[61-65]讨论点模式匹配的一些方法，大多数基于点模式的指纹匹配方法都采用两步匹配的方法，即首先找到对应点，然后根据对应点确定两个模式之间的旋转平移变换，并通过计算重合在一起的点对数来确定两个指纹的相似程度。由于旋转、平移、非线性形变以及虚假特征和特征属性的估计误差，使得对应点的寻找非常困难。为了解决这个问题，几乎所有的方法都采用了特征点提供额外的信息，如纹路信息^[19]，方向图、特征点与周围特征点的关系^{[32][66-68]}等。当图像中有较大噪声或者形变的时候，上述这些额外信息，都有可能造成对应点估计误差。

通过对应点可以计算出两个模式之间的旋转和平移参数。为了克服非线性

形变和特征属性的误差,研究者尝试了诸多方法来匹配对准后的模板。Hong^{[19][30]}等采用串匹配的方法计算两个指纹的相似度,这种方法在细节特征发生顺序颠倒时会失效;Isenor^[67]把每条纹线作为节点,而将纹线之间的相邻关系作为边,采用图匹配的方法。尽管引入图的概念能够使匹配算法对非线性形变更为鲁棒,但是这种拓扑结构的构造方法受纹路噪声的影响非常大,并且作者也没有给出大样本下的实验结果;Chen^[68]则采用了树匹配的方法:首先找到对应点,将其作为根节点,再在对应点周围寻找匹配的细节特征,如果找到,将其作为根节点的子节点,如此继续直至找不到匹配的点或者已经遍历所有特征,最后,如果两个树的拓扑结构一致,则认为两个指纹匹配。该方法的缺陷是对斗型指纹不适用。最近,Vajna^[69]提出了三角匹配和动态时间规划相结合的方法,很好地解决了非线性形变的问题,但是该方法需要的信息量非常大;受该方法的启发,我们提出了一种基于误差扩散的指纹匹配方法:既然指纹的非线性形变很难建模,那么我们就用已匹配的点对的误差来估计待匹配点的误差,从而达到自适应跟踪形变的目的。

与上述方法相比,Fan等^[70]则另辟蹊径,首先根据距离对所有特征进行聚类,并用模糊量进行描述,匹配时使用双向模糊加权图模型进行匹配,但是聚类的方法会带来一些信息损失;Saleh^[71]等则将特征变换到角度一曲率空间,并用欧氏距离的最小方差进行匹配。

手指的疾病、长期的体力劳动等等都有可能使手指上凹凸不平的纹路被磨平,这种情况下是无法提取细节特征的。如何处理这样的指纹?一个很好的解决方案是使用纹理特征,如Coetzee^[17]提出了一种在频域统计指纹能量分布的方法;而Jain, Lee^[10]和Tico^[15-16]则使用Gabor函数和小波分析的方法提取图像信息。这些方法损失了指纹的细节,因而所能达到的识别率也是有限的。Jain等^[72]将纹理分析和细节特征匹配的结果在决策层进行融合的方法,提高了识别率。

2.5 本章小结

上文从特征选择、特征提取和特征匹配三个方面介绍了指纹身份鉴别系统核心算法的研究现状。从中可以看出:

➤ 目前,无论提出的特征利用了指纹的哪种性质,都可以归为两大类:结构特征和纹理特征。可以说,特征选择问题基本上已经定型。

➤ 在特征提取中，主流的指纹预处理和后处理方法实际上引入了大量的规则，这就使得算法在某一方面取得较好结果的同时，会在另一些方面引入噪声，如在后处理过程中，几乎所有的方法都定义了特征理想情况或者可能的错误情况，但是某些错误情况在实际中是可能发生的，如一段很短的纹路和两个相连的分叉点等等。因此，这个领域的研究将向自适应图像处理的方向发展，也只有这样，才有可能处理指纹图像中可能出现的各种噪声；

➤ 在特征匹配方面，由于特征基本上已定型，因此匹配算法也不外乎两种：基于细节的点模式匹配方法和基于纹理分析的方法，这两种方法所面临共同的挑战是对应点和非线性形变。如何解决这两个问题，将仍然是研究者努力的方向。

第三章 基于小波域的 Gabor 函数指纹图像增强算法研究

本章为论文的核心内容,针对从 U.r.U4000B 光学传感器提取的指纹图像,提出增强算法。为了验证指纹图像增强的有效性,先建立了一个指纹识别系统,然后在背景分割算法、基于小波域的 Gabor 函数图像增强算法和伪特征点去除算法三方面进行改进。

3.1 传统的基于 Gabor 函数的指纹图像增强算法

Gabor 滤波增强是使用方向场图来进行增强的,是指纹增强算法中最常见的一种。该算法的基本出发点是基于质问的数学模型,指纹在局部小区域內可以认为是一组平行的具有一定频率的直线,那么可以顺着脊线的方向使用 Gabor 窗函数过滤图像,使脊线的信息得到加强。由于是顺着脊线的方向滤波,在顺着脊线方向上有平滑的作用,因此能将一些断裂的脊线修复回原来的装备,同时由于 Gabor 滤波器具有良好的频率选择性,因此可以在有效地去除脊线上的噪声的同时,保持脊线的结构。

基于Gabor函数的指纹图像增强算法流程共包括5 个步骤: ①归一化处理; ② 方向场估算; ③ 频率场估算; ④ 图像分割; ⑤ Gabor 滤波。其中①~④是计算特征参数,计算结果将在⑤ Gabor 滤波中用到。

3.1.1 归一化处理

指纹图像的归一化处理可以减少脊线或谷线像素点的灰度变化,而且使图像灰度值达到一个预先定义的平均值和方差。设 $I(i, j)$ 为采集到的指纹图像像素点 (i, j) 的灰度值,指纹图像的大小为 $m \times n$,指纹图像的灰度平均值和灰度方差分别为 $M(I)$ 和 $V(I)$ 。设 $N(i, j)$ 为整体灰度归一化处理后像素点 (i, j) 的灰度值,计算公式如下:

$$N(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{V_0(I(i, j) - M(I))^2}{V(I)}}, & I(i, j) > M(I) \\ M_0 - \sqrt{\frac{V_0(I(i, j) - M(I))^2}{V(I)}}, & \text{其他} \end{cases}$$

3-1

式中 M_0 与 V_0 分别是指纹图像灰度平均和灰度方差的期望值。归一化处理是基于像素的操作，但它并不改变指纹图像的脊线和谷线的结构。

3.1.2 方向场估计

方向场反映了指纹图像上纹线的方向，其准确性直接影响图像增强的效果。根据纹线方向在局部区域内基本一致的特点，先把指纹图像分块；然后计算每一子块的纹线方向，最后用该方向代表对应子块内各个像素的方向。用这种方法来求指纹方向场效率较高且不易受少量的图像噪声影响。

具体算法如下：

- 1) 将图像分成 16×16 大小的互不重叠的子块，采用 sobel 算子计算每个子块像素点 (u, v) 梯度值 ∂_x (沿 X 轴方向)， ∂_y (沿 Y 轴方向)；
- 2) 利用公式估计中心在点 (i, j) 的子块的脊线方向值

$$V_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{u=i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{v=j+\frac{w}{2}} 2\partial_x(u, v)\partial_y(u, v) \quad 3-2$$

$$V_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{u=i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{v=j+\frac{w}{2}} (\partial_x^2(u, v) - \partial_y^2(u, v)) \quad 3-3$$

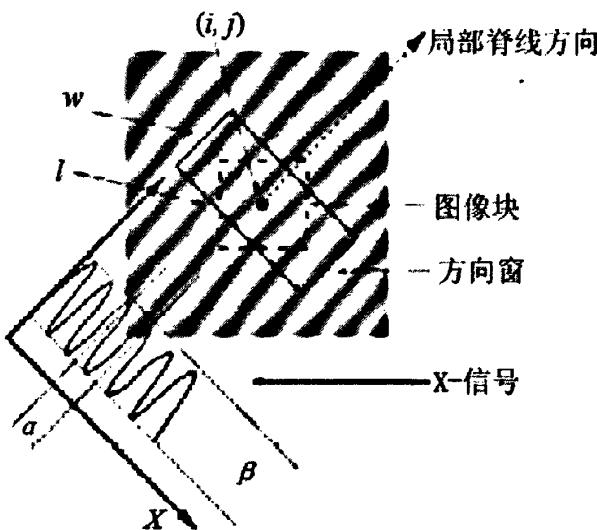
$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{V_x(i, j)}{V_y(i, j)} \right) \quad 3-4$$

其中 $\theta(i, j)$ 是以像素点 (i, j) 为中心的子块的局部脊线方向， w 是子块的边长。由于噪声、粘连、模糊以及断裂等原因，方向场中存在着方向突变块，指纹具有脊线方向变化平缓的特性，并且在一个小范围内具有相对稳定的变化趋势，因此采用了高斯低通滤波器对指纹图像的方向场进行平滑处理，得到了相对平滑的方向场，此结果将在后面使用，记其为 θ 。

3.1.3 频率场估计

在指纹图像的局部非奇异区域里, 沿着垂直于脊线的方向看, 指纹脊线和谷线像素点灰度值大致形成一个二维的正弦波, 定义纹线频率为相邻的两个波峰或波谷之间的像素点数的倒数。求取这些互不重叠的局部区域的频率值, 按各区域位置组成一个场结构, 称为指纹的频率场。设 N 表示规格化后的图像, O 是指纹方向场, 其算法步骤如下:

图 3-1 频率图



- 1) 把 N 分成 $W \times W$ 大小的互不重叠的子块;
- 2) 以图像子块中心点 (i, j) 为中心, 子块脊线方向为短轴, 作一个尺寸为 $l \times W$ 的长方形窗口, 如图2 所示, 在窗口中按公式 (5) 计算幅值 $X[k]$

$$X[k] = \frac{1}{W} \sum_{w=0}^{w-1} G(u, v), k = 0, 1, 2, \dots, l-1 \quad 3-5$$

$$u = i + (d - w/2) \cos O(i, j) + (k - l/2) \sin O(i, j)$$

$$v = j + (d - w/2) \sin O(i, j) + (k - l/2) \cos O(i, j)$$

l 表示方向窗的宽度, W 表示方向窗的高度, 取 $l=32$, $W=16$ 。 U 和 V 为方向窗口中的点换算到图像坐标系下的坐标值;

(3) 离散信号 $X[k]$ 组成了一个二维的正弦波, 从得到的 $X[k]$ 中找到所有的极大值点, 计算这些极大值的平均距离(即极大值间的平均像素点数), 记为 $T(i,$

j ，则波形频率可表示为 $F(i, j) = 1/T(i, j)$ 。

由此获得的频率场反映了指纹图像纹理结构的频率特性，此结果将在后面使用，记其为 F 。

3.1.4 Gabor 滤波器及其应用

滤波器设计，应考虑以下几方面内容：

- 1) 滤波器应能增强指纹脊线和谷线间的对比度，以去除脊线间的粘连、孔洞现象；
- 2) 滤波器应能在一定程度上连接指纹断裂的脊线，使指纹脊线光顺，去除分叉；
- 3) 指纹的脊线和谷线具有很好的局部方向特性和频率特性，滤波器应具有方向的可选择性和频率的可选择性。

Gabor 变换是英国物理学家 Gabor 提出来的，由“测不准原理”可知，它具有最小的时频窗，即 Gabor 函数能做到具有最精确的时间-频率的局部化偶对称 Gabor 滤波器的一般形式如下：

$$h(x, y, \phi, f_\theta) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_\theta^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_\theta^2}{\sigma_y^2}\right)\right) \cos(2\pi f_\theta x_\theta) \quad 3-6$$

$$x_\theta = x \cos(\phi) + y \sin(\phi)$$

$$y_\theta = -x \sin(\phi) + y \cos(\phi)$$

其中 θ 是滤波器的方向， f 是脊线的频率， $[x_\theta, y_\theta]$ 表示坐标轴 $[x, y]$ 逆时针转角度 θ ， x_θ 和 y_θ 分别是沿着 x 和 y 轴的高斯包络常量。

由于 Gabor 滤波器具有频率选择和方向选择的特性，采用 Gabor 滤波器不但能够去掉噪声，并且能把指纹的脊和谷的结构不失真地保留下。为了把 Gabor 滤波器作用于指纹图像，必须先定义 3 个参数：① Gabor 滤波器的方向 θ ；②正弦平面波的频率 f ；③高斯包迹的标准偏差 x_θ 和 y_θ 。其中纹线的方向和频率已算出，参数 f 和 θ 决定了滤波器带通区域中心在频域上的位置， x_θ 和 y_θ 取不同的值会对滤波图像产生不同的影响，值取得越大，滤波器的去噪能力越强，但产生伪脊线和伪谷线的可能性也越大；值取得越小，则反之。基于经验和实验， x_θ 和 y_θ 取值均为 4.0 时滤波效果较为理想。

利用上面设计的 Gabor 滤波器，对指纹图像进行滤波，公式为

$$E(i, j) = \begin{cases} 255 & M(i, j) = 0 \\ \sum_{u=-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \sum_{v=-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} G(u, v, O(i, j), F(i, j)) \cdot N(i-u, j-v) & M(i, j) \neq 0 \end{cases}$$

3-7

其中 $E(i, j)$ 为滤波后的图像, $N(i, j)$ 为规格化图像, $W=13$, 是 Gabor 滤波器的模板大小, $M(i, j)$ 为区域掩码, 前文均已算出。

3.1.5 指纹图像二值化和细化

在这里采用固定阈值法, 阈值设为归一化时的均值。

指纹图象二值化后, 纹线仍具有一定的宽度, 而指纹识别只对纹线的走向感兴趣, 不关心它的粗细。为了进一步压缩数据, 提高识别的准确性, 需要对指纹图象进行细化处理。细化是删除指纹纹线的边缘象素, 使之只有一个象素宽度。细化时应保证纹线的连接性, 方向性和特征点不变, 还应保持纹线的中心基本不变。

从图象的左上角元素开始进行, 每个象素均抽取出如图3-3所示的10个相邻象素, 其中 P_5 位待识别点, 如果与图3-4中的任意模板相匹配, 则首先标记 P_5 可删除(即 $P_5 = 0$), 同时与图3-5中的模板比较, 如果匹配 P_5 保留, 则否则 P_5 删除。如此循环, 直到所有点都扫描完毕。

图 3-2 领域图

$$\begin{matrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_{13} \\ P_4 & P_5 & P_6 & P_{14} \\ P_7 & P_8 & P_9 & P_{15} \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} & * \end{matrix}$$

图 3-3 删除模板

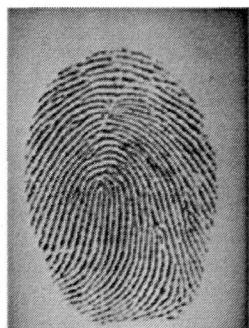
$$\begin{matrix} \begin{bmatrix} 1 & * & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & * & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ * & 1 & * \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & * & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & * & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ * & 1 & * \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} * & 1 & * \\ 1 & 1 & 0 \\ * & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} * & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ * & 1 & * \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & * \\ 0 & 1 & 1 \\ * & 1 & * \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} * & 1 & * \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & * \end{bmatrix} \end{matrix}$$

图 3-4 保留模板

$$\begin{bmatrix} * & 1 & * & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ * & 1 & * & 0 \\ * & * & * & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} * & * & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ * & * & 1 & * \\ * & * & * & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} * & * & 1 & * \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ * & * & 0 & 0 \\ * & * & * & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} * & 0 & * & * \\ 1 & 1 & 1 & * \\ * & 1 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} * & 0 & * & * \\ * & 1 & * & * \\ 1 & 1 & 0 & * \\ * & 0 & 0 & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} * & 0 & * & * \\ * & 1 & * & * \\ 0 & 1 & 1 & * \\ 0 & 0 & * & * \end{bmatrix}$$

图 3-6 显示了指纹图象在经过 Gabor 增强、二值化、细化后的效果

图 3-5 图像预处理过程



a 原始图片



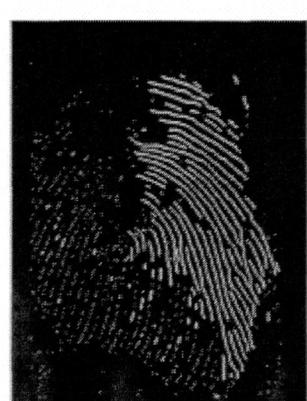
b 归一化后



c 增强后图像



d 二值化后图像



e 细化后图像

3.2 指纹图像背景分割

3.2.1 常用指纹图像背景分割算法

指纹图像轮廓的分割处理主要有方差法和方向图法两种方法。

方差算法基于背景区灰度方差小、而指纹区方差大的思想，将指纹图像分块，计算每一块的方差，如果该块的方差小于阈值 T 为背景区域，否则为前景区域。应用此法时，要视每一幅图像的方差来确定阈值，阈值的选取困难；且由于分块，分割后有阶梯效应；另外，方差的计算复杂度高；

方向图算法是基于指纹区的局域内方向一致^{[2][3]}，而非指纹区的方向较杂乱的思想，根据梯度及块方向图方向及阈值确定前景、背景区域。该方法计算复杂，而且阈值选取非自适应，要依试验确定。

3.1.2 改进的指纹图像背景分割算法

通过指纹传感器采集的指纹图像，指纹图像的前景（脊和谷）分别为黑线和白线，而背景区（手指未接触到的地方）更白些。也就是说，前景的灰度值比背景更低些。这样可以通过简单阈值法对指纹的前景和背景进行分割。

阈值的确定有很多方法，常用的有固定阈值和局部阈值法。但效果都不太理想。本文针对实际应用的指纹采集中，手指与传感器未接触区多在传感器的四个角落，用这4个角落的灰度均值为分割前景与背景的阈值，即：用 $f(i, j)$ 表示图像中某一象素点的灰度值， w 为选定的窗口大小， M_{lu} M_{lb} M_{ru} M_{rb} 分别表示左上角、左下角、右上角和右下角的灰度均值， T 表示四个角落的灰度均值， $S(a, b)$ 表示分割后的二值图像中某象素点的值（0 或 1）。其计算公式如下

$$M_{lu} = \frac{1}{w \times w} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^w f(i, j) \quad 3-8$$

$$M_{lb} = \frac{1}{w \times w} \sum_{i=M-w+1}^M \sum_{j=1}^w f(i, j) \quad 3-9$$

$$M_{ru} = \frac{1}{w \times w} \sum_{i=1}^w \sum_{j=N-w+1}^N f(i, j) \quad 3-10$$

$$M_{rb} = \frac{1}{w \times w} \sum_{i=M-w+1}^M \sum_{j=N-w+1}^N f(i, j) \quad 3-11$$

$$T = \frac{1}{4} (M_{lu} + M_{lb} + M_{ru} + M_{rb}) \quad 3-12$$

$$S(a, b) = \begin{cases} 1, & f(i, j) \geq T \\ 0, & f(i, j) < T \end{cases} \quad 3-13$$

本文提出的指纹分割算法, 只对图像的 4 个角进行计算, 计算量小, 且分割阈值达到自适应。

3.3 基于小波域的 Gabor 函数指纹图像增强算法改进

3.3.1 基于小波域的 Gabor 图像增强算法

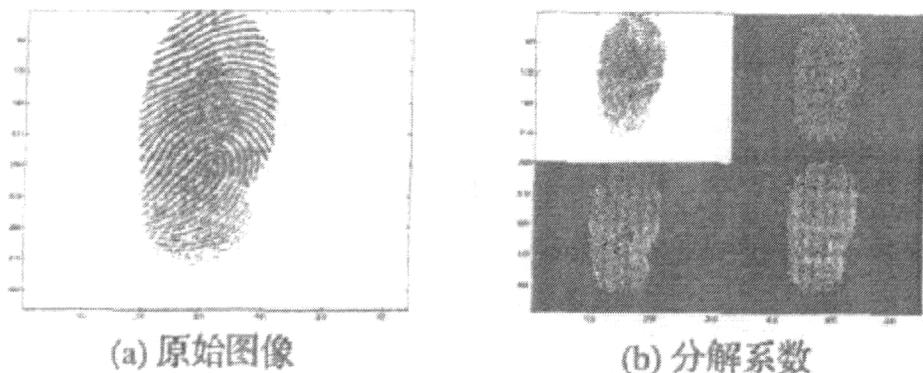
上述基于Gabor函数的指纹增强算法是在空域进行的, 利用原始指纹图像来计纹线方向信息。该方法的纹线方向估计易受到图像的噪音等高频信息的影响, 因而在指纹过干或过湿的区域估计的纹线方向信息可靠性较低, 因此本文提出了一种基于Gabor函数的小波域指纹增强算法。该算法仅对指纹图像的低频子图进行纹线方向估计, 不但可以削弱指纹图像高频信息对方向估计的影响, 提高了估计方向的可靠性, 而且可以减少方向估计时间。

3.3.2 小波域的纹线方向估计

基于 Gabor 函数的指纹图像增强, 依赖于纹线方向的准确估计。指纹图像在局部区域内几乎所有像素点的方向是一致的, 且在小波分解后小波低频系数的分布与原指纹图像的像素分布非常相似, 因此低频系数图很好地保留了原指纹图像的纹线方向和频率信息, 且抑制了高频扰动对纹线方向和频率信息的影响。指纹过干或过湿的局部区域可看作是图像局部区域灰度的高频扰动, 因而在小波域仅对其低频系数图做纹线方向估计将削弱指纹过干或过湿区域对方向估计的影响。小波分解的计算可以通过与正交镜像滤波器相卷

积的金字塔算法实现，而小波基的选择也是非常重要的。本文提出的算法仅考虑低频图的信息来估计纹线方向，因此需选择使高频图含有较少的信息量且具有紧致性的小波基。指纹图像可以被看作输入信号，用 db7 小波将指纹图像进行小波分解得到 1 个低频图和 3 个高频图，各子图间像素的层次相关性，如图 3-6 所示。若输入的指纹图像大小为 $m \times n$ ，则由图 1 知：4 个输出子图的维数均为 $(\frac{m}{2} \times \frac{n}{2})$ 。

图 3-6 指纹图像的 db7 小波分解系数图



(图 (b) 右上角为低频小波系数图，其他为高频小波系数图)

本文对小波低频系数图采用 3-4 来估计纹线方向。

由于低频系数图和高频系数图间的像素点是一一对应的，由低频图估计得到的各像素的方向可作为高频图对应像素的纹线方向。采用上述的小波域纹线方向估计有两个方面的好处：1) 在低频子图做纹线方向估计可有效抑制指纹过干或过湿的影响；2) 低频图的尺寸大小仅为原指纹图像的一半，估计纹线方向的计算量会有所下降。

3.3.3 小波域指纹增强

纹线方向和频率都是指纹的固有结构信息，只有充分利用指纹图像的这些信息才能取得良好的增强效果。Gabor 函数具有方向选择和频率选择的特性，因此采用 Gabor 函数不但能够去掉噪声，并且能把指纹的脊线和谷线的结构不失真地保留下。偶对称 Gabor 函数修改后用于指纹增强的形式如下^[4]：

$$\begin{aligned}
 h(x, y, \phi, f) &= \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_\phi^2}{\delta_x^2} + \frac{y_\phi^2}{\delta_y^2}\right)\right) \cos(2\pi f x_\phi) \\
 x_\phi &= x \cos(\phi) + y \sin(\phi) \\
 y_\phi &= -x \sin(\phi) + y \cos(\phi)
 \end{aligned}
 \tag{3-14}$$

其中 ϕ 是 Gabor 函数的方向, f 是指纹图像正弦平面波的频率, δ_x 和 δ_y 分别是沿着 x 和 y 轴的高斯包迹的空间常量。

指纹图像在小波分解的过程中进行了下采样, 低频子图为原始图像在下一尺度上的概貌, 而高频子图分别体现了原始图像垂直方向、水平方向和沿对角线方向的细节信息, 这些细节信息不仅包含了很多噪声而且也具有大量的原始指纹图像信息, 为了确保增强结果的准确可靠必须对高频子图进行处理, 增强沿纹线方向的细节信息, 抑制其他方向的细节信息, 并对增强后的各子图进行小波重构得到最终增强结果。

设指纹图像在小波分解后的低频小波系数子图为 $L(i, j)$, 高频小波系数子图分别为 $H(i, j)$, $V(i, j)$ 和 $D(i, j)$, 其中 $i = 1, 2, \dots, M/2$, $j = 1, 2, \dots, N/2$ 。 $\theta(i, j)$ 为由 3-4 算法估计低频子图 $L(i, j)$ 的纹线方向。低频图的 Gabor 函数增强结果为 $EL(i, j)$, 计算公式如下:

$$EL(i, j) = \sum_{u=-W_g/2}^{W_g/2} \sum_{v=-V_g/2}^{V_g/2} h(u, v, \theta(i, j)) L(i-u, j-v)
 \tag{3-15}$$

高频子图不具有明显的纹线方向信息, 但各像素点与低频子图是对应的, 应具有相同的纹线方向, 因此利用低频图的估计纹线方向 $\theta(x, y)$ 分别对高频小系数 $H(i, j)$, $V(i, j)$ 和 $D(i, j)$ 按公式 (6) 进行 Gabor 函数增强。设各高频子图增强结果分别为 $EH(i, j)$, $EV(i, j)$ 和 $ED(i, j)$ 。最后, 对增强后的各子图 $EH(i, j)$, $EV(i, j)$ 和 $ED(i, j)$ 进行小波重构, 得到最终增强的指纹图像。

3.4 指纹伪细节点处理

伪细节点的存在会同时提高指纹图像匹配时的误识率和拒识率。因此, 在特征提取时, 往往需要进行伪细节特征点的识别和删除。

细节点属性和伪细节点结构获得之后, 进行后处理操作以删除图像中的伪细节点。后处理算法应该满足以下要求:

- 1) 所有的细节点都应经过处理, 保留真实的细节点, 删除伪细节点。
- 2) 为了降低计算复杂性, 每个步骤针对一种伪细节点结构作相应处理。
- 3) 前面的处理步骤不能破坏后续处理步骤需要的信息。
- 4) 在前面的处理步骤中如果造成新的伪细节点, 应在后续步骤中删除。

3.4.1 毛刺的删除

指纹图像细化后, 由于脊线上有可能存在小的突起, 在细化后的股价线上呈现出小的短枝, 这样就会产生伪的分歧点和端点, 所以在细化后必须加入删除毛刺的程序。

毛刺的一端是端点, 另一端表现为分叉点, 一般毛刺的长度是很短的, 根据这一特点, 如果从任一端点出发, 沿着沿线跟踪, 若在很短的距离内遇到了分叉点, 则有理由认为跟踪过的指纹纹线部分为毛刺, 应删除。

算法描述如下:

- 1) 搜索每一个细节点, 如果为端点, 标记为 1;
- 2) 如果在一给定阈值范围内跟踪到一个分叉点, 则删除所跟踪过的纹线上的点, 否则处理下一个点。
- 3) 如果所有端点都处理完毕, 则算法结束; 否则继续执行步骤 1)

3.4.2 断线的连接

伤疤在细化后的指纹图像上表现为断线, 一般来说, 那些端点距离小于一定值的两个端点为伪细节点, 两个端点应予以删除。

删除断点的的算法描述如下:

- 1) 搜索每一个细节点, 如果为端点, 标记为 1;
- 2) 在给定阈值范围内搜索与该端点对应的端点, 如果方向相反, 应该将两个端点都删除
- 3) 如果所有的端点都搜索完毕, 则结束; 否则, 继续执行步骤 1)

3.5 试验结果

为了验证本文提出的基于 Gabor 函数的小波域指纹增强算法的效果, 从 FVC2004 的指纹库中选取了 2 幅低质量指纹图像做实验, 用于验证本文方法的效果。指纹库采集分辨率为 500dpi, 指纹采集设备为 CrossMatch 生产的 V300 的光学指纹采集仪, 图像尺寸大小为 640*480。

本文试验中取块大小 W 为 8。指纹图像小波分解后各纹线间的像素点的平均个数为 5，则 Gabor 函数的频率为 $f=1/5. \partial_x$ 和 ∂_y ，根据经验取为 4。

图 3-7 试验结果



图3-6 给出局部区域过湿的指纹图像 (a) 和过干的指纹图像 (d) 两类典型低质量指纹图像的增强结果。指纹模式区的纹线方向变化比较剧烈，使用传统算法增强并不能较好地保留模式区的纹线信息，而本文算法能很好地保留模式区的纹线信息。图2(a)的指纹图像的部分区域过湿，使用传统算法容易导致纹线方向估计错误，而本文算法能正确估计出该区域的纹线方向，且对于指纹过湿区域的纹线增强结果明显优于传统算法。指纹过干的图像如图2 (d) 所示，可以看出本文算法连接断线的能力明显高于传统增强算法。当纹线结构模糊、对比度很低时，传统算法很难保证纹线方向计算结果的正确性，而对小波变换的低频图进行估计纹线方向可以减弱高频信息对纹线方向的影响，因而估计出的方向信息更为准确。

可靠。

3.6 本章小结

首先搭建了一个自动指纹识别平台,该方法是基于Gabor函数的指纹图象增强算法,在此基础上分别从背景分割,图像增强,伪特征点去除等方面对现有算法进行了改进。由于增强算法仅对指纹图像的低频子图进行纹线方向估计,不但可以削弱指纹图像高频信息对方向估计的影响,提高了估计方向的可靠性,进而提高了增强效果,而且可以减少计算时间。

第四章 基于串距离的指纹匹配算法

指纹图像匹配是通过对两枚指纹特征集间的相似性比较，来判断对应的指纹图像是否来自同一手指的过程，它是一种非常经典而又亟待解决的模式识别问题。

4.1 基于串距离的匹配算法

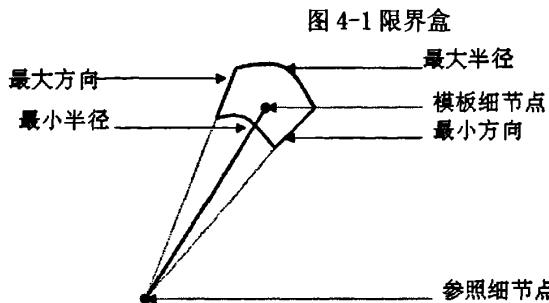
1997 年 A. K. Jain 等提出了一种基于串距离的算法，可以用来解决指纹图像中弹性扭曲的问题。该算法首先用最小二乘拟合等方法估计直角坐标系中的两组特征点集的旋转角度和校准点位置，将旋转后落入限界盒中重的匹配点数最大的角度作为旋转角度。然后分别以某个校准点为中心转换到极坐标系中，二维特征点将次成一维的串，接着用串匹配算法计算两个串间的距离，最后将结果规范化并转化成指纹匹配分数。

A. K. Jain 在基于几何关系的细节点匹配方面进行了深入的研究^[73]，并提出多种校准匹配的改进方法。它采用在极坐标系中作细节匹配的方法，这是一种较好的选择。因为在极坐标系中进行细节匹配有很多优点：首先，极坐标系具有平移和旋转的不变形；其次，在极坐标中能更好地描述指纹图像呈放射状非线性形变。

罗希平教授对 A. K. Jain 等提出的细节匹配算法进行了修正^[74]。他将脊线信息引入匹配过程中，这样做好处之一是以较低的计算代价有效地解决了匹配中参照点对的选取问题。

4.2 限界盒方法及其原理

一个限界盒式放在模板细节点上的一个盒子，如图 4-1 所示，这个盒子一对变得极角为常数，另一对边的极半径为常数。



用 `angle_size` 表示极半径为常数的那对边的极角差异

$$\text{Angle_size} = \text{angle_high} - \text{angle_low} \quad 4-1$$

同样, 用 `radius_size` 表示极角常数的那对边极半径的差异

$$\text{Radius_size} = \text{radius_high} - \text{radius_low} \quad 4-2$$

限界盒的大小用 `angle_size` 和 `radius_size` 来表示。

文献^[73]介绍了算法中使用了一个固定大小的限界盒, 即在所有的模板细节点处 `angle_size` 和 `radius_size` 取同样的值。而在这里我们介绍一种使用可变大小的限界盒, 即 `angle_size` 和 `radius_size` 的值对着细节点的极径大小而变化。如果模板细节点的极径比较大, 他的限界盒将有一个较大的 `radius_size` 和较小的 `angle_size`。固定大小与可变大小限界盒的差异可从图 4-2 中看出来。

图 4-2 比较固定大小的限界盒和可变大小的限界盒

固定大小的限界盒 可变大小的界限盒



用下式来计算极半径为 r 的模板细节点的 `radius_size` 和 `angle_size`

$$\begin{aligned}
 \text{Radius_size} &= \begin{cases} r_small, r_size < r_small \\ r_size, r_small \leq r_size < r_large \\ r_large, r_size \geq r_large \end{cases} \\
 \text{Angle_size} &= \begin{cases} a_small, a_size < a_small \\ a_size, a_small \leq a_size < a_large \\ a_large, a_size \geq a_large \end{cases}
 \end{aligned}
 \quad 4-3$$

式中, a 是预先给定的常数, r 是模板细节点的极径, r_small 、 r_large 、 a_small 、 a_large 分别是 $radius_size$ 和 $angle_size$ 的上界和下届, 它们的值是预先设定的。

使用可变大小的限界盒是为了使算法对非线性形变更为鲁棒。非线性形变一般在一个特定的区域内较大, 然后非线性地向外扩张。当细节点的极径较小时, 小的形变就可以造成大的极角改变, 而极半径的改变较小。所以在这种情况下限界盒的 $angle_size$ 应该比较大而 $radius_size$ 则应该较小。另一方面, 当细节点的极半径较大时, 极角的较小改变就会造成细节点位置的较大变动, 而极半径的形变可以看成是该细节点与参照细节点间的所有区域的形变的累加。所以在这种情况下限界盒的 $angle_size$ 应该比较小而 $radius_size$ 则应该比较大。

用 $input_point[l]$ 表示输入串 Q_i^s 的第 l 个点, $template_point[k]$ 表示模板串 P_k^s 的第 k 个点。用 $angle_size[k]$ 和 $radius_size[k]$ 表示模板串中第 k 各细节点的限界盒大小。 $angle_high[k]$ 、 $angle_low[k]$ 、 $radius_high[k]$ 、 $radius_low[k]$ 表示模板串中第 k 个细节点的限界盒 4 条边的值, 它们的初值如下

$$angle_high[k] = angle_size[k]/2 \quad 4-4$$

$$angle_low[k] = -angle_size[k]/2 \quad 4-5$$

$$radius_high[k] = radius_size[k]/2 \quad 4-6$$

$$radius_low[k] = -radius_size[k]/2 \quad 4-7$$

调整限界盒的做法如下: 对每一个模板细节点 $template_point[m]$, 其中 $m > k$ 且 $\Delta e = e_m^Q - e_k^Q < 120$, 执行一下操作

$$\text{angle_high[m]} = \text{angle_high[m]} + \lambda(r_i^P - r_k^Q) \quad 4-8$$

$$\text{angle_low[m]} = \text{angle_low[m]} + \lambda(r_i^P - r_k^Q) \quad 4-9$$

$$\text{radius_high[m]} = \text{radius_high[m]} + \lambda \Delta e \quad 4-10$$

$$\text{radius_low[m]} = \text{radius_low[m]} + \lambda \Delta e \quad 4-11$$

式中, r_i^P 表示模板串 p 中第 i 个细节点的极径, r_k^Q 表示输入串中第 k 个细节点的极径, λ 是一个预先给定的值, 设置为 0.5.

一旦监测到一对对应点, 算法即对还没有用来匹配, 又在从 $\text{template_point}[k]$ 开始的一个扇形区域内的模板点的限界盒位置进行调整。

4.3 校准特征点串

令 $P=((x_1^P, y_1^P, \theta_1^P)^T, (x_2^P, y_2^P, \theta_2^P)^T, \dots, (x_M^P, y_M^P, \theta_M^P)^T)$ 表示模板图像中的 M 个细节点, $Q=((x_1^Q, y_1^Q, \theta_1^Q)^T, (x_2^Q, y_2^Q, \theta_2^Q)^T, \dots, (x_N^Q, y_N^Q, \theta_N^Q)^T)$ 表示模板图像中的 N 个细节点, 为了把细节点转换到极坐标系中, 需要在模板细节点集和输入细节点集中各选一个参照点作为相应的极坐标系中的原点, 并算出其他细节点相对于参照点的极坐标。由于事先并不知道模板点集与输入点集的对应关系, 因此将考虑所有可能的参照点对。

对模板点集中的每一点 $P_i (1 \leq i \leq M)$ 和输入点集中的每一点 $Q_j (1 \leq j \leq N)$, 定义 $\text{rotate}[i][j]$ 为将 P_i 和 Q_j 当作参照点对时, 从输入图像到模板图像的旋转角度。如果 P_i 和 Q_j 可以被当成一对对应点, 即它们分别对应的脊线相似性到一定程度, 则 $\text{rotate}[i][j]$ 将取 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间的一个值, 否则定义 $\text{rotate}[i][j]$ 取值为 400, 以表示 P_i 和 Q_j 不能作为一对对应点。如果 P_i 和 Q_j 是不同类型的细节点, 也就是说它们一个是端点, 一个是分叉点, 则他们不是对应点对, $\text{rotate}[i][j]$ 取值为 400。

如果 P_i 和 Q_j 是相同类型的细节点, 也就是说它们都是脊线端点或都是脊线分叉点, 如果纪录的相应脊线中的点个数不同, P_i 和 Q_j 是不是对应点对及 $\text{rotate}[i][j]$ 的取值将由下面的算法决定。

用 R 表示细节点 P_i 对应的脊线, r 表示 Q_j 对应的脊线。匹配 r 与 R , 用式 6-15 来计算着两条脊线间的差异

$$Diff_dist = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^L |R(d_i) - r(d_i)|$$

$$Diff_ang = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^L |R(\alpha_i) - r(\alpha_i)|$$

4-12

式中, L 是纪录的脊线中的点个数, $R(d_i)$ 和 $r(d_i)$ 分别表示从脊线 R 与 r 上的点 i 到对应的细节点的距离, $R(\alpha_i)$ 和 $r(\alpha_i)$ 分别表示连接脊线 R 与 r 上的点 i 到对应的细节点的直线同对应细节点的方向的夹角。

如果这两条脊线的差异 $Diff_dist$ 和 $Diff_ang$ 分别小于某个阈值 T_d 和 T_a , 也就是说这两条脊线的形状在一定程度上相似, 那么 P_i 和 Q_j 能被当作对应细节点对, $rotate[i][j]$ 为

$$rotate[i][j] = dir_temp - dir_in \quad 4-13$$

式中, dir_temp 和 dir_in 分别是 P_i 和 Q_j 的方向。如果 $Diff_dist$ 大于 T_d 或 $Diff_ang$ 大于 T_a , 也就是说两条脊线彼此不相似, 那么细节点 P_i 和 Q_j 不能被当作对应细节点对, 将 $rotate[i][j]$ 的值设为 400。

由于最后要将细节点都转换到极坐标下, 只要计算输入图像与模板图像间的旋转角度, 而不需要考虑两幅图像间的平移。要在极坐标系中将输入图像与模板图像校准, 只需要将输入细节点与模板细节点都分别相对于参照点 P_i 和 Q_j 转换到极坐标系中, 然后在所有输入细节点的极角上加一个角度 $rotate[i][j]$ 。也就是说, 将输入细节点与模板细节点都分别相对于参照点 P_i 和 Q_j 用式转换到极坐标系中。

$$\begin{aligned} r_i &= \sqrt{(x_i - x')^2 + (y_i - y')^2} \\ e_i &= \begin{cases} \arctan \frac{y_i - y'}{x_i - x'} \\ \theta_i - \theta' \end{cases} \end{aligned}$$

4-14

式中, $(x_i, y_i, \theta_i)^T$ 是待转换细节点的坐标, $(x', y', \theta')^T$ 是参照细节点的坐标, $(r_i, e_i, \theta_i)^T$ 是细节点在极坐标中的表示。然后, 对每一个输入细节点的 e_i 加一个 $rotate[i][j]$ 。

4.4 特征点串的匹配方法

匹配 P_i^s 和 Q_i^s 的算法描述如下：

用式(6-6)~式(6-9)决定每一个模板细节点限界盒的大小,获得angle_high[k]、angle_low[k]、radius_high[k]、radius_low[k]对每一个 $k(1 \leq k \leq M)$ 的值。设 $m\ score[i][j]=0$,作如下循环:

上述过程中, `conditional` 定义为:

$$\text{Condition} = \begin{cases} \text{true} & \begin{cases} \text{radius_low}[k] < (r_i^P - r_k^Q) < \text{radius_high}[k] \\ \text{angle_low}[k] < (r_i^P - r_k^Q) < \text{angle_high}[k] \\ \Delta\theta < \epsilon \\ \text{rotate}[k][l] < 400 \end{cases} \\ \text{false, 其他} \end{cases}$$

$$\Delta\epsilon = \begin{cases} a, (a = (e_i^P - e_k^Q + 360) \bmod 360) < 180 \\ a - 180, \text{ 其他} \end{cases}$$

$$\Delta\theta = \begin{cases} a, (a = (\theta_i^P - \theta_k^Q + 360) \bmod 360) < 180 \\ a - 180, \text{ 其他} \end{cases}$$

4-15

Condition1 是将 template_point[k] 和 input_point[1] 看作对应点对的条件。其含义是, 要将任意两个细节点 template_point[k] 和 input_point[1] 看作对应点对的条件, input_point[1] 应该在 template_point[k] 限界盒的内部, 这两个细节点的方向差异应小于 ϵ (设 $\epsilon = 30$), rotate[k][1] 应小于 400, 即 P_i 和 Q_j 对应的脊线不相似。

把体现在 rotate[i][j] 中的脊线信息引入到匹配过程中的作用主要是两个方面:

➤ 在指纹细节匹配中, 如何选择可靠的参照点对一直是一个难题, 而如果将所有可能的点对分别当作参照点对来计算又将带来计算量太大的问题。算法中通过引入脊线信息, 在参照点对的选取中, 细节点 P_i 和 Q_j 能被当作参照点对, 则必须 $\text{rotate}[i][j] < 400$, 即 P_i 和 Q_j 对应的脊线有一定程度的相似性, 这样做大大减少了可能的参照点对的数目, 使得算法既保证了计算的速度, 又有效地解决了参照细节点对的选取问题。

➤ 引入脊线信息能有效地防止两幅来自不同指纹的图像被错误地匹配成功, 同时它对来自同一指纹的图像的匹配影响很小。这是因为如果两幅图像来自同一枚指纹, 则他们的对应点所对应的脊线往往也是相似的, 而如果两幅图像来自不同指纹, 则很可能点对 P_i 和 Q_j 满足作为对应点的所有其他条件, 但 $\text{rotate}[i][j] = 400$, 即它们对应的脊线不相似。

4. 5 串距离匹配算法的主要步骤

细节匹配算法的主要步骤如下:

- 1) 对每一个 $i (1 \leq i \leq M)$ 和每一个 $j (1 \leq j \leq N)$, 如果 $\text{rotate}[i][j] =$

400, 即细节点 P_i 和 Q_j 不能被当作对应细节点对, 则重复此步并选择另外一对 P_i 和 Q_j , 否则转到步骤 2)。如果所有的细节点对都已考虑过了, 则转向步骤 5)

2) 将 P_i 和 Q_j 当作参照细节点, 用上节中的方法将输入点集和模板点集中的细节点都转换成坐标。

3) 将极坐标中的模板细节点和输入细节点按极角递增方向排序, 并连接成串, 表示如下:

$$P_i^S = ((r_1^P, e_1^P, \theta_1^P)^T, (r_2^P, e_2^P, \theta_2^P)^T, \dots, (r_M^P, e_M^P, \theta_M^P)^T)$$

$$Q_j^S = ((r_1^Q, e_1^Q, \theta_1^Q)^T, (r_2^Q, e_2^Q, \theta_2^Q)^T, \dots, (r_N^Q, e_N^Q, \theta_N^Q)^T)$$

4-16

式中, (r^P, e^P, θ^P) 和 (r^Q, e^Q, θ^Q) 表示对应的极半径、极角和相对于参照点的细节点方向。

4) 用后面将要介绍的方法匹配串 P_i^S 和 Q_j^S , 找出匹配分数, 记录为 $m_score[i][j]$ 。然后转回步骤 1)

5) 找出 $m_score[i][j]$ 中的最大值, 把它当作输入细节点集与模板细节点集的匹配分数。如果匹配分数高于一个预先设定的阈值, 则认为输入图像与模板图像来自同一个指纹, 否则认为他们来自不同指纹。

4. 7 本章小结

本章采用基于串距离的匹配算法进行识别, 为了适应指纹图像的几何形变及错位等问题, 在固定限界盒的基础上, 尝试用可变大小的限界盒, 对图像的非线性形变起到了一定的抑制作用。

第五章 指纹识别系统实验结果

5.1 指纹图像来源

指纹图像的采集是自动指纹识别系统的重要组成部分，直接关系着系统的识别率。目前，由于各厂商技术保密性问题，指纹图像数据库及评测方法标准不统一，不同测试条件下得到的性能指标往往不具可比性。

为此，美国国家标准局(NIST)发布了一系列的标准指纹数据库，包括NIST-4, NIST-9, NIST-14, NIST-24以及NIST-27和NIST-29，这些标准库已经成为大多数研究者测试算法的首选。

同时，由意大利波格尼亚大学生物系统实验室、密歇根州立大学生物实验室等组织的国际指纹识别竞赛(Fingerprint Verification Competition FVC)也吸引了不说专家、学者、科研机构的主意。这些工作对指纹身份鉴别系统，乃至生物特征身份鉴别系统测试的标准化发挥了重要的作用。

光学取像设备是最早出现的指纹传感器，图像质量较好、寿命长，故其应用范围最广。由于光学技术的进步，光学传感器体积和价格迅速降低，当前仍然广泛应用于公安、民用等行业。同时参考FVC2004指纹图像采集设备，我们选择了由美国Digital Persona公司生产的U.r.U4000光学指纹传感器的升级版本U.r.U4000B作为指纹提取设备。

指纹图片提供者包括在校学生、农民、儿童等各个年龄段和职业，同时在提取过程中我们不对提供者作任何要求，包括手指放置的方向、角度、放置力度、手指干湿程度都未作具体要求。一共采集了50个人的手指图片，每个手指采集12幅图片，即一共 $50*10*12=6000$ 幅图片。

本试验图片库一本分来源于国际指纹识别竞赛2004年图片库，共3200幅指纹图片，其中包括光学指纹图像传感器采集到的图像1600幅，热敏传感器采集到的图像800幅，人工合成的指纹图像800幅。

该实验一共有9200幅待匹配指纹图片。如图5-1为库中的一些图片。

图5-1部分指纹图像



5.2 指纹识别系统评价标准

在了解如何评价一个指纹身份鉴别系统(更广义一些,生物特征身份鉴别系统)之前,首先应了解理想的指纹身份鉴别系统是什么样的。Philips指出,理想的生物身份鉴别系统应满足^[3]:

- 1) 所有的人都拥有这一生物特征,并且不同人的生物特征是可以区分的;
- 2) 生物特征的采集不随采集条件变化而变化;
- 3) 系统能够区分冒充者。

对身份鉴别系统进行评价,就是判断其符合上述理想系统的程度。

5.2.1 拒识率

拒识率 (False Rejection Rate, FRR) 又称为“拒真率”或“错误拒绝的概率” (False Non Match Rate, FNMR) 其含义是指将相同的指纹误认为是不同的指纹的出错概率。该项指标的数值大小与系统设定的判定相似度的门限阈值呈正相关,即相似度门限阈值定得越高, FRR的值也越高,其表达式如下:

$$FRR = \frac{\text{拒识的指纹数目}}{\text{考察的指纹总数目}} \times 100\%$$

5.2.2 误识率

误识率(False Accept Rate, FAR)又称为“认假率”或“错误接受率”(False Match Rate, FMR),其含义是指将不同的指纹误认为是相同的指纹,而加以接受的出错概率。该项指标的数值大小与系统设定的判定相似度的门限阈值呈负相关,即相似度门限阈值定得越高, FRR的值越低,其表达式如下:

$$FAR = \frac{\text{错判的指纹数目}}{\text{考察的指纹总数目}} \times 100\% \quad 5-2$$

5.2.3 等错误率

对于自动指纹识别系统而言,通过设定不同的系统判定门限阈值,就可以看到这两个指标 FRR 与 FAR 成反比关系。这很容易理解—“把关”越严,误识的可能性就越低,但是据识的可能性就越高。由于 FRR 和 FAR 是相互矛盾的,这就使得在应用系统的设计中,要权衡易用性和安全性,根据不同的用途来调整这两个值。另一种有效的方法是连续比对两个或更多的指纹,从而在不损失易用性的同时,提高系统的安全性。

为了综合评价一个民用指纹识别系统的总体性能,门限阈值与 FAR 、 FRR 的相关曲线可以引出另外一个综合性能参数指标,即“等错误率”(Equivalence Error Rate, EER)。通常我们把 FAR 与 FRR 相等时的值定义为“等错误率”,即图中 FAR 与 FRR 曲线的相交点。

EER 反应出了一个自动指纹识别系统的综合特性,不同算法的精确度性能好坏可以通过 EER 的大小来体现, EER 越低表示系统可以在同样的 FAR 条件下获得更低的 FRR 值,算法的精确度也越高。

在该实验中,我们主要比较 FAR, FRR, 来验证增强效果

5.3 指纹增强算法试验

该实验分两组进行:

第一组图片库来自 FVC2004,一共 400*8 幅图片,即 400 个手指的图片,每个手指采样 8 次。

第二组图片库为自采图片库,一共 500*12 幅图片,即 500 个手指的图片,每个手指采样 8 次。

对于 M*N 幅图片,即 M 个手指, N 次采样, 则 FRR 的比较次数为:

$$\frac{N \times (N-1) \times M}{2} \times 100\% \quad 5-3$$

FAR 的比较次数为：

$$\frac{M \times (M-1)}{2} \times 100\% \quad 5-4$$

下列试验中, FAR(t), t 代表阈值, t 为百分数, 即在总特征点中, 当有 t 个点匹配时, 认为同一个指纹。

5-1 至 5-4 各表分别给出了实验结果。

表 5-1 无增强效果的指纹识别试验结果

	FAR(60%)	FAR(70%)	FRR(60%)	FRR(70%)
FVC2004 图片库	88.12	87.47	88.67	89.50
自采图片库	91.61	88.19	89.31	93.41

表 5-2 添加背景分割算法的指纹识别试验结果

	FAR(60%)	FAR(70%)	FRR(60%)	FRR(70%)
FVC2004 图片库	79.50	74.34	74.56	75.12
自采图片库	81.46	79.52	80.62	78.34

表 5-3 传统的基于 Gabor 函数的指纹识别试验结

	FAR(60%)	FAR(70%)	FRR(60%)	FRR(70%)
FVC2004 图片库	42.61	37.68	34.62	35.91
自采图片库	47.77	45.15	45.40	47.62

表 5-4 基于小波域的 Gabor 函数的指纹识别试验结果

	FAR(60%)	FAR(70%)	FRR(60%)	FRR(70%)
FVC2004 图片库	26.52	22.31	20.56	20.89
自采图片库	40.56	37.89	38.49	40.57

表 5-5 背景分割算法和小波域 Gabor 函数增强的指纹识别试验结果

	FAR(60%)	FAR(70%)	FRR(60%)	FRR(70%)
FVC2004 图片库	19.67	16.38	14.86	16.68
自采图片库	33.78	30.45	30.56	32.66

下面我们分别对 FVC2004 图片库和自采图片库的实验结果进行分析。

图 5-2 FVC2004 指纹识别结果分析

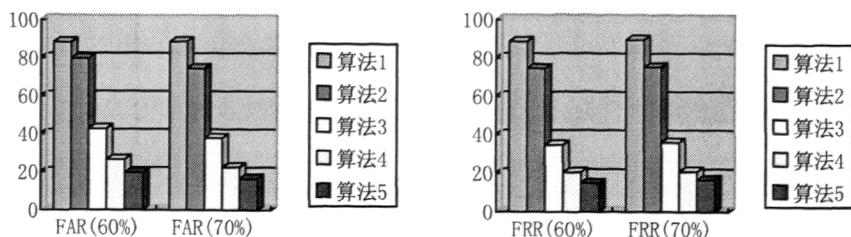
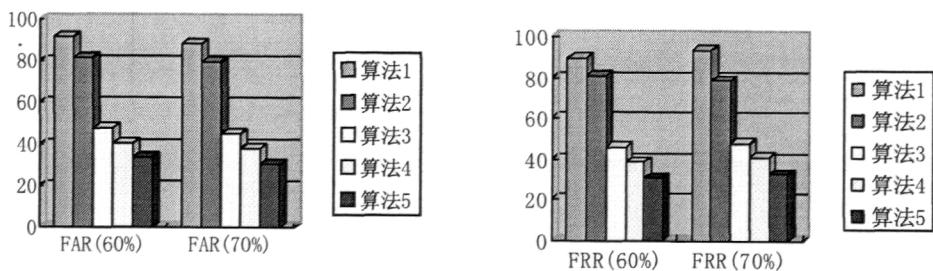


图 5-3 自采指纹识别结果分析



表中算法 1 对应无增强效果的指纹识别试验结果，算法 2 对应添加背景分割算法的指纹识别试验结果，算法 3 对应传统的基于 Gabor 函数的指纹识别试验结果，算法 4 对应 基于小波域的 Gabor 函数的指纹识别试验结果算法 5 对应背景分割算法和小波域 Gabor 函数增强的指纹识别试验结果。

我们从 fvc2004 图片库识别结果可以看出，与没有任何预处理效果相比，只填加了背景分割算法 FRR 和 FAR 都有所下降，证明本论文提出的背景分割算法有一定效果；传统的 Gabor 算法识别率为 $1-FRR=64.09\%$ ，增强效果比较差，而通过本论文算法后，在阈值为 60% 时，识别率达到 85.14%，阈值为 70% 时，识别率达到 83.32%。识别率有了明显提高。

自采图片库的识别率明显呈现同样的趋势，再一次证明了增强效果有明显提高。由于在采集过程中没有对指纹提供者做任何限制，同时提供者包括学生、儿童还有农民工，有些指纹质量很差，所以没有 FVC2004 图片库得到的识别率高。

5.4 本章小结

通过实验，可以证明背景分割算法能够提高识别率，而基于小波域的

Gabor 增强算法利用低频部分的方向图进行增强也有效的提高了识别率，且计算速度比传统的方法明显加快。

第六章 总结与展望

随着社会的日益信息化，人们的活动空间在无形中扩大，身份鉴别已经成为一个越来越重要的问题。作为历史最为悠久同时也最为成熟的指纹身份鉴别系统，在近年来也受到了人们的广泛关注。但问题远未完全解决，尤其是在指纹图像质量比较差的情况下，设计一种能够有效提取信息并使匹配的鲁棒性较高的算法是相当困难的。

6.1 总结

指纹图像分割是指纹图像预处理的一个重要部分，本文根据手指与传感器中接触区的位置差异，用左上、左下、右上、右下四个区域的灰度均值作为分割阈值，试验结果表明，该方法可以快速高效地对该种指纹图像进行轮廓分割。

针对指纹图像局部区过干或过湿的问题，提出了一种基于 Gabor 函数的小波域指纹增强算法。该算法在小波域利用低频系数图估计指纹方向，进而分别实现基于 Gabor 函数的小波域各子图增强，最终将各增强子图利用小波逆变换实现重构。

指纹图象细化后，容易产生大量的毛刺及断线。因此，在此后的细节特征点提取过程中产生大量的伪特征点，因此必须分辨出伪特征点，并加以删除。本论文根据毛刺和断线的结构特征，设计了识别算法。

通过实验得出结论：通过与国际指纹识别竞赛的结果相比较，该算法实验效果仅次于第10名的效果，在阈值为60%时，识别率达到85.34%，在阈值为70%时，识别率达到87.32%。

6.2 展望

指纹识别领域涉及许多关键技术，我们就背景分割，图像增强，伪特征点去除，及指纹识别等主要技术作了一些研究与实验。虽然提出和改进了一些关键算法，识别率有明显提高，但仍有许多不足之处。究其原因主要表现为以下几个方面：

首先，指纹前背景分割问题和方向图的计算对于后期处理至关重要，实验

表明这些方法能够有效提高特征提取的正确率。但是从实验结果来看，对于低质量纹路区域，仍然有视觉可辨的纹路结构的方向没有得到正确计算，而且有些区域并没有得到正确的分割，所以方向计算方法和分割算法还有可以改进的余地。

其次，指纹匹配方法直接影响指纹识别的性能，本书中的方法虽然在一定程度上能够解决指纹非线性形变问题，在一定程度上提高了指纹识别的性能，但仍然没有达到手工的匹配的正确率。因此方法还有待改进或提出更多新的有效的匹配算法。

最后，自动指纹识别技术涉及多方面的技术，由于时间和能力有限，现在的增强技术主要是从背景分割、方向图的正确计算、伪特征去除方面进行提高，以后还需要从其他方面来提高识别率。

参考文献

- [1] <http://www.biometricgroup.com>.
- [2] R .Clarke, Human Identification in Information Systems: Management Challenges and Public Policy Issues, *Information Technology & People*[J], vol.7,no .4, pp.6 -37 ,1994.
- [3]阮秋琦.《数字图像处理》[M] 电子工业出版社 2004
- [4] 谢杰成, 张大力, 徐文立. 小波图象去噪综述[J] 中国图象图形学报 2002.3
- [5] 田捷 杨鑫 《生物特征识别技术理论与应用》[M], 电子工业出版社 2003
- [6] Dario Maio, Davide Maltoni, Raffaele Cappelli, J .L .Wayman , Anil K .Jain, FVC2000: Fingerprint Verification Competition[J], *IEEE Transactions on PAMI*, Vo l.2 4 , N o. 3, pp .402-412, 2002
- [7] R. Cappelli, A .E rol, D .Maio, D .Maltoni, Synthetic Fingerprint Image Generation[J], Proc. 1 5th International Conference Pattern Recognition, Barcelona ,S ept.3 -8,pp .475-478,2 000.
- [8] 柴晓光, 岑宝识 《指纹识别技术》[M] 人民邮电出版社 2004
- [9]N. K. Ratha, S. Chen, A. K. Jain, Adaptive Flow Directional-Based Feature Extraction in Fingerprint Images[J]. *Pattern Recogniton*, Vol. 28, No, 11, pp. 1657-1672, 1995
- [10]Anil K. Jain, Lin Hong, Sharath Pankanti, Ruud Bolle, An Identity-Authentication System Using Fingerprint[J], *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, No. 9, 1997
- [11]Gustavo Drets, Hans Liljenstrom, Fingerprint Sub-classification and Singular Point Detection[J], *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, Vol. 12, No. 4, pp 407-422, 1998
- [12]Anil.K.Jain, Salil Prabhakar, Lin Hong, Sharath Pankanti, Filterbank-Based Fingerprint Matching[J], *IEEE Trans, On Image Processing*, Vol.9, No.5,2000.
- [13]Chih-Jen Lee,Sheng-De Wang, A Gabor Filter-Based Approach to Fingerprint

Recognition[J], IEEE Workshop on Signal Processing Systems,pp.371-378,1999

[14] M.Tico, P.Kuosmanen, J.Sarrinen, Wavelet Domain Features for Fingerprint Recognition[J], Electronics Letters, Vol.37,no.1,pp.21-22,2001
[15]Marius Tico, Ero Immonen, Pauli Ramo, Pauli Kuosmanen, J ukka Saarinen, Fingerprint Recognition Using Wavelet Features[J], Proc.IEEE Internatioinal Symposium on Circuits and Systems,Vol.2,pp.21-24.2001

[16]L.Coetzee, E.C.Botha, Fingerprint Recognition in Low Quality Images[J], Pattern Recogniton,Vol.26,pp.1441-1460,1993

[17]Roddy, Stosz, Fingerprint Features: Statistical Analysis and System Performance Estimates [J], Proceedings of the IEEE,Vol.85,No.9,1997

[18]Shlomo Greenberg, Mayer Aladjem, Daniel Kogan, Itshak Dimitrov, Fingerprint Image Enhancement using Filtering Techniquus[j], Proc.15th International Conference Pattern Recognition ,Barcelona,Sept.3-8,pp.326-329,2000

[19]Lin Hong, Yifei Wan, Anil Jain ,Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation, IEEE Trans, On Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.20,No.8,pp.777-789,1998

[20] Anil Jain, Lin Hong, Ruud Bolle, On-Line Fingerprint Verification[J],IEEE Trans, On Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.19,No.4,pp 302-313,1997

[21]C.L.Wilson,G.Candela, P.J.Grother,C.I.Watson, R.A.Wilkinso, Massively Parallel Neural Network Fingerprint Classification System[J], NIST Tech,Rep , Image Recognition Group,1993

[22]C.L .Wilson, G .T .Candela, C .L .Watson, Neural Network Fingerprint Classification [J],Journal for Artificial Neural Networks, V ol.1 ,N o.2,pp.1 -25,1994 .

[23]B.G Sherlock, D .M .Monro, D .Millard, Fingerprint Enhancement by Directional Fourier Filtering, IEEE Proc.-Vis. Image Signal Processing, Vol.141 ,N o .2, pp .8 7-94,19 94.

[24]Marius Tice, Pauli Kuomaen, A Multi-resolution Method for Singular Points Detection in Fingerprint Images[J],Proc.the IEEE Intl. Symposium on Circuits and Systems (I SCAS'9 9),V ol.4,N o.18 3-186,19 99.

- [25] L.Coetze, E.C.Botha, Preprocessing of Two-dimensional Fingerprint Images for Fingerprint Recognition[J], Proc. South African Symposium on Communications and Signal Processing(COMSIG),pp .69 - 73,19 91.
- [26] B.M .Mehtre, N .N .Murthy, S .Kapoor, Segmentation of Fingerprint Images using the Directional Image[J], Pattern Recognition, Vo 1.20 ,pp .42 9-435,19 87
- [27]B.M .M thtre, B .Chatterjee, Segmentation of Fingerprint Images-a Composite Method[J],Pattern Recognition, Vo 1.22 ,pp .38 1-385,19 89.
- [28]B.M .Mehtre,Fingerprint Image Analysis for Automatic Identification[J],Machine Vision Applications, Vo 1.6, N o.2- 3,pp .12 4-139,19 93.
- [29]B.G Sherlock, P. M .Monro, A Model for Interpreting Fingerprint Topology[J],Pattern Recognition, V ol.20 ,pp .10 47-1055,19 93.
- [30]C.I.Watson, G.T.Candela ,P.J.Grother, Comparison of FFT fingerprint filtering Methods for Neural Network Classification[J], NIST Tech..Rep.NISTIR5493,Advanced system Div, Image Recognition Group,1994
- [31]David Vernon, Automatic Detection of Secondary Crease in Fingerprints[J],Optical Engineering, Vol.32 ,No.10 ,pp .26 12-2623,1 993.
- [32]A. K. Hreichak, J. A. McHugh, Automated fingerprint recognition using structural matching[J],Pattern Recognition, Vol.23 ,pp .78 93-904,1990
- [33] W.F .Leung, W .E .Leung, W .H .Lau,A .Luk, Fingerprint Recognition using Neural Network[J],Proc. I EE Workshop Neural Network for Signal Processing, pp .226 -235, 1991.
- [34] B. Moayer, K. Fu, A Tree System Approach for Fingerprint Pattern Recognition[J],IEEE Tran. Pattern Analysis and Machine Intelligence, V ol.8 ,No .3 , pp. 37 6-388,1 986
- [35] B. D. Costello, C. A. Gunawardena, Y. M. Nadiadi, Automated Coincident Sequencing for Fingerprint Verification[J], IEEE Colloquiumon Image Processing for Biometric Measurement, Vol.3, pp .1- 5,19 94.
- [36]王德民, 胡庆生, 王庆麟, 指纹图像的预处理方法[J], 自动化学报, 第13卷, 第2期, 1987.

- [37] M.R .Verma, A .K .Majumder,B .Chatterjee, Edge Detection in fingerprint[J], Pattern Recognition, Vol.20 ,N o.5, pp .513-523,1987.
- [38] Lawrence O'Gorman, Matched Filter Design for Fingerprint Enhancement[J], Proceeding of International Conference and Signal Processing (I CASSP-88),Vo 1.2, pp .91 6-919, on Acoustics ImageSpeech,1988
- [39] L. O'Gorman, J. V. Nickerson, An Approach to Fingerprint Filter Design[J], Pattern Recognition, Vol.22,pp .29 -38,19 89.
- [40]Per-Erik Danielsson, Qin-Zhong Ye, Rotation-Invariant Operators Applied to Enhancement of Fingerprints[J], Proc.of the 9th International Conference Pattern Recognition, Vol.1, pp .329-333,19 88.
- [41]Lin Hong, Anil Jain, Sharathcha Pankanti, Ruud Belle, Fingerprint Enhancement [J], Proc. IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, Sarasota ,Fl, pp .20 2-207,D ec.19 96.
- [42]Xudong Jiang, Wei Yun Yau, Wee Ser, Minutiae Extraction by Adaptive Tracing the Gray Lvel Ridge of the Fingerprint Image, IEEE 6th International Conference on Image Processing, Kobe,Japan,19 99.
- [43]Sugata Ghosal, Nalini K. Ratha, Taghavendra Udupa, Sharath Pankanti, Hierarchical Partitioned Least Squares Filter-Bank for fingerprint Enhancement[J], Proc. 15th International Conference Pattern Recognition, Barcelona, Sept.3- 8,pp .338-341,20 00.
- [44]陈宏, 113捷, 张堂辉, 张晓鹏, “指纹图像的灰度估计增强算法” [J], 第二届身份鉴别 研讨会会议录, pp. S4 -35—pp. S2 -42, 20 010
- [45]倪林, 边肇祺, 王文渊, “一类新的知识型指纹图像非线性滤波方法” [J], 自动化学报, 第23卷, 第5期, 1997年9月。
- [46]Ahmed S. Abutaleb, M. Kamle, A Genetic Algorithm for the Estimation of Ridges in Fingerprints[J] ,IEEE Trans. On Image Processing,Vol.8 ,N o.8 ,pp .11 34 -1 13 9,19 99.
- [47]Andres Almansa, Tony Adaptation of Scale-Space Lindeberg, Fingerprint Enhancement by Shape Operators with Automatic Scale Selection[J], IEEE Transactions on Image Processing, Vol.9, N o.12 ,pp .20 27-2042,20 00.

- [48] Weickert Joachim, Coherence-Enhancing Diffusion Filtering[J], International Journal of Computer Vision, Vol.3 1,pp .111—127,19 99.
- [49]Qun Gao, Philipp Forster, Karl R. MSbus, George S. Moschytz, Fingerprint Recognition Using CNNS: Fingerprint Preprocessing[J], Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems(I SCAS2 001), Vol.2 ,pp.43 3-4 36 , 2001
- [50] Rao,C .V .K .,"On Fingerprint Pattern Recognition[J],Pattern Recognition, Vol.10, pp 15 -1 8 ,1978.
- [51] T. Ch. Malleswara Rao, Feature Extraction for Fingerprint Classification[J],Pattern Recognition, Vol.8, pp 18 1—191,1976.
- [52] A. P. Fitz, R. J. Green, "Fingerprint classification using a Hexagonal Fast Fourier Transform[J], Pattern Recognition, Vol.29 ,1587-1597,1 996
- [53] XiPing Luo, Jie Tian, Knowledge-based Fingerprint Image Enhancement[J], Proc.15th international Conference Pattern Recognition, Barcelona, Sep.3- 8,pp 783- 786, 2000.
- [54]Dario Maio, Davide Maltoni, Direct Gray-Scale Minutiae Detection in Fingerprints[J] ,IEEE Tran.On Pattern Ana. And Machine Int.,Vol.19, No.1,pp27 -40, 1997.
- [55] Bir Bhanu, Michael Boshra, Xuejun Tan, Logical Templates for Feature Extraction in Fingerprint Images[J], Proc.15th International Conference Pattern Recognition, Barcelona, Sept.3-8,pp .850-854,2000.
- [56] D. C. Douglas Hung, Enhancement and Feature Purification of Fingerprint Images[J], Pattern Recognition, Vo l.26 ,N o.11 ,pp .16 61—1671,1993.
- [57] Alessandro Farina, Zsolt M. Kovacs-Vajna, Alberto Leone, Fingerprint Minutiae Extraction from Skeletonized Binary Images[J], Pattern Recognition,Vol.3 2 , pp .8 77-889,1999.
- [58] Q.X iao,H .R aafat, Fingerprint Image Post-Processing: a Combined Statistical and Structural Approach[J],Pattern Recognition,Vo l.24 ,pp .98 5-992,19 91.
- [59] Qinghan Xiao, Hazem Raafat, Combining Statistical and Structural Information for Fingerprint Image Processing, Classification and Identification [J], Pattern Recognition: Architectures, Algorithms and Applications, World Scientific Publishing Co.,1991.

- [60] Salil Prabhakar, Anil K. Jain, Jianguo Wang, Sharath Pandanti, Ruud Bolle, Minutia Verification and Classification for Fingerprint Matching[J], Proc. 15th International Conference Pattern Recognition, Barcelona, Sept.3- 8, Vol.1, pp .25 -29 ,2 00 0 .
- [61] A. Ranade, A. Rosenfeld, Point Pattern Matching by Relaxation[J], Pattern Recognition, Vol.26 ,N o.2, pp .269-276,1993
- [62] D. Skea, I. Barrodale, R. Kuwahara, R. Poeckert, A Control Point Matching Algorithm[J], Pattern Recognition, Vol.26 ,N o.2,pp .269-276,19 93
- [63] J. P. P. Starink, E. Backer, Finding Point Correspondence Using Simulated Annealing [J], Pattern Recognition, Vol.2 8,N o.2,pp .231-240,1995.
- [64] 张立华, 徐文立, “点模式匹配” [J], 计算机学报, 第22卷, 第7期, 1999年7月。
- [65] 洪波, 荣钢, 黄韬, “一种基于遗传算法的指纹比对算法”, 清华大学学报 (自然科学版), 第41卷, 第3期, 2001年。
- [66] Xudong Jiang,Wei-Yun Yau, Fingerprint Minutiae Matching Based on the Local and Global Structures[J], Proc. 15th International Conference Pattern Recognition, pp .1038—1041,2000.
- [67] D.K .Is enor,S .GZaky, Fingerprint Identification Using Graph Matching[J], Pattern Recognition, Vol.19 ,pp .111—112,1986.
- [68] Z.Chen,C .H .K uo, A Topology-Based Matching Algorithm for Fingerprint Authentication[J], Proc. of 25th Annual IEEE International Carnahan Conference on Security Technology, pp.84 -87,1991.
- [69] Zsolt M ikl6s Kovacs-Vajna, A Fingerprint Verification System Based on Triangular Matching and Dynamic Time Warping [J], IEEE Tran. On P AMI, Vol.22 ,N o. 1 1 ,2 000.
- [70] Kuo Chin Fan, Cheng Wen Liu, YuanKai Wang, A Randomized Approach with Geometric Constraints to Fingerprint Verification[J], Pattern Recognition, Vol.33 , pp .1 7 93-1803,20 00.
- [71] Abdelmonem A. Saleh, Reza R. Adhami, Curvature-Based Matching Approach for Automatic Fingerprint Identification[J], Proc. the 33th Southeastern Symposium on System

Theory, pp .17 1-175,2001.

[72] Anil Jain, Arun Ross, Salil Prabhakar, Fingerprint Matching Using Minutiae and Texture Features[J], Proc. International Conference on Image Processing ,Greece, October7 -10, 2001

[73]A.K.Jain, Lin Hong, S.Prabhaker, Ruud Bolle. On-line identity authentication system using fingerprints. Proceedings of the IEEE,1997,85:1365-1388

[74]罗希平, 田捷, 自动指纹识别中的图像增强与细节匹配 . 软件学报 2002, 13 (5) : 946-956

致谢

本文的工作是在我的导师杨大利博士和余文博士的悉心指导和热情关怀下完成的。从课题立项到论文的开题，字里行间无不浸透着导师们的心血和汗水。在我攻读硕士学位的二年多时间里，得到两位老师无微不至的关心和帮助。老师严谨的治学作风、深邃的科学思想以及渊博的专业知识，将成为我一生的榜样。值此论文成稿之际，谨向老师衷心的感谢和敬意！

借此机会，我要深深地感谢我的父母。多年来为了我的学业，他们在精神上物质上都给了我巨大的支持，没有他们无私的支持和奉献就没有我的今天。

在研究生入学初期我还得到白中英教授的悉心指导，在他的指导下我选择一些非常有用的课程，这是我研究生阶段一个非常重要的收获，也是我能顺利完成此论文基础。

在读研究生期间特别要感谢侯凌燕老师、龙京凡和牟永明老师对我学习上的支持。

感谢同门同学邱春武两年来对我的帮助和鼓励。

在读研究生期间，我得到了廉明欢，汤立伟，秦文学，方春燕，温金超等同学的帮助和支持，在此表示感谢。

最后我衷心感谢各位尊敬的老师和前辈在百忙中抽出宝贵时间评审我的论文。

硕士期间发表论文

[1] 李艳梅, 杨大力, 余文, “基于Gabor滤波的指纹图像增强算法的优化”, 北京邮电大学学术委员会, 北京邮电大学第二届研究生学术论坛论文集, 2007. 10: 124。