



国防科技图书出版基金



指纹特征提取 与多特征识别

■ 陈芳林 周 杰 著

Fingerprint Feature Extraction
and Multi-feature Recognition



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

指纹特征提取与 多特征识别

Fingerprint Feature Extraction and
Multi - feature Recognition

陈芳林 周 杰 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

指纹特征提取与多特征识别 / 陈芳林, 周杰著. —北京: 国防工业出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-118-10966-5

I. ①指… II. ①陈… ②周… III. ①指纹鉴定 - 方法研究
IV. ①D918.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 231793 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 7¼ 字数 124 千字

2016 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 在国防科学技术领域中，学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著；密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由总装备部国防工业出版社列出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，原国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

随着通信、网络、金融技术的高速发展，信息安全显示出前所未有的重要性，人的身份识别技术的应用越来越广泛。生物识别技术是指利用生理特征（如人脸、指纹、掌纹等）或行为特征自动地识别个人身份的科学技术。指纹是最广泛使用的生理特征之一，已受到人们的重视，在安全领域的许多方面有着非常广泛的应用前景。指纹自动识别系统已成功地应用于预防身份欺诈、打击恐怖主义、刑侦和国防安全等方面。这些系统按照应用形式可分为三类：指纹验证系统、指纹辨认系统和现场指纹辨认系统。

虽然指纹包含许多特征，如方向场、密度图、奇异点和细节点等，但几乎所有传统的实际应用的指纹识别系统都是基于细节点的。研究表明，在细节点匹配的基础上，进一步利用扩展特征（即细节点之外的其他指纹特征）可以改善纯细节点匹配算法的准确性。然而，这些研究都是在理想情况下进行的（假定有足够的储存空间、足够的计算能力及充足的人力资源），没有充分考虑实际应用中的各种复杂因素。目前，国内外也鲜有系统、全面地介绍指纹在实际应用中的特征提取与多特征识别的著作。

作者在近十年的指纹识别研究工作基础上完成本书，这些工作的目的是克服实际应用中复杂因素的限制，从而将扩展特征应用到实际的指纹识别系统中，以提高系统的识别性能。本书写作的目标不是介绍指纹识别的基本原理和完整过程，而是着力于阐述指纹识别在实际应用中的新理论和新技术。本书主要由作者已公开发表的成果、博士学位论文整理而成。同时也参考了同一研究领域的他人研究论文，在此表示感谢。

本书内容组织如下：

第1章是概述，简要介绍指纹识别的研究背景、传统指纹识别方法的流程、目前研究的困难与热点问题。

第2章针对现有指纹识别系统不能处理重叠指纹的不足，提出一种分离重叠指纹的方法，该方法可以将重叠指纹较好地分离成独立的指纹，便于自动提取特征。重叠指纹主要存在于从犯罪现场提取出来的指纹；当取指器上有残存指纹时，也可能出现重叠指纹。现有指纹识别方法不能分离重叠指纹，不能成

功地完成重叠区域的脊线检测。因此,重叠指纹对目前的指纹识别算法提出了挑战。而人工地在重叠指纹上标定特征,即便是指纹专家,也是一件相当困难的事情。本章提出一种分离重叠指纹的算法,其原理是首先估计初始方向场;然后利用松弛标注的方法将初始方向场分离成两个独立的方向场;最后,利用这两个独立的方向场,对原始图像进行增强,得到两个独立的指纹。本章既用仿真数据,也用实际的现场重叠指纹数据做实验,对算法进行性能测试,实验表明,该方法可以成功地分离重叠指纹,并提高重叠指纹的识别率。

为了更充分地利用细节点信息,第3章提出了基于细节点的方向场重建及其应用的方法。传统的基于细节点的指纹识别算法,一般由两步组成,即细节点提取与细节点匹配。在细节点匹配中,输入指纹的细节点并与数据库中指纹的细节点进行比较,计算总共匹配的细节点对数。如果比对的得分高于某个阈值,则认为这两幅指纹图像来自同一手指。这种匹配算法只应用了每个细节点独自的位置和方向信息,而没有利用细节点之间的相互信息。因而,这种方法不具备充分的识别能力,尤其是在大规模的指纹辨认系统中。方向场是指纹最重要的全局特征之一,但由于一些系统只存储了细节点的模板(这些系统包括多数传统的指纹识别系统、嵌入式系统,现场指纹识别系统往往也只有人工标定的细节点),没有存储指纹原始图像,因而无法应用方向场信息。本章提出从细节点重建方向场,再将方向场应用到指纹比对中。首先从细节点重建方向场,然后将重建的方向场应用到指纹比对中,最后与细节点比对进行融合。该方法对细节点信息的利用更加充分,可以有效地提高系统的识别率。实验结果表明,将重建的方向场比对与细节点比对融合,提高了系统的识别性能。

除了细节点和方向场外,奇异点也是指纹的重要特征,可以应用于指纹分类、检索等。传统的基于 Poincaré 指数的奇异点检测方法,在图像质量较差时,容易产生虚假检测点。产生虚假检测点的原因主要有:①基于 Poincaré 指数的特征表示的仅仅是一个标量,无法提供足够的信息来检测奇异点;②许多后处理步骤仅仅考虑一个点的局部特征,难以区分真实奇异点与虚假奇异点。这些虚假奇异点通常是由于断纹、疤痕、斑点及衰老等原因产生的。在这些点附近,虚假点的局部方向信息与真实奇异点的方向信息往往没有什么区别,难以通过局部特征来区分真实奇异点与虚假奇异点。因此,将全局信息应用到奇异点的检测中变得尤为重要。

第4章提出一种新的奇异点检测方法,在用 Poincaré 指数方法检测得到初始的奇异点候选集后,使用 DORIC 特征去除大部分虚假检测的奇异点。最后,利用两类奇异点之间的数量约束关系以及方向场重建误差最小准则,选择最优的奇异点组合。该方法综合利用指纹的局部信息和全局信息,在提高奇异点正

确检测率的同时大幅降低了误检率。

指纹的特征有许多种,但大多数研究只求取其中的一种特征用于指纹识别,并与细节点识别相融合,以提高系统的性能。我们自然会问:①通过融合更多的特征,系统性能是否会进一步得到提升?②在这么多的特征中,哪些是性能最好的选择组合?③如何控制特征数增加所需的时间消耗?这些问题对于实际指纹识别系统的设计非常重要。为了分析多特征在指纹识别中的应用,第5章进行了多特征融合的比较研究,找到最优的特征组合以及组合的方式。特征越多,识别率提高,但同时所需的时间越多。在指纹验证中,这是可以接受的,因为指纹验证是1对1的比对。由于自动指纹辨认系统(AFIS)是一个1对 N (N 是数据库中指纹的数目,通常非常大)的比对过程,特征的增加引起时间消耗的增大将是难以接受的。本章进一步提出一种新的基于多特征的指纹辨认方法,通过引入分级的策略,在融合多特征的同时控制时间的消耗。由于分级结构的每级对应使用一个特征,可以排除许多不匹配的指纹,因此,该方法可以减小计算量,同时保持较高的识别率。

第6章在第5章的基础上进一步研究如何提高指纹辨认系统中细节点匹配的速度。已有许多研究者的工作旨在加快指纹辨认系统的搜索速度,例如基于分类和索引的工作,但这些方法很难避免识别精度的降低。本章提出了一种新颖的分级细节点匹配算法用于指纹识别。该方法通过把匹配过程分解成几个层次(层级),并且在不同的层次中拒绝许多不匹配的指纹或掌纹,节省了许多时间,识别率较高。实验结果显示,对比传统的方法,本章所提出的算法可以节省大约50%的搜索时间,说明了该方法的有效性。

本书是在国家自然科学基金项目(61203263、61225008、61020106004、61005023、61021063)等研究成果的基础上编写的。衷心感谢国家自然科学基金委员会和国防科技图书出版基金委员会的资助。本书总结了作者多年的研究成果,希望能够促进国内指纹识别技术等相关领域的研究,并对从事相关领域的研究人员有一定参考价值。

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2015年11月 于长沙

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 指纹识别背景介绍	1
1.2 指纹识别综述	2
1.2.1 指纹识别的基本概念	3
1.2.2 指纹识别的传统方法	4
1.2.3 传统指纹识别方法的不足和当前的研究热点	9
第 2 章 现场重叠指纹的分离与特征提取	11
2.1 引言	11
2.2 估计初始方向场	13
2.3 分离重叠方向场	15
2.3.1 松弛标注	16
2.3.2 分离算法	17
2.4 分离重叠指纹及特征提取	22
2.5 奇异点信息的应用	25
2.6 实验	27
2.6.1 仿真实验	27
2.6.2 真实现场指纹上的实验	29
2.6.3 统计实验	31
第 3 章 从细节点恢复方向场及其应用	33
3.1 引言	33
3.2 基于模型的方向场表示	33
3.2.1 零极点模型及其改进	34
3.2.2 多项式模型	35
3.2.3 组合模型	35

3.3 从细节点恢复方向场	36
3.3.1 有效区域估计	37
3.3.2 插值	37
3.3.3 用模型拟合恢复方向场	39
3.3.4 性能分析	41
3.4 恢复方向场应用于指纹识别	43
3.4.1 基于方向场的比对	43
3.4.2 方向场比对与基于细节点比对相融合	45
3.5 实验	47
3.5.1 数据库	47
3.5.2 融合算法的实验结果	48
3.5.3 与前人相关工作的比较	49
第4章 指纹奇异点检测	52
4.1 引言	52
4.2 指纹的拓扑分析	53
4.2.1 数学背景	53
4.2.2 指纹图像上的分析	55
4.3 DORIC 特征及其在去除虚假细节点上的应用	56
4.3.1 DORIC 特征	56
4.3.2 去除虚假奇异点	59
4.4 利用全局信息选择奇异点的最优组合	60
4.4.1 去除不可能的奇异点组合	61
4.4.2 选择奇异点的最优组合	62
4.5 实验	65
4.5.1 DORIC 特征的性能	65
4.5.2 与其他基于 Poincaré 指数算法的比较	66
4.5.3 与非 Poincaré 指数方法的比较	67
第5章 多特征融合与快速比对	69
5.1 引言	69
5.2 多特征指纹识别的比较研究	69
5.2.1 指纹特征介绍	70
5.2.2 融合算法	73

5.2.3 实验与分析	74
5.3 基于分级结构的指纹多特征辨认	77
5.3.1 特征的选择	77
5.3.2 算法描述	77
5.3.3 实验	82
第6章 基于分级结构的指纹快速匹配	84
6.1 引言	84
6.2 相关工作	85
6.2.1 配准	86
6.2.2 比对	86
6.2.3 比对时间分析	87
6.3 基于分级结构的指纹快速比对	87
6.3.1 分级辨认搜索算法	87
6.3.2 时间分析	88
6.4 实验	91
6.4.1 数据库	91
6.4.2 搜索到第一个满足条件即退出	91
6.4.3 全部搜索取最佳匹配	92
6.4.4 与现有方法的比较	92
参考文献	94

Table of Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Introduction of Fingerprint Recognition	1
1.2	Review of Fingerprint Recognition	2
1.2.1	The Conception of Fingerprint Recognition	3
1.2.2	The Conventional Fingerprint Recognition Method	4
1.2.3	Current Research Focus	9
Chapter 2	Separation and Feature Extraction of Overlapped Fingerprints	11
2.1	Introduction	11
2.2	Initial Orientation Estimation	13
2.3	Separation of Overlapped Orientation Fields	15
2.3.1	Relaxation Labeling	16
2.3.2	Separation Algorithm	17
2.4	Separation of Overlapped Fingerprints and Feature Extraction	22
2.5	Application of Singular Points	25
2.6	Experiments	27
2.6.1	Simulation Experiments	27
2.6.2	Experiments on Latent Fingerprints	29
2.6.3	Statistical Experiments	31
Chapter 3	Reconstructing Orientation Field from Minutiae and Its Application	33
3.1	Introduction	33
3.2	Model Based Orientation Field Representation	33
3.2.1	Zero-Pole Model and Its Improvement	34
3.2.2	Polynomial Model	35
3.2.3	Combination Model	35

3.3	Reconstructing Orientation Field from Minutiae	36
3.3.1	Effective Region Estimation	37
3.3.2	Interpolation	37
3.3.3	Reconstructing Orientation Field Based on Model Fitting	39
3.3.4	Performance Analysis	41
3.4	Reconstructed Orientation Field for Fingerprint Recognition	43
3.4.1	Matching Based on Orientation Field	43
3.4.2	Fusion of Orientation Field Matching and Minutiae Matching	45
3.5	Experiments	47
3.5.1	Database	47
3.5.2	Experiments of the Fusion Method	48
3.5.3	Comparing	49
Chapter 4	Singular Points Detection	52
4.1	Introduction	52
4.2	Topological Analysis of Fingerprints	53
4.2.1	Mathematical Background	53
4.2.2	Analysis on Fingerprint Images	55
4.3	DORIC Feature and Its Application in Removing Spurious Singular Points	56
4.3.1	DORIC Feature	56
4.3.2	Removing Spurious Singular Points	59
4.4	Singular Points Selection with Global Information	60
4.4.1	Removing Invalid Combinations	61
4.4.2	Selecting Optimal Singular Points	62
4.5	Experiments	65
4.5.1	Performance of the DORIC Feature	65
4.5.2	Comparing with Other Poincaré Index-based Methods	66
4.5.3	Comparing with Non-Poincaré Index-based Methods	67
Chapter 5	Multi-feature Recognition and Fast Matching	69
5.1	Introduction	69
5.2	Comparing Studies on Multi-feature Fingerprint Recognition	69

5.2.1	Introduction of Fingerprint Features	70
5.2.2	Fusion Algorithms	73
5.2.3	Experiments and Analysis	74
5.3	Hierarchical Algorithm for Multi-feature-based Fingerprint Identification	77
5.3.1	Feature Selection	77
5.3.2	Algorithm Description	77
5.3.3	Experiments	82
Chapter 6	Hierarchical Minutiae Matching for Fingerprint Recognition	84
6.1	Introduction	84
6.2	Related Works	85
6.2.1	Alignment	86
6.2.2	Matching Score	86
6.2.3	Matching Time Analysis	87
6.3	Fingerprint Minutiae Matching Based on Hierarchical Strategy	87
6.3.1	Hierarchical Identification Searching Algorithm	87
6.3.2	Searching Time Analysis	88
6.4	Experiments	91
6.4.1	Database	91
6.4.2	First One Searching	91
6.4.3	Full Searching	92
6.4.4	Comparing	92
References		94

第 1 章 绪 论

1.1 指纹识别背景介绍

指纹是指人的手指末端皮肤的纹理，由于它具有唯一性和永久性，因而成为广泛使用的身份鉴别特征^[1]。其中，唯一性是指世界上任何两个手指的指纹都是不同的，永久性是指一个人的指纹是终身不变的。除了以上两个优势外，指纹作为身份鉴别依据，还有不易被盗（钥匙容易被盗）、不会被忘记（密码容易被遗忘）等优点。相对于其他生物特征识别，指纹还具有容易采集（虹膜不易采集）、准确率高（人脸识别率不够高）等优点^[2]。用生理特征进行身份辨认的方法称为生物特征识别（Biometrics），其中指纹识别是应用最广泛、最可靠的个人身份认证方法^[3,4]。由于指纹具有终身不变性、唯一性和便利性，因此几乎已成为生物特征识别的代名词。

指纹识别有着较长而成果丰富的历史。20 世纪 60 年代，基于计算机的自动指纹识别系统就已面世，并开始应用于刑事侦破中。近年来，指纹自动识别从刑事应用逐渐推广到出入海关、上班考勤、门禁、银行取款、社保领取等领域^[6]，使得不需身份证件就能够方便地识别身份。美国“9·11”事件以来，各国对公共安全越来越重视，都开始大力发展指纹识别系统的应用。其中刑事侦破属于 1 对 N （ N 是数据库中指纹的数目，通常非常大）的指纹识别应用，即在不知道测试者身份 ID 时识别其身份^[7]。

随着公安部门将刑侦和出入境管理的指纹库进行联网和统一化，需要同时处理的指纹数量大幅增加，已达到数亿枚的水平，这就对指纹识别水平有了新的更高的要求。民用市场的发展也对指纹识别技术提出了高速化、更高识别率的要求，以满足各种不同应用的需求。

指纹纹线有规律的排列形成了不同的纹型。纹线的端点和分叉点称为指纹的细节点。目前，指纹自动识别系统基本都是基于细节点比对的，即通过比较不同指纹的细节点来进行识别。近年来，大量研究工作都是围绕着如何更好、更快地提取细节点和匹配细节点进行的^[4,8-13]。随着社会对指纹识别性能要求

越来越高,现有系统与方法的不足也越来越明显:一方面,由于现场指纹质量差,系统难以自动地提取细节点,特别是对于重叠指纹,现有系统无法很好地检测脊线、提取细节点;另一方面,现有方法可以满足 1 对 1 的指纹验证的需求(此时需要知道测试者的 ID 号),但对于大人群下的 1 对 N 识别的应用效果很不理想^[7]。Pankanti^[9]、Jain^[14]和 Tan^[15]等人分析了传统的基于细节点的指纹识别方法中指纹唯一性的问题,他们指出,在某些情况下,任意两枚指纹比对上 12 个细节点的概率可以达到 5.86×10^{-7} ,即约 171 万个手指中就有两枚指纹相同(匹配意义上)。因而当传统指纹识别方法应用于大人群的 1 对 N 查询和身份识别时,往往错误率较大,且实时性不能保证^[16-18]。

出现以上问题的根本原因在于:①现有系统都基于一个假设,即指纹图像都已经得到很好的分割,但是,重叠指纹在实际应用中很常见,尤其是犯罪现场指纹,经常出现多个指纹重叠在一起的情况;②一些传统的指纹系统及嵌入式系统,为节省存储空间,往往只存储细节点特征,而没有存储指纹图像,对指纹信息应用不充分;③已有的方法在求取奇异点时,大多只利用指纹局部信息,而没有利用指纹的全局信息,漏检率与错检率较高;④指纹数据库的增大使得实时的指纹比对难以实现,尤其当使用较多特征对指纹进行比对时,所需要的比对时间更多。

为解决这些问题,本书从四个方面对这些问题进行深入探讨:

(1) 分离犯罪现场中常见的重叠指纹,并提取特征进行识别。

(2) 针对只存储细节点信息的指纹识别系统(如嵌入式指纹识别系统、某些早期的指纹识别系统),研究新的指纹表达特征及这些特征的提取和匹配方法。

(3) 研究基于局部信息初检、全局信息筛选的奇异点(包括中心点和三角点)检测方法。

(4) 为了实现多特征在指纹识别中的应用,研究不同特征组合的识别精度,在此基础上建立指纹的统一特征表达模型,研究多特征指纹识别的快速比对方法,借鉴人脸快速检测中瀑布模型的思想,将指纹的多种特征进行分组,生成多个小比对器以实现指纹快速比对。

1.2 指纹识别综述

本节将对指纹识别领域进行文献综述,主要包括指纹识别的基本概念、指纹识别的传统方法及其不足、当前的研究热点。