

基于大尺度方向场描述子的指纹分类算法

朱之丹 马廷淮 梅 园

(南京信息工程大学计算机与软件学院 南京 210044)

(南京信息工程大学江苏省网络监控中心 南京 210044)

(江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044)

摘 要 指纹分类通过将指纹划分到一系列预定义类别之中以极大降低指纹匹配的工作量,是指纹识别系统中一项非常关键的技术。受 FingerCode 分类特征启发,提出了一种称为大尺度方向场描述子的新的分类特征,该特征以指纹核心点(core 点)为中心构造大尺度环形网状结构,通过抽取网状结构中节点处的方向来形成特征向量,以达到近似描述核心点周围的方向模式的目的。大量实验结果表明:相较于 FingerCode 特征,新特征在保证分类准确率的同时,由于特征提取方式更为简单、高效,分类速度也提高了近 20 倍。

关键词 指纹识别,指纹分类,方向场,奇异点,方向场描述子

中图法分类号 TP391 文献标识码 A

Fingerprint Classification Approach Based on Orientation Descriptor

ZHU Zhi-dan MA Tin-huai MEI Yuan

(School of Computer & Software, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

(Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

(Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract Fingerprint classification which is aimed to reduce the number of comparisons that are required to be performed in a large fingerprint database by classifying fingerprints into predefined classes is a significant technique of the fingerprint identification system. Inspired by existing literature, a new algorithm of fingerprint classification named as large-scale orientation field descriptor was proposed in this paper. The algorithm describes approximate orientation pattern near the core point by extracting the direction of the nodes belonging to a large-scale annular mesh structure surrounding the core point as feature vector. Because of the simple and efficient feature extraction, experiments show that comparing with FingerCode, the proposed method achieves similar classification accuracy with 20 times computation speed.

Keywords Fingerprint identification, Fingerprint classification, Orientation field, Singular point, Orientation descriptor

自动指纹识别系统由于体积小、成本低、易操作、可靠性高等优点,越来越受到人们的青睐,成为最重要的生物识别技术之一,其通常有两种工作模式:验证和识别^[1]。在验证模式下用户输入指纹并请求验证,系统确认输入指纹是否与所请求验证身份的指纹匹配。在识别模式下,用户输入指纹,系统在数据库中匹配指纹并根据匹配结果得出该用户的身份。尽管指纹验证方面已获得了令人满意的结果,但是从验证过程扩展为识别过程时不管是时间花费还是精确度都严重恶化^[2]。为解决该问题,展开了对指纹分类的研究。指纹分类通过将指纹划分到一系列预定义类别之中以极大降低指纹匹配的工作量,随着指纹库中指纹数量的日益增加,指纹分类在指纹识别系统中的作用也显得愈发关键。

指纹分类算法的分类效果主要受其所选择的分类特征影响。目前指纹分类多采用指纹的两类一级特征^[3]。(1)奇异

点信息:文献[4]通过把奇异点的数量、位置以及方向等信息作为特征对指纹进行分类,并认为该特征在一定程度上具有描述指纹拓扑结构甚至其类型的能力,文献[5]的分类算法在此基础上引入了奇异点的相关性这一新特征对奇异点的可信度进行描述,该特征主要包括滤波响应值以及在 4 尺度方向场上所定位的奇异点位置和方向上的差异;(2)方向场信息:方向场信息存在 3 种主要的特征提取方式:1)校准方向场(Registered orientation),最具代表性的工作为 PCASYS^[6],该算法计算与参考点相对方向,以减少指纹图像空间旋转对方向场的影响,并通过该方向场的水平和垂直分量对指纹进行分类;2)脊谷线结构,近年来关于该类特征的研究主要集中在虚拟脊线追踪^[7]方面,主要思路是对从奇异点起始的脊线上的方向场进行统计,根据脊线整体方向场相对垂直方向的偏移量对指纹类型进行判断;3)多方向 Gabor 滤波,最具代表

本文受国家自然科学基金(2012g094),中国博士后基金(20110491413)资助。

朱之丹(1992—),男,硕士生,主要研究方向为指纹识别、图像处理、机器学习,E-mail:zdan_zhu@163.com;马廷淮(1974—),男,博士,教授,主要研究方向为数据挖掘、数据共享、隐私保护,E-mail:thma@nuist.edu.cn;梅园(1981—),男,博士,副教授,主要研究方向为图像处理、机器学习、自动指纹识别,E-mail:chinameiyuan@126.com。

性的是文献[8]所提出的 FingerCode 特征,该特征主要通过指纹核心点区域多方向 Gabor 滤波的响应值描述出指纹奇异点附近方向场的近似模式。

上述分类特征中,FingerCode 被认为是现阶段效果最好且最具有鲁棒性的分类特征之一[9]。但由于提取 FingerCode 特征需对指纹图像进行多方向 Gabor 滤波并对其响应值进行处理,存在运算复杂度较高、时间花费较大的缺点。

受 FingerCode 分类特征启发,提出了一种称为大尺度方向场描述子的新的分类特征,该特征以指纹核心点(core 点)为中心构造大尺度环形网状结构,通过抽取网状结构中节点处的方向来形成特征向量,以达到近似描述核心点周围的方向模式的目的。大量实验结果表明:相较于 Finger Code 特征,新特征在保证分类准确率的同时,由于特征提取方式更为简单、高效,分类速度提高了近 20 倍。

1 预处理过程

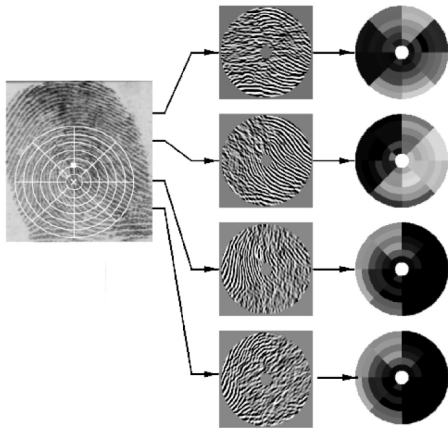
该算法所需的指纹图像预处理过程如下。

- 1) 指纹分割:参考文献[10]中的算法对原始指纹图像进行分割处理,并把指纹图像分割为前景区域(指纹区域)和背景区域[11];
- 2) 方向场计算:本文通过指纹图像局部灰度的梯度对指纹方向场进行计算[12];
- 3) 奇异点定位:本文通过复数滤波(Complex Filter)[13]对奇异点的位置及其方向进行计算。

2 特征提取及分类过程

2.1 特征提取

基于对 FingerCode 特征提取过程(见图 1)的分析可以发现:本质上,该特征是描述核心点周围的方向模式,并可以认为该区域的方向模式蕴含了指纹类型的鉴别信息,该特征的提取需进行复杂的滤波过程,存在时间花费大的问题。



以核心点向下 40pixel 为参考点构造 6 个 20pixel 宽度的环形区域,每个环形区域等分成 8 块,总共 48 块的扇形区域。对所有区域进行 4 方向 Gabor 滤波,分别计算每个扇形区域内滤波响应的方差,作为特征向量。

图 1 FingerCode 特征向量提取过程

受其启发,本特征提取的主要过程是以指纹核心点(core 点)为中心构造大尺度环形网状结构,通过抽取网状结构中节点处的方向来形成特征向量(见图 2),以达到在较少的时间花费下近似描述核心点周围的方向模式的目的。该特征具有以下特点。



X 标记核心点区域;延伸线由虚线表示;环形结构由实线表示;圆点强调了节点位置;箭头指出了该节点处方向。

图 2 在 FVC2002_DB1 指纹构建的大尺度方向场描述子

1) 大尺度环形网状结构避开了指纹邻近核心点区域以及指纹边缘处冗余的方向信息,提取的方向信息属于指纹内对指纹类型更具描述力的部分。

2) 定义大尺度环形网状结构位于背景区域或图像外的节点为无效节点,反之为有效节点。由于位于同一条参考点延伸线上的节点处的方向相对一致,因此无效节点处的方向由与其相同延伸线上距其最近的有效节点处的方向近似表示。

3) 相较 FingerCode,该特征的提取过程无需进行复杂的滤波及其响应值的处理,更加简单、高效。

提取流程如图 3 所示,具体步骤如下。

- Step 1 以核心点为中心构造 i 个半径分别为 r_i 的环形结构;
- Step 2 由参考点为起点作均匀分布的方向延伸线,其方向 θ_j 可由式(1)确定;
- Step 3 通过式(2)计算节点位置,并根据节点的位置判断该节点是否有效。若有效则执行 Step 4;否则执行 Step 5;
- Step 4 采集节点位置方向信息 $d_{i,j}$,执行 Step 6;
- Step 5 $d_{i-1,j}$ 赋值给 $d_{i,j}$,执行 Step 6;
- Step 6 通过式(3)构建特征向量;

$$\theta_j = \theta_{start} + \frac{2\pi}{num} \times (j-1) \quad (1)$$

其中, θ_{start} 表示采样的起始角度(图 2 中以水平方向作为第一条延伸线角度,即起始角度为 0), num 为参考点延伸线数量(即每个环形结构上节点数量)。

$$\begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Pr.x + r_i \times \cos(\theta_j) \\ Pr.y + r_i \times \sin(\theta_j) \end{bmatrix} \quad (2)$$

用 $\begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \end{bmatrix}$ 表示在第 i 环上第 j 点的坐标, $\begin{bmatrix} Pr.x \\ Pr.y \end{bmatrix}$ 表示参考点坐标。

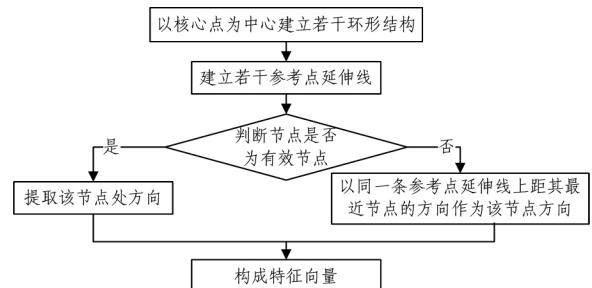


图 3 大尺度方向场描述子提取流程

2.2 分类过程

支持向量机 SVMs 是一种有坚实理论基础的样本学习方法,其最终决策函数只由少数的支持向量所确定,大大简化了分类问题。本算法以采集的 $i \times j$ 个节点的方向信息作为特征向量,通过支持向量机进行分类。若存在 k 个待分类别,则输入的特征向量 F 分别经过与每个类相对应的向量机得到 k 个输出值 $g_n(x) (n \in [1, k])$,其中最大者对应的类别即为输入特征向量所表示类别。

$$F = \begin{bmatrix} d_{1,1} & \cdots & d_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{i,1} & \cdots & d_{i,j} \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 实验

3.1 实验准备

实验所用指纹库为 FVC2002_DB1/DB2。通过两个指纹库的实验结果对本实验提出的算法的实际分类效果及其鲁棒性进行测试。DB1 与 DB2 各包含 100 个不同的手指,每个手指保存了 8 幅指纹图像。各个指纹类型的数量不论是在库内还是实际自然分布中都存在着不平衡问题^[14],其中平拱型与尖拱型指纹数量相对较少(平拱型与尖拱型的实际自然分布分别为 3.7% 和 2.9%),本实验合并这两类指纹。DB1 库内各种类指纹分布情况:右旋型 38%,左旋型 35%,涡型 25%,平拱/尖拱型 2%;DB2 库内指纹分布情况:右旋型 32%,左旋型 35%,涡型 28%,平拱/尖拱型 5%。

本实验构造具有 3 层环形以及 8 方向参考点延伸线的网状结构,同时在指纹有效节点数量小于半数 ($N < 12$) 时拒绝该指纹。本实验中每个库各选取 80% 的手指作为训练集,余下的 20% 作为测试集,保证训练集与测试集无交集,对分类结果进行统计。

3.2 实验及结果

(1) 在 DB1 中主要测试不同方向场描述子产生的分类结果。三层环形结构选取 60pixel, 80pixel, 100pixel (该半径下拒绝率为 6.55%), 测试不同类型方向场描述子的分类效果。主要调整 3 个方面。1) 起始方向, 本实验主要测试两类起始方向: ① 水平方向; ② 复数滤波获得的核心点区域主方向; 2) 方向信息, 本实验主要测试两类方向信息: ① 采样点区域方向场的值即绝对方向; ② 采样点相对于主方向的相对方向; 3) 是否离散化。本实验中离散化指的是把在某个区间的方向映射为同一个值(把 $[0, \pi]$ 等分为 18 个区间)。

分类结果如表 1 所列: 从水平位置起始, 取绝对方向且未离散化的方向场描述子具有最好的分类精度。

表 1 在 DB1 中测试不同方向场描述子产生的分类结果(三层环形结构半径为 60pixel, 80pixel, 100pixel)

方向场描述子类型			准确率 (%)
起始方向	相对方向/绝对方向	离散化	
主方向	绝对方向	×	88.10
主方向	绝对方向	√	82.71
主方向	相对方向	×	83.33
主方向	相对方向	√	78.57
水平方向	绝对方向	×	91.07
水平方向	绝对方向	√	90.48
水平方向	相对方向	×	86.90
水平方向	相对方向	√	84.52

(2) 在 DB2 中采用在 DB1 中精度最好的水平位置起始, 取绝对方向且未离散化的方向场描述子, 对环形结构半径进

行调整(拒绝率随着该结构半径变动)以适应不同尺寸的指纹图像, 并根据分类准确率对该算法的鲁棒性进行分析。分类结果如表 2 所列: 在半径取 60pixel, 90pixel, 120pixel 时, 在 DB2 上获得了最佳的分类精度。

表 2 在 DB2 中测试在不同采样半径产生的分类结果, 提取水平方向起始采取未离散化绝对方向的方向场描述子

采样半径选取	准确率 (%)	拒绝率 (%)
60 80 100	83.96	13.69
60 90 120	85.12	14.29
70 95 120	79.16	16.07
70 90 110	79.16	15.48
60 85 110	83.93	14.29
80 100 120	85.12	16.67

(3) 表 3 对比了基于 FingerCode 与本文所提算法在 FVC2002 中的分类效果。可见相较于 FingerCode, 该算法在保证分类准确率的同时, 提高了近 20 倍的分类速度。

表 3 本文算法与基于 FC(FingerCode) 的指纹分类算法的分类效果对比

指纹库	正确率 (%)		时间花费 (s)	
	FC	本文算法	FC	本文算法
DB1	88.38	91.07	2.779	0.173
DB2	86.28	85.71	2.564	0.139

3.3 实验分析

实验(1)中由于该特征所采用的网状结构节点并非连续的, 无法准确描述主方向起始以及离散化之后更加抽象的方向场下核心点周围区域方向场的变化规律。为消除方向场的歧义, 通常情况下采用取值范围为 $[0, \pi]$ 的方向场, 该取值在一定程度上模糊了相对方向下左旋型与右旋型的模式。

在 DB2 的指纹图像中 60pixel, 90pixel, 120pixel 半径的环形网状结构最能满足既覆盖核心点周围大部分前景区域又避开指纹核心点区域以及指纹边缘的要求, 故取得最佳的分类效果。

实验(3)表明相较 FingerCode, 该特征的提取过程无需进行复杂的滤波及其响应值的处理, 更加简单、高效。

结束语 该算法首次通过提取大尺度方向场描述子作为特征向量对指纹核心点附近方向场的近似模式进行描述。表 1 与表 2 表明该特征对指纹的类型具有描述能力, 但鲁棒性不足。该算法的特征提取方式简单和高效, 相较 FingerCode, 该算法无需复杂的多方向 Gabor 滤波过程, 在时间花费上具有优势, 表 3 表明本文算法提高了近 20 倍的分类速度。该算法误分类多发生于涡型和经旋转的指纹, 这些指纹具有描述力的部分极易被忽略的缺点, 加之大尺度方向场描述子特征的不连续性, 导致分类信息不完整。本文拟将此作为日后研究的重点。对低质量指纹进行增强处理^[15], 对特征提取方法进行改进或将该算法与其他指纹分类算法进行混合, 或采用其他分类器^[16], 以获得更好的鲁棒性和分类精度。

参考文献

- [1] Maltoni D, Maio D, Jain A, et al. Handbook of Fingerprint Recognition[M]. Springer-Verlag Inc., New York, 2009
- [2] Liu M, Jiang X D, Kot A C. Efficient fingerprint search based on database clustering[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(6): 1793-1803
- [3] Feng J, Jain A K. Fingerprint reconstruction: from minutiae to

- phase[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2011, 33(2): 209-223
- [4] Hong J H, Min J K, Cho U K, et al. Fingerprint classification using one-vs-all support vector machines dynamically ordered with Naive Bayes classifiers[J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(2): 662-671
- [5] Liu M. Fingerprint classification based on adaboost learning from singularity features[J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(3): 1062-1070
- [6] Cappelli R, Lumini A, Maio D, et al. Fingerprint classification by bidirectional image partitioning[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1999, 21(5): 402-421
- [7] Jung H W, Lee J H. Noisy and incomplete fingerprint classification using local ridge distribution models[J]. *Pattern Recognition*, 2015, 48(2): 473-484
- [8] Jain A K, Prabhakar S, Hong L. A multichannel approach to fingerprint classification[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1999, 21(4): 348-359
- [9] Galar M, et al. A survey of fingerprint classification Part II: Experimental analysis and ensemble proposal[J]. *Original Research Article Knowledge-Based Systems*, 2015, 81: 98-116
- [10] Peralta D, Galar M, Triguero I, et al. Minutiae filtering to improve both efficacy and efficiency of fingerprint matching algorithms[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2014, 32(32): 37-53
- [11] Chen Xin-jian, Tian Jie, Cheng Jian-gang, et al. Segmentation of fingerprint images using linear classifier[J]. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2004, 4: 480-494
- [12] Bazen A M, Gerez S H. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 905-919
- [13] Thai H L, Hoang T V. Fingerprint reference point detection for image retrieval based on symmetry and variation[J]. *Original Research Article Pattern Recognition*, 2012, 45(9): 3360-3372
- [14] Wang S, Yao X. Multiclass imbalance problems: analysis and potential solutions[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B*, 2012, 42(4): 1119-1130
- [15] Mei Y, Zhao B, Zhou Y, et al. Orthogonal curved-line Gabor filter for fast fingerprint enhancement[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(3): 175-177
- [16] Sáez J A, Galar M, Luengo J, et al. Analyzing the presence of noise in multi-class problems: alleviating its influence with the one-vs-one decomposition[J]. *Knowledge & Information Systems*, 2014, 38(1): 179-206

(上接第 143 页)

3 实验结果与分析

从图 15 的实验结果可以看出, 本文算法能够获取完整的子光圈图像, 证明本文数据处理算法对处理微透镜型光场相机中的数据有效可行, 但处理后的图像有一道偏暗区域, 有可能是光场相机中 LFR 文件中编码方式未充分理解, 导致文件中给出的一些解码校正参数未充分利用。

结束语 本文全面系统地介绍了基于微透镜型光场成像系统的光场数据处理方法, 完成了从 Lytro Illum 光场相机中提取和解码光场数据, 并进行处理获取标准四维光场图像矩阵和子光圈图像矩阵的过程, 为光场成像技术的研究和应用奠定了基础。但本文算法获取的子光圈图像总会有部分偏暗区域, 因此后续工作将提出一套更准确可靠的算法来提取光场子光圈图像。

参 考 文 献

- [1] Ng R, Levoy M, Bredif M, et al. Light field photography with a handheld plenoptic camera, computer science technical report CSTR[R]. Palo Alto: Stanford University, 2005
- [2] Levoy M. Light fields and computational imaging[J]. *Computer*, 2006, 39(8): 46-55
- [3] Zhou Yan, Guo Hui-wen, Liang Guo-yuan, et al. 3D Reconstruction Based on Light Field Information[C]// *IEEE International Conference on Information and Automation*. 2015: 976-981
- [4] Huang Yu-sheng, Xia Jun, Yin Han-chun. Three-dimensional scene reconstruction by using lenslet array model in computational integral imaging[C]// *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2009, 7513: 75131E
- [5] Tao M W, Hadap S, Malik J, et al. Depth from Combining Defocus and Correspondence Using Light Field Cameras[C]// *IEEE International Conference on Computer Vision*. 2013: 673-680
- [6] Bishop T E, Favaro P. Full-Resolution Depth Map Estimation from an Aliased Plenoptic Light Field[M]// *Computer Vision - ACCV 2010*. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 186-200
- [7] Ng R. Fourier slice photography [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 735-744
- [8] Zhou Zhi-liang, Yuan Yan, Xiang Li-bin. Computer simulation for digital refocusing imager based on light field photography[C]// *International Symposium on Photoelectronic Detection & Imaging*. 2009
- [9] 聂云峰, 相里斌, 周志良. 光场成像技术进展[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2011, 28(5): 563-571
- [10] Vaish V, Wilburn B, Joshi N, et al. Using plane + parallax for calibrating dense camera arrays[C]// *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2004
- [11] Levin A, Fergus R, Durand F, et al. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 70-75
- [12] Adelson E H, Wang J Y A. Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 99-106
- [13] Georgiev T, Zhan Yu, Lumsdaine A, et al. Lytro camera technology: theory, algorithms, performance analysis[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2013, 8667(15)
- [14] 阮龙. 基于微透镜型光场成像数据获取及深度信息提取研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014
- [15] 高珍. 光场相机的数据处理和标定方法研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2014
- [16] 周文晖, 林丽莉. Lytro 相机的光场图像校正与重对焦方法[J]. *中国图像图形学报*, 2014, 19(7): 1006-1011
- [17] Dansereau D G, Pizarro O, Williams S B, et al. Decoding, Calibration and Rectification for Lenslet-Based Plenoptic Cameras[C]// *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013