

一种用于指纹方向场估计的网格插值模型

王红法¹⁾ 王曙光²⁾ 樊玲玲¹⁾ 郭田德¹⁾

¹⁾(中国科学院研究生院数学科学学院,北京 100049) ²⁾(中国科学院自动化研究所,北京 100080)

摘要 指纹方向场的估计是指纹识别预处理算法中的重要环节,对算法识别效率起到关键作用。本文提出了一种网格插值模型,该模型以指纹奇异点为中心,将指纹平面做网格划分,利用插值算法建立了方向场与指纹奇异点之间的非线性关系。模型中利用了指纹的全局信息来调整网格点的值,使得它与传统的基于局部信息的方向场算法有本质的区别。在 FVC2002 和 FVC2004 指纹数据库上的实验结果表明,该模型比传统算法具有更高的准确性和鲁棒性,同时对于低质量的指纹图像,仍然能够给出很好的方向场估计。

关键词 指纹识别 方向场 指纹分析 奇异点 指纹模型

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)03-0422-08

A Grid-Interpolation Model for Orientation Field Estimation in Fingerprint Images

WANG Hong-fa¹⁾, WANG Shu-guang²⁾, FAN Lin-lin¹⁾, GUO Tian-de¹⁾

¹⁾(School of Mathematical Sciences Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

²⁾(Institute of Automation of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Orientation field estimation is an essential preprocessing step and it is crucial for the efficiency of the fingerprint recognition algorithm. In this paper, we propose a Grid-Interpolation Model. It partitions the fingerprint plane around singular points with discrete grids, and builds the nonlinear relationship between orientation field and singular points. The orientation of grid points is adjusted by global information of the fingerprint, which is much different from the conventional method. Two experiments are carried out on FVC2002 and FVC2004 databases and the results indicate that the proposed model can reduce noise more efficiently and has more robust performance than the conventional method. Especially as for fingerprints with bad quality, it also can give satisfactory estimation.

Keywords fingerprint recognition, orientation field, fingerprint analysis, singular points, fingerprint model

1 引言

指纹由于其唯一性,终身不变性一直以来都作为最重要的生物特征之一^[1-3]。特别是近些年来,自动指纹识别系统(AFIS)在社会生活中的许多方面都得到了广泛应用,如罪犯追踪,社会安保,进出口控制,电子商务等^[4]。目前对于 AFIS 的研究主要在于 3 个方面,即图像增强,指纹分类和细节点匹

配^[5]。这 3 个方面的研究都要用到指纹的一个最基本而又十分重要的特征——方向场。准确、可靠的计算指纹方向场,对 AFIS 具有重要的意义。

作为指纹的全局特征,方向场描述了指纹最基本的形态结构。在指纹大部分区域,方向都近似平行,但是在某些特殊区域方向场变化剧烈^[6],这是由于指纹上存在着奇异点造成的。指纹的奇异点有两类,一类叫做三角点(delta 点),另一类叫做中心点(core 点),如图 1 所示。

收稿日期:2007-05-30;改回日期:2007-11-01

第一作者简介:王红法(1981 ~),男,中国科学院研究生院数学科学学院硕士研究生。主要研究方向为模式识别、优化算法。E-mail: hongfawang@gmail.com



○中心点 △三角点

图1 指纹的奇异点

Fig. 1 Singular points of fingerprint

目前已经有众多学者对方向场的计算提出了各种不同的算法,如基于梯度的算法^[6-9],基于方向模板的算法^[10-11],Jain等人则提出了一种基于滤波器组的算法^[12-13]。直接基于梯度的算法虽然能够给出连续的方向估计,但是对噪声比较敏感。为了克服这个缺点,文献[6]~[9]利用最小二乘法,主方向分析等方法对此做了改进,改进后的算法效果有了明显的提高。基于方向模板的算法则是预先给定一组方向模板,然后计算指纹纹线与哪个方向最为相近,其原则就是沿纹线方向指纹灰度值变化最小,而沿法线方向则为最大。而基于滤波器组的算法是针对给定的一组方向滤波器,计算相应的滤波响应来确定纹线的方向。尽管后面两种算法对噪声比较鲁棒,但是它们只能得到离散的若干方向,因而方向的准确性不高。除此之外,还有些其他算法,如基于高频能量分析^[14]等。

但是所有的这些工作都有一个重大的缺陷,那就是它们都只是利用了指纹的局部信息。对于一些低质量的指纹图像,例如图像中存在伤疤,皱褶或大面积玷污等,由于局部信息的缺失使得这些方法很难准确有效地计算出指纹方向场。Sherlock和Monro^[15]基于指纹奇异点提出了一种称之为零-极点模型(zero-pole model)的计算方法模拟指纹方向。该模型的一个重要意义在于它提供了一种全局化描述指纹方向场的方法。为了提高该模型的准确性,Vizcays和Gerhardt^[16]提出了一种分段线性模型,该模型的一个重大缺陷在于它没有考虑指纹区域上点到奇异点之间的距离因素。而周杰等人^[17-18]则提

出了一种多项式和点电荷相结合的改进模型,该模型在奇异点附近利用点电荷模型来模拟方向场,而在远离奇异点的区域则采用了多项式模型平滑方向场,它将奇异点的作用范围限制在了局部邻域中。

本文在零-极点模型的基础上,提出了一种网格插值模型用以计算指纹的方向场。该模型能够更加准确,鲁棒地描述和计算指纹方向场。另外,它对于指纹压缩,方向场的存储,以及人造指纹^[19-20]都有积极的意义。

2 零-极点模型及其修正

Kass等人^[7]指出,指纹奇异点决定了方向场的拓扑结构,最常用的一种检测奇异点的方法是利用Poincare index^[10]。指纹图像上任意一点的Poincare index是指在沿围绕该点的任意一条封闭曲线逆时针旋转一周方向场改变量的总和。假设 O 是指纹方向场, (x, y) 是指纹上的任意一点,那么 (x, y) 点的Poincare index可以用如下数学公式表示:

$$Pin(x, y) = \lim_{r \rightarrow 0^+} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\partial}{\partial \theta} O(x + r \cos \theta, y + r \sin \theta) d\theta \quad (1)$$

式中, r 为半径, θ 为辐角。

特别地,指纹图像Poincare index的取值有如下特性:

$$Pin(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{2} & (x, y) \text{ 为中心点} \\ -\frac{1}{2} & (x, y) \text{ 为三角点} \\ 0 & \text{其他点} \end{cases} \quad (2)$$

正是上面这一奇特性,使得Poincare index广泛应用于指纹奇异点的检测。

通过对奇异点周围指纹方向的研究,Sherlock和Monro^[15]建立了一个模型来描述指纹的方向场结构。在该模型中,他们将指纹图像看作是一个复平面,并将指纹图像的纹线方向看作是复函数 $p(z)$ 的辐角 $O(z)$ 。 $p(z)$ 、 $O(z)$ 通过下面的数学表达式给出:

$$p(z) = \sqrt{\exp(2jO_0) \cdot \frac{(z - z_{c_1})(z - z_{c_2}) \cdots (z - z_{c_m})}{(z - z_{d_1})(z - z_{d_2}) \cdots (z - z_{d_n})}} \quad (3)$$

$$O(z) = (\arg(p(z))) \bmod \pi \quad (4)$$

式中, z_{c_m}, z_{d_n} 分别为指纹的第 m 个中心点和第 n 个三角点, O_0 为一常数值, 通常为背景方向。

从式(3)可以看出, 指纹的中心点和三角点恰好分别就是该式的零点和极点, 这也正是零-极点这一命名的由来。另外根据复分析的知识, 易知式(4)与下式等价。

$$O(z) = \left[O_0 + \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^m \arg(z - z_{c_i}) - \sum_{j=1}^n \arg(z - z_{d_j}) \right) \right] \bmod \pi \quad (5)$$

从上式可以看出, 中心点 z_{c_i} 对方向场的影响为 $\frac{1}{2} \times$

$\arg(z - z_{c_i})$, 而三角点 z_{d_j} 的影响为 $-\frac{1}{2} \times \arg(z - z_{d_j})$ 。

零-极点模型描述了指纹方向场的拓扑结构, 可以看作是一种理想的方向场。因此, 理想的方向场仅取决于中心点和三角点的个数和位置。根据此模型, 标准的中心点和三角点的周围的方向场应为图 2 所示。但是理想的方向场往往与实际的指纹方向场有较大的差异, 因此有不少文献^[16-18] 都对该理想模型做了一些有意义的修正。

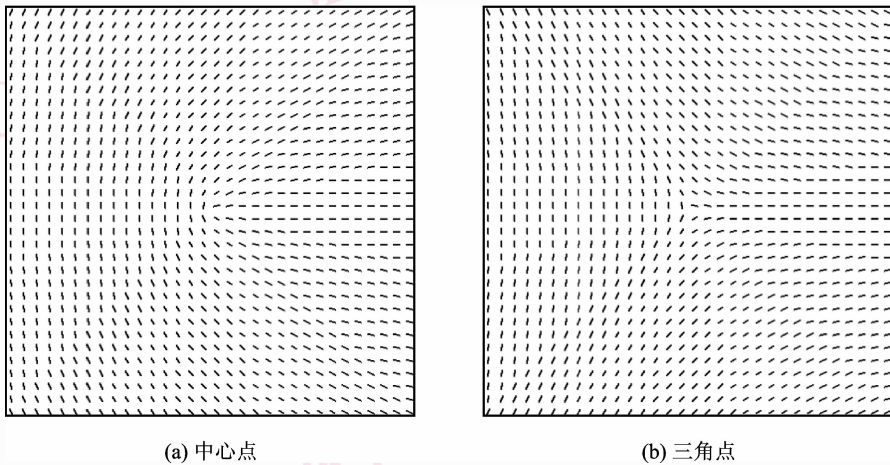


图 2 零-极点模型中奇异点周围的方向场

Fig. 2 Orientation field near the singular points determined by Zero-pole Model

3 网格插值模型

提出了一种新的指纹方向场计算模型, 主要分 2 步介绍, 第 1 部分为分析与建模, 第 2 部分为模型求解。

3.1 分析与建模

为了分析清楚各个奇异点对方向场的影响, 不妨先考虑单个奇异点(以一个中心点为例)。将指纹平面看作是一个复平面 Z , 原点为指纹的中心点 z_c , 那么复平面上任意一点 z 都可以表示为如下形式:

$$z - z_c = r \cdot e^{i\theta} \quad (6)$$

式中, r 和 θ 分别表示半径和辐角。

不论是在零-极点模型^[15] 还是在其修正模型^[16] 中, 奇异点对方向的影响都仅和辐角有关系,

这显然不是很合理。事实上, 指纹图像上任意一点的方向不仅与它和奇异点所成的角度有关系, 而且与它到奇异点的距离也有关系。本文中把距离这一重要因素加以考虑, 构造了另外一种新的更加符合实际指纹方向场的模型。将奇异点 z_k 的作用改为不仅是幅角 θ 的函数, 同时也是半径 r 的函数(以下统称方向作用函数), 即

$$g_k(z - z_k) = g_k(r, \theta) \quad (7)$$

那么指纹平面上任意一点的方向场可以表示为

$$O(z) = \left[O_0 + \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^m g_{c_i}(Z - Z_{c_i}) - \sum_{j=1}^n g_{d_j}(Z - Z_{d_j}) \right) \right] \bmod \pi \quad (8)$$

根据指纹方向场的实际情况, 可以做如下假设:

- (1) 光滑性: 在 (r, θ) 平面上, $g_k(r, \theta)$ 是一个相当光滑的函数。

$$(2) \text{ 相容性: } \int_{\Gamma} dg_k(r, \theta) = 2\pi$$

式中, Γ 为任一条环绕中心点的闭曲线, 该假设保证了在中心点处的 Poincare index 为 $\frac{1}{2}$. 容易看出, 该假设和下面的假设(2')是等价的。

$$(2') g_k(r, \theta + 2\pi) = g_k(r, \theta) + 2\pi$$

$$(3) \text{ 单调性: } \frac{\partial g_k(r, \theta)}{\partial \theta} \geq 0$$

这一假设一方面要求奇异点的方向作用函数是关于幅角单调增的, 另一方面也是为了减少模型中参数的自由度, 提高模型求解的稳定性。

一般而言, 指纹图像上有多个奇异点。不同奇异点如 z_{c_i}, z_{d_j} 对方向场的影响并不完全相同, 因此有必要为它们各自构造相应的方向作用函数 $g_{c_i}(r, \theta), g_{d_j}(r, \theta)$ 。另外在 Galton-Henry 分类规则^[21-22]下平弓纹是不存在奇异点的, 但是在本文中, 认为平弓纹具有一对距离很近的奇异点(中心点和三角点), 它们对于方向场的影响相互抵消。

下面分析函数 $g_k(r, \theta)$ 的函数表示式。首先将整个复平面按径向和切向划分为各个网格区域, 也就是将半径 r 离散化为 r_0, r_1, \dots, r_p , 将幅角 θ 离散化为 $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_q, \theta_{q+1}$, 其中 $\theta_{q+1} = \theta_0 + 2\pi$ 。上述分划可以用几何图形(图3)直观地表示出来。

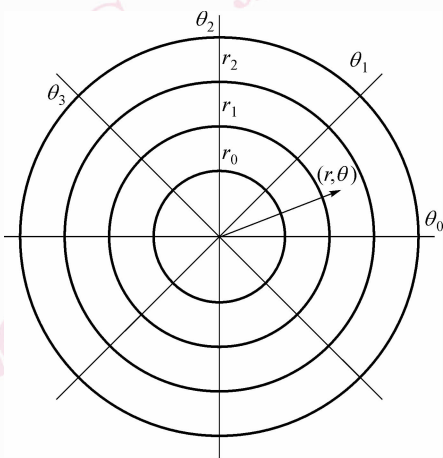


图3 网格划分的几何表示

Fig.3 Geometrical interpretation to partition the area around singular point with discrete grids

每个网格点的坐标可以表示为 (r_i, θ_j) , 相应的值为可调节的参数 $g_k(r_i, \theta_j)$, 记为矩阵 C

$$C = \begin{bmatrix} c_{00} & \cdots & c_{0q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{p0} & \cdots & c_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_k(r_0, \theta_0) & \cdots & g_k(r_0, \theta_q) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_k(r_p, \theta_0) & \cdots & g_k(r_p, \theta_q) \end{bmatrix}$$

现在的问题是如何根据交叉点处函数值 $g_k(r_i, \theta_j)$, $i = 0, 1, \dots, p; j = 0, 1, \dots, q$ 来确定网格平面上任意一点 (r, θ) 的函数值 $g_k(r, \theta)$ 。

考虑 $\theta \in [\theta_j, \theta_{j+1})$,

(1) 如果 $0 < r < r_0$, 则与该点相邻的网格点只有两个: $(r_0, \theta_j), (r_0, \theta_{j+1})$, 于是可以利用这两点函数值的线性插值来表示该点函数值。

(2) 如果 $r > r_p$, 可以和(1)类似利用 $g_k(r_p, \theta_j)$ 和 $g_k(r_p, \theta_{j+1})$ 线性插值来获得。

(3) 当 $r_0 \leq r_i < r < r_{i+1} \leq r_p$, 与上面两种情况不同的是该点周围有四个相邻网格点: $(r_i, \theta_j), (r_i, \theta_{j+1}), (r_{i+1}, \theta_j), (r_{i+1}, \theta_{j+1})$ 。因此可以采用双线性插值来得到 $g_k(r, \theta)$ 。

上面的分析都是针对一个中心点进行的, 但是很显然同样的分析也适合于三角点。

3.2 模型求解

本文的最终目的是要能够计算出准确的指纹方向场。而通过前面的分析, 指纹各个点的方向已经能够用网格点的参数来表示了。也就是说如果能够求出网格点处的参数值, 就可以计算指纹上任意点的方向。为此可以极小化如下误差函数:

$$\min \langle O_e \rangle = \min \int_Z (O_m(z) - O_f(z))^2 dz \quad (9)$$

式中, $O_m(z)$ 为网格插值模型计算出的方向场, $O_f(z)$ 为真实指纹的方向场。目标函数中的变量为指纹上所有奇异点对应的一组网格点值:

$$\left\{ c_{ij}^k \mid i = 0, 1, \dots, p; j = 0, 1, \dots, q; k = 1, 2, \dots, m \right\} \\ \left\{ d_{ij}^l \mid i = 0, 1, \dots, p; j = 0, 1, \dots, q; l = 1, 2, \dots, n \right\}$$

式中, c_{ij}^k, d_{ij}^l 分别表示第 k 个中心点和第 l 个三角点对应复平面中网格点 (r_i, θ_j) 的参数值。而且从第3.1节的分析中不难看出 O_e 关于变量 c_{ij}^k 的偏导数 $\frac{\partial O_e}{\partial c_{ij}^k}$ 仅在相应的4个周边网格邻域 $S_{ij}^1, S_{ij}^2, S_{ij}^3, S_{ij}^4$ 中才非零, 如图4所示。这对于减少计算量具有重要的意义。最后通过最速下降法(一种最基本的优化算法)可以求出参数值, 从而就可以利用这些参数值来计算指纹平面上任意一点处的指纹方向。

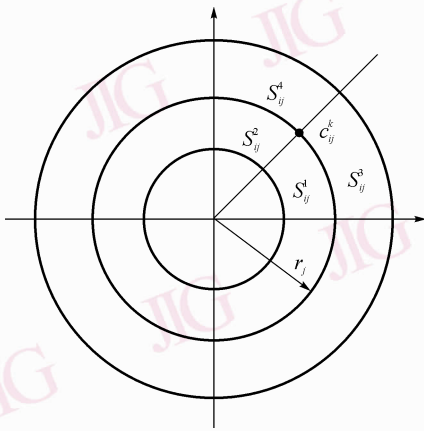


图 4 网格点作用区域示意图

Fig. 4 Geometrical interpretation for the effect neighborhoods of the grid point

4 实验结果

一个实用的指纹方向场算法,应该在指纹质量较好的情况下能够给出精确的方向场估计,同时对于低质量的指纹图像,也能够给出较好的方向场估计,也就是算法应该具有较强的鲁棒性。目前大多数的方向场算法只能做到第 1 点,而在鲁棒性方面却效果不佳。因此从算法精度和算法鲁棒性 2 个方面对本文的算法进行评价是比较合理的。本文设计了 2 个实验,第 1 个实验是在一个高质量指纹图像数据库上进行,目的就是检验本文算法能不能计算出准确的方向场;第 2 个实验则在一个质量很差的指纹数据库上进行,目的在于测试本文算法能不能对噪声有较高的鲁棒性。而且我们特意选择了各种不同类型的指纹做实验,如平弓、帐弓、旋、斗等。

4.1 精度测试

FVC2002^[23] 提供了 4 个数据库 (DB1 ~ DB4), 每个数据库中包含了 880 枚指纹 (110 个指头, 每指头采集了 8 枚指纹)。其中 DB1 中指纹是通过光学设备采集而来, 每幅指纹图像大小为 388×374 像素, 分辨率为 500 dpi。从中选了 40 幅质量较好的指纹图像来进行算法测试。

在这个试验中将幅角均匀地分成 8 份 (也就是每份 45°), 而半径则按照 48 像素宽度进行划分。为了衡量算法得出的方向场是否准确, 必须知道指纹的真实方向场。为了避免人工标定的繁琐工作, 同时由于我们测试选用的指纹质量都比较好, 因此可以利用基于梯度的方向场算法^[8]得到的方向场可以作为真实方向场的近似。我们将网格插值算法和零-极点模

型^[15] 以及其改进模型^[16] 做了比较, 分别统计了各算法计算出的方向场与真实方向场之间的平均误差和标准方差。表 1 中给出了 3 种算法的实验结果统计, 图 5 中给出了 3 种算法的一个实验实例。

表 1 算法的平均误差和标准偏差 (度)

Tab. 1 Mean or orientation error and standard deviation ($^\circ$)

模型	平均误差	标准偏差
零-极点模型 ^[15]	20.588	6.131
零-极点模型的改进算法 ^[16]	4.645	0.998
网格插值模型	2.325	0.597

从表 1 可以看出, 提出的网格插值模型估计的平均方向误差为 2.325° , 标准方差为 0.597° , 这个结果要明显优于另外的 2 个模型。图 5 表明, 零-极点模型估计的方向 (图 5 (b)) 与真实方向有较大偏差, 改进算法^[16] 的效果 (图 5 (c)) 比零-极点模型有很好的改善, 但是在不少区域计算出的方向场仍然与真实的指纹方向场差别较大。而提出的网格插值模型估计的方向 (图 5 (d)) 在整个指纹平面上都与真实方向拟合的比较理想。

4.2 鲁棒性测试

许多计算方向场的传统方法都是基于局部梯度方向, 因此它们很容易受到噪声的影响, 特别是对于低质量的图像, 用这些方法很难给出准确的指纹方向场。但是提出的网格插值模型是基于全局信息的, 因此具有很强的鲁棒性。

FVC2004^[24] 提供的指纹数据库中很多指纹的质量很差, 其中 DB1 和 DB2 中指纹是通过光学设备采集而来, 大小分别为 640×480 像素和 328×364 像素, 分辨率都为 500 dpi。图 6 是从这两个数据库中选取的几幅具有代表意义的指纹图像。这些图像有的纹线之间相互粘连 (图 6 (a), 图 6 (b), 图 6 (d)), 有的大面积区域玷污 (图 6 (e)), 甚至还有些区域没有提取到指纹图像 (图 6 (c))。而且这些指纹图像包含了各种的纹型, 如弓、旋、斗等。图 7 和图 8 是分别利用基于梯度的方向场算法^[8] 和提出的网格插值模型计算的实验结果。从实验结果很明显的看出, 本文模型对于这些低质量的指纹图像仍然能够给出很好的方向场估计, 比起文献^[8] 有极大地提高。特别对于像图 6 (e), 图 6 (c) 等图像上有大面积玷污或空白的区域, 传统的基于局部信息的算法根本无法计算方向场, 但是本文算法能够根据全局的方向信息来预测这些区域的方向信息, 给出准确的方向场估计。

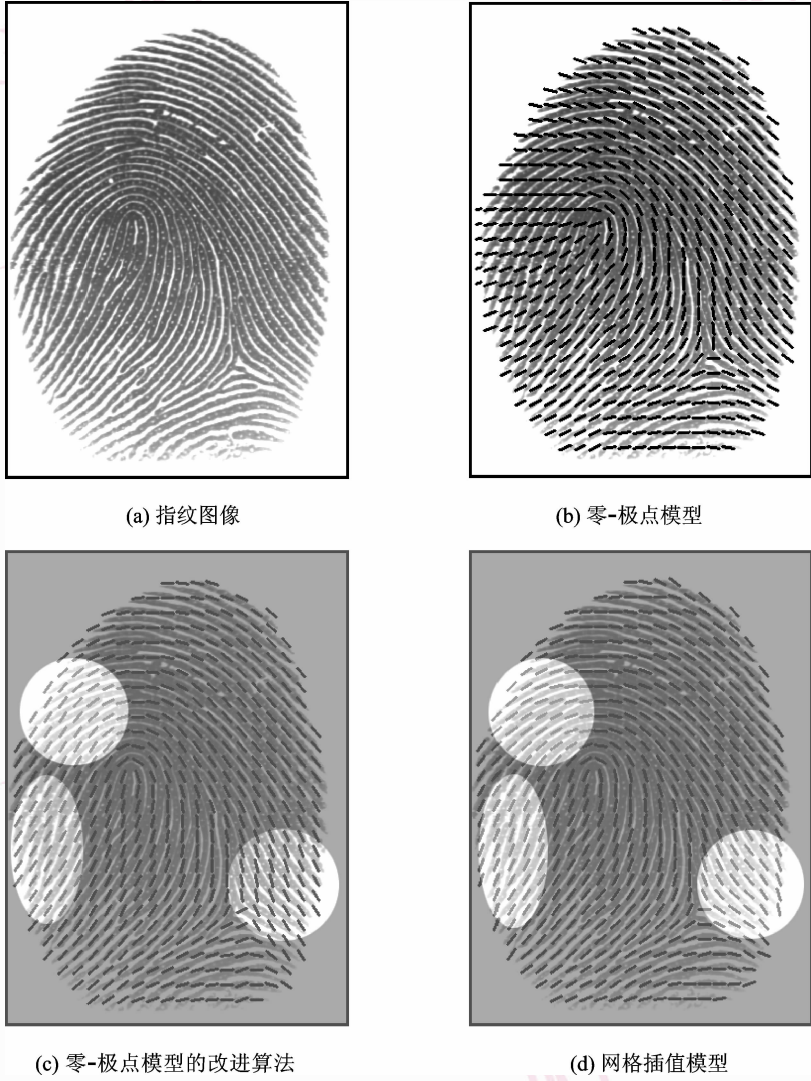


图5 3种算法计算出的指纹方向场比较

Fig. 5 A comparison about the orientation field estimated through three models

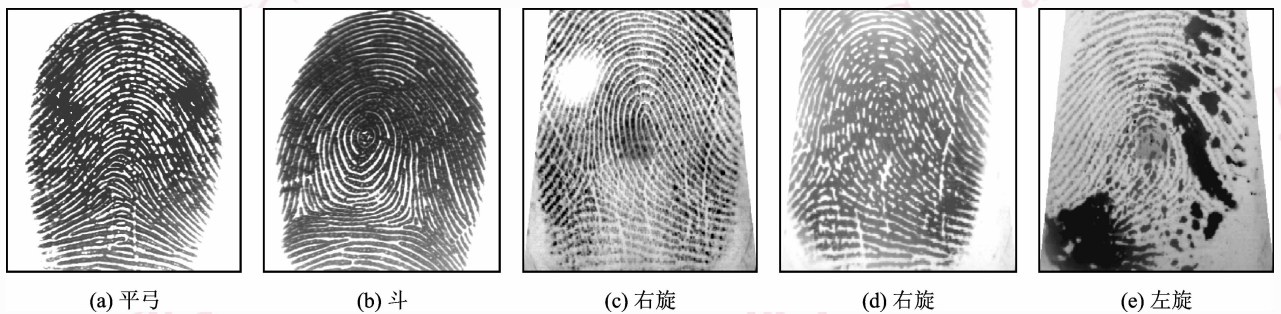


图6 实验中的一些低质量指纹图像

Fig. 6 Some fingerprints with low quality in the experiment

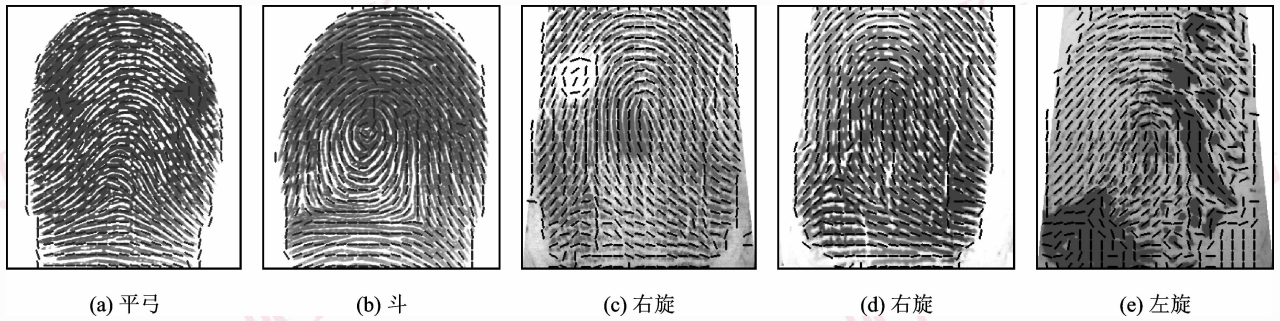


图 7 基于梯度的方向场算法计算出的方向场

Fig. 7 Orientation estimation using algorithm based on gradient

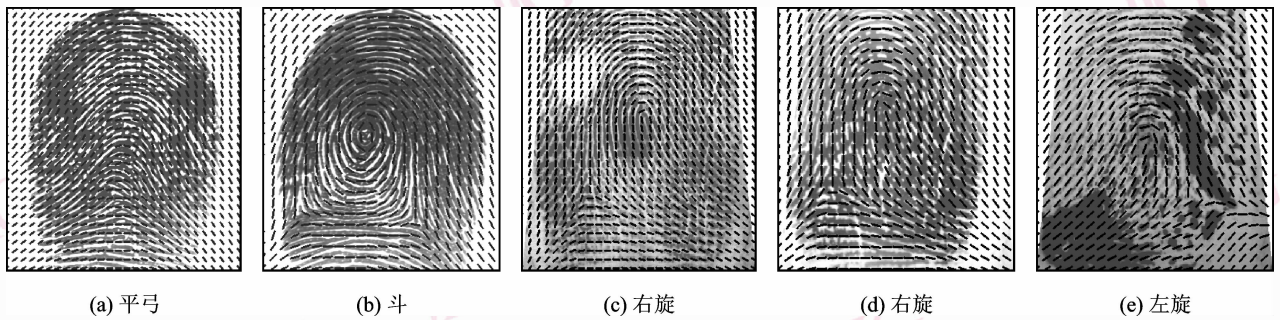


图 8 网格插值模型计算出的方向场

Fig. 8 Orientation estimation using Grid-interpolation model

5 结 论

提出了一种估计方向场的新模型,其特点在于利用了指纹的全局信息来计算指纹方向场。实验结果表明,该模型比以前的模型具有更高的精度和对噪声的鲁棒性,对于低质量的指纹图像也有较好的表现。而且由于该模型采用一组参数(网格点)来描述指纹方向场的拓扑结构,因此它对于指纹的压缩和存储都有积极的意义。但是也发现,目前的模型仍然存在着不足:首先,半径的划分上我们采用的是均匀划分。而直观上,离奇异点近的区域划分步长应该更大一些,而较远区域步长相应小一点应该更加合适。另外,本文在模型求解上采用了最简单的梯度下降法,如果采用其他的优化算法或许有更佳的表现。

参考文献 (References)

- Jain A K, Lin H, Boole R. On-line fingerprint verification[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, **19**(4):302-314.
- Lin H, Wan Y F, Jain A K. Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, **20**(8):777-789.
- Jain L C, Halici U, Hayashi I, *et al.* Intelligent Biometric Techniques in Fingerprint and Face Recognition [M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2000.
- Maltoni D, Maio D, Jain A K, *et al.* Handbook of Fingerprint Recognition [M]. New York, USA: Springer Science + Business Media, 2003: 43-45.
- Luo Xi-ping, Tian Jie. Image enhancement and minutiae matching algorithms in automated fingerprint identification systems[J]. Journal of Software, 2002, **13**(5): 946-956. [罗希平, 田捷. 自动指纹识别中的图像增强和细节匹配算法[J]. 软件学报, 2002, **13**(5): 946-956.]
- 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 and Machine Intelligence, 2002, **24**(7):905-919.
- Kass M, Witkin A. Analyzing oriented patterns[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1987, **37**(3):362-385.
- Ratha N K, Chen S Y, Jain A K. Adaptive flow orientation-based feature extraction in fingerprint images [J]. Pattern Recognition, 1995, **28**(11): 1657-1672.
- Rao K. A Taxonomy for Texture Description and Identification[M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1990.

- 10 Kawagoe M, Tojo A. Fingerprint pattern classification [J]. *Pattern Recognition*, 1984, **17**(3):295-303.
- 11 Stock R M, Swonger C W. Development and Evaluation of A Reader of Fingerprint Minutiae [R]. Ithaca, NY, USA: Cornell Aeronautical Laboratory, 1969:13-17.
- 12 Jain A K, Prabhakar S, Hong L. A multi-channel approach to fingerprint classification [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, **21**(4): 348-359.
- 13 Karu K, Jain A K. Fingerprint classification [J]. *Pattern Recognition*, 1996, **7**(3): 389-404.
- 14 O'gorman L, Nickerson J V. An approach to fingerprint filter Design [J]. *Pattern Recognition*, 1989, **22**(1):29-38.
- 15 Sherlock B G, Monro D M. A model for interpreting fingerprint topology [J]. *Pattern Recognition*, 1993, **26**(7):1047-1055.
- 16 Vizcaya P R, Gerhardt L A. A nonlinear orientation model for global description of fingerprints [J]. *Pattern Recognition*, 1996, **29**(7): 1221-1231.
- 17 Zhou Jie, Guo Jin-wei. A model-based method for the computation of fingerprints orientation field [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(6):821-835.
- 18 Gu Jin-wei, Zhou Jie. A novel model for orientation field of fingerprints [A]. In: *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, Madison, Winconsin, USA, 2003, **2**: 493-498.
- 19 Cappelli R, Maio D, Maltoni D. Synthetic fingerprint-image generation [A]. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition [C]*, Barcelona, Spain, 2000, **3**:471-474.
- 20 Cappelli R, Maio D, Maltoni D. Synthetic fingerprint database generation [A]. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition [C]*, Quebec City, Canada, 2002, **3**:744-747.
- 21 Galton F. *Finger Print* [M]. London, UK: McMillian Press, 1892.
- 22 Henry E. *Classification and Uses of Finger Prints* [M]. London, UK: George Routledge and Sons, 1900.
- 23 Maio D, Maltoni D, Cappelli R, *et al.* FVC2002: second fingerprint verification competition [A]. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition [C]*, Quebec City, Canada, 2002, **3**: 811-814.
- 24 Maio D, Maltoni D, Cappelli R, *et al.* FVC2004: third fingerprint verification competition [A]. In: *Proceedings of the International Conference on Biometric Authentication [C]*, Hong Kong, 2004, **3072**:1-7.