

一种基于形态学运算的指纹方向场计算方法

官群健¹ 祝 恩¹ 殷建平¹ 梁小龙¹ 赵建民²

(国防科技大学计算机学院 长沙 410073)¹

(浙江师范大学数理与信息工程学院 金华 321004)²

摘 要 指纹识别是生物认证技术中应用最为广泛的技术之一,其中指纹方向场计算是自动指纹识别系统中最关键的步骤,指纹图像预处理、特征提取和匹配的过程都以方向场为基础。因此提出一种基于对指纹图像方向场进行形态学运算的方向场计算方法。实验证明,该方法可以正确有效地计算低质量指纹图像,特别是褶皱类型指纹图像的方向场。

关键词 生物认证,指纹识别,方向计算,形态学运算,褶皱

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Fingerprint Orientation Estimation Based on Morphological Operation

GUAN Qun-jian¹ ZHU En¹ YIN Jian-ping¹ LIANG Xiao-long¹ ZHAO Jian-min²

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)¹

(Math Science and Information Engineering Academy, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)²

Abstract Fingerprint recognition is one of the most popular methods for biometric authentication. In the process of recognition, the ridge orientation estimation is the most important step, since it serves for segmentation, enhancement, minutiae extraction and matching. We proposed a method for orientation estimation based on morphological operation to regulate the orientation field. The experience shows that this method can correctly and robustly estimate the fingerprint orientation field for low quality images, especially for those with creases.

Keywords Biometric authentication, Fingerprint recognition, Orientation estimation, Morphological operation, Crease

1 引言

身份认证是人类社会不可缺少的一部分。在许多涉及敏感数据、社会安全以及个人隐私的领域,必须要求安全可靠的身份认证。传统的身份认证方式一般采用口令、密码以及钥匙等,但是这些密钥容易遗忘、丢失、被冒用。而利用生物特征(如人脸、指纹、虹膜等)进行身份认证可以发挥生物特征的唯一性、稳定性以及与生俱来等特性,且其使用方便,不易遗忘、丢失和被盗用。而在人类众多的生物特征中,指纹^[1]由于其普遍性强、方便采集、识别性能较好等因素已成为应用最为普遍、技术最为成熟的生物特征之一。但是,指纹识别技术并没有得到彻底解决,指纹识别系统的正确率以及时间效率仍然存在很大的空间需要提高,而在指纹识别算法中仍然有许多问题有待解决,比如低质量指纹图像的特征提取与匹配。

1.1 褶皱类型低质量指纹

在指纹采集过程中,由于采集环境以及手指表皮环境等因素,采集到的指纹图像会受到干扰,主要表现如图 1 所示:图 1(a)手指皮肤太干,造成图像纹路中断;图 1(b)手指皮肤

太湿,使图像纹路黏在一起;图 1(c)手指皮肤皱纹或者伤疤,造成图像中存在褶皱;图 1(d)手指在传感器上移动,使图像模糊;图 1(e)传感器上残留上一次指纹印迹,造成图像中纹路重叠;图 1(f)传感器受静电干扰也会使图像难以识别。

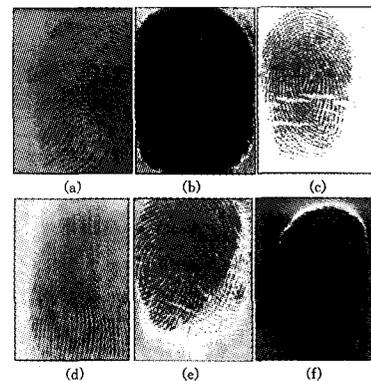


图 1 低质量指纹图像

以上几种造成低质量指纹图像的原因中,只有褶皱图 1(c)是由于手指短期不变的自身条件造成的,其他 5 种情况都

到稿日期:2012-04-15 返修日期:2012-05-20 本文受国家自然科学基金项目(60970034,61105050,61070198),高等学校全国优秀博士学位论文作者资助项目(2007B4),浙江师范大学计算机软件与理论省级重中之重学科开放基金(ZSDZZZXK38)资助。

官群健(1987-),男,硕士生,主要研究方向为模式识别,E-mail:guanqunjian@163.com;祝 恩(1976-),男,博士,副教授,主要研究方向为模式识别、图像处理、信息安全;殷建平(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为算法设计与分析、人工智能、模式识别、信息安全;梁小龙(1988-),男,硕士生,主要研究方向为模式识别;赵建民 男,教授,主要研究方向为模式识别、网络工程及企业信息化工程(通信作者)。

可以通过改善采集仪器和手指表皮干燥程度得到解决,因此,本文着重解决褶皱类型低质量指纹图像的方向计算问题。褶皱产生的原因^[2]包括天生的皮肤皱纹;由于年龄衰老而产生的皮肤皱纹;由于季节变化产生皮肤开裂;伤疤等。分析FVC指纹库发现,绝大多数低质量指纹图像中都存在褶皱区域,而正常指纹图像中也或多或少存在褶皱。褶皱对指纹图像的主要影响是切断正常纹路,造成方向场计算错误(见图2),进而影响后续步骤,造成伪细节点,最终影响指纹匹配结果。



图2 褶皱区域方向场计算错误

1.2 方向场计算方法研究概况

在指纹图像方向场计算这一研究领域,早期的研究者致力于研究新的方向场计算方法。目前主流的方向场计算方法包括:基于梯度的方向场计算方法、基于傅里叶变换的方向场计算方法和基于模型建立的方向场计算方法。其中最为广泛使用的主流方法是基于梯度的纹路方向计算方法^[3,4]。该方法计算每个像素处的灰度变化梯度向量,由于纹路边缘的灰度变化最为明显,该方法可以得到与纹路边缘垂直的梯度向量,进而得到纹路方向。但是基于梯度的方法容易受噪音干扰而产生错误方向,为了纠正错误方向,常采用低通滤波方法^[5]对方向场进行平滑。Kamei等人^[6]采用傅里叶分析方法计算纹路方向,对局部图像块进行傅里叶变换后,在频域上会呈现出两个峰值,其连线的走向会和纹路方向垂直。基于模型的方向场计算方法则通过建立指纹图像方向场模型,根据奇异点(包括核心点和三角点)的位置来估计全局的方向场^[7],但该方法不能区分具有相同奇异点位置的不同指纹图像。

对于低质量指纹图像,方向场的准确计算是指纹识别的基础。虽然一般的方向场计算方法在一定程度上可以弥合细小的纹路间隙,但是对于宽度较大的褶皱效果不明显。基于梯度的方法利用了纹路边缘梯度向量与纹路方向垂直这一原理,但是在褶皱区域,较宽的空白区域使纹路边缘梯度向量不垂直于纹路方向,而低通滤波器往往容易受褶皱区域的影响而将正确的纹路方向修改成为错误的方向。基于方向场模型的方法依赖于奇异点的位置和方向的正确计算,而奇异点的准确定位又依赖于方向场的计算。因此本文提出了主要针对褶皱型低质量指纹图像的方向场计算方法。

2 方向场计算

为了便于描述算法,首先对指纹图像进行数学建模,设定符号表达方式如下: I 表示一幅指纹图像,宽为 m ,高为 n , $I(u, v)$ ($0 \leq u < m, 0 \leq v < n$)表示图像在 (u, v) 坐标处的灰度值。以图像块为单位进行指纹图像分割时,设定方向块大小为 $w \times w$,暂且设 m, n 是 w 的倍数(否则可以对图像进行扩充)。这样图像一共可以被分为 $(m/w) \times (n/w)$ 块,用 $W(i, j)$ 来表示第 i 行第 j 列的图像块,其中心坐标为 $(i \cdot w + w/2, j \cdot w + w/2)$ 。图像分割的结果用 $M(i, j)$ 表示,若 $M(i, j) = 0$,表示该图像块为背景块,若 $M(i, j) = 1$,表示该图像块为前景块。计算图像方向场时, $O(i, j)$ 用来表示图像块的平均方

向。指纹纹路方向 θ 与 $\theta + \pi$ 表示同一方向,所以将 $O(i, j)$ 取值范围规约于 $[0, \pi)$ 之间。

计算指纹图像方向场之前,一般都要进行图像分割,目的是消除不含纹路的背景区域,提取包含纹路的前景图像,以减少工作量。因此,本文提出的针对褶皱类型低质量指纹图像的方向场计算方法包括如下步骤:

- (1)对指纹图像进行初步分割,提取包含纹路的前景图像。
- (2)对前景图像进行初始方向场计算。
- (3)判断褶皱区域错误方向,并对错误方向进行形态闭运算以修正纹路方向。

2.1 图像初步分割

目前指纹分割的方法一般是将图像分割成若干不重叠的图像块,计算每个图像块的特征向量,并根据特征向量来判断图像块是属于前景还是背景。分割中常用的图像块特征包括灰度统计特征、局部方向特征、频率与投影信号以及方向图统计特征等。本文利用图像块灰度统计特征^[8],主要是灰度均值和灰度方差来分割图像。

灰度均值反映图像块中灰度的平均值,记为 $C1$,由式(1)计算。非纹路区域一般颜色较浅,因而灰度均值一般较大。而纹路区域含有纹路,因此灰度均值一般较小。

$$C1 = \frac{\sum_{u=i \times w}^{(i+1) \times w - 1} \sum_{v=j \times w}^{(j+1) \times w - 1} I(u, v)}{w \times w} \quad (1)$$

灰度方差反映图像块灰度的变化程度,记为 $C2$,由式(2)计算。纹路区域中脊线和谷线交错,因此灰度方差会比非纹路区域大。

$$C2 = \frac{\sum_{u=i \times w}^{(i+1) \times w - 1} \sum_{v=j \times w}^{(j+1) \times w - 1} [I(u, v) - C1]^2}{w \times w} \quad (2)$$

对于指纹图像每一个图像块 $W(i, j)$,分别根据式(1)和式(2)计算其灰度均值 $C1$ 和灰度方差 $C2$,设定阈值 t_1, t_2 ,按照式(3)判定图像块属于前景或者背景。

$$M(i, j) = \begin{cases} 1, & C1 < t_1, C2 > t_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 初始方向场计算

我们采用基于梯度的方法^[1,9]计算图像块方向场。在图像块 $W(i, j)$ 中,纹路左右两边的边缘像素的梯度向量方向刚好相反,为了避免在计算中相互抵消,计算中采用梯度向量的平方,得到结果的 $1/2$ 即为纹路的垂直方向,梯度的计算采用Sobel算子^[10]。按照2.1节图像分割得到的结果,对于前景图像块 $W(i, j)$,通过式(4)一式(8)可以求出以 $(i \cdot w + w/2, j \cdot w + w/2)$ 为中心、以 w 为边长的图像块 $W(i, j)$ 的纹路方向:

$$G_x(u, v) = \frac{\partial I(u, v)}{\partial u} \quad (4)$$

$$G_y(u, v) = \frac{\partial I(u, v)}{\partial v} \quad (5)$$

$$V_x = \frac{\sum_{u=i \times w}^{(i+1) \times w - 1} \sum_{v=j \times w}^{(j+1) \times w - 1} [G_x^2(u, v) - G_y^2(u, v)]}{w \times w} \quad (6)$$

$$V_y = \frac{\sum_{u=i \times w}^{(i+1) \times w - 1} \sum_{v=j \times w}^{(j+1) \times w - 1} 2G_x(u, v)G_y(u, v)}{w \times w} \quad (7)$$

$$O(i, j) = \tan^{-1}(V_y/V_x)/2 \quad (8)$$

2.3 方向修正

形态学在图像处理中应用非常广泛,在指纹识别技术中也有着重要作用。传统算法中,对指纹图像进行形态学操作

一般在灰度层面^[11]上进行。形态学开、闭运算是应用最为广泛的方法之一,开运算使图像纹路边缘光滑,断开狭窄的连接以及消除细小的毛刺;闭运算同样使指纹纹路边缘变得光滑,但它与开运算相反,可以弥合狭窄的间断^[12]。

由于形态学运算的特性,提出基于形态学运算修正纹路方向的基本思想:若某图像块方向在某一变化范围(如 $[a, a+\Delta]$)之外,而其周围的大多数图像块方向在变化范围之内,则这个图像块的方向很可能是错误的,可以用周围方向在变化范围之内的图像块方向对这个图像块的方向进行修正。

首先,设定方向变化范围 $[a, a+\Delta]$,由于我们将纹路方向规约在 $[0, \pi)$ 之间,为准确处理边界 0 和 π 周围的纹路方向,定义纹路方向 θ 是否为范围 $[a, a+\Delta]$ 之内的符号:

$$\theta \in [a, a+\Delta] \Leftrightarrow (\theta \in [a, a+\Delta] \vee (\theta + \pi) \in [a, a+\Delta]) \quad (9)$$

$$\theta \notin [a, a+\Delta] \Leftrightarrow (\theta \notin [a, a+\Delta] \wedge (\theta + \pi) \notin [a, a+\Delta]) \quad (10)$$

对于某图像块 $W(k, l)$,定义集合 $N_a(k, l)$ 表示以该图像块为中心、与其距离不大于 d 、且方向在范围 $[a, a+\Delta]$ 之内的图像块集合(见式(11)),并且定义符号 $Card(N_a(k, l))$ 表示集合 $N_a(k, l)$ 内的元素个数。

$$N_a(k, l) = \{W(i, j) \mid |i-k| \leq d, |j-l| \leq d, O(i, j) \in [a, b]\} \quad (11)$$

其次,检测方向的差异性以判断错误方向。对于图像块 $W(k, l)$,若其方向不在范围 $[a, a+\Delta]$ 之内(见式(12)),而且其周围的大部分图像块方向在范围 $[a, a+\Delta]$ 之内,即集合 $N_a(k, l)$ 内元素个数大于等于某阈值(见式(13)),阈值取 $2d(d+1)$,说明该图像块 $W(k, l)$ 的方向是错误的。

$$O(k, l) \notin [a, b] \quad (12)$$

$$Card(N_a(k, l)) \geq 2d(d+1) \quad (13)$$

最后,修正错误的图像块方向。修正后的图像块 $W(k, l)$ 方向由集合 $N_a(k, l)$ 中的元素通过式(14)求得:

$$O(k, l) = \frac{1}{2} \arctan \frac{\sum_{W(i, j) \in N_a(k, l)} \sin 2O(i, j)}{\sum_{W(i, j) \in N_a(k, l)} \cos 2O(i, j)} \quad (14)$$

对于整个指纹图像,变化范围的参数 a 按照一定的尺度 δ 遍历整个 $[0, \pi)$ 区间,对于 $(m/w) \times (n/w)$ 块图像块,检测每一块图像块的方向差异性以判断其是否为错误方向,并对方向错误的图像块进行闭合操作,算法流程如下:

给定参数 Δ, d, δ

For ($a=0; a < \pi; a = a + \delta$) /* 角度范围覆盖整个 $[0, \pi)$ 区间 */

{

For ($i=0; i < \frac{m}{w}; i++$)

For ($j=0; j < \frac{n}{w}; j++$) /* 遍历整幅图像 */

{

If ($M(i, j) = 0$ 或者 $O(i, j) \in [a, a+\Delta]$) continue;

If ($O(i, j) \notin [a, a+\Delta]$ 且 $Card(N_a(i, j)) \geq 2d(d+1)$)

/* 检测方向差异性,判定错误方向 */

$$O(i, j) = \frac{1}{2} \arctan \frac{\sum_{W(g, h) \in N_a(i, j)} \sin 2O(g, h)}{\sum_{W(g, h) \in N_a(i, j)} \cos 2O(g, h)};$$

/* 对错误方向按照式(12)进行闭合操作 */

}

}

3 实验

本节将采用两种计算方法进行比较:方法1为 Hong Lin^[5]提出的基于梯度的方法,该方法利用 Gauss 低通滤波器对方向场进行低通滤波;方法2为本文提出的方法。在 FVC 指纹图像库中选取4幅含有明显褶皱的低质量指纹图像进行实验。分别使用方法1和方法2计算图像方向场,得到的结果如图3所示。

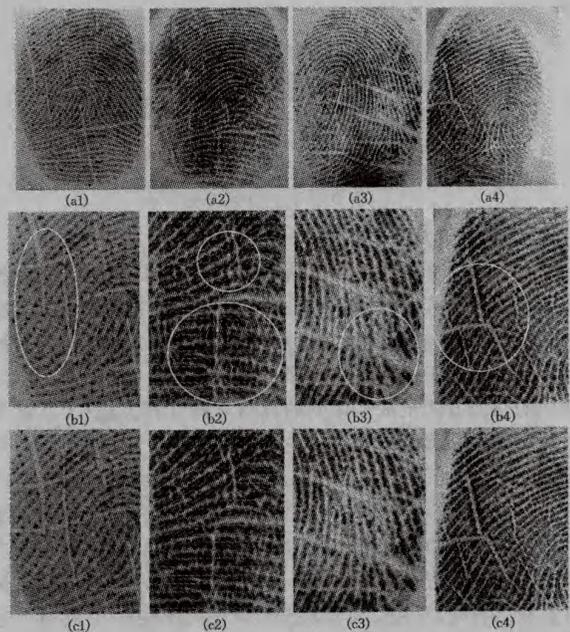


图3 实验结果
(a1)~(a4)为原始指纹图像;(b1)~(b4)为采用 Hong Lin^[5]的方法计算的方向场,椭圆区域的纹路由于褶皱的干扰,其方向场存在明显的错误;(c1)~(c4)为采用本文提出的方法计算的方向场,对错误的方向场修正效果明显

图3 实验结果

通过实验结果可以看出,在(b1)~(b4)中,标记的区域存在明显的方向计算错误,而该区域恰好是指纹图像存在褶皱的区域。产生这种结果的原因是由于在褶皱区域计算得到的梯度并不垂直于纹路边缘,由此得到的纹路方向与真实方向存在较大差异。对纹路方向进行低通滤波可以在一定程度上纠正错误的方向,如在(b1)~(b4)中,一些较小的间隙得到了较好的弥合。但是在较宽的褶皱区域,错误的方向占大多数,低通滤波反而将正确的方向修改成了错误的方向,修正效果不明显。而(c1)~(c4)在褶皱区域不存在明显的错误方向。通过对比(b1)~(b4)和(c1)~(c4)可以看出,本文提出的方法可以更有效地修正褶皱区域的纹路方向。

结束语 指纹方向场计算是指纹识别中的重要步骤,本文提出了一种新的指纹方向场计算方法,其针对褶皱类型的低质量指纹图像,通过初始分割、初始方向计算、形态学闭运算,可以有效地修正褶皱区域错误的方向场。通过实验表明,本文提出的算法将明显提高指纹图像纹路方向计算的准确率。

参考文献

- [1] 祝恩,殷建平,张国敏,等. 自动指纹识别系统[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2006,5:25-86

(下转第271页)

结束语 本文提出一种基于训练样本自动选取的 SVM 彩色图像分割算法。通过 FCM 算法对图像进行预处理,可自动获取训练样本,实现了彩色图像的自动分割。本文方法无论从数据统计中还是从视觉效果上,算法的有效性都得到了很好的验证。此外,对于较复杂的彩色图像,如何自动确定类别个数,还有待进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Ohlander R, Price K, Raj R D. Picture segmentation using a recursive region splitting method[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1978, 8(3): 313-333
- [2] 杨红颖, 王向阳, 王春花. 基于特征加权的自适应 FCM 彩色图像分割算法[J]. *计算机科学*, 2009, 36(8): 281-284
- [3] Tremeau A, Borel N. A region growing and merging algorithm to color segmentation[J]. *Pattern Recognition*, 1997, 30(7): 1191-1203
- [4] Fan J, Aref W G, Hacid M S, et al. An improved automatic isotropic color edge detection technique[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2001, 22(13): 1419-1429
- [5] Ong S H, Yeo N C, Lee K H, et al. Segmentation of color images using a two-stage self-organizing network[J]. *Image and Vision Computing*, 2002, 20(4): 279-289
- [6] Vapnik V N. *The Nature of Statistical Learning Theory*[M]. New York: Springer-Verlag, 1995
- [7] Yu Zhi-wen, Wong Hau-San, Wen Gui-hua. A modified support vector machine and its application to image segmentation[J]. *Image and Vision Computing*, 2011, 29(1): 29-40
- [8] Pabitra M, Shankar B U, Sankar K P. Segmentation of multi-spectral remote sensing images using active support vector machine[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2004, 25(9): 1067-1074
- [9] Genton M G. Classes of kernels for machine learning: a statistics perspective[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2001, 2: 299-312
- [10] 张刚, 马宗民. 一种采用 Gabor 小波的纹理特征提取方法[J]. *中国图像图形学报*, 2010, 15(2): 247-254
- [11] Fowlkes C, Martin D, Malik J. Local Figure/Ground Cues are Valid for Natural Images[J]. *Journal of Vision*, 2007, 7(8): 1-9
- [12] Shi J, Malik J. Normalized cuts and image segmentation[C]// *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington: IEEE Computer Society Press, 1997: 731-737

(上接第 229 页)

- [11] 张学. 统计学习理论的本质[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 96-105
- [12] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Neural Networks (NN 1995)*. 1995: 1942-1948
- [13] Ling S H, Lu H, Leung F H F, et al. Improved hybrid particle swarm optimized wavelet neural network for modeling the development of fluid dispensing for electronic packaging [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(9): 3447-3460
- [14] Dos Santos Coelho L, Herrera B M. Fuzzy identification based on a chaotic particle swarm optimization approach applied to a nonlinear yo-yo motion system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(6): 3234-3245
- [15] Sekanina L, Torresen J. Detection of norwegian speed limit signs [C]// *16th European Simulation Multiconference on Modelling and Simulation (ESMMS 2002)*. 2002: 337-340
- [16] 柏春岚. Matlab 在图像边缘提取中的应用[J]. *科技信息*, 2009(14): 224-225
- [17] 王进, 康雄. 基于演化硬件的道路限速标志识别方法[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2011, 32(6): 689-694
- [18] Torresen J, Jorgen W B, Sekanin L. Efficient recognition of speed limit signs [C]// *7th Intelligent Transportation System Conference (ITS 2004)*. 2004: 652-656
- [19] Chen Ze-zhi, Pears N, Austin J. Road vehicle classification using Support Vector Machines [C]// *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS 2009)*. 2009: 214-218

(上接第 248 页)

- [2] Wu Chen-yu, Zhou Jie, Bian Zhao-qi, et al. Robust Crease Detection in Fingerprint Images [J]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003, 2: 505-510
- [3] Bazen A M, Cerez S H. Systematic Methods for the Computation of the Directional Field and Singular Points of Fingerprints[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 905-919
- [4] Ratha N K, Chen Shao-yun, Jain A K, et al. Adaptive Flow Orientation-based Feature Extraction in Fingerprint Images [J]. *Pattern Recognition*, 1995, 28(11): 1657-1672
- [5] Hong L, Wang Y F, Jain A K. Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(8): 777-789
- [6] Kamei T, Mizo M, et al. Image filter design for fingerprint enhancement [C]// *The International Symposium on Computer Vision (ISCV'95)*. Coral Gables, Florida, 1995: 21-23
- [7] Sherlock B, Monro D. A model for interpreting fingerprint topology [J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(7): 1047-1055
- [8] 唐良瑞, 谢晓辉, 蔡安妮. 基于 D-S 证据理论的指纹图像分割方法[J]. *计算机学报*, 2003, 26(7): 887-892
- [9] 詹小四, 宁新宝, 尹义龙. 多级分块尺度下的指纹方向信息提取算法[J]. *南京大学学报*, 2003, 39(4): 476-482
- [10] Castleman K R. *数字图像处理*[M]. 宋志刚, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 256-278
- [11] Oliveira M A, Leite N J. A multi scale directional operator and morphological tools for Reconnecting broken ridges in fingerprint images[J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41: 367-377
- [12] 张铮, 王艳平, 薛桂香. *数字图像处理与机器视觉——Visual C++与 Matlab 实现*[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 210-225