

## 应用于嵌入式设备的指纹图像质量估计方法

刘小强<sup>1,2</sup>, 袁国顺<sup>1†</sup>, 乔树山<sup>1</sup>

(1.中国科学院微电子研究所,北京 100029;2.中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**现有的指纹图像质量估计算法时间复杂度较高,嵌入式设备的计算资源有限,导致时间复杂度较高的指纹图像质量估计算法在这些设备上应用较为困难,为了解决这一问题,提出了应用于嵌入式设备的指纹图像质量估计方法.该方法首先对梯度场、方向场和频率场进行估计,通过对高质量指纹图和纹理图像的分析,得到了指纹图像质量索引与梯度、方向和频率之间的关系.利用这一关系衡量梯度、方向和频率的准确性,进而作为指纹图像质量索引来表征指纹图像质量.实验结果表明,该方法能够准确地产生质量索引,可以很好地对指纹质量优劣区域进行区分,在保证指纹认证系统性能的前提下,显著降低了指纹质量估计算法时间复杂度.

**关键词:**指纹认证;图像质量;方向估计;频率估计

**中图分类号:**TP391.4

**文献标志码:**A

## Fingerprint Image Quality Estimation Method Applied to Embedded Devices

LIU Xiaoqiang<sup>1,2</sup>, YUAN Guoshun<sup>1†</sup>, QIAO Shushan<sup>1</sup>

(1. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The existing fingerprint image quality estimation algorithm has high computational complexity. The computing resources of embedded devices are limited, and fingerprint image quality estimation algorithm with high computational complexity is difficult to apply on these devices. In order to solve this problem, a method of fingerprint image quality estimation method applied to embedded devices is proposed. First, the method estimates the gradient field, the direction field and the frequency field, and the relationship among the fingerprint image quality, gradient, direction and frequency is obtained by analyzing the high-quality fingerprint image and texture image. This relationship is used to measure the accuracy of the estimated gradient, direction and frequency, and then it is made as the fingerprint image quality index to characterize the quality of fingerprint image. The experimental results show that the method can accurately generate the fingerprint image quality index. The method can distinguish the good and bad regions of the fingerprint image very well. Under the premise of ensuring the performance of the fingerprint authentication system, the computational complexity of the fingerprint quality estimation algorithm is significantly reduced.

**Key words:** fingerprint identification; image quality; directional estimation; frequency estimation

\* 收稿日期:2019-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61474135), National Natural Science Foundation of China(61474135); 国家高技术研究发展计划资助项目(2015AA042605), The National High Technology Research Development Program of China(2015AA042605)

作者简介:刘小强(1990—),男,安徽阜阳人,中国科学院微电子研究所博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: mryuangs@hotmail.com

指纹识别是目前所有生物识别中最为常见的技术<sup>[1]</sup>,一个典型的指纹识别系统包含3个处理过程:1)指纹图像预处理,预处理主要对指纹图像增强处理,连接断的脊线;2)特征提取,从增强后的指纹图像中提取特征点信息;3)特征匹配,提取到的特征点与指纹库中的进行比较并统计计分,根据计分结果判断是否匹配.研究表明指纹识别系统的性能非常依赖于采集到的指纹图像的质量<sup>[2]</sup>,低质量的指纹区域将会产生伪特征点也会丢失真的特征点,使用伪特征点或者未使用关键的特征点均会导致认证系统性能下降,指纹图像质量估计对于提高指纹识别系统的性能尤为重要<sup>[3]</sup>.指纹质量估计目的是得到可靠的质量索引值,为特征提取和特征匹配阶段提供参考参数,进而提升认证系统的性能.实际应用中算法的时间复杂度是考虑的重要方面<sup>[4]</sup>,算法时间复杂度高会导致实际应用困难,在保证性能情况下,降低算法时间复杂度,提高时间效率是应用中优化的目标,特别对于计算资源较少的嵌入式设备.

绝大多数的指纹认证系统是基于特征点匹配<sup>[5]</sup>,准确提取出正确的特征点是特征匹配的前提,尤其是分岔点和端点,往往希望这些特征点来自于指纹质量较好的区域.为了在预处理阶段及早发现低质量的指纹区域,Raoni等人<sup>[6]</sup>对近年来的指纹质量估计算法作了回顾并分析各种算法的特点,提出了一种通用可扩展的评估框架;Ali等人<sup>[7]</sup>采用深度学习对指纹图像质量进行估计,提出使用深度卷积神经网络(DNN)从输入的指纹图像中获取图像失真参数建立纠正模型,之后对图像纠正进而提升指纹认证系统性能.但是基于深度学习方式算法时间复杂度高,对于嵌入式设备是不能接受的.Javad等人<sup>[8]</sup>提出基于特征点对和凸核心点(MP-CCP)的方法,将指纹质量估计加入到匹配中作为匹配权重的一部分,对特征点的质量进行等级划分,减少搜索空间,提高认证系统性能.Yao等人<sup>[9]</sup>通过研究指纹图像的质量估计与特征点模板结构之间的关系,提出特征点三角化(MDT)计算特征点区域的面积来进行指纹质量估计.Gallally等人<sup>[10]</sup>对人脸和指纹图像无参考质量估计和全参考质量估计(FR-IQA)进行了分析,分别采用无参考质量估计和全参考质量估计对输入图像的质量进行估计,根据指纹的质量判断指纹是否来自于活体.随着指纹处理算法的性能提升,算法的时间复杂度也随之提高.由于嵌入式设备中计算资源有限,需要从算法和硬件两个方面

来对算法的具体实现进行优化.Tariq等人<sup>[11]</sup>提出利用现场可编程阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)的并行性加速指纹图像增强过程,达到实时处理的目的.Mubeen等人<sup>[12]</sup>使用图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)提供的大规模并行架构,优化指纹匹配处理过程中的数据通路、内存传输和计算结构的设计,加速指纹处理的匹配过程.Gok等人<sup>[13]</sup>提出使用数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)加速指纹认证系统.基于此,本文提出应用于嵌入式设备的指纹质量估计方法,提出的算法具有较低时间复杂度,可以加速指纹质量估计算法在嵌入式设备上的应用.

## 1 特征信息参数估计

指纹图像质量估计依赖于图像中的特征信息,这些特征信息包括指纹频率、脊线方向、频域特性等,利用特征信息参数计算指纹图像质量索引之前需要对这些参数进行估计,其中梯度场估计是为方向场计算做准备的,参数估计的准确性直接决定所得到的质量索引是否可靠.

### 1.1 梯度场估计和方向场估计

在指纹采集过程中,由于受采集器本身和环境因素影响导致噪声较大,因此需要对指纹图像做简单处理,主要包括图像去噪和归一化.由于非线性滤波器会导致图像的细节丢失,不能很好地保护图像的纹理结构<sup>[14]</sup>,并且非线性滤波器的计算复杂度较高,因此,本文使用滤波核半径为3的高斯滤波器对采集到的指纹图像进行去噪处理,式(1)对指纹图像 $I_i$ 去噪处理得到较低噪声的指纹图像 $I_g$ .采用Hong等人<sup>[15]</sup>提出的方法对指纹图像进行归一化处理,经式(2)归一化后的图像 $I_n$ 的灰度值处于相对统一的水平,这有利于后续处理.

$$I_g(x, y) = \sum_{(k, l)} I_i(x+k, y+l)g(k, l) \quad (1)$$

式中: $g(k, l) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(k^2+l^2)}{2\sigma^2}}$ .

$$I_n(x, y) = \begin{cases} I_{g0} + \sqrt{\frac{\sigma_0 \times (I_g(x, y) - \bar{I})}{\sigma_{x, y}}} & \text{如果 } I_g(x, y) > \bar{I} \\ I_{g0} - \sqrt{\frac{\sigma_0 \times (I_g(x, y) - \bar{I})}{\sigma_{x, y}}} & \text{如果 } I_g(x, y) \leq \bar{I} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\bar{I}$ 是指纹图像的平均值; $\sigma_{x, y}$ 是指纹图像的方差; $I_{g0}$ 和 $\sigma_0$ 分别为设定的目标均值和方差.

指纹脊线方向场估计在奇异点检测、脊线增强和指纹分类方面有很重要的作用,许多算法对方向场估计进行研究,这些算法有基于空间变换法<sup>[16]</sup>、基于梯度法等.在这些算法中最为常用的是梯度法.具体估计方法:将归一化后的指纹图像  $I_n$  分割为若干互不交叠大小为  $w_\theta \times w_\theta$  的子块,采用索贝尔算子(Sobel)计算子块的每个点水平方向梯度  $G_x$  和垂直方向的梯度  $G_y$ .梯度的具体计算公式见式(3):

$$G_x = I_n \times \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_y = I_n \times \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

为了平滑梯度场,使用滤波核半径为 3 的均值滤波器对梯度  $[G_x, G_y]$  进行滤波得到  $[G_{fx}, G_{fy}]$ ,通过式(4)对方向场进行估计:

$$\theta_{ES}(x, y) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\sum_{w_\theta} 2G_{fx}G_{fy}}{\sum_{w_\theta} (G_{fx}^2 - G_{fy}^2)} \right) + \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

式中:  $G_{fx}$  和  $G_{fy}$  分别为滤波后子块沿  $x$  轴方向和  $y$  轴方向梯度;  $w_\theta$  为子块的大小;  $\theta_{ES}$  是估计所得的方向.

图 1(a)为指纹图块.图 1(b)反映了指纹图块与其梯度分布关系,水平方向梯度  $G_x$  和垂直方向的梯度  $G_y$  呈现线性关系,图中直线可以由式(5)建模.图 1(c)是由图 1(a)估计得到的方向值分布,由于梯度对于噪声和低质量指纹非常敏感,估计得到的方向需要修正.图 1(c)中  $\theta_{ES}$  是未做修正估计得到的方向,  $\theta_{LS}$  是修正估计得到的方向.由于指纹采集器的非线性噪声和手指破损原因会产生图 1(c)中黑色圈内距离  $\theta_{ES}$  线较远的离群点,这些离群点不能简单地用线性滤波器处理.为了提高算法鲁棒性,需要滤除离群点对方向场估计影响,使用最小二乘法(Least Square, LS)<sup>[17]</sup>通过不断迭代来获得准确的方向  $\theta_{LS}$ .

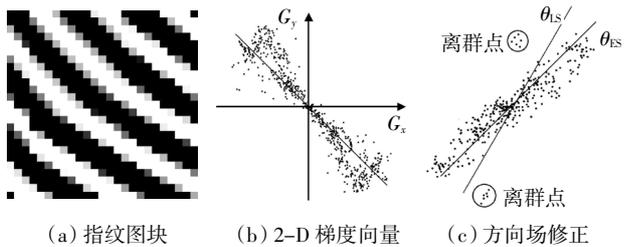


图 1 指纹图块与梯度和方向的关系

Fig.1 Fingerprint block relationship with gradient and direction

$$y_i = \hat{\beta}x_i + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中:  $y_i$  表示  $G_{fy}$ ;  $x_i$  表示  $G_{fx}$ ;  $\varepsilon$  表示误差.  $\hat{\beta}$  的值可以由式(6)得出.

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (6)$$

式中:  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ ;  $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ .

LS 方法获取准确的  $\theta_{ES}$  具体过程如下:

- 1)采用式(3)和均值滤波计算梯度  $[G_x, G_y]$ ;
- 2)采用式(4)计算初始的子块方向  $\theta_{ES}$ ;
- 3)以欧拉距离来权衡梯度并剔除离群点;
- 4)使用 LS 方法重新估计方向场,判断上一次方向与本次方向的差值是否小于某一阈值;
- 5)如果小于这一阈值则停止估计,大于这一阈值返回步骤 3)继续估计.

使用 LS 方法移除离群点对方向进行修正,图 1(c)为经过最小二乘法修正前后角度的对比,图 1(c)中黑色圈内距离 LS 线较远的离群点通过处理将会被舍弃,进而得到鲁棒性较好的方向场.

### 1.2 脊线频率估计

对于不含特征点(分岔点和端点)和奇异点(三角点和核心点)的理想纹理图可以将它建模为如图 2 所示的理想纹理图脊线频率分析模型.图 2 中方形纹理窗为所选取的纹理块,需要估计其所在区域的脊线频率;垂直于脊线方向的矩形窗口是方向窗,以点  $I_n(x, y)$  为中心,以脊线方向  $\theta_{LS}$  旋转得到.

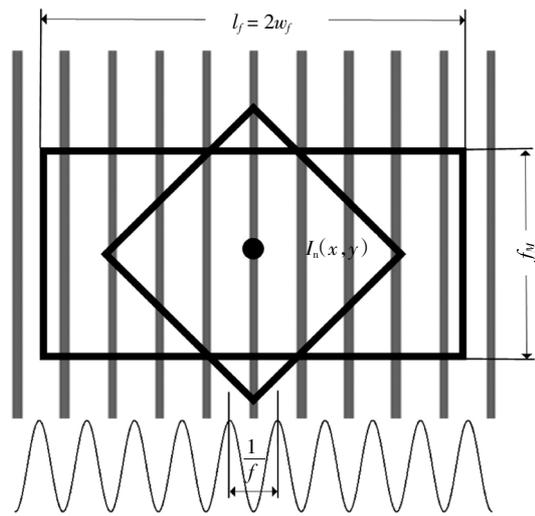


图 2 理想纹理图脊线频率分析模型

Fig.2 Ideal texture ridge frequency analysis model

具体脊线频率  $f$  估计过程如下:

- 1)将归一化后的图像  $I_n$  分为若干互不交叠大小为  $w_f \times w_f$  的子块;
- 2)以子块的中心  $I_n(x, y)$  建立窗口  $l_f \times w_f$ , 其中  $l_f$

$= 2w_f$ , 窗口方向垂直于脊线, 如图 2 所示. 并以脊线的方向  $\theta_{1s}$  旋转这一窗口使得脊线垂直于水平方向;

3) 由式(7)计算窗口内每一列的和  $C(i)$ , 通过计算  $C(i)$  的相邻极大值之间的距离得到脊线频率  $f$ , 相邻极大值对应的是相邻谷线位置.

$$C(i) = \frac{1}{w_f} \sum_{u,v} I_n(u,v), i = 0, 1, 2, \dots, l_f - 1 \quad (7)$$

式中:  $I_n$  为归一化后的图像;  $u, v$  为窗口内点的坐标;  $w_f$  为窗口的高度.

$$f = \frac{1}{|C(i_{p1}) - C(i_{p2})|} \quad (8)$$

式中:  $C(i_{p1}), C(i_{p2})$  分别为相邻的极大值;  $f$  为得到的脊线频率.

由频率估计的过程可以看出, 频率估计也依赖于指纹的方向场估计, 需要根据角度旋转窗口, 这样方便计算极值, 因此对于方向估计结果进行修正以保证所得到的方向准确性是十分必要的.

## 2 指纹质量估计

由第 1 节分析可知, 采集到的指纹往往受内外因素影响造成估计的特征信息参数不准确, 特别是方向场. 经过梯度计算得到的方向需要修正, 而修正后的方向值往往只与一部分梯度值有直接关系, 可以通过分析梯度与修正后的方向场关系对指纹图像的质量进行估计. 为了证明这一方法的可行性, 接下来对理想的纹理图像进行分析. 理想的纹理灰度图像应该是无噪声、无特征点和奇异点且有  $I_i(x, y) \in \{0, 255\}$ , 对于理想的纹理灰度图像其梯度场和方向场存在式(4)的关系, 可以将其改写为:

$$\tan(2\theta_{ES} - \pi) = \frac{2G_{fx} \times G_{fy}}{G_{fx}^2 - G_{fy}^2} = \frac{\sin(2\theta_{ES})}{\cos(2\theta_{ES})} \quad (9)$$

$$\sin^2(2\theta_{ES}) + \cos^2(2\theta_{ES}) = 1 \quad (10)$$

考虑到对于方向场必然满足式(10)条件, 将式(9)和式(10)结合并改写式(10), 可以得到本文定义的指纹质量索引:

$$\tilde{Q}_{index} = \sqrt[1]{|2G_{fx}G_{fy}\sin(2\theta_{ES})| + |(G_{fx}^2 - G_{fy}^2)\cos(2\theta_{ES})|} \quad (11)$$

式中:  $\tilde{Q}_{index}$  值取决于梯度场、方向场;  $\lambda$  为修正因子 ( $\lambda > 1$ ), 可以调整质量索引范围, 本文实验中取 3.

由式(11)可知, 质量索引值与梯度和方向密切相关, 实际中, 通过实验发现质量索引值与脊线频率也是相关的. 对于频率一定的纹理图, 这一影响

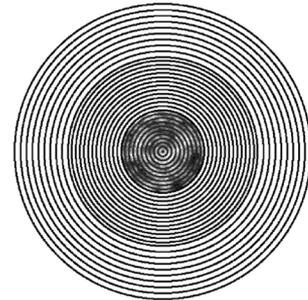
对于质量索引是一致的. 然而对于非理想的指纹图像其纹线频率呈现在一定范围内. 也就是说不同频率的指纹块具有不同的质量索引值. 为了使得质量索引对于不同频率区域的指纹具有良好的鲁棒性, 使用滤波核半径为  $f$  均值滤波器对梯度场重新滤波处理, 见式(12).

$$[G_{mx}, G_{my}] = \frac{1}{d^2} \sum_d [G_{fx}, G_{fy}] \quad (12)$$

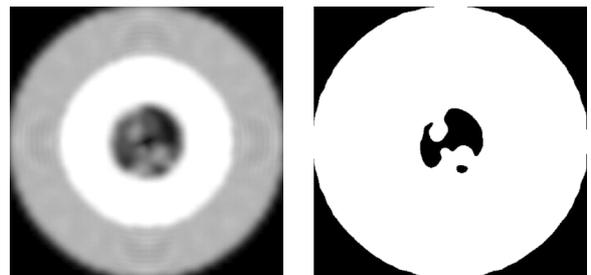
式中:  $d$  为  $2f + 1$ . 将修正后的角度和式(12)的结果代入式(11), 得到最终的指纹质量索引, 见式(13).

$$Q_{index} = \sqrt[1]{|2G_{mx}G_{my}\sin(2\theta_{1s})| + |(G_{mx}^2 - G_{my}^2)\cos(2\theta_{1s})|} \quad (13)$$

本文通过实验说明式(13)作为质量索引的合理性, 生成一幅同心圆纹理图, 如图 3(a)所示, 其内环脊线较密集区域的脊线频率  $f_1$  为  $1/7$ , 外环脊线较稀疏区域的脊线频率  $f_2$  为  $1/10$ . 为了在同一幅纹理图像中体现对较差质量区域的比较, 在图 3(a)中心的圆形区域加入柏林噪声<sup>[18]</sup>, 使这部分退化为质量较差的纹理区域. 采用式(13)计算图 3(a)的纹理图像质量索引. 图 3(b)为质量索引值结果图, 从图中可以看出所定义的质量索引表达式能够很好地反映纹理图像质量, 并且与脊线频率是相关的, 脊线频率愈小索引值愈小, 即对于频率较小的区域表征着质量越差. 这是由于频率小的区域平滑后的梯度值也较小, 这一特点能够估计出按压力度导致的



(a) 纹理图



(b) 质量索引值

(c) 基于质量索引分割

图 3 纹理图的质量表征

Fig.3 The quality index of texture picture

形变指纹质量,因为一般指纹区域的频率是一定的,而由于按压力度过大会导致形变,脊线频率变小,质量索引也可以用于图像的分割,图 3(c)为索引图通过阈值分割得到的基于质量索引的分割后的图像,从分割后的图可以看出基于质量索引分割能够较好地将纹理的前景区域分割出来。

对于加入柏林噪声的图 3(a)中心圆形低质量纹理区域并不是所有的像素点都可以准确估计出梯度场和方向场,柏林噪声使得梯度场和估计的方向场偏离正常的关系,从图 3(b)中可以明显看出退化区域的索引值较小,这一点在质量索引值图 3(c)中也有反映,退化的中心区域质量较差同时也会导致估计的频率不准确,在实验中这一区域的梯度和频率值会偏小,这会导致经过式(13)处理后得到的索引值会较小,表征着指纹质量越差。

通过上述对梯度场、方向场和频率场之间关系的分析,得到了指纹质量索引值表征指纹质量,其中梯度场的准确性直接决定计算得到方向场,梯度场越准确所估计出的方向场就越准确,即质量索引值越大越接近理想值,同时通过实验得质量索引与纹理频率有一定的关系,基于这一事实笔者定义  $Q_{index}$  作为指纹质量索引值。

### 3 实验结果及分析

为了客观评价和比较本文提出的应用于嵌入式设备的指纹质量估计方法的有效性,将所提出的算法与现有的指纹质量估计算法进行比较,主要从 3 个方面进行评估:对指纹图像质量优劣区域的区分度、引入指纹质量估计对系统性能影响、指纹质量估计算法时间复杂度和实际的运行时间,所使用的数据库为 FVC2002 DB I 指纹图片大小  $388 \times 374$ ,DB II 指纹图片大小  $296 \times 560$ ,DB III 指纹图片大小  $300 \times 300$ <sup>[9]</sup>,每个库采集 10 个不同手指的 80 幅指纹,每个手指采集 8 幅。

#### 3.1 质量优劣区域分离度

本实验主要评估提出的算法对指纹的质量优劣区域的区分能力,可以有效地将指纹的前景区域分割出来,通过质量索引将指纹分为质量好的区域和质量差的区域,质量好的区域指的是包含有用的特征点的指纹,在质量较好区域里的特征点被认为是可靠的,可以作为匹配参考点,质量差的区域指的是含有伪特征点,质量较差区域中特征点是不可靠的,尽量避免参与匹配或者在匹配时根据质量索

引赋予较小的权值,图 4 为质量估计算法对指纹图像中质量好的区域和质量差的区域估计以及基于质量索引的指纹图像分割,从图中可以看出,质量索引图能够准确反映出指纹原图的质量,表 1 是本文所提算法与文献[7-10]中的质量估计算法对不同数据库中指纹的质量优劣区分度对比,区分度采用式(14)计算得出<sup>[20]</sup>,区分度值越大表示算法对于指纹优劣的区分效果越好。

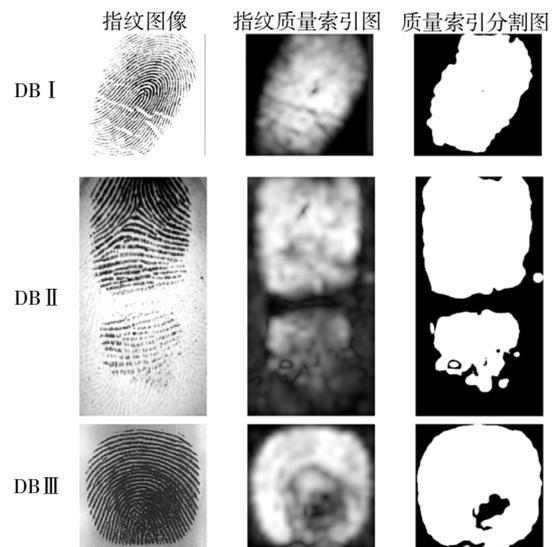


图 4 指纹质量索引表征和分割

Fig.4 Fingerprint quality index and segmentation

表 1 不同质量估计算法对指纹质量的区分度

Tab.1 Separability of different quality checking algorithm

算法	DB I	DB II	DB III
DNN <sup>[7]</sup>	2.05	1.82	1.98
MP-CCP <sup>[8]</sup>	1.86	1.71	1.82
MDT <sup>[9]</sup>	1.71	1.72	1.97
FR-IQA <sup>[10]</sup>	1.73	1.78	1.91
本文方法	2.09	1.74	2.03

由表 1 可知,对于指纹库 DB I 和 DB III 本文所提出的算法能更好地对指纹质量加以区分,对于数据库 DB II 本文所提出的算法区分度小于 DNN 和 FR-IQA 算法,这可能是由于 DB II 中指纹质量较好,本文提出的算法是基于梯度场、方向场和频率偏差关系,随着式(13)中根号下的值增大, $Q_{index}$  值变化较为缓慢,即对于质量越高的图像质量索引值的变化越不明显,因此,对质量较好的指纹所估计得到的参数往往与实际相差较小,因此无法体现本文所提算法优越性。

$$\text{Separability} = \frac{|\mu_{\text{good}} - \mu_{\text{bad}}|}{\sqrt{(\sigma_{\text{good}}^2 + \sigma_{\text{bad}}^2)/2}} \quad (14)$$

### 3.2 系统性能比较

质量估计主要为提升指纹认证系统的性能引入的,影响认证系统性能的因素较多,除了第1节中提到指纹图像采集端的因素,算法本身也是决定认证系统性能的一个方面,如特征点提取算法和匹配算法会直接对系统性能造成影响.为了保证对比实验的公平性,后续指纹处理一系列算法采用相同的算法,其中指纹增强采用 Hong 等人<sup>[15]</sup>提出的 Gabor 滤波器,特征提取使用 Nguyen 等人<sup>[21]</sup>提出的方法.在 Mubeen 等人<sup>[12]</sup>提出的匹配算法基础上根据特征点的质量索引不同给予不同的匹配权重,来自于质量好区域的特征点赋予较大权重,而来自于较差区域的特征点匹配时赋予较小权重.实验将本文算法与其他4种指纹质量估计算法<sup>[7-10]</sup>在系统性能方面作比较,使用接收者操作特征曲线(Receiver Operator characteristic, ROC 曲线)表征系统性能,曲线反映的是真接受率(True Acceptance Rate, TAR)和假接受率(False Acceptance Rate, FAR)的关系,应用中希望得到更大 TAR 和更小的 FAR.图5是不同算法分别对 DB I、DB II、DB III 进行处理得到的 ROC 曲线,从结果可以看出本文提出质量估计方法在认证系统性能提升方面明显优于 DNN、MP-CCP、MDT 和 FR-IQA 算法,这是由于本文所提出的算法

综合考虑了梯度场、方向场和频率对指纹质量影响,并在参数估计阶段进行了修正,进一步提升参数估计的鲁棒性. DNN 算法采用深度神经网络方法对于指纹整体变形的估计和纠正效果较好,虽然与本文提出的算法性能接近,但在图像局部区域处理方面存在不足.

### 3.3 时间复杂度分析

时间复杂度可以定性描述算法的运行时间,是算法实际应用中考虑的一个方面,算法能否应用于实际中的重要考虑因素.应用中往往希望在保证性能前提下,能降低算法时间复杂度和资源消耗.为了验证本文提出的指纹图像质量估计算法在时间复杂度上的优势,分别在不同的平台上实现所提出指纹质量估计算法.在 NVIDIA GTX 960 GPU@1.3 GHz 平台上使用 C 语言实现并行化加速程序运行;在 Intel FPGA ARRIA V 平台上采用并行的方式,以硬件描述语言实现;针对于嵌入式终端应用场景,分别在 TI 的 DSP TDA3MA @500 MHz、ARM Cortex-A9 @925 MHz、ARM Cortex-M4 @168 MHz 对算法进行实现并比较算法运行时间.表2是本文提出的算法与现有的部分质量估计算法在时间复杂度和计算时间的对比,从表中可以看出,本文提出的算法计算时间复杂度明显低于 DNN、MP-CCP 和

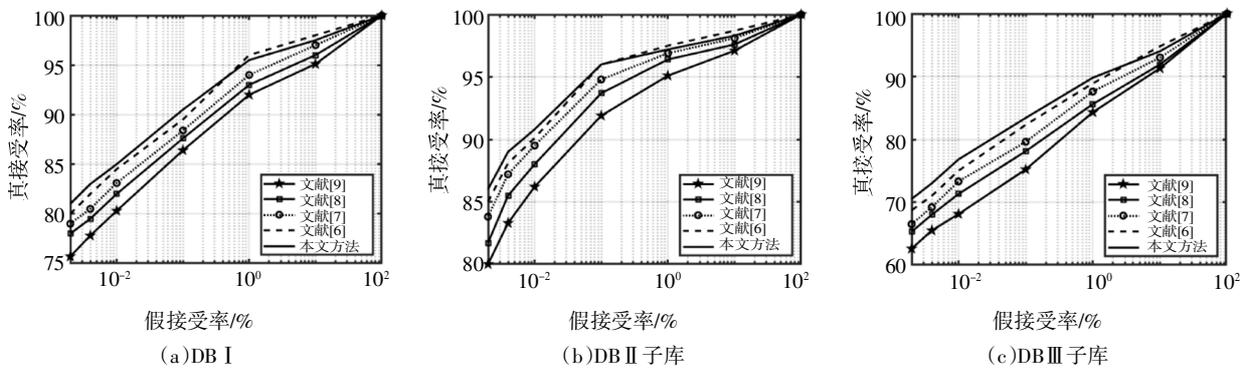


图5 不同指纹库的 ROC 曲线  
Fig.5 ROC curves of different fingerprint image libraries

表2 算法计算时间对比

Tab.2 Algorithm calculation time comparison

算法	时间复杂度	GTX 960 GPU/ms	TDA3MA/ms	Cortex-A9/ms	Cortex-M4/ms	FPGA/ms
DNN <sup>[7]</sup>	$O(\sum_i N_i^2 n_i^2 C_i - C_i)$	1 135.53	4 855.68	35 509.27	—	474.28
MP-CCP <sup>[8]</sup>	$O(6N^2n^2 + N \log n)$	74.86	336.47	2 257.49	12 889.73	31.36
MDT <sup>[9]</sup>	$O(6N^2n^2 + 16N^2 \log n)$	83.75	474.01	3 027.61	17 605.52	44.39
FR-IQA <sup>[10]</sup>	$O(N^2n^2 + Nn)$	5.49	24.81	211.03	1 176.57	1.18
本文方法	$O(N^2n^2 + \frac{1}{\sqrt{N}})$	8.52	34.82	309.65	1 554.63	2.74

MDT 算法,与 FR-IQA 算法复杂度相近.从实际算法在硬件平台运行时间的结果可以看出,FR-IQA 算法和本文提出的算法在各类硬件平台上运行时间少于其他 3 种算法,适合在基于 Cortex-A9 和 Cortex-M4 的平台中应用,但是 FR-IQA 采用传统图像的质量估计方法虽然在时间也具有优势,但由 3.2 节比较可知,FR-IQA 难以在质量估计准确度较高的场景下应用.

## 4 结 论

为了解决指纹质量估计在嵌入式设备深入应用中时间复杂度较高的问题,提出了应用于嵌入式设备的指纹图像质量估计方法.首先对指纹图像梯度、方向和频率等特征信息参数进行估计,分析梯度场和方向场的关系,并考虑频率对估计的影响得到指纹质量索引表达式.通过建立基于纹理图的质量估计模型详细说明所提出方法的准确性,实验结果表明,本文提出的算法在质量索引及分割方面与主观感知具有非常好的一致性,估计结果可以很好地反映指纹图像的质量.通过质量优劣区域分离度、系统性能比较和算法时间复杂度的对比,本文提出的算法具有较高性能,特别对于质量差的指纹和形变较大区域有很好的表现.并且提出的算法时间复杂度低,在不损失准确性的情况下,计算时间消耗较少,可以很好地应用于嵌入式设备中.为了进一步降低算法的计算时间,下一步将考虑在嵌入式应用中对算法进行定点操作.

## 参 考 文 献

[1] MAJID K, NARGES A, DIMITRIOS H. Liveness detection and automatic template updating using fusion of eeg and fingerprint [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2018, 13 (7):1810—1822.

[2] YAO Z G, BARS J L, CHARRIER C, *et al.* Literature review of fingerprint quality assessment and its evaluation [J]. IET Biometrics, 2016, 5(3):243—251.

[3] SCHUCH P, SCHULZ S, BUSCH C. Survey on the impact of fingerprint image enhancement [J]. IET Biometrics, 2018, 7(2):102—105.

[4] 沈丽丽, 彭科. 基于小波包分解的无参考立体图像质量评价 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(10):139—147.

SHEN L L, PENG K. No-reference stereoscopic image quality assessment based on wavelet-packet decomposition [J]. Journal of Hunan University (Nature Sciences), 2018, 45(10):139—147. (In Chinese)

[5] 张莉, 李甫, 吴开腾. 无方向的三角形匹配指纹识别 [J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(9):1214—1221.

ZHANG L, LI F, WU K T. Directionless triangle-matching fingerprint recognition [J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(9): 1214—1221. (In Chinese)

[6] RAONI F S T, NEUCIMAR J L. A new framework for quality assessment of high-resolution fingerprint images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(10): 1905—1917.

[7] ALI D, HADI K, SEYED M I, *et al.* Fingerprint distortion rectification using deep convolutional neural networks [C] // International Conference on Biometrics. Los Angeles, CA, USA: IEEE Biometrics Council, 2018: 1—8.

[8] JAVAD K, ALI M K. Fingerprint indexing based on minutiae pairs and convex core point [J]. Pattern Recognition, 2017, 67(C): 110—126.

[9] YAO Z, BARS J L, CHARRIER C, *et al.* Quality assessment of fingerprints with minutiae delaunay triangulation [C] // International Conference on Information Systems Security and Privacy. Angers, France: IEEE, 2015: 315—321.

[10] GALLALLY J, MARCEL S, FIERREZ J. Image quality assessment for fake biometric detection: application to iris, fingerprint and face recognition [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(2): 710—724.

[11] TARIQ M K, DONALD G B, MOHAMMAD A, *et al.* Efficient hardware implementation for fingerprint image enhancement using anisotropic gaussian filter [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(5): 2116—2126.

[12] MUBEEN G, SHAHZAIB I, SYED A T, *et al.* Efficient fingerprint matching using GPU [J]. IET Image Processing, 2018, 12(2): 274—284.

[13] GOK M, GORGUNOGLU S, ORAK I M. Fingerprint pre-processing on ARM and DSP platforms [J]. Electronics & Electrical Engineering, 2014, 20(6): 140—143.

[14] 刘国才, 王帅卿. 多方向几何非线性扩散图像去噪方法 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(8): 135—141.

LIU G C, WANG S Q. Multi-directional geometric nonlinear diffusion method for image denoising [J]. Journal of Hunan University (Nature Sciences), 2016, 43(8): 135—141. (In Chinese)

[15] HONG L, WAN Y F, JAIN A. Filter-Fingerprint image enhancement algorithm and performance evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777—789.

[16] DOGHRAJI S, DONIAS M, BERTHOUMIEU Y. Recursive texture orientation estimation based on space transformation and hypersurface reconstruction [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(9): 4367—4381.

[17] LEE C, LEE S, KIM J, *et al.* Preprocessing of a fingerprint image captured with a mobile camera [C] // ICB'06 Proceedings of the 2006 International Conference on Advances in Biometrics. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006: 348—355.

[18] CAPPELLI R, MAIO D, MALTONI D. An improved noise model for the generation of synthetic fingerprints [C] // Control, Automation, Robotics and Vision Conference. Kunming: IEEE, 2004: 1250—1255.

[19] MALTONI D, MAIO D, JAIN A K, S. *et al.* FVC2002 Database [EB/OL]. [2017-11-20]. <http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/databases.asp>.

[20] DULA R, HART P, STORK D. Pattern classification [M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2000: 6—10.

[21] NGUYEN T H, WANG Y, LI R F. An improved ridge features extraction algorithm for distorted fingerprints matching [J]. Journal of Information Security and Applications, 2013, 18(4): 206—214.