

# 基于特征融合的指纹质量评估算法<sup>\*</sup>

马丽红<sup>1</sup> 余德聪<sup>1</sup> 卢汉清<sup>2</sup> 陈志清<sup>3</sup>

(1. 华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510640; 2 中国科学院自动化研究所 模式识别国家重点实验室, 北京 100080; 3 广东省公安厅 刑事技术中心, 广东 广州 510050)

**摘 要:** 针对公安刑侦指纹库中指纹质量参差不齐的问题, 提出一种基于指纹图的空间和频率特征融合的指纹质量评估算法. 首先用中心区域黑像素比例、环形谱结构和 Gabor 方向特征来单独评估指纹质量, 分析各种特征的评估性能. 然后, 根据各评估特征对不同质量类型指纹的评估特性, 给出一种新的非线性指纹评估准则, 它通过对 3 种质量特征的评估结果进行非线性融合加权来计算指纹的质量评估分数. 在公安刑侦指纹库上测试了该评估准则, 结果表明, 文中提出的非线性融合评估方法能够准确地评估指纹质量.

**关键词:** 指纹; 质量评估; 算法; 非线性融合; Gabor 特征; 黑像素比例

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

由于指纹特征具有个体惟一性和不随年龄改变的特性, 指纹识别被视为最有效的生物特征识别手段或方法之一, 已广泛应用于刑事罪犯识别、自动取款卡验证、网上银行和楼宇门禁控制等各种身份认证场合. 但是自动指纹识别系统的性能很大程度上依赖于采集的指纹质量. 指纹质量主要与皮肤湿度、按捺压力、污渍、传感机制、创伤及其它因素有关. 一枚质量好的指纹应该有清晰的脊谷结构, 这样才能保证比较高的识别率. 如果能够首先评估指纹的质量, 拒绝质量低的指纹图并及时重新采集指纹图, 自动指纹识别系统的性能将会大大提高. 事实上, 采集的指纹质量控制, 指纹库中图像质量分布的分析, 对低质量指纹进行修改的阈值设定等应用都迫切需要一个切实可行的指纹质量评估标准. 因此, 一种有效的指纹质量评估标准对于实际应用是很重要的.

近几年来, 已有文献提出了一些指纹质量评估方法. Hong 等<sup>[1]</sup>在与指纹方向场局部正交的方向上计算各分块的灰度方差, 然后用方差值来评估指纹

的质量, 但该方法要求在准确的方向场上进行, 因此在指纹噪声比较严重的情况下, 该方法会失效. Ratha 和 Bolle<sup>[2]</sup>提出了一种基于小波标量量化 (WSQ) 的图像评估方法, 但自动指纹识别系统中采用非压缩指纹图像, 因此 WSQ 不适用于指纹质量的评估. Shen 等<sup>[3]</sup>提出了一种基于 Gabor 滤波器的指纹图像质量评估方法, 但该方法对不同大小和不同分辨率的图像需要训练滤波器参数, 而且 Gabor 变换也耗费一定的计算时间. Lin 等<sup>[4]</sup>引入梯度向量的特征值来评估局部脊线和方向的确定程度, 并用方向流来评估质量, 该方法只能在噪声不是方向分布的条件下, 才能够确保方向表示的可靠性. 其它的指纹质量评估方法还包括傅立叶变换谱方法<sup>[5]</sup>和基于梯度方向的方法<sup>[6]</sup>. 以上这些方法只使用了指纹的局部特征来评估指纹的质量, 而单一的特征往往只能反映指纹图像质量的某个方面, 不足以区分所有的质量类型. 因此, 结合指纹的空域和频域、局部和全局特征来评估是一种合理的构想. 一种利用七种局部和全局特征的合成方法<sup>[7]</sup>已用于指纹的质量评估, 但这种方法由于融合参数太多, 在确定各个特征的权值时比较困难, 而且它是一种线性加权方法, 在融合时并没有考虑到不同特征对最终评估结果的贡献是不同的, 而且往往是非线性的.

文中提出了一种新的基于中心区域黑像素比、环形谱结构和局部 Gabor 特征的非线性融合方法.

收稿日期: 2006-05-09

<sup>\*</sup>基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60472063); 广东省自然科学基金项目资助 (04020074/CN200402)

作者简介: 马丽红 (1965-), 女, 博士, 副教授, 主要从事图像视频处理与模式识别方面的研究. E-mail: eellma@scut.edu.cn

由于环绕指纹中心点的区域对于指纹质量评估最为重要,而且中心区域黑像素比例最能反映主要脊谷结构的对比度和完整性,因此文中的实验主要是在指纹中心的前景区域中进行,并去除其它的背景区域。

## 1 指纹质量特征及其性能分析

指纹质量可以通过很多特征来评估,其中用来评估指纹质量的最重要的 3 个特征包括中心区域黑像素比、环形谱结构和 Gabor 方向特征。本节分别定义了这 3 种特征的质量评估分数函数,并比较了这些特征的评估性能。

### 1.1 中心区域黑像素比

指纹中心区域的灰度分布对指纹质量评估有着非常重要的意义。质量好的指纹图像有很高的脊谷对比度,因为这些指纹图像细节清晰,能很好地区分脊谷结构。而湿指纹的污垢会使成像后的相邻指纹线粘连在一起,干指纹中指纹线断裂使指纹的前景位置包含背景区域,这些现象会极大地影响脊谷对比度,而且脊谷结构的完整性在一定程度上会遭到破坏。

为了定量分析脊谷对比度,设  $R_B$  为中心区域的黑像素比例,  $N_B$  为黑像素数目,  $L$  为中心区域的长和宽,则  $R_B$  可定义为

$$R_B = N_B / L^2 \quad (1)$$

可见,  $R_B$  为对中心区域归一化后的黑像素数目,即单位面积的黑像素数。

通过对 620 枚指纹训练样本的统计和测算,定义中心区域黑像素比的质量评估分数函数  $Q_1$  为

$$Q_1 = \begin{cases} 2 - \frac{\bar{G}}{150} \left( 1 - \frac{1 - R_B}{3} \right), & \bar{G} > T_1 \\ 1 - \sqrt{|R_B - 0.6|}, & T_2 < \bar{G} < T_1 \\ \frac{\bar{G}}{150} \left( 1 - \frac{R_B}{3} \right), & \bar{G} < T_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\bar{G} = \frac{1}{L^2} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L G_{ij} \quad (3)$$

式中:  $G_{ij}$  为像素点  $(i, j)$  的灰度值,  $\bar{G}$  为中心区域  $L \times L$  的平均灰度值。  $\bar{G} > T_1$  的灰度区为干指纹图像,  $\bar{G} < T_2$  的灰度区为湿指纹图像,  $T_2 < \bar{G} < T_1$  的灰度区为质量好的指纹图像。

图 1 给出了指纹原图及其指纹中心区域图。图 2 给出了训练过程中 3 类指纹图随黑像素比例的分布情况,对比图 2 和式 (2) 可知,湿指纹分布区内的黑像素比例越小,其质量越好;干指纹分布区内的黑像素比例越小,其质量越差;对于质量好的指纹图,其黑像素比例接近一个常数  $R_B$ ,灰度均值在  $T_2$  和

$T_1$  之间。当指纹分布区内的黑像素比例偏离常数  $R_B$  时,指纹图像质量会迅速下降。

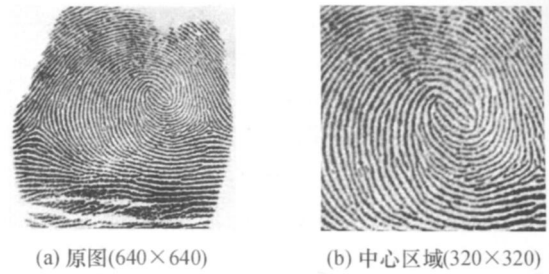


图 1 中心区域分割

Fig 1 Segmentation of central area

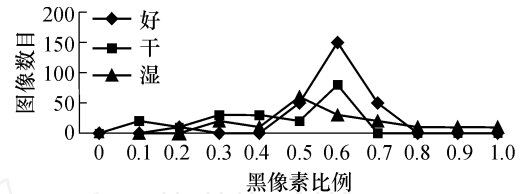


图 2 3 类指纹图的黑像素比例分布

Fig 2 Black-pixel ratio distributions of three kinds of fingerprint images

计算指纹质量评估分数函数  $Q_1$  ( $L = 320$ ) 的主要步骤如下:

- (1) 定位指纹中心点<sup>[8]</sup>, 如果找不到指纹中心点, 把指纹图像中心设为中心点;
- (2) 计算以指纹中心点为中心的  $320 \times 320$  区域的平均灰度值;
- (3) 把指纹图像分为 3 类 (湿、好、干), 并用 3 个不同的阈值对指纹图二值化;
- (4) 根据式 (2) 计算指纹质量评估分数  $Q_1$ 。

通过  $Q_1$  能够很容易地区分出干指纹和湿指纹, 并对质量好的指纹进行质量评估。但对于前景区域远小于  $320 \times 320$  的指纹计算会出现问题, 因为此时  $320 \times 320$  的中心区域包含了大量的背景像素。

### 1.2 环形谱结构

傅立叶变换是分析全局的方向和频率结构的有用工具。由于指纹的空域脊谷模式在频域表现出明显的环形结构, 因此可以用环形谱结构来评估指纹的质量。

一枚质量好的指纹, 其离散傅立叶变换图在幅度谱中心会出现一个环, 因为脊谷结构是一个准周期性信息, 它在大部分方向上有几乎相等的频率峰值, 即指纹脊谷变化对应某一个较窄的频率带。而质量差的指纹在幅度谱上不会出现一个明显的环, 因为他们包含了污垢点、模糊边界和断开的纹线等, 这使指纹图像占据了很宽的频率带。此时, 即使指纹图像的黑像素比例满足中心黑像素比值的要求, 但该

指纹也需要重新采集. 图 3 给出了一枚指纹的环形谱结构图.

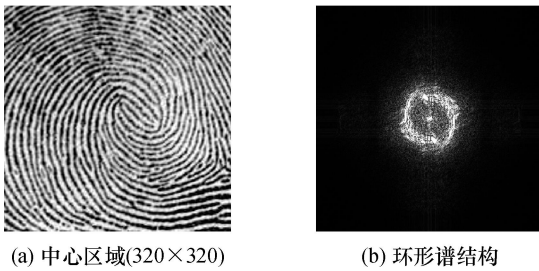


图 3 中心区域与环形谱结构

Fig 3 Central area and ring structure of Fourier spectrum

文中采用文献 [5] 中的环形谱结构特征来解决宽带噪声指纹的判断问题, 并定义了一个新的指纹质量评估分数函数  $Q_2$  为

$$Q_2 = \frac{1}{C_2} \sum_{i=0}^{359} F \quad (4)$$

式中:  $C_2$  为归一化因子, 它将  $Q_2$  归一到 0 与 1 之间.

$$F = 2P(x_m, y_m) - P(x_s, y_s) - P(x_l, y_l) \quad (5)$$

其中  $P(x_m, y_m)$  代表在最大幅度环上角度为  $\theta$  处的幅度值,  $(x_s, y_s) = (x_m, y_m)/2$  和  $(x_l, y_l) = 3(x_m, y_m)/2$  是同一方向上的参考点.

文中在计算  $Q_2$  之前, 首先搜索最大的频谱环位置以获得更准确的评估. 如果不搜索最大环直接用方程 (4) 计算  $Q_2$ , 那么不同指纹脊谷距离的差异性会导致  $F$  出现负值. 为避免这一问题, 要求检测到的最大幅度环  $i$  应满足

$$i = \text{Max}_j \left\{ \sum_{j=0}^{359} P(x_j, y_j) \right\}, \quad 30 \leq j \leq 40 \quad (6)$$

式中:  $P(x_j, y_j)$  代表频谱幅值,  $(x_j, y_j)$  是该点的坐标, 整数  $j$  是最大频谱环到频谱中心点的距离. 归一化图像后较大的  $P(x_j, y_j)$  出现在相应角为  $\theta$  距离频谱中心 30 至 40 像素点处. 因为中心前景区域大小为  $320 \times 320$ , 指纹相邻脊谷之间平均距离大概为 9 个像素点, 而相应的最大频谱幅值出现在距离频谱中心 30 至 40 像素点. 计算  $Q_2$  ( $L=320$ ) 的步骤如下:

- (1) 定位指纹中心点;
- (2) 对  $320 \times 320$  中心区域进行傅立叶变换;
- (3) 应用式 (6) 搜索最大的频谱环;
- (4) 在最大频谱环上根据式 (4) 计算  $Q_2$ .

由于傅立叶变换是在全局上计算中心区域的质量好坏, 因此即使指纹图中只有小部分区域是质量差的, 它的质量评估分数也是不会高的. 因而  $Q_2$  能较为准确地评估指纹的脊谷周期性呈现能力.

### 1.3 Gabor方向特征

Gabor 滤波器同时具有方向选择性和频率选择

性. 由于质量好的指纹图像有很强的方向趋势和非常明确的空间频率, 而质量较好的指纹块, 其 Gabor 特征值在一个方向或者几个方向上会比其它方向大很多; 相反质量较差的指纹块, 其 Gabor 特征在各个方向的取值变得很接近. 因此, 可以用各个方向的 Gabor 特征标准差来评估指纹的局部质量.

二维 Gabor 滤波器的通用形式如下:

$$h(x, y, \theta_k, f_0) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{x_k^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_k^2}{\sigma_y^2} \right) \right\} \cos(2\pi f_0 x_k) \quad (7)$$

$$x_k = x \cos \theta_k + y \sin \theta_k \quad (8)$$

$$y_k = y \cos \theta_k - x \sin \theta_k \quad (9)$$

式中:  $\theta_k$  为滤波器  $h(x, y, \theta_k, f_0)$  在第  $k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) 个方向上的角度;  $f_0$  为正弦波的频率;  $m$  为滤波器的方向数目;  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  分别为高斯函数沿  $x$  轴和  $y$  轴的标准差. 以  $(X, Y)$  为中心  $l \times l$  分块在第  $k$  个方向上的 Gabor 特征幅度定义为

$$g(X, Y, \theta_k, f_0) = \left| \sum_{x=-l/2}^{l/2-1} \sum_{y=-l/2}^{l/2-1} I(X+x, Y+y) h(x, y, \theta_k, f_0) \right| \quad (10)$$

式中:  $I(x, y)$  为像素点  $(x, y)$  的灰度值;  $l$  为分块的长;  $\theta_k = (k-1)/m$ ,  $k=1, 2, \dots, m$ .

该 Gabor 分块的标准差为

$$G = \left[ \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (g(X, Y, \theta_k, f_0) - \bar{g})^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\bar{g} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m g(X, Y, \theta_k, f_0) \quad (12)$$

式中:  $\bar{g}$  为该分块在  $m$  个方向上 Gabor 特征幅度的均值. 图 4 给出一枚指纹在 4 个方向上的 Gabor 特征.

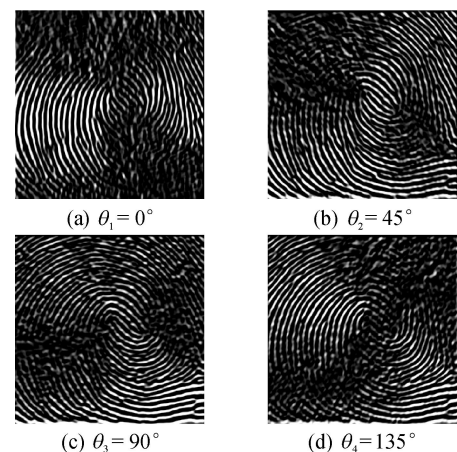


图 4 指纹的 Gabor 方向特征

Fig 4 Gabor directional features of fingerprint

因为文中所处理的中心区域只包含前景块, 所以在计算 Gabor 特征之前不需要对区域进行分割.

通过计算所有前景块的标准差之和,可以得到指纹质量评估分数函数  $Q_3$ :

$$Q_3 = \frac{1}{C_3} \sum_{i=1}^N G(i) \quad (13)$$

式中:  $C_3$  为归一化因子,将  $Q_3$  归一到 0 与 1 之间;  $N$  为指纹分块数.  $Q_3$  的评判依据是指纹的方向性. 由于强方向性意味着高的 Gabor 特征值和高的指纹质量,因此  $Q_3$  能够筛选出具有明确方向性的指纹图. 计算  $Q_3$  的步骤如下:

(1) 定位指纹中心点;

(2) 将前景中心区域 ( $L \times L$ ) 分为  $N$  块 (大小为  $l \times l$ );

(3) 分别应用式 (10) 和 (11) 计算以像素 ( $X, Y$ ) 为中心的指纹分块的  $m$  个 Gabor 特征幅度和标准差  $G$ ;

(4) 应用式 (13) 计算  $Q_3$ .

## 2 融合评估准则和质量评估分数的计算

定义计算融合评估分数  $Q$  为

$$Q = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^3 w_i Q_i^{k_i}, \quad k_i = 1, 2 \quad (14)$$

式中:  $C$  为归一化因子,将  $Q$  归一到 0 与 1 之间;  $w_i$  和  $k_i$  分别为  $Q_i$  的权值和幂次方.

融合评估准则  $Q$  将指纹图像划分为质量好和质量差两类,其中质量差的图像包括干图像和湿图像. 每种质量评估特征对最终质量评估分数的贡献是不同的,对于质量好的图像,傅立叶特征和 Gabor 特征会比较大,而对于质量差的图像,其  $R_B$  偏离正常值. 由于  $Q_1$  能够有效地检测出质量差的图像,而且质量差的图像的  $Q_1$  值小,所以它的幂次方加权值比质量好的大.  $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_3$  的值分别设置为 1、2 和 2,以体现出不同特征的贡献是非线性的. 相反,  $Q_2$  和  $Q_3$  能够很好地表达质量好的图像;对于质量好的图像,其  $Q_2$ 、 $Q_3$  取大值,它们的线性权值比  $Q_1$  的要大,  $w_1$ 、 $w_2$  和  $w_3$  的值分别设置为 2、1 和 1. 通过设置不同的参数,可以满足不同类型指纹的评估需要.

由于每种特征对于最终质量评估分数的贡献是非线性的,式 (14) 的非线性方法比线性方法能更好地对质量好和质量差的图像进行分类.

## 3 实验结果

实验以公安刑侦指纹库为例,包含 620 枚  $640 \times 640$  的 256 灰度级指纹图,分辨率为 500 dpi,评估集中在  $320 \times 320$  中心区域,分块大小为  $16 \times 16$  像素.

图 5 给出了几种不同评估方法的质量评估分

数. 从图 5 可知, Gabor 特征和环形谱结构特征能很好地将指纹图分为质量好和质量差的图像. 而中心区域黑像素比例法能很好地检测出质量差的指纹图像. 对指纹库中的部分图像,虽然其 Gabor 特征和环形谱结构特征的得分比较高,但它们的中心区域分数低. 在这种情况下,非常需要通过融合的方法来获得一个合理的分数. 从图 5 还可以看出,非线性融合方法能够比较容易地找出质量差的图像. 分析那些分数低的图像样本发现,分数低于 0.1 的图像质量是非常差的. 为了进一步测试融合方法的性能,应用指纹分类系统<sup>[8]</sup>将指纹分为斗形、右环、左环、拱形和尖拱形 5 类. 在不拒绝任何指纹图像的情况下,分类的正确率是 90.6%,在应用文中融合评估方法拒绝 10% 质量差的指纹图像后,分类的正确率提高到 94.3%.

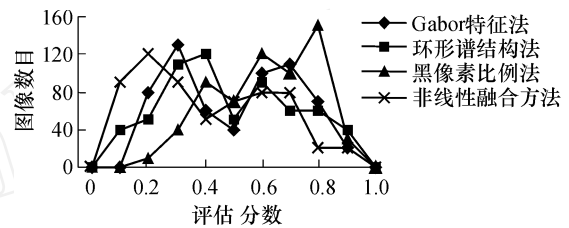


图 5 几种方法的指纹质量评估分数比较

Fig 5 Comparison of fingerprint quality scores evaluated by several methods

图 6 为文中非线性方法和线性方法<sup>[7]</sup>的指纹质量评估分数比较. 从图 6 可以看出,非线性方法能比线性方法更好地辨识质量好和质量差的图像. 按照线性方法计算指纹的质量评估分数,两种方法根据评估后的结果拒绝 10% 质量差的指纹图像后进行指纹分类,线性评估方法的指纹分类正确率为 92.5%,比文中非线性融合评估方法的 94.3% 低 1.8%. 另外,非线性融合评估方法拒绝 25% 质量差的指纹图像后,其分类正确率可以达到 96%.

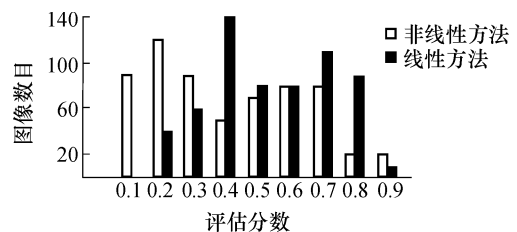


图 6 非线性和线性方法的指纹质量评估分数比较

Fig 6 Comparison of fingerprint quality scores evaluated by nonlinear and linear methods

图 7 给出了文中非线性融合评估方法对三类指纹图的评估结果,从图 7 可见,对于不同类型的指纹图采用不同的参数来非线性融合能得出比较好的评估效果.

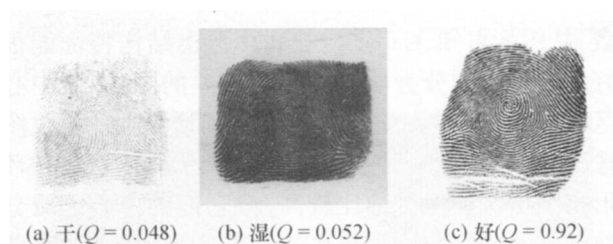


图 7 典型指纹图及其质量评估分数

Fig 7 Typical fingerprint images and their quality scores

## 4 结语

文中提出了一种融合三种特征来评估指纹质量的方法,它采用了非线性加权来实现质量评分,该非线性方法的评估性能优于线性方法.实验结果表明,这三种特征基本满足实验库中指纹图像的质量评估要求.但是,该方法的性能与准确地定位指纹中心点有很大关系.因此,下一步的研究重点在于寻找一种准确的指纹中心点检测方法,用以提高指纹质量融合评估方法的性能.

### 参考文献:

- [1] Hong Lin, Wan Yi-fei, Jain Anil Fingerprint image enhancement algorithm and performance evaluation [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis Machine Intelligent, 1998, 20(8): 777-789.
- [2] Ratha N K, Bolle R M. Fingerprint image quality estimation [C]. Proceeding of 4th Asian Conference on Computer Vision Taipei: AFCV, 2000: 819-823.
- [3] Shen Lin-lin, Kot Alex, Koo Wai-mun Quality measure of fingerprint images [C]. Proceeding of 3th International Conference on Audio- and Video-based Biometric Person Authentication Berlin-Heidelberg: Springer, 2001: 266-271.
- [4] Lin Eyung, Jiang Xu-dong, Yau Wei-yun Fingerprint quality and validity analysis [C]. Proceeding of 2002 International Conference on Image Processing New York: IEEE, 2002: 1469-1472.
- [5] Lee Bongku, Moon Ji-hyun, Kim Hakil A novel measure of fingerprint image quality using the Fourier spectrum [J]. Proc of SPIE, 2005, 5779: 105-112.
- [6] Qi Jin, Shi Zhong-chao, Zhao Xu-ying, et al Measuring fingerprint image quality using gradient [J]. Proc of SPIE, 2005, 5779: 455-459.
- [7] Qi J, Abdurrahim D, Li D, et al A hybrid method for fingerprint image quality calculation [C]. Proc of Fourth IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies Buffalo: IEEE, 2005: 124-129.
- [8] Jain A K, Prabhakar S, Lin H A multichannel approach to fingerprint classification [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(4): 348-359.

## Evaluation Algorithm of Fingerprint Quality Based on Feature Fusion

Ma Li-hong<sup>1</sup> Yu De-cong<sup>1</sup> Lu Han-qing<sup>2</sup> Chen Zhi-qing<sup>3</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, South China Univ of Tech, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

2. National Laboratory of Pattern Recognition of Automation Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

3. Criminal Tech Center, Dept of Public Security of Guangdong Province, Guangzhou 510050, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of quality difference in fingerprint in public security fingerprint database, a new fusion method to evaluate fingerprint quality is proposed by combining the spatial and the frequency features of a fingerprint image. In this method, the black-pixel ratio in the central area, the ring structure of Fourier spectrum and the directional Gabor features are first employed to respectively assess the fingerprint quality, and their corresponding evaluation performances are discussed. Then, according to the evaluation capacities of these features for different quality images, a nonlinear fusion approach is presented to obtain the final quality scores by weighing the nonlinear fusion of the features mentioned above. The fusion criterion is finally tested in a public security fingerprint database, the results demonstrate that the proposed nonlinear fusion algorithm is feasible in fingerprint quality evaluation.

**Key words:** fingerprint; quality evaluation; algorithm; nonlinear fusion; Gabor feature; black pixel ratio