

# 基于 Radon 变换的指纹图像滤波增强方法

李利 范九伦

(西安邮电学院信息与控制系, 西安 710061)

**摘要** 基于 Gabor 滤波实现过干指纹图像的增强是一种较好的方法,如何估计 Gabor 滤波器的参数是解决问题的关键。本文采用 Radon 变换来估计 Gabor 滤波中的方向和频率,然后进行 Gabor 滤波增强。通过对 FVC2000 指纹库中的部分过干的指纹图像进行增强,结果表明,该方法增强效果明显,处理速度较快。

**关键词** 指纹增强 Radon 变换 Gabor 滤波 二值化

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)03-0417-05

## The Method of Fingerprint Image Enhancement Based on Radon Transform

LI Li, FAN Jiu-lun

(Department of Information and Control, Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061)

**Abstract** Using Gabor filter to enhance dry fingerprint image is an effective method. The key step is estimating the parameter of Gabor filter. In this paper, the direction and frequency of Gabor filter is estimated by Radon transform, and then fingerprint image is enhanced by the Gabor filter. Experiment results for some dry fingerprint images in FVC2000 fingerprint bases showed that the proposed method can produce effective enhancing with high processing rate.

**Keywords** Fingerprint enhancement, Radon transform, Gabor filter, Binarization

## 1 引言

随着电子商务,网上贸易的发展,交易的安全性需要更加有效地保证,身份认证和识别显得越来越重要。指纹的唯一性和终身不变性,决定了通过指纹验证身份成为最合理的身份认证方法之一。自动指纹识别系统(AFIS)是目前性价比最高的生物特征识别系统。然而指纹的过干,导致采集到的指纹图像存在很多脊线中断。如果不对这样的指纹图像做滤波增强处理,将会在指纹图像特征提取时得到很多伪特征点,对最终匹配的结果产生影响。因此,对过干指纹图像在提取特征信息之前进行有效地滤波增强是很有必要的。

指纹图像的方向特性和频率特性是指纹图像固有的两种根本特性,目前的指纹增强算法也大都是利用指纹的这些特性来对图像进行滤波,主要有2种方法:方向滤波增强和 Gabor 滤波增强。Gabor 滤波函数本身具有的方向和频率选择的特性,决定了它成为目前指纹图像增强方面研究的热点<sup>[1]</sup>。而滤波器参数的估计成为问题的关键所在。

目前估计方向的方法主要有通过像素点及其邻域灰度值分布特点估计方向<sup>[2]</sup>,以及基于梯度算子的方法<sup>[3]</sup>;估计纹线频率的方法主要有基于方向窗的方法<sup>[4]</sup>,该方法在估计了纹线方向的基础上,根据纹线方向构造图像分块,在块内得到沿纹线方向的灰度均值与分块列的正弦曲线关系,求波峰间距,进而得到脊线频率,算法涉及根据方向分块,实

基金项目:国家自然科学基金项目(60572133)

收稿日期:2007-06-01;改回日期:2007-11-13

作者简介:李利(1984~),女,2008年于西安邮电学院获信号与信息处理专业硕士学位。主要研究方向为指纹识别、图像处理与信息安全。E-mail:lili841006@163.com。

现起来很复杂,而且方向估计结果的误差会直接导致频率估计的不准确。这些方法运算量很大,将直接影响到指纹图像滤波增强的速度。为解决面临的问题,本文通过 Radon 变换估计纹线方向和频率。Radon 变换是一种计算图像沿指定方向上的投影的方法,一个 2 维函数的投影为一个特定方向的线性积分<sup>[5]</sup>。提出的算法首先对图像归一化,然后对归一化后的图像进行 Radon 变换,估计纹线方向和频率,准确地估计了图像分块的纹线方向和频率,很大程度上减少了运算时间,提高了估计 Gabor 滤波参数的可靠性和效率。

## 2 指纹图像的增强算法

### 2.1 指纹图像的归一化处理

指纹图像归一化的目的是使图像灰度值达到一个预先定义的平均值和方差;增强图像整体对比度。归一化处理能够有效地解决按压不均匀对采集到的指纹图像的影响。归一化采用如下公式实现<sup>[6]</sup>:

$$g(i, j) = \begin{cases} m_0 + \sqrt{\frac{v_0(I(i, j) - m)^2}{v}} & I(i, j) \geq m \\ m_0 - \sqrt{\frac{v_0(I(i, j) - m)^2}{v}} & I(i, j) < m \end{cases} \quad (1)$$

对于图像  $I(i, j)$ ,  $m, v$  分别为图像的灰度均值和方差,  $m_0, v_0$  为期望的灰度均值和方差,实验中取  $m_0 = 100, v_0 = 100$ <sup>[6]</sup>。

### 2.2 滤波器参数的设计

对指纹图像进行 Gabor 滤波增强,需要估计两个重要的参数:纹线方向和频率。

本文对归一化后的指纹图像分块,通过 Radon 变换计算纹线方向和频率。图像的 Radon 变换是将原始图像变换为它在各个方向上的投影表示。图像  $f(x, y)$  在角度  $\theta$  上的投影定义为

$$R(\theta, x') = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x' \cos \theta - y' \sin \theta, x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy' \quad (2)$$

式中,

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3)$$

Radon 变换可以形象地用图 1 表示:

基于指纹图像在一定分块内的方向和频率的一致性,对图像分块做 Radon 变换。得到的结果  $R$  是一个以角度  $\theta$  为列,以  $x'$  为行的矩阵,矩阵里的

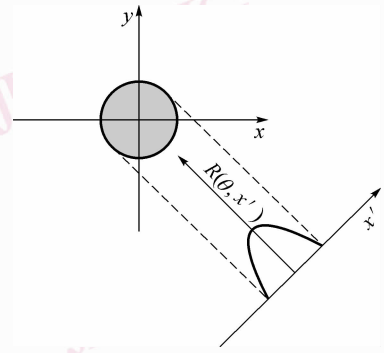


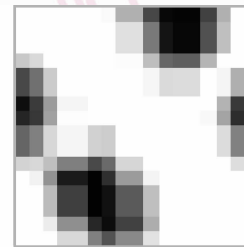
图 1 Radon 变换示意图

Fig. 1 Radon transform

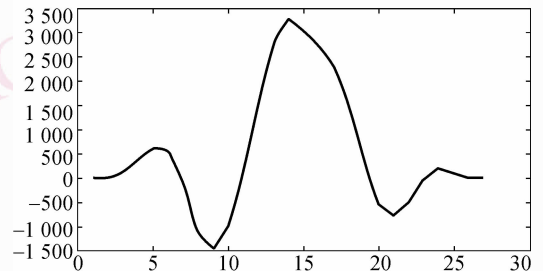
元素为图像块的投影值,也就是图像在 Radon 域的值。

指纹纹线具有局部方向性,所以图像块在垂直于纹线方向上的投影值的最大值也是 180 个方向上各个投影值的最大值。这样,我们可以认为:Radon 域最大值所在的列  $j$  (投影角度  $(1^\circ \sim 180^\circ)$ ),将对应与脊线方向垂直的方向。这样得到的脊线方向精确到  $1^\circ$ ,并且运算的速度很快,为后面的滤波增强做好了准备。脊线的方向  $\alpha$  与  $j$  之间的关系如下:

$$\alpha = \begin{cases} j \times 1^\circ + 90^\circ & j \leq 90 \\ j \times 1^\circ - 90^\circ & j > 90 \end{cases} \quad (4)$$



(a) 16×16 的图像块



(b) Radon 域最大值所在列的值域分布

图 2 图像块的 Radon 变换

Fig. 2 Radon transform of the image block

对于归一化后的  $512 \times 512$  的指纹图像,选取  $16 \times 16$  的图像块,如图 2(a) 所示的图像块。对它进行 Radon 变换, Radon 域的最大值所在的列为第 45 列,应用式(4)估计纹线方向,知纹线的方向为  $135^\circ$ 。矩阵  $R$  中第 45 列的值域分布如图 2(b) 所示。

指纹纹线具有局部频率性,所以图像块在每个方向上的投影值与行数  $x'$  成近似正弦曲线的关系。与脊线方向垂直的方向上的投影值与行数的这种正弦曲线关系就可以用来估计脊线或者谷线间距,从而估计纹线频率。图 2(b) 就是图 2(a) 所示  $16 \times 16$  图像块在垂直于脊线方向上的投影值与行数的类似于正弦曲线关系的波形图。根据图 2(b) 中波峰间距或者波谷间距,可以估计纹线频率。对比图 2 所示的(a)、(b)2 个图,可以看到指纹图像上的脊线反映在波形上是波谷,谷线反映在波形上是波峰,可以认为相邻波峰与波峰或者相邻波谷与波谷之间的距离就是纹线交替的周期,记为  $d$ ,那么该图像块的纹线频率为:

$$f = \frac{1}{d} \quad (5)$$

这样,估计纹线频率的问题就转化为计算图 2(b) 所示的波峰与波峰或者波谷与波谷之间的距离  $d$ 。如果把分块的大小选得合适,波形图大致上可以分为以下几种情况:

- (1) 只有 1 个波峰和 1 个波谷;
- (2) 2 个波峰, 1 个波谷;
- (3) 2 个波谷, 1 个波峰;
- (4) 2 个波峰, 2 个波谷;
- (5) 2 个波峰, 3 个波谷;
- (6) 3 个波峰, 2 个波谷;
- (7) 只有 1 个波峰。

需要注意的是,这里的波峰应当满足 Radon 值为正数的条件,这样就可以保证它对应于指纹图像上的谷线;同样,波谷也应当满足 Radon 值为负数的条件,这样就可以保证它对应于图像上的脊线。

对这样 7 种波形分别计算周期  $d$ 。对于第 1 种波形,峰顶与谷底之间的距离是周期  $d$  的一半;对于第 2 种波形,波峰与波峰之间的距离看作周期  $d$ ;对于第 3 种波形,波谷与波谷之间的距离看作周期  $d$ ;对于第 4 种波形,取波峰间距和波谷间距的平均值

为周期  $d$ ;对于第 5 种波形,它对应的图像块包含了两条完整的谷线,所以取波峰间距为周期  $d$  要比取波谷间距为周期  $d$  更加合理;对于第 6 种波形,同样的道理,对应的图像块包含两条完整的脊线,所以取波谷间距为周期  $d$  要比取波峰间距为周期  $d$  更加合理;对于最后一种情况的波形,这种波形对应的图像块为背景块,可以不对其做 Gabor 滤波处理,这样,就在估计纹线频率的过程中潜在地对指纹图像加了一个掩膜,对归一化后的指纹图像的背景部分不做处理,更进一步加快了滤波处理的速度。

例如,对于图 2(b) 所示的波形,从图像块(a)来看,该块包含了 2 个完整的脊线,所以波谷间距能够更准确地反映纹线周期。

需要注意的是,如果分块大小取得过大,将产生更多的波峰波谷,这使周期  $d$  的判断变得更加复杂,消耗了更多时间,却不一定能得到更加准确的周期  $d$ ;如果分块的大小取得过小,在块内可能不具有局部频率性,将无法准确地得到纹线频率。一般地,对于  $512 \times 512$  的指纹图像,分块大小取为  $16 \times 16$ 。

### 2.3 指纹图像的 Gabor 滤波增强

Gabor 滤波器具有良好的频率选择性和方向选择性,与指纹图像的特性相符合;并且,根据 Gabor 函数在  $x$  方向带通,在  $y$  方向低通的特性,对 Gabor 滤波器做一定的旋转就可以很好地去掉脊线粘连和连接中断的脊线。所以选择 Gabor 滤波器来对指纹图像进行滤波增强。

偶对称 Gabor 函数的表达式如下:

$$h(x, y, \alpha, f) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_\alpha^2}{\delta_x^2} + \frac{y_\alpha^2}{\delta_y^2}\right)\right] \cos(2\pi f x_\alpha) \quad (6)$$

式中,

$$\begin{pmatrix} x_\alpha \\ y_\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (7)$$

$\alpha$  为 Gabor 滤波器的方向,实际取估计的指纹图像块方向,  $(x, y)$  为像素点的坐标,  $f$  为脊线频率,  $\delta_x^2, \delta_y^2$  分别是沿着  $x$  和  $y$  轴的高斯包络的空间常量,  $\delta_x^2, \delta_y^2$  的值取得越大,滤波器在纹线方向上增强,连接中断脊线的能力越强,但是取得太大,又会减弱垂直于纹线方向的指纹纹线信息。通过实验,取  $\delta_x^2, \delta_y^2$  为 4。

滤波增强后的指纹图像由下面的公式得到:

$$T(i, j) = \sum_{u=-w/2}^{w/2} \sum_{v=-w/2}^{w/2} h(u, v, \alpha, f) L(i-u, j-v) \quad (8)$$

$w$  为滤波器窗口的大小。 $u, v$  分别为遍历图像块的行和列, 卷积实现滤波。 $L(i-u, j-v)$  是图像像素值函数。为了确保图像分块中至少有一脊一谷, 同时, 分块内方向和频率能够保持一致, 通常将原始图像尺寸调整为能够被  $32 \times 32$  整除的大小, 分块大小取为图像大小的  $1/(32 \times 32)$ 。对于本文实验中经最近邻插值扩展后的  $512 \times 512$  大小的指纹图像, 分块大小取为  $16 \times 16$ 。而滤波器窗口大小  $w = 10$ 。式(8)相当于将 Gabor 滤波函数(如式(6)所示)和指纹的归一化图像 2 维卷积, 达到指纹图像增强的目的。

最后, 对增强后的指纹图像采用分块阈值的方法进行二值化处理<sup>[7]</sup>, 得到最终结果。

### 3 实验结果

为了验证提出的算法的增强效果, 对 FVC2000 指纹数据库中的 200 幅过干的指纹图像进行滤波增强, 其中两幅的增强结果如图 3 所示。

图 3(a) 是原始指纹图像; 图 3(b) 是归一化之后的图像; 图 3(c) 是通过文献[4]中的方法增强之后的图像, 文献[4]中的方法是对图像分块, 根据梯度法求纹线方向, 基于方向窗求频率, 最后进行 Gabor 滤波增强; 图 3(d) 是采用本文算法增强的结果。



图 3 增强结果

Fig. 3 Enhancement results

如图 3 所示, 与文献[4]中的增强算法相比较, 本文的增强算法能够更好地增强指纹图像的对比度, 连接中断的脊线, 反映脊线的真实走向。另外, 可以看到, 本文算法对指纹图像边缘部分的处理效果较好。在 Pentium (R) 4, 256 MB 内存, Windows

XP 操作系统环境下, 对上述经最近邻插值法扩展后的  $512 \times 512$  的指纹图像做增强处理, 算法的运算时间如表 1 所示, 可见, 运行时间比文献[4]有进一步的降低。

表1 运行时间比较

Tab.1 The program time comparison

原始指纹图像 (512 × 512)	文献[4]方法增强 时间(s)	本文算法增强 时间(s)
指纹图(a1)	155.024	89.457
指纹图(a2)	163.083	97.771

## 4 结论

利用本文的算法,用 Matlab 对 FVC2000 指纹数据库中一些过干指纹图像进行处理,通过 Radon 变换能得到更为准确的指纹纹线方向和频率,获得了较好的增强效果。此外该方法运算速度较快,能进一步满足大规模指纹识别系统的实时处理与识别的要求。

### 参考文献 (References)

- 1 Liu Yuan-ning, Li Zhi-hui. Research on fingerprint enhancement and classification algorithm [A]. In: Proceedings of the 4th International Conference on Computer and Information Technology [C], Wuhan, 2004: 199-204.
- 2 Luo Xi-ping, Tian Jie. Image Enhancement and minutia matching

algorithms in automated fingerprint identification system [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.]

- 3 Wang Sen, Zhang Wei-wei, Wang Yang-sheng. Fingerprint classification by directional fields [A]. In: Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Multimodal Interfaces [C], Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2002: 395-399.
- 4 Hong Lin, Wan Yi-fei, Anil Jain. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777-789.
- 5 Li Jun-hong, Pan Quan, Chen Yu-chun. An invariant multiscale texture image analysis algorithm based on Radon transform [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(9): 1117-1123. [李军宏, 潘泉, 陈玉春. 基于 Radon 变换的纹理图像多尺度不变量分析算法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(9): 1117-1123.]
- 6 Xia Zhen-hua, Shi Yu, Yu Sheng-lin. Fingerprint image enhancement based on Gabor filters [J]. Journal of Engineering Graphics, 2006, (5): 80-85. [夏振华, 石玉, 于盛林. 基于 Gabor 滤波器的指纹图像增强[J]. 工程图学学报, 2006, 27(5): 80-85.]
- 7 Shao Zhi-yong, Wen Chun-you, Tian Ying. Comparative study among fingerprint image binarization methods [J]. Journal of An Shan University of Science and Technology, 2004, (3): 186-189. [邵志勇, 温春友, 田莹. 指纹图像二值化方法的比较研究[J]. 鞍山科技大学学报, 2004, 27(3): 186-189.]