

Gabor 滤波器在指纹图像分割中的应用

丁裕锋 马利庄 聂栋栋 刘军波

(上海交通大学数字媒体与数据重建实验室, 上海 200030)

摘要 为了有效地进行指纹图像的分割。在分析了 Gabor 滤波器虚部特征的基础上,在指纹图像的分割中引入了 Gabor 滤波器虚部的滤波结果作为新的指纹图像特征,并通过加权平均的分割策略,获得了较好的实验结果。同时,为了提高分割速度,还改进了特定条件下的 Gabor 滤波算法,从而有效地降低了算法的时间复杂度。

关键词 指纹图像分割 Gabor 滤波

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)09-1037-05

The Application of Gabor Filter in Fingerprint Segmentation

DING Yu-feng, MA Li-zhuang, NIE Dong-dong, LIU Jun-bo

(Digital Media and Data Reconstruction Lab. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract Fingerprint segmentation is an important step in fingerprint identification processing. For effective fingerprint segmentation, the properties of the imaginary of Gabor Filter are analyzed and introduced into the fingerprint segmentation processing as a new feature of the fingerprint area. By using this new feature and other two assistance features, namely the local mean value and the local variance, good segmentation results are gotten with the weighted average segmentation method, which shows the result of the imaginary of Gabor Filter is an effective feature of fingerprint images. In order to get a faster algorithm, the Gabor filter algorithm is also accelerated in special conditions, which reduces the complexity of the proposed algorithm efficiently.

Keywords fingerprint image segmentation, Gabor filter

1 引言

指纹识别是当前在身份鉴定中广泛使用的一项生物特征识别技术。在指纹识别的流程中,分割是指纹图像预处理的第 1 步。由于通过指纹图像分割,可以将指纹图像的前景、背景以及模糊区域区分出来,以使得指纹识别处理的其他步骤在有效的纹线区域进行,从而能够有效地减少干扰引起的伪特征,以提高指纹识别的正确率,并减少运算量。

基于方向图的分割方法^[1]是目前应用较为广泛的指纹图像分割方法。这种方法直接根据指纹区域上纹理的方向性,首先区分出指纹区域和背景区域。在有方向性引导的指纹区域,该方法能够较准确地分辨出指纹区域,但在背景区域,由于这种方法失去引导,容易将背景区域识别为前景,所以,这种方法

直接用于分割的效果通常不理想。

Bazen 等用图像的局部灰度均值、局部标准差和局部一致性^[2]作为特征,再利用线性分类的方法分割指纹图像^[3]。其中,局部一致性表征了局部图像纹理走向的一致性,但是这些特征还不足以标示出模糊区域。

针对以上特征的不足,王森等采用了图像的对比如度、局部主能量比、局部标准差和局部一致性作为特征^[4]。其中,对比如度是局部方差与局部灰度均值的比值,局部主能量比则反映了局部图像中主频率上的能量与不含直流分量的局部平均能量的比值。在指纹区域中,由于灰度的分布存在周期性,且主频率上的能量非常集中,而背景区域上灰度分布则通常是散乱的,但能量分布却比较均匀,因而这种特征能标示指纹区域,但是局部主能量比对于背景区域的条纹干扰敏感,在背景区域有条纹干扰的情况下,无

法很好地标示出指纹区域和背景区域。

Gabor 滤波器是 1964 年由 Gabor 引入的窗口傅里叶变换。在指纹图像处理方面,Gabor 滤波器的实部被广泛应用于指纹图像的增强^[5]。本文对 Gabor 滤波器的虚部特点作了分析,并在指纹图像分割中成功引入 Gabor 滤波器虚部的滤波结果作为新的特征。

2 Gabor 滤波器的虚部

在指纹图像的增强中,Gabor 滤波器的实部已被广泛使用,而对其虚部却没有单独的使用。本文对 Gabor 滤波器的虚部作了研究。研究结果表明,在指纹图像的分割中,Gabor 滤波器的虚部滤波结果是标示指纹区域的一种有效特征。

2.1 Gabor 滤波器

Gabor 滤波器的数学表达式如下:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp(\mathbf{j}\omega x) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{j} = \sqrt{-1}$, ω 是纹理的频率。从式(1)可看出,Gabor 滤波器是一个被 Gauss 函数调制的频率为 ω 的正弦波。由于 Gauss 函数的局部性特征,致使 Gabor 滤波器只在局部起作用,同时,因为被调制的正弦波只针对 x 坐标,所以,实际上在 y 方向上被调制的是一个直流分量。由此可见,Gabor 滤波器是一个在 x 方向上带通,在 y 方向上低通的滤波器。为了利用这种方向选择性,需要先将 Gabor 滤波器作用域中的图像转向假定的方向,再对旋转后的图像进行滤波。于是会有以下 3 种情况:

(1) 如果条形纹理的走向与假定方向正交,且信号的频率在带通范围内,则信号能完全通过;

(2) 如果条形纹理的走向正好与假定方向平行,则信号完全通不过,滤波结果基本为 0。

(3) 在(1)、(2)两种情况之间,由于条状纹理信号会在通过时发生一定的衰减,因此滤波结果也介于两者之间。

2.2 Gabor 滤波器的虚部特性

在指纹处理领域,对 Gabor 滤波器的使用通常局限在实部。通过分析 Gabor 滤波器的虚部,即可以看出 Gabor 滤波器虚部的特点。

由 Euler 公式

$$\exp(\mathbf{j}\omega x) = \cos(\omega x) + \mathbf{j}\sin(\omega x) \quad (2)$$

式(1)可以展开为

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cos(\omega x) + \mathbf{j} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \sin(\omega x) \quad (3)$$

可见,Gabor 滤波器的虚部是一个奇函数,因为,使用 Gabor 滤波器滤波时,积分区域总是中心对称的,所以,如果被积函数在这个区域内是中心对称的,则积分的结果就将为零。如果被积函数在这个区域内是中心反对称的,则积分结果的模值将最大;而 Gabor 滤波器的实部为偶函数,它的作用和虚部刚好相反。

对于任意的被积函数,Gabor 滤波器的虚部能更好地反映出被积函数在 Gabor 滤波器的 x 方向上的不对称性,而 Gabor 滤波器的实部则能更好地反映出被积函数的对称性。

2.3 Gabor 滤波器用于指纹图像分割

正是由于 Gabor 滤波器的虚部的特性,因此能更好地在指纹图像的分割中利用 Gabor 滤波器的虚部。

由于指纹图像区域的特点是有清晰的黑白条状纹理,使用 Gabor 滤波器的虚部滤波,其滤波结果的模值都比较大;而背景图像区域由于通常没有条状纹理,或者纹理不明显,其滤波结果的模值都比较小,因此,利用 Gabor 滤波器的虚部对整幅图像进行滤波,能区分出图像的指纹区域、背景区域和指纹模糊的低质量区域。

2.4 利用 Gabor 滤波器虚部滤波的加速算法

由于 Gabor 滤波器的虚部需要进行二维卷积运算,所以在滤波窗口较大时,一次运算的时间会比较长。当未知任何纹理信息,需要估计纹理走向时,则需要将多个方向上的 Gabor 滤波结果叠加,运算时间将会更长。如果不对滤波算法进行加速优化,那么处理一幅 256×256 的指纹图像的运行时间就将达到数秒,这将严重影响算法的响应性能。

为此,在利用 Gabor 滤波器虚部滤波的时候,本文对滤波算法进行了优化,即将二维的 Gabor 卷积运算分解为 3 个一维实数卷积运算。

首先,假设 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, 于是有卷积公式

$$G(x, y) = \sum_{s=-W_x/2}^{W_x/2} \sum_{t=-W_y/2}^{W_y/2} \exp\left(-\frac{s^2+t^2}{2\sigma^2}\right) I(x+s, y+t) \exp(\mathbf{j}\omega s_\theta) \quad (4)$$

(4)

其中,

$$s_{\theta} = s \cos \theta + t \sin \theta$$

$$t_{\theta} = t \sin \theta + s \cos \theta$$

W_x, W_y 为 x, y 方向窗口的大小

上式可以被分解为两个独立的一维复数卷积。

令

$$\hat{I}(x, y) = \sum_{t=-W_y/2}^{W_y/2} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) I(x+s, y+t) \times [\cos(\omega t \sin \theta) + \mathbf{j} \sin(\omega t \sin \theta)] \quad (5)$$

于是

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \sum_{s=-W_x/2}^{W_x/2} \hat{I}(x, y) \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right) \times [\cos(\omega s \cos \theta) + \mathbf{j} \sin(\omega s \cos \theta)] \quad (6)$$

取其虚部,整理后得

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \sum_{s=-W_x/2}^{W_x/2} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right) \times \hat{I}_r(x+s, y) \sin(\omega s \cos \theta) + \frac{1}{2\pi\sigma^2} \sum_{s=-W_x/2}^{W_x/2} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right) \times \hat{I}_i(x+s, y) \cos(\omega s \cos \theta) \quad (7)$$

其中

$$\hat{I}_r(x+s, y) = \sum_{t=-W_y/2}^{W_y/2} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \times \cos(\omega t \sin \theta) I(x+s, y+t)$$

$$\hat{I}_i(x+s, y) = \sum_{t=-W_y/2}^{W_y/2} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \times \sin(\omega t \sin \theta) I(x+s, y+t)$$

其中, $\exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \sin(\omega t \sin \theta)$, $\exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \times \cos(\omega t \sin \theta)$, $\exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right) \cos(\omega s \cos \theta)$ 及 $\exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right) \times \sin(\omega s \cos \theta)$ 都可以预先求出。设 Gauss 窗口的宽度为 $n \times n$, 对于每个像素点, 式(4)的运算量为 $n \times n$ 次乘法和 $n \times n - 1$ 次加法, 而式(7)的运算量仅为 $4n$ 次乘法和 $4n - 2$ 次加法。这样就将一个宽度为 n 的方窗的计算量从平方级降到线性, 对于较大的 Gauss 窗口, 式(7)能够有效地减少运算量。

3 算法框架

由于在有效的纹理区域, Gabor 滤波器虚部的一

些滤波结果会出现模值相对较大的负数, 因此本文对 Gabor 滤波器的滤波结果取模值。又因为 Gabor 滤波器虚部对在滤波器的 x 方向上关于滤波器中心对称的函数的滤波结果是 0。对于指纹图像, 若选择的频率适当, 则在纹线的中线位置会出现很窄的 0 区域, 于是, 在做图像分割的时候, 若同时引入图像的局部灰度均值特征和局部标准差特征, 并使这两个特征与 Gabor 滤波器的滤波结果相结合, 再使用加权平均的分割策略就可获得较好的分割结果。

算法描述:

- (1) 用 8×8 模板计算局部灰度均值;
- (2) 用 8×8 模板计算局部标准差;
- (3) 用 9×9 窗口的 Gabor 滤波器虚部对指纹图像进行滤波;
- (4) 构造并获取特征向量;
- (5) 计算特征向量的加权平均;
- (6) 初始化结果模板, 置所有值为 1;
- (7) For 每个像素点 {

计算该像素的 3×3 邻域内, 特征向量的加权平均值超过阈值的像素点个数 count;

if (count < 阈值 1)

if (count > 阈值 2)

if (Gabor 滤波结果 < 阈值 3 or 标准差 < 阈值 4)

置结果模板的当前像素点位置为 0;

end if

end if

end if

end for

4 实验结果

在进行图像分割的时候, 由于纹理方向尚未确定, 因此本文采用了 $0, \pi/4, \pi/2$ 和 $3\pi/4$ 4 个方向的 Gabor 滤波器, 并将滤波结果叠加, 作为 Gabor 滤波器滤波的结果。图 1 是一幅指纹图像 4 个方向上的 Gabor 滤波器虚部的滤波结果和叠加以后的结果。

为验证 Gabor 滤波器虚部在指纹图像分割中的效果, 本文对 VeriFinger 软件使用的示例图像和 FVC2000 的 DB_2 指纹数据库中的指纹图像做了分割实验, 得到了较为满意的结果。图 2 是对一幅指纹图像的局部均值、局部标准差、局部一致性和 Gabor 滤波器虚部的滤波结果。从图中可以看到,

Gabor 滤波器虚部的滤波结果比局部均值提取结果和局部标准差提取结果更清楚地标示出了指纹图像的纹线区域,比局部一致性提取结果更清晰地标示出纹线区域的边界。图 3 给出了本文方法的一些分割结果,图 3(a)是 VeriFinger 软件使用的一幅示例

图像,图 3(b)是 FVC2000 的 DB-2 指纹图像库中的一幅指纹图像。由于 Gabor 滤波器虚部的滤波结果很好地标示出了指纹区域,因此使用简单的分割策略即可获得较好的分割结果。

实验中,在使用改进的 Gabor 滤波算法后,分

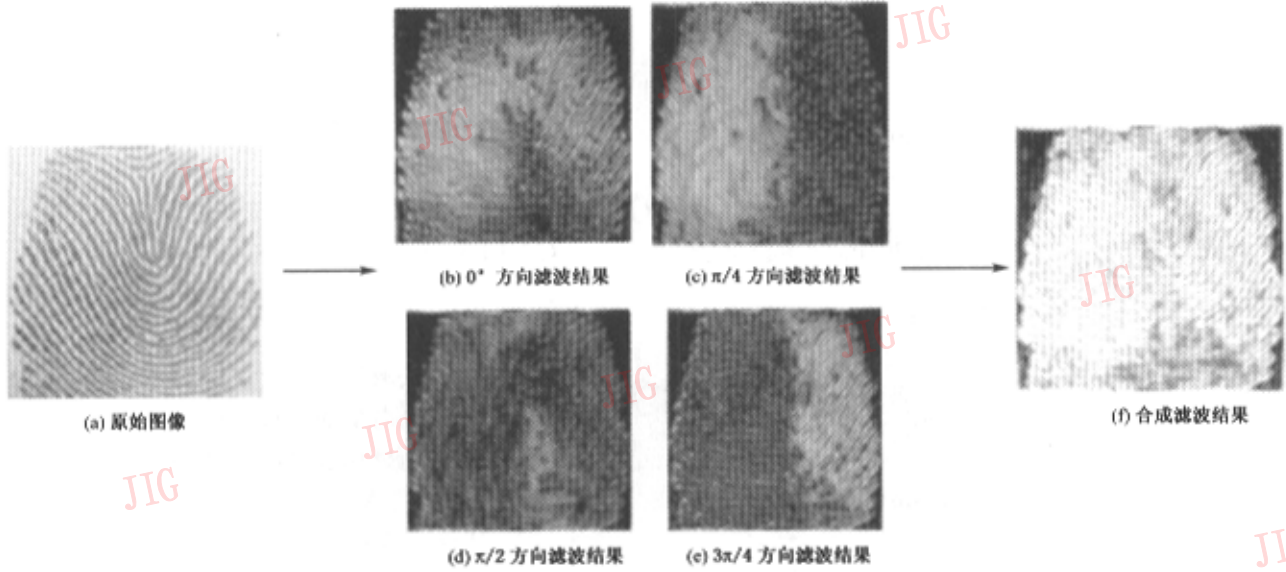


图 1 4 个方向上的 Gabor 滤波器虚部滤波结果与合成滤波结果

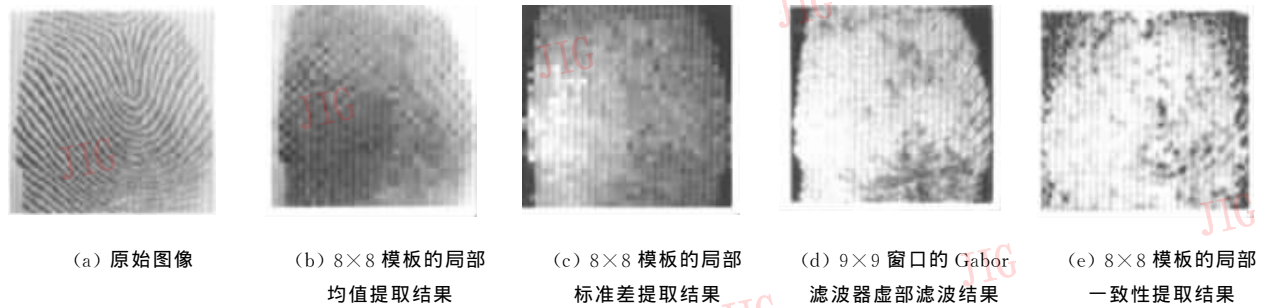
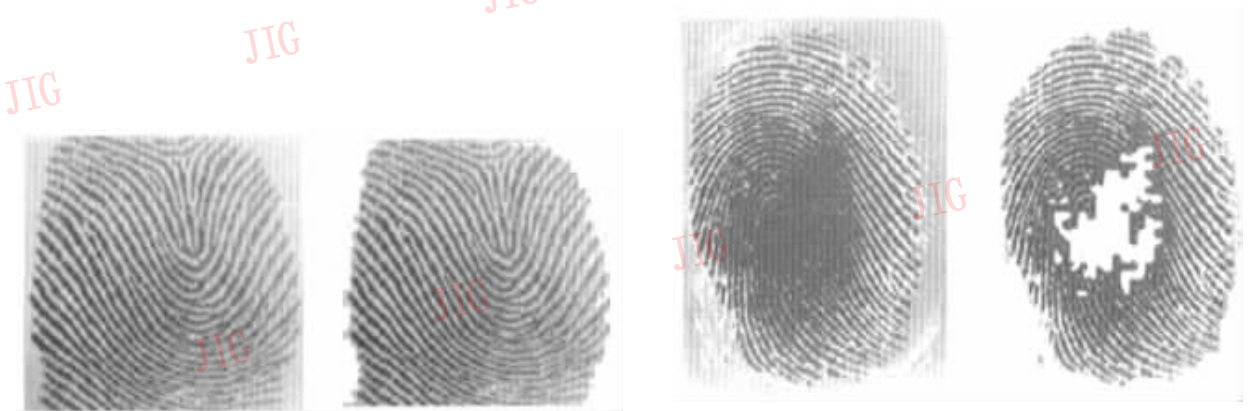


图 2 指纹原图像和提取的特征



(a) VeriFinger 软件使用的示例图像(左)以及用本文方法分割的结果(右)

(b) FVC2000 的 DB-2 图像库的指纹图像(左)以及用本文方法分割的分割结果(右)

图 3 指纹图像及其分割结果

割的运算时间降为未使用加速算法时的 1/6,这说明改进的 Gabor 滤波算法是有效的。

5 结论

本文分析了 Gabor 滤波器的虚部特征,并成功地将其应用到指纹图像的分割中,同时通过简单的分割策略进行了实际指纹图像的分割实验,获得了较好的结果。该特征已被成功地应用到了浙江省高等法院的 IFIS 指纹鉴定系统中,而该系统也已通过了浙江省科学技术成果鉴定。这说明,Gabor 滤波器虚部的滤波结果的确是指数图像的一个有效特征。

本文对特定条件下的 Gabor 滤波算法进行了有效的改进,使得运算的复杂度由 $O(n^2)$ 降至 $O(n)$ 。实验证明,这一算法有效地提高了运算速度。

参考文献

- 1 Mehtre B M, Muthy N N, Kapoor S, *et al.* Segmentation of fingerprint image using the direction image [J]. *Pattern Recognition*, 1987, **20**(4): 429~435.
- 2 Bazen A M, Gerez S H. Directional field computation for fingerprints based on the principal component analysis of local gradients [A]. In: *Proceedings of ProRISC2000, 11th Annual Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing [C]*, Veldhoven, The Netherlands, 2000:215~222.
- 3 Bazen A M, Gerez S H. Segmentation of fingerprint images[A]. In: *Proceedings of ProRISC 2001, 12th Annual Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing [C]*, Veldhoven, The Netherlands, 2001:276~280.
- 4 WANG Sen, ZHANG Weiwei, WANG Yangsheng. New features extraction and application in fingureprint segmentation [J]. *Journal of Acta Automatica Sinica*, 2003, **29**(4): 622~627.

- 5 Hong L, Wan Y, Jain A. Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(8): 777~789.



丁裕锋 1977年生,硕士研究生,1999年毕业于上海交通大学电力系统及其自动化专业,获工学学士学位。主要研究方向为图像处理、基于图像的图形技术和科学计算可视化。

E-mail:glacier@sjtu.edu.cn



马利庄 1963年生,1991年获浙江大学计算机辅助设计与图形学理学博士学位,上海交通大学计算机系教授,博士生导师。研究兴趣包括计算机辅助设计、计算机图形、计算机动画、科学数据可视化、数字多媒体与数据重建等。



聂栋栋 1977年生,博士研究生,2002年毕业于河北省燕山大学获得硕士学位。主要研究方向为图形图像处理。



刘军波 1979年生,硕士研究生,2001年毕业于上海交大学生物技术专业,获理学学士学位。主要研究方向为指纹识别和CAD系统设计。