

# 基于 Log-Gabor 滤波的指纹图像增强<sup>\*</sup>)

王 玮 李见为 黄非非 冯海亮

(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400030)

**摘 要** 自动指纹识别系统的性能在很大程度上依赖于指纹图像的采集效果。指纹图像增强用于改善原始指纹图像的质量,以保证指纹特征提取的准确性,是十分必要的。Gabor 滤波是比较有效的指纹图像增强方法,但是仍存在一定的局限性。与传统的 Gabor 滤波器相比,Log-Gabor 滤波器可以在取得最佳空间定位的同时具有更宽广的频带,有利于改善指纹图像的滤波效果。本文提出采用 Log-Gabor 滤波器来实现指纹图像增强,先利用加窗傅里叶变换来提取指纹图像的局部频谱信息,再在频域进行滤波。在详述了滤波器的设计方法之后,给出具体的图像滤波方案,并与传统方法作了比较。实验结果表明,所提出的算法能有效改善指纹图像的质量和提高了指纹识别的可靠性。

**关键词** 指纹,图像增强,Log-Gabor 滤波器,加窗傅里叶变换

## Fingerprint Image Enhancement by Log-Gabor Filtering

WANG Wei LI Jian-Wei HUANG Fei-Fei FENG Hai-Liang

(Key Lab on Optoelectronic Technology and System of State Education Ministry, Chongqing University, Chongqing 400030)

**Abstract** The performance of automatic fingerprint identification system relies heavily on the quality of fingerprint images. Fingerprint image enhancement is intended to improve the image quality and is essential to ensure the accuracy of fingerprint feature extraction. Despite the performance improvements, there are still certain limitations of Gabor filtering in fingerprint image enhancement. Compared with Gabor filters, Log-Gabor filters can be constructed to have wider bandwidth with optimal spatial localization, which contributes to increase the filtering performance for fingerprint images. This work proposes a novel approach to fingerprint image enhancement, which is based on Log-Gabor filtering. To implement the filtering in frequency domain, the windowed Fourier transform is utilized to extract the local frequency spectrum of fingerprint images. In this paper, the design method and implementation scheme of Log-Gabor filters are described in detail. The performance is compared with the traditional method. Experimental results show that the proposed algorithm effectively improves the quality of fingerprint images and promotes the reliability of fingerprint identification.

**Keywords** Fingerprint, Image enhancement, Log-Gabor filter, Windowed Fourier transform

## 1 引言

指纹识别是目前应用最为广泛的生物特征识别技术之一,它基于指纹特征的唯一性和终身不变性来实现个人身份鉴定。现有的大多数自动指纹识别系统通过比较指纹细节点的位置、方向和类型来判断两枚指纹是否一致,因此系统的可靠性取决于细节点提取的准确程度。由于目前指纹采集设备的不完善性,对于干、湿、脏、老化或磨损的手指,往往难以采到理想的指纹图像。为了弥补指纹图像的质量缺陷,保证指纹识别系统的鲁棒性,有必要在指纹特征提取之前实施指纹图像增强。指纹图像增强的目的是在保护纹线结构的前提下提高脊线和谷线的对比度,将指纹的纹理信息从噪声中分离出来。目前已经提出了许多关于指纹图像增强的算法。O'Gorman 和 Nickerson<sup>[1]</sup>最先提出了基于方向滤波的指纹图像增强方法。该方法使用具有方向性的滤波器来沿着指纹纹线方向进行平滑,同时还能在梯度方向上提高纹理的对比度。Sherlock<sup>[2]</sup>等人则在频率域进行方向滤波。首先用一组方向

滤波器对原始图像的频谱进行处理,每一个方向滤波器用于提取对应方向的频谱。最后将经过滤波的图像根据原始图像的局部方向信息来进行融合,从而得到完整的增强图像。Hsieh<sup>[3]</sup>等人采用小波变换来实现指纹图像增强。首先对图像进行小波分解,然后在小波域进行纹理滤波,并采用了一种方向补偿的技术来改善图像质量。Hong<sup>[4]</sup>等人采用二维偶对称 Gabor 滤波器来对指纹图像进行滤波。首先估算出原始指纹图像的方向场和频率场,然后将 Gabor 滤波器调制到对应的方向和频率上,再与相应的图像子块进行卷积。该方法较好地结合了指纹的方向信息和频率信息,对指纹图像的增强效果比较显著。

由于 Gabor 滤波器具有最优联合时频分辨率,因此基于 Gabor 滤波的指纹图像增强方法能取得较好的处理效果,是目前被广泛应用的算法<sup>[5]</sup>。但是,Gabor 滤波器也存在固有的缺陷,对于取得最佳空间定位的同时得到尽可能宽的频谱信息的设计目标来说,Gabor 滤波器并不是最优的。对于偶对称 Gabor 滤波器,无法构造任意带宽且不含直流分量的传

<sup>\*</sup>)本文受重庆市科技攻关重点项目资助,编号 CSCT. 2004AA-2001-8277-02。王 玮 博士生,研究方向:模式识别与图像处理;李见为 教授,博士生导师,研究方向:模式识别与图像处理,仪器科学与技术。黄非非 硕士生,研究方向:模式识别与图像处理;冯海亮 副教授,研究方向:应用数学,模式识别与图像处理。

递函数。与传统的 Gabor 函数相比,Field<sup>[6]</sup>提出的 Log-Gabor 函数在滤波器带宽设计上具有更好的特性,可以在最佳空间定位的同时覆盖更宽广的频率范围。利用这一性质,本文提出构造合适的 Log-Gabor 滤波器来实现指纹图像增强,并与传统的 Gabor 滤波方法作了比较,实验结果表明,所提出的算法能取得更为理想的效果。

## 2 滤波器设计

### 2.1 Log-Gabor 滤波器的构造

Log-Gabor 函数是 Gabor 函数的另一种表述形式。Gabor 函数的传递函数在线性频率尺度下为高斯函数,而 Log-Gabor 函数的传递函数则为对数频率尺度下的高斯函数。与 Gabor 函数相比,Log-Gabor 函数有两个重要优点。其一,Log-Gabor 函数始终没有直流分量,因此用于图像处理时不受亮度条件的影响;其二,Log-Gabor 函数的传递函数在高频处有一个伸长的尾部,可以弥补普通 Gabor 函数低频表示过度而高频表示不足的缺陷。

由于 Log-Gabor 函数在坐标原点的奇异性,我们不能直接在空域中得到函数的解析表达式,因此滤波器的构造应在频域中进行。一个二维 Log-Gabor 滤波器可以分解成径向滤波器和角度滤波器两部分,对应的极坐标表达式分别如公式(1)和(2)所示:

$$G_r(r) = \exp\left(-\frac{[\log(r/f_0)]^2}{2 \cdot \sigma_r^2}\right) \quad (1)$$

$$G_\theta(\theta) = \exp\left(-\frac{(\theta-\theta_0)^2}{2 \cdot \sigma_\theta^2}\right) \quad (2)$$

完整的 Log-Gabor 滤波器由上述二者相乘得到,如下所示:

$$G(r, \theta) = G_r(r) \cdot G_\theta(\theta) \quad (3)$$

其中,  $r$  表示径向坐标,  $\theta$  表示角度坐标,  $f_0$  为滤波器中心频率,  $\theta_0$  为滤波器方向角度, 参数  $\sigma_r$  和  $\sigma_\theta$  分别用于决定滤波器的径向带宽和角度带宽。

从上述滤波器定义可以看出, Log-Gabor 滤波器取决于四个参数:  $f_0$ 、 $\theta_0$ 、 $\sigma_r$  和  $\sigma_\theta$ 。其中,  $f_0$  和  $\theta_0$  分别对应于指纹图像的局部纹线频率和纹线方向,  $\sigma_r$  和  $\sigma_\theta$  则主要根据经验值来选择。下面详细介绍如何确定滤波器参数。

### 2.2 指纹纹线方向和纹线频率估计

滤波器的方向  $\theta_0$  和中心频率  $f_0$  与指纹图像的局部纹线方向和纹线频率相对应, 因此, 计算这两个参数实际上就是估算指纹图像的方向场和频率场<sup>[4,5,7-9]</sup>。本文所采用的计算步骤如下:

(1) 将原始指纹图像分为互不重叠的图像子块, 大小均为  $B \times B$ ;

(2) 对各图像子块中的每个像素点  $(x, y)$ , 使用 Sobel 算子计算其水平和垂直方向上的梯度  $d_x$  和  $d_y$ ;

(3) 假设图像子块的中心坐标为  $(i, j)$ , 按下式计算该子块的纹线方向:

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\sum_{u=i-\frac{B}{2}}^{i+\frac{B}{2}} \sum_{v=j-\frac{B}{2}}^{j+\frac{B}{2}} 2d_x(u, v)d_y(u, v)}{\sum_{u=i-\frac{B}{2}}^{i+\frac{B}{2}} \sum_{v=j-\frac{B}{2}}^{j+\frac{B}{2}} (d_x^2(u, v) - d_y^2(u, v))} \right) \quad (4)$$

(4) 将所有图像子块的方向转换至三角函数域, 然后进行邻域平滑, 从而得到较为光滑的方向场;

(5) 对各个图像子块, 沿其纹线方向进行投影, 得到一个

一维数组, 数组中的极值对应于指纹的脊线和谷线。假设  $T(i, j)$  为该数组中极大值的平均间距, 则对应的纹线频率为:  $F(i, j) = 1/T(i, j)$ 。

根据上述计算的指纹纹线方向和纹线频率即可确定对应滤波器的方向和中心频率, 需要注意的是, 由于图像在空域的方向和在频域的方向是相互垂直的, 因此上面求得的方向应加上  $\pi/2$  方可得到对应的滤波器方向。

### 2.3 滤波器带宽设计

二维 Log-Gabor 滤波器的带宽分为径向带宽和角度带宽。其中, 径向带宽取决于参数  $\sigma_r$ , 其值越大, 则带宽也越大。分析表明,  $\sigma_r$  取值为 0.3 时, 滤波器径向带宽大致为 1 倍频,  $\sigma_r$  取值为 0.6 时, 带宽大致为 2 倍频。对于指纹图像滤波,  $\sigma_r$  取值越大越有利于保护指纹纹线结构, 但是同时降低了滤波器的去噪能力。根据经验, 本文取  $\sigma_r$  值为 0.5, 可以较好地兼顾滤波器在这两个方面的性能。

类似地, 滤波器的角度带宽由参数  $\sigma_\theta$  控制。其值越大, 则带宽也越大。滤波器的角度带宽设置与指纹纹线的曲率有关, 对于曲率较大的区域, 需要适当增加角度带宽以更好地保护纹线结构。值得一提的是, 传统的 Gabor 滤波方法没有提供调整滤波器角度带宽的手段, 因此难以兼顾指纹纹线曲率差别较大的不同区域。根据经验, 本文对于低曲率区域, 令  $\sigma_\theta$  为  $\pi/9$ , 对于高曲率区域, 则令  $\sigma_\theta$  为  $\pi/5$ 。对指纹纹线曲率的大小的判断, 通常采用指纹奇异点检测的方法来实现。由于一般的奇异点检测算法并不可靠, 且不能应用于拱形指纹, 本文利用指纹的方向场设计了一种曲率度量来衡量纹线曲率, 其定义如下:

$$C(i, j) = \frac{1}{N^2} \sum_{u=i-N/2}^{i+N/2} \sum_{v=j-N/2}^{j+N/2} |\sin(\theta(i, j) - \theta(u, v))| \quad (5)$$

由定义可知, 曲率度量  $C$  的取值范围为  $[0, 1]$ 。纹线曲率越大, 则  $C$  值也越大。根据经验, 我们令公式(5)中的  $N$  为 3, 并选择 0.3 作为阈值。当  $C$  小于 0.3 时, 认为对应的图像区域为低曲率区域, 反之则将其视为高曲率区域。图 1(a) 给出了一个指纹方向场的例子, 图 1(b) 则以灰度图形式来描述对应的曲率度量, 灰度值越大, 表明曲率越高。

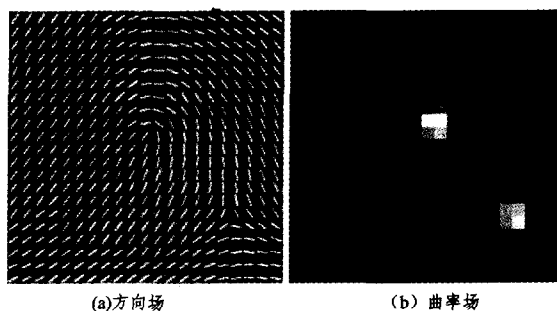


图 1 指纹图像方向场和曲率场

## 3 指纹图像滤波

由于 Log-Gabor 滤波器的解析表达式只在频域中存在, 因此图像滤波应在频域进行, 这就要求把原始图像相应地变换到频域。本文采用二维加窗傅里叶变换来提取图像各个局部的频谱信息, 变换的定义式如下:

$$F(i, j, u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) W(x-i, y-j) e^{-j(\omega x + \nu y)} dx dy \quad (6)$$

其中,  $(i, j)$  为图像子块的中心坐标,  $(x, y)$  为空域坐标,

( $u, v$ )为频域坐标。需要注意的是,由于我们需要从滤波结果中恢复空域图像,因此这里对窗口函数  $W(x, y)$  有较为严格的要求。为了消除图像分块带来的块边缘效应,窗口尺寸不能取得太小,但也不能过大,以免增加不必要的计算负担。根据经验,本文将窗口尺寸  $W \times W$  取为  $32 \times 32$ , 图像分块尺寸  $B \times B$  取为  $12 \times 12$ 。显然,相邻的窗口存在相互重叠的部分,如图 2(a)所示。为了满足图像反变换的需要,这里采用上升余弦窗作为变换的窗口函数,其定义如下:

$$W(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta r_1 \leq 0 \\ \frac{1 + \cos((\Delta r_1 / \Delta r_2) \cdot (\pi / 2))}{2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$(x, y) \in [-W/2, W/2]$$

其中,

$$\Delta r_1 = \sqrt{x^2 + y^2} - B/2 \quad (8)$$

$$\Delta r_2 = \sqrt{(W/2)^2 + (W/2)^2} - B/2 \quad (9)$$

上升余弦窗在图像中的定位及其三维形状如图 2 所示。各图像子块的频谱信息便是通过对该窗口进行移动来分别取得。令  $F(u, v)$  和  $F'(u, v)$  分别表示滤波前后的频谱,则滤波步骤表示如下:

$$F'(u, v) = G(u, v) \cdot F(u, v) \quad (10)$$

其中,  $G(u, v)$  为 Log-Gabor 滤波器的直角坐标表示。显然,滤波器的尺寸应当和频谱的尺寸一致。

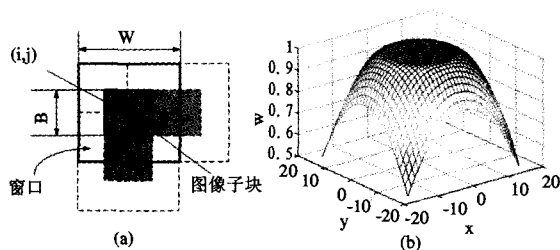


图 2 加窗傅里叶变换中的窗口定位和形状

滤波完成后,接下来的步骤便是对频谱进行傅立叶反变换以取得空域图像数据。对于反变换的结果,我们保留其实部值,并按对应的分块位置进行组合,便可得到完整的增强图像。

#### 4 实验结果

我们采用 FVC2004 DB2 指纹数据库来测试算法。该数据库共有 880 幅指纹图像,分别来自 110 个不同的手指。图像通过光学式传感器采集得到,每一幅图像的大小为  $328 \times 364$ ,分辨率为 500dpi。

图 3 给出了部分原始指纹图像及其增强结果。其中(a)和(b)为原始指纹图像,(c)和(d)为采用传统 Gabor 滤波算法得到的增强结果,(e)和(f)为采用本文提出的 Log-Gabor 滤波算法得到的增强结果。从图中可以看出,Log-Gabor 滤波在改善指纹图像脊线和谷线对比度的同时能更有效地修复裂纹,在纹线曲率较高的区域能较好地保护纹线结构,所取得的增强图像纹理清晰流畅,亮度变化均匀,适于后续的形象分割和特征提取。

在使用细节点作为指纹特征的情况下,指纹匹配实际上就是在两个指纹特征模板中寻找能够对得上的细节点<sup>[10]</sup>。显然,细节点提取的准确性依赖于指纹图像的质量和增强效果。因此,为进一步评估所提出算法的有效性,我们还结合后

续的特征提取和匹配算法,通过最终的识别率来比较增强算法的性能。测试实验使用了 FVC2004 DB2 数据库中的全部指纹图像。对于来自同一手指的不同指纹进行比对,以统计正确接受率(Authentic Acceptance Rate);对所有手指的第一个指纹样本两两比对,以统计错误接受率(False Acceptance Rate)。测试得到的 ROC 曲线如图 4 所示,其横坐标为错误接受率,纵坐标为正确接受率,曲线离横轴越远说明识别的准确性越高。通过比较 ROC 曲线可以看出,Log-Gabor 滤波确实提高了指纹识别的准确性。

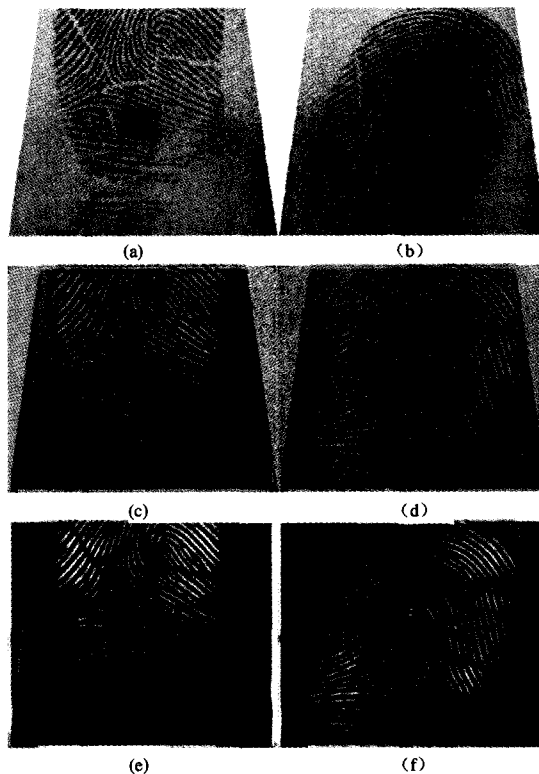


图 3 原始指纹图像及其对应的增强结果

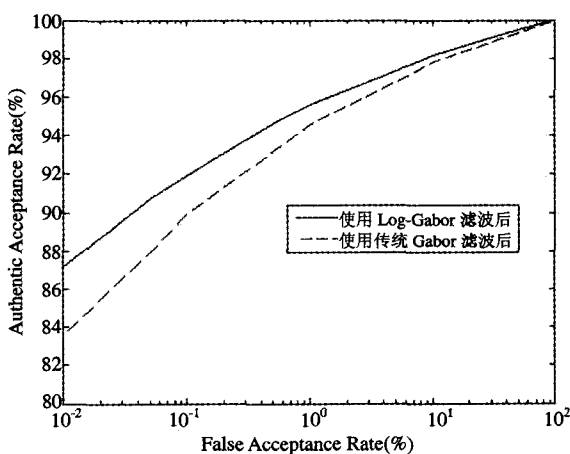


图 4 Log-Gabor 滤波和传统 Gabor 滤波对应的 ROC 曲线

**结论** 本文提出了基于 Log-Gabor 滤波的指纹图像增强算法。与传统 Gabor 滤波器相比,Log-Gabor 滤波器可以用更紧凑的空间表示来捕获较宽广的频谱信息,有利于改善指纹图像的滤波效果。从图像的增强结果可以看出,Log-Gabor 滤波具有较强的去噪能力,同时能更好地保护指纹纹线结构。

(下转第 247 页)

上角是一个小地图,便于用户定位自己的当前位置及纵览整个博物馆。

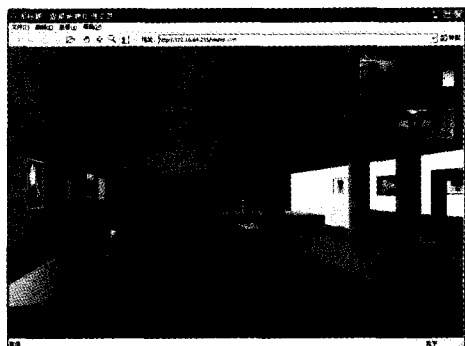


图7 虚拟漫游界面

**结论和进一步工作** 本文概述了虚拟博物馆系统的设计和实现的基本过程和关键技术。系统采用 Visual C++ 6.0 编程实现,并使用多种设计模式,大大降低了模块间的耦合程度,增强了稳定性和鲁棒性,具有良好的自适应能力。其中,一些关键技术如场景描述语言 XVM,为解决数字博物馆的虚拟展示问题提供了一条新的思路。目前,已完成的南京大学地球科学博物馆系统已经投入使用,获得了良好的效果。

下一步需要研究的课题包括:当场景中的 3D 模型较多

时,如何根据视点的位置和方向以及网络负载等因素合理安排模型下载次序,并在 XVM 文档结构中提供相应的支持;以及需要在 XVM 中增加对物体行为的描述,加强虚拟博物馆地交互能力。

## 参考文献

- 1 Addison A C. Emerging Trends in Virtual Heritage [J]. IEEE Multimedia, 2000, 7(2): 22~25
- 2 Kwon Y M, Kim I J, Ahn S C, et al. Networked 3D Virtual Museum System. [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(3): 301~305
- 3 Vince J. Virtual Reality System [M]. SIGGRAPH Series, ACM Press, Addison-Wesley Publishing Company, 1995
- 4 向辉,孟祥旭,杨承磊. 山东大学考古数字博物馆设计与实现 [J]. 系统仿真学报, 2003, 15(3): 319~321
- 5 Iwazaki K, Yasuda T, Yokoi Shigeki, et al. The Museum Network and On demand Systems for School Education Based on XML. In: International Conference on Computers in Education, 2002. 941~942
- 6 Lin M C, Gottschalk S. Collision detection between geometric models: a survey [A]. In: Proceedings of IMA Conference on Mathematics of Surfaces, 37~56
- 7 Martin R C. Agile Software Development, Principles, Patterns, and Practices. Reading, MA: Person Education, 2003
- 8 Gamma E, Helm R, Johnson R, et al. Design Patterns, Elements of Reusable Object-Oriented Software. Reading, MA: Addison-Wesley, 1995
- 9 Schmidt D C. Reactor: An Object Behavioral Pattern for Concurrent Event Demultiplexing and Handler Dispatching. In: Pattern Languages of Program Design (J. O. Coplien and D. C. Schmidt, eds.), Reading, MA: Addison-Wesley, 1995. 529~545
- 10 Jain P, Schmidt D C. Service Configurator: A Pattern for Dynamic Configuration of Services. In: Proc. of the 3rd Conference on Object Oriented Technologies and Systems, USENIX, June 1997

(上接第 218 页)

$Q_i$  (其中:  $i \neq k, j \neq k, i \neq j, k \in R, i \in R, j \in R$ ) 的坐标位置无关,故凸壳  $Q$  的任一顶点  $Q_k$  独立于其它顶点。

因此,该基本定理成立。

**结论** 基于同构化凸壳构造基本定理,作者认为凸壳生成算法改进与优化的同构化方向应当是:第一、根据凸壳内点无关性定理,应一方面使凸壳极点(实为顶点)分布域极小化,即让包含凸壳极点的判定区域尽可能小,以大大减少凸壳极点判定时的无效处理量;另一方面使极点判定对象直接化,即让所判定对象尽可能接近当前所寻极点,以大幅提高凸壳极点判定对象的直接针对性。第二、根据凸壳顶点独立性定理,一方面可从不同初始对象出发,来改进和优化串行凸壳新算法;另一方面,可对不同视角对象处理,来改造和创造并行凸壳新算法。

因此,在生成凸壳过程中,应尽力缩小极点的可能分布域——在尽可能小的分布域内,尽可能快地直接找出并只找出其各个极点(即凸壳各条边的各端点)的凸壳算法;进而,再对有潜力的优秀串行凸壳新算法施行并行化改造与创新。无疑,这必定是今后“突破目前凸壳算法研究停滞不前窘况,进

一步提高凸壳算法(包括串行、并行)效率”的主要捷径。

实际上,作者利用同构化凸壳构造基本定理和本文结论,于 2005 年已研究出诸如“基于最大基线倾角智能逼近的凸壳新算法”等凸壳新算法。

## 参考文献

- 1 张立华,徐文立. 基于凸壳的透视变换下的点模式匹配方法 [J]. 自动化学报, 2002(2)
- 2 (美) Gonzalez R C, Richard E. Word. 数字图象处理 [M]. 阮秋琦,等译. 北京:电子工业出版社, 2003
- 3 任群,田捷. 基于前景轮廓线搜索的指纹图象分割算法 [M]. 北京:中科院自动化所复杂科学与智能系统实验室
- 4 徐常青,等. 计算机图形学 [M]. 机械工业出版社, 2004
- 5 周培德. 计算几何 算法分析与设计 [M]. 清华大学出版社, 2000
- 6 陈国良. 并行计算 结构·算法·编程 [M]. 高等教育出版社, 2002
- 7 陈国良. 并行算法的设计与分析 [M]. 高等教育出版社, 2002
- 8 Aloupis G. A History of Linear-time Convex Hull Algorithms for Simple Polygons. <http://en.wikilib.com/wiki/Talk:Convex-hull>
- 9 Chand H, Kapur S. An algorithm for convex polytopes. J. ACM, 1970, 17: 78~86
- 10 Graham R. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar point set. Info. Proc. Letters, 1972, 1: 132~133
- 11 Barber C, Dobkin D, Huhdanpaa H. The Quickhull algorithm for convex hulls. ACM Trans. on Mathematical Software, 1997, 22: 469~483

(上接第 243 页)

我们还进一步结合细节点提取和匹配的结果来评估增强算法的性能。实验结果表明:所提出的算法能有效减少细节点提取的错误和提高指纹识别的准确性。

## 参考文献

- 1 O'Gorman L, Nickerson V. An approach to fingerprint filter design. Pattern Recognition, 1989, 22(1): 29~38
- 2 Sherlock B G, Monro D M, Millard K. Fingerprint enhancement by directional Fourier filtering. In: IEE Proc. Vision Image Signal Process, 1994, 141(2): 87~94
- 3 Hsieh C T, Lai E, Wang Y C. An effective algorithm for fingerprint image enhancement based on wavelet transform. Pattern Recognition, 2003, 36(2): 303~312
- 4 Hong L, Wan Y, Jain A. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation. IEEE Transactions on Pattern

Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777~789

- 5 Chikkerur S, Govindaraju V, Cartwright A N. Fingerprint image enhancement using SIFT analysis. In: Proceedings of 3rd International Conference on Advances in Pattern Recognition, Bath, UK, 2005. 20~29
- 6 Field D J. Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(12): 2379~2394
- 7 Nagaty K A. On learning to estimate the block directional image of a fingerprint using a hierarchical neural network. Neural Networks, 2003, 16(1): 133~144
- 8 Zhou J, Gu J. A model-based method for the computation of fingerprints orientation field. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(6): 821~835
- 9 Kovacs-Vajna Z M, Rovatti R, Frazzoni M. Fingerprint ridge distance computation methodologies. Pattern Recognition, 2000, 33(1): 69~80
- 10 Jea T Y, Govindaraju V. A minutia-based partial fingerprint recognition system. Pattern Recognition, 2005, 38(10): 1672~1684