

基于加博函数的指纹增强算法及其应用*

尹义龙⁺, 詹小四, 谭台哲, 宁新宝

(南京大学 电子科学与工程系, 江苏 南京 210093)

An Algorithm Based on Gabor Function for Fingerprint Enhancement and Its Application

YIN Yi-Long⁺, ZHAN Xiao-Si, TAN Tai-Zhe, NING Xin-Bao

(Department of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

+ Corresponding author: Phn: 86-531-8363380, E-mail: yinyilong@263.net

<http://www.nju.edu.cn>

Received 2001-11-29; Accepted 2002-05-17

Yin YL, Zhan XS, Tan TZ, Ning XB. An algorithm based on Gabor function for fingerprint enhancement and its application. *Journal of Software*, 2003,14(3):484~489.

Abstract: Fingerprint enhancement is important for improving the accuracy of minutiae extraction, even for the total automated fingerprint identification system (AFIS). A fingerprint enhancement algorithm based on Gabor function and its application is developed in this paper. A method for ridge orientation acquirement is improved and a new method for ridge frequency acquirement is brought out. The formula that Gabor function is used in fingerprint enhancement is presented, and the fingerprint enhancement is implemented using ridge orientation and ridge frequency as parameters. The performance of this method is evaluated with some typical low quality images of Nanjing University fingerprint database. Experimental results indicate that the method has dramatic effect to low quality fingerprint images and false reject rate (FRR) of fingerprint matching can be effectively decreased after enhancement. Speed of the method can fill the demand of on-line AFIS.

Key words: fingerprint; Gabor function; fingerprint enhancement; ridge orientation; ridge frequency

摘要: 指纹增强对于提高细节特征提取的准确率乃至整个自动指纹识别系统的性能实现都具有重要的意义。研究了基于加博(Gabor)函数的指纹增强算法,对纹线方向提取算法进行了改进,提出了一种纹线频率提取方法,给出了加博函数用于指纹增强的具体应用形式,以指纹图像的纹线方向和纹线频率为参数,使用加博函数实现了对指纹图像的增强处理,并使用南京大学活体指纹库中的部分典型低质量图像样本对算法性能进行了测试。实验结果表明,该算法对低质量图像具有显著的增强效果,增强后可以有效地降低指纹匹配的拒识率(false reject rate,简称FRR),处理速度和增强效果可以基本上满足在线自动指纹识别系统的需要。

* Supported by the Science and Technology Development Plan Program of Changchun City of China under Grant No.99011 (长春市科技发展计划); the Application Development Foundation of Nanjing University of China under Grant No.2001-03 (南京大学应用开发基金); the Natural Science Development Program of Education Office of Anhui Province of China under Grant No.2002KJ234 (安徽省教育厅自然科学研究项目)

第一作者简介: 尹义龙(1972—),男,山东菏泽人,博士,副教授,主要研究领域为生物特征识别,数字图像处理。

关键词: 指纹;加博函数;指纹增强;纹线方向;纹线频率

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

近年来,以指纹为代表的生物特征识别技术引起了人们的广泛关注^[1].自动指纹识别系统大多是依靠细节特征(minutiae)实现指纹的识别^[2],准确、可靠地提取细节特征是自动指纹识别实现的前提和基础.指纹细节特征提取过程由图像与背景分离、指纹增强、图像二值化、图像细化和细节特征检测等步骤组成.

细节特征提取的准确性严重依赖于指纹图像的质量.如果采集到的指纹图像质量比较差,在进行细节特征提取的过程中就会产生大量的伪特征信息,丢失大量真正的特征信息,会使整个自动指纹识别系统的性能受到严重的影响,甚至导致不能正确地进行指纹识别.由于现有指纹采集设备的不完善性,对于干、湿、脏、老化和磨损严重的手指,往往难以采集到清晰的指纹图像.为了确保特征提取算法的性能对指纹图像的质量具有足够的鲁棒性,研究指纹增强算法是十分必要的.实际上,即使对质量比较差的指纹,指纹专家仍然能够利用诸如局部纹线方向、纹线连续性、纹线趋势和纹线疏密程度等各种视觉线索正确地识别出特征信息.因此,从理论上讲,通过算法对指纹图像进行增强是完全可行的.指纹增强技术正是在这样一种背景下产生和发展的.所谓指纹增强,就是对低质量的指纹图像采用一定的算法进行处理,使其纹线结构清晰化,尽量突出和保留固有的特征信息以避免产生伪特征信息,其目的是保证特征信息提取的准确性和可靠性.

沿着垂直于纹线的方向来看,指纹纹线大致形成一个二维的正弦波.除了模式区等少数异常区域以外,在一个小的局部区域内,指纹纹线的分布具有良好的频率特性和方向特性.充分利用局部区域内纹线的频率和方向信息,对每个局部区域构建相应的模板进行增强就能有效地去除噪声,突出纹线的固有结构.加博(Gabor)函数具有最佳时域和频域连接分辨率的特点,是惟一能够达到时频测不准关系下界的函数,可以很好地兼顾时域和频域信息,实现对信号的处理,使用加博函数实现指纹增强应该是一个合理的选择.

本文实现和改进了纹线方向的提取算法,提出了一种新的纹线频率提取算法,以纹线方向和纹线频率为参数,对不同的分块图像构建相应的增强模板,实现对指纹图像的分块自适应增强.该方法对于低质量指纹图像具有显著的增强效果,经过增强后的指纹可以正确地实现匹配.

本文第1节是指纹增强方法综述.第2节详细介绍了基于加博函数的指纹增强算法的实现.第3节给出了实验结果.第4节总结全文.

1 指纹增强方法综述

迄今为止,已有不少文献对指纹增强的算法进行了研究^[3-9].绝大多数方法都使用了纹线方向作为增强算法的参数,有些方法还同时使用纹线的频率信息.纹线方向和纹线频率都是指纹的固有结构信息,只有充分地使用这些信息才能对指纹图像取得良好的增强效果.

L.Hong 等人^[3]提出了一种使用加博函数增强指纹图像的方法,并对该方法的性能进行了评测.该方法确立了使用加博函数实现指纹增强的基本技术体系.但可用区域和不可用区域的划分需要大量的典型样本,依靠经验确定参数取值,技术实现的难度比较大;当纹线结构模糊、对比度很低时,基于方向窗的方法难以保证纹线频率计算结果的可靠性.

L.Hong 等人^[4]还利用加博滤波器组将指纹图像分解为一个滤波图像集,用分解方法计算图像方向场的方向.对低质量指纹图像,该方法仍能取得较好的增强效果.但算法相当复杂和耗时,难以满足在线应用的需要.

B.G.Sherlock 等人^[5]使用方向傅里叶滤波器在频域实现了对指纹图像的增强.该算法仅使用了纹线方向信息而没有利用纹线频率信息.D.C.Douglas Hung^[6]专门针对二值图像提出了一种指纹增强和特征纯化的方法.L.O'Gorman 等人^[7]使用的指纹增强方法则高度依赖纹线方向信息.

2 基于加博函数的指纹增强方法

纹线方向和纹线频率的准确性和可靠性,是保证加博函数增强效果的基础.本节内容由纹线方向提取、纹

线频率提取和基于加博函数的指纹增强算法实现 3 部分组成.

2.1 纹线方向提取

L.Hong 等人^[3]提出了一种在固定的分块尺寸下计算纹线方向的方法.针对该算法在大的分块尺寸下纹线方向计算结果粗略但相对可靠、在小的分块尺寸下纹线方向计算结果精确但抗噪能力差的特点,本文将该算法进行了改进,分别在不同的分块尺寸下使用 L.Hong^[3]算法计算纹线方向,如果发现小块图像上计算的纹线方向与包含它的大块图像上计算的纹线方向有明显的差异,则认定该小块图像上纹线方向计算结果有误,利用大块图像的纹线方向计算结果对其进行修正,最后将得到的小分块尺寸下的纹线方向用于指纹增强.这在一定程度上兼顾了纹线方向计算的可靠性和精确性.

设 $D32[i][j]$, $D16[m][n]$, $D8[r][s]$ 分别表示在 32×32 , 16×16 , 8×8 分块尺寸下计算得到的分块图像的纹线方向,则改进后的纹线方向提取算法描述如下:

算法 1. 改进后的纹线方向提取算法.

- ① 采用 L.Hong^[3]算法分别计算 $D32[i][j]$, $D16[m][n]$, $D8[r][s]$;
- ② 对任一 $D16[m][n] \in D32[i][j]$, 如果 $|D32[i][j] - D16[m][n]| > \Delta_1$, 则令 $D16[m][n] = D32[i][j]$;
- ③ 对任一 $D8[r][s] \in D16[m][n]$, 如果 $|D16[m][n] - D8[r][s]| > \Delta_2$, 则令 $D8[r][s] = D16[m][n]$.

其中 Δ_1, Δ_2 分别是两个经验阈值.最后将 $D8[r][s]$ 用于指纹增强.

图 1 是对一幅低质量指纹图像使用 L.Hong^[3]算法和经过改进的算法提取的纹线方向信息.

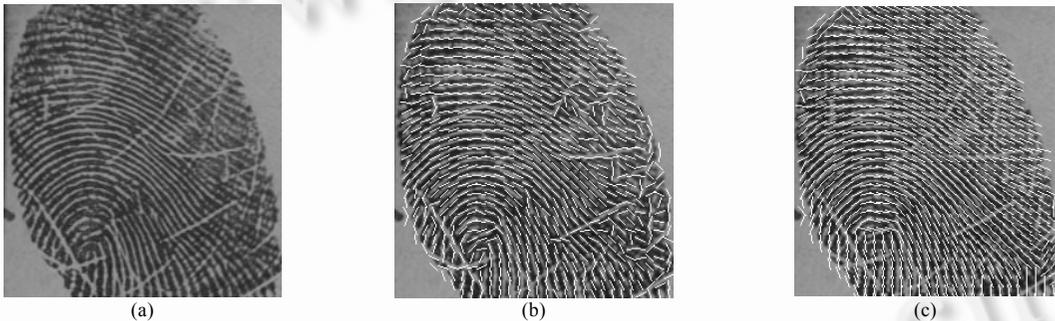


Fig.1 Results of ridge orientation acquiring from a low quality fingerprint image: (a)~(c) indicate original fingerprint image, with L. Hong's method, with improved method, respectively

图 1 对一幅低质量指纹图像的纹线方向提取结果: (a)~(c) 分别是原始指纹图像和用 L.Hong 方法、改进方法提取的纹线方向

2.2 纹线频率提取

本文提出了一种基于统计窗和基线的纹线频率提取算法,在二值图像上计算纹线频率.

定义 1. 统计窗.定义一块图像的统计窗为以该块图像中心点为中心,宽、高均为 SWS (本文取 $SWS=16$) 的正方形指纹图像区域.

定义 2. 基线.当该块图像的纹线方向为 $0 \sim \pi/2$ 时,定义基线为通过统计窗左上角且与该块图像纹线方向平行的直线;当该块图像的纹线方向为 $\pi/2 \sim \pi$ 时,定义基线为通过统计窗右上角且与该块图像纹线方向平行的直线.

一块图像的纹线频率通过计算其统计窗区域内的纹线分布来获取.图 2 为不同纹线方向下统计窗和基线的示意图.为清楚起见,指纹区域仍使用灰度图像来表示.

算法 2. 纹线频率提取算法.

- ① 采用自适应动态阈值方法,将指纹图像分块二值化,使脊线上的点取值为 1,谷线上的点取值为 0;
- ② 定义数组 $\text{int Distance}[dMax+1]$, $dMax$ 为统计窗内各点到基线的最大可能距离.对每一块图像,计算其统计窗内所有指纹脊线上的点到基线的距离 d ,并令 $\text{Distance}[(\text{int})d] = \text{Distance}[(\text{int})d] + 1$;
- ③ 以 Distance 数组的下标 ($0 \sim dMax$, 表示到基线的距离) 为横坐标, Distance 数组的取值 (某一距离上脊线上

的点集中的程度)为纵坐标,构建直方图.对直方图进行统计计算,求取峰值位置,则平均峰值间距即为该块图像内的脊线的平均宽度,其倒数就是该块指纹图像的纹线频率;

④ 采用高斯低通滤波器在块水平上对求得的纹线频率进行平滑,模板尺寸取 3×3 .

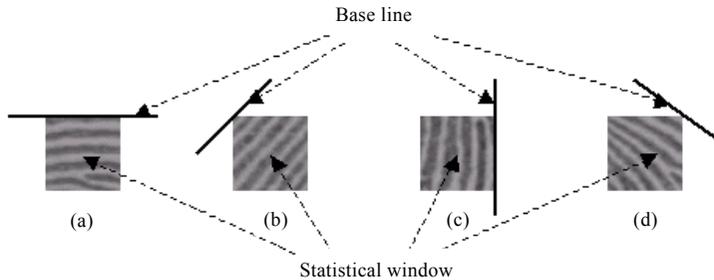


Fig.2 Definitions of statistical window and base line with different ridge orientation: (a)~(d) indicate the instance when ridge orientation is 0 , $(0 \sim \pi/2)$, $\pi/2$, $(\pi/2 \sim \pi)$, respectively
图2 不同纹线方向下统计窗和基线的定义:(a)~(d)分别是纹线方向为 0 , $(0 \sim \pi/2)$, $\pi/2$ 和 $(\pi/2 \sim \pi)$ 的情况

2.3 基于加博函数的指纹增强算法分析与实现

本文将通用偶对称加博函数稍作修改,指纹增强使用如下形式的加博函数:

$$h(m, n) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{m^2}{\delta_m^2} + \frac{n^2}{\delta_n^2}\right]\right\} \cos(2\pi f d_{(m,n)}), \quad (1)$$

其中,离散变量 m, n 的取值均在 $-MS/2 \sim MS/2$ 之间, MS 为增强模板尺寸,本文取 7×7 . δ_m 和 δ_n 分别是沿横轴与纵轴的高斯包络常数,经验值均取 4 . f 为分块图像的纹线频率,是纹线频率信息在加博函数中的具体体现. $d_{(m,n)}$ 是一个非常重要的参数,它的意义为增强模板中的某一元素 (m, n) 到通过模板中心且方向与该块图像纹线方向相同的直线的距离(如图3所示),是纹线方向信息在加博函数中的具体体现.模板中各元素取值的大小随着 $d_{(m,n)}$ 取值的不同以该块图像纹线频率为周期变化.

设 $Mask$ 表示块图像的加博增强模板, $OrgImgData$ 代表增强前的指纹图像数据, $ResultImgData$ 代表增强后的指纹图像数据, MS 表示增强模板尺寸,则基于加博函数的指纹增强算法描述如下:

算法3. 基于加博函数的指纹增强算法.

- ① 将指纹图像分成大小为 8×8 的互不重叠的块;
- ② 分别采用第2.1节和第2.2节描述的算法计算各块图像的纹线方向和纹线频率;
- ③ 使用式(1)为每块图像分别构建相应的增强模板;
- ④ 对所有块图像,用式(2)对该块图像内的各像素点进行离散卷积运算,其结果即为增强后的图像.

$$ResultImgData[m][n] = \sum_{u=0}^{MS} \sum_{v=0}^{MS} OrgImgData[m+u][n+v] \times Mask[u][v]. \quad (2)$$

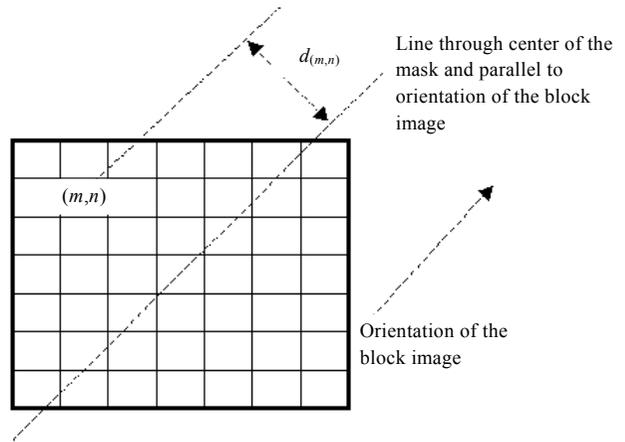


Fig.3 Meaning of the parameter of $d_{(m,n)}$
图3 参数 $d_{(m,n)}$ 的意义

3 实验结果

处理速度和增强后指纹匹配的拒识率(false reject rate,简称 FRR)是指纹增强算法的两个关键指标.为验证本文方法的效果,从南京大学活体指纹图像库(1 200 枚活体指纹,每个手指 10 次采样)选取 8 个典型低质量手指的图像样本组成一个 80 枚图像的样本库,将本文算法与 L.Hong^[3]算法(图像分块尺寸为 16×16)在主频 PIII733、内存为 128M 的 PC 机上进行了性能对比实验,仅作同源样本间的交叉比对,每个手指比对次数为 $C_{10}^2 = 45$ 次,8 个手指比对次数为 $8 \times 45 = 360$ 次,测试指纹增强算法平均运行时间和经增强后指纹匹配的拒识率.测试的结果为:L.Hong 算法和本文算法增强一幅图像平均用时分别为 0.57 秒和 0.69 秒,平均拒识率分别为 15.0%和 10.3%(见表 1).部分图像增强输出结果如图 4 所示.

本文使用的指纹图像采集分辨率为 500dpi,指纹采集设备为中国科学院光学精密机械研究所生产的光学全反射式 ZY202-B 型活体指纹采集仪,图像尺寸约为 320×320 .

Table 1 Performance comparison between two methods

表 1 两种指纹增强算法的性能对比

Methods	Matching times	Success times	Failure times	False reject rate (%)	Average runtime (s)
L.Hong's method	360	306	54	15.0	0.57
Our method	360	323	37	10.3	0.69

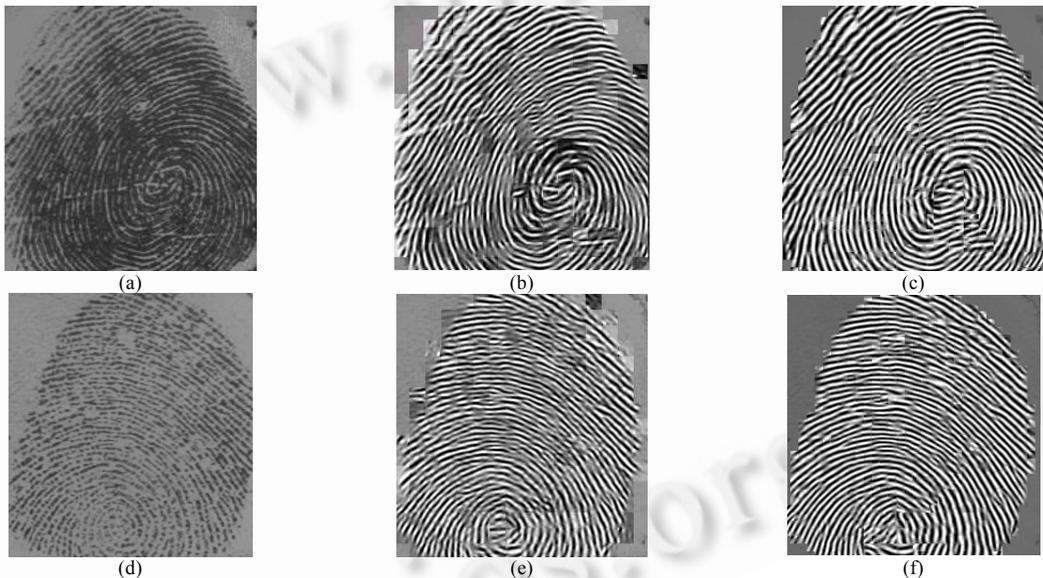


Fig.4 Results of fingerprint enhancement with two methods: (a), (d) are two typical low quality fingerprint images; (b), (e) and (c), (f) are results of enhancement with L. Hong's method and our method, respectively

图 4 两种方法的指纹增强输出结果:(a)和(d)是两枚典型的低质量指纹图像, (b),(e)和(c),(f)分别是用 L.Hong 方法和本文方法的相应增强结果

4 结论与探讨

本文研究了基于加博函数的指纹增强算法.对指纹纹线提取方法作了改进,有效地提高了低质量指纹图像下纹线方向计算结果的可靠性.本文提出了一种计算纹线频率的新方法,可以比较可靠地计算指纹纹线频率.另外,还给出了加博函数在指纹增强中的具体应用形式,对纹线方向和纹线频率信息在加博函数增强中的意义进行了分析,实现了基于加博函数的指纹增强算法.初步的实验结果证明了方法的有效性.与已有方法相比,处理速度和增强效果均有所提高,并且可以有效地降低自动指纹识别系统的拒识率.

纹线方向和纹线频率计算结果的可靠性是决定指纹增强效果的关键因素.对于低质量指纹图像,如何进一步提高纹线方向和纹线频率的可靠性是需要继续研究的问题.

指纹模式区附近纹线方向变化比较剧烈,不适宜用加博函数进行增强.在今后的研究中,可考虑将其他增强

算法与基于加博函数的算法相结合,对模式区附近的指纹区域采用其他算法单独进行增强.

References:

- [1] Yin YL, Ning XB, Zhang XM. Development and application of automatic fingerprint identification technology. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2002,38(1):29~35 (in Chinese with English Abstract).
- [2] Qi Y, Tian J, Deng X. Genetic algorithm based fingerprint matching algorithm and its application on automated fingerprint identification system. Journal of Software, 2000,11(4):488~493 (in Chinese with English Abstract).
- [3] Hong L, Wan Y, Jain AK. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998,20(8):777~789.
- [4] Hong L, Jain AK, Pankanti S, Bolle R. Fingerprint enhancement. In: Proceedings of the IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. Sarasota, FL, 1996. 202~207.
- [5] Sherlock D, Monro DM, Millard K. Fingerprint enhancement by directional Fourier filter. IEE Proceedings of Vision Image and Signal Processing, 1994,141(2):87~94.
- [6] Douglas Hung DC. Enhancement feature purification of fingerprint images. Pattern Recognition, 1993,26(11):1661~1671.
- [7] O'Gorman L, Neckerson JV. An approach to fingerprint filter design. Pattern Recognition, 1989,22(1):29~38.
- [8] Almansa A, Lindeberg T. Fingerprint enhancement by shape adaptation of scale-space operators with automatic scale-selection. IEEE Transactions on Image Processing, 2000,9(12):2027~2042.
- [9] Luo XP, Tian J. Image enhancement and minutiae in automatic fingerprint identification. Journal of Software, 2002,13(5):946~956 (in Chinese with English Abstract).

附中文参考文献:

- [1] 尹义龙,宁新宝,张晓梅.自动指纹识别技术的发展与应用.南京大学学报(自然科学版),2002,38(1):29~35.
- [2] 漆远,田捷,邓翔.基于遗传算法的指纹图匹配算法及应用.软件学报,2000,11(4):488~493.
- [9] 罗希平,田捷.自动指纹识别中的图像增强与细节匹配.软件学报,2002,13(5):946~956.