

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4785.201204001

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20121116.1702.011.html>

基于三高斯滤波的低质指纹图像增强方法

赵慧敏¹, 李卫军¹, 刘扬扬², 谌琛¹, 陈亮¹

(1. 中国科学院半导体研究所 人工神经网络实验室, 北京 100083; 2. 中国科学院 光电研究院, 北京 100094)

摘要:低质指纹图像在司法刑侦过程中普遍存在,往往需要人工参与鉴别.因此,符合人类视觉特性的指纹图像处理研究方法具有一定的实用价值.将非经典感受野三高斯数学模型引入指纹图像处理,提出一种新的低质指纹图像增强算法.首先通过三高斯单边滤波获得邻域图像的主观感觉亮度;然后对指纹图像进行局部对比度增强.通过分析研究指纹脊谷交替分布的特性,结合三高斯模型自身特性,得到针对指纹图像的三高斯单边滤波的参数自适应模型和局部对比度调整参数.对比实验结果表明,该方法取得了整体和局部的亮度增强效果,突出灰暗区域的细节特征,尤其适用于低质指纹图像的处理.

关键词:三高斯模型;指纹增强;非经典感受野;单边滤波

中图分类号: TP18; TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2012)06-0489-05

A low quality fingerprint image enhancement algorithm based on tri-Gaussian filter

ZHAO Huimin¹, LI Weijun¹, LIU Yangyang², CHEN Chen¹, CHEN Liang¹

(1. Laboratory of Artificial Neural Networks, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2. The Institute of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Low quality fingerprint recognition is an all-pervading problem of criminal investigation, which asks for extra manual efforts to address. Therefore, the fingerprint image processing method in accordance with human visual characteristics has certain practical value. This paper introduces the tri-Gaussian model of the concentric receptive field to the fingerprint image processing, and proposes a novel image enhancement algorithm especially for low-quality fingerprint image processing. The algorithm goes like this: firstly obtain the perceptual luminance of the neighbouring image by tri-Gaussian unilateral filtering; and then enhance the local contrast of the given fingerprint image. Based on analysis of the ridge-valley alternately distributing properties of fingerprint images and the disinhibitory properties of concentric receptive field, we have obtained the adaptive parameter model of tri-Gaussian unilateral filter especially for fingerprint images as well as the local contrast adjustment parameters. The contrast experiments indicate that the proposed method is effective to enhance the global and local luminance, stress the details of dark areas, and especially appropriate to assist the low-quality fingerprint identification.

Keywords: tri-Gaussian model; fingerprint enhancement; concentric receptive field; unilateral filter

指纹技术的研究有很长的历史,已经广泛应用在社会安全、边防建设、身份验证、电子用户验证和司法刑侦等领域.一个理想的输入指纹图像,脊线和谷线在局部区域能连续变换,这样就可以轻易分辨出脊线,从而准确提取细节点.但是,在刑侦领域,案发现场采集到的通常都是低质指纹图像,主要原因

有:脊线不连续,即脊线存在中断或裂缝;平行的脊线不能很好地分开,主要由于汗孔、污渍等导致的脊线粘连;指纹上的折痕、擦伤或者创伤;采集时由于压力不均和角度旋转造成的形变^[1].这些因素很容易造成丢失真正的特征,提取的特征中有伪特征,细节点的位置特征(位置和方向)存在错误等问题.因此,对于低质指纹图像,难以正确求取指纹的方向图或频率图,自动指纹识别系统基本不能胜任,需要人

收稿日期:2012-04-06. 网络出版日期:2012-11-16.

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90920013).

通信作者:李卫军. E-mail: wjli@semi.ac.cn.

工更多地参与. 因此, 低质指纹图像能否通过增强处理, 尽可能多地获得清晰的纹线结构, 以符合人的视觉特性, 具有重要的实用价值.

指纹图像增强方法分为基于像素的图像增强和基于纹理的图像增强两大类. 前者是在空域对指纹进行处理, 直接作用于指纹的像素值, 一般用在指纹的初级处理中, 主要实现图像灰度的调整, 使得后期对指纹图像进行方向图、频率图的提取更有利, 从而为后续的利用方向或频率信息对指纹的进一步增强奠定良好的基础. 后者是在变换域进行, 利用指纹的纹理信息, 如相位(即指纹方向信息)、频率、能量等对指纹图像进行加强处理.

基于像素的指纹图像增强方法, 通常根据图像的全局或局部灰度分布情况, 对像素值进行调整, 以达到增强指纹特征的目的. 目前, 基于像素的指纹图像增强技术主要有以下几种算法: 归一化、直方图均衡化、灰度拉伸和维纳滤波等.

由 L. Hong 等提出的整体灰度归一化的方法^[2], 是目前使用最广的方法, 目的是减小不同指纹图像之间灰度值的差异, 使输入的图像具有相同的均值和方差. 但该方法并不改善指纹脊谷的清晰程度. B. G. Kim 等提出基于块处理的灰度归一化方法^[3]. Zhixin 等提出类似的归一化处理, 对皮肤表面灰度进行模拟近似处理, 从而突出显示脊线^[4]. 灰度拉伸^[5]重在提高图像灰度级的动态范围. 在指纹图像处理中以非线性变化为主, 其中指数、对数和 Sigmoid 函数(Zin Mar Win 2011)^[6]最常见. 直方图均衡化能有效利用指纹图像灰度强度场值分布信息对图像进行均衡处理, 从而加大指纹图像脊和谷的像素反差, 增强对比度. 如 M. U. Akram 等使用局部直方图增强对比度, 再用中值滤波去掉噪声^[7]. J. Ma 等对指纹图像进行高斯滤波去掉灰尘等噪声, 然后使用直方图均衡化处理^[8]. 维纳滤波(Wiener filtering)是图像复原中的经典方法, 在去除图像的噪声方面也有很好的应用. 例如 Greenberg 等先利用基于块的直方图均衡化对图像进行初级处理, 然后使用维纳滤波进行指纹图像分块处理达到去噪的目的^[9].

上述图像处理方法对于质量很高的指纹图像, 处理效果很好, 但是对于在刑侦等领域采集的低质量指纹图像, 处理效果有限, 且不能满足人工参与的需求.

1 基于三高斯单边滤波的指纹图像增强方法

1.1 视网膜神经节细胞的感受野特性

人类视觉系统是世界上最好的图像处理系统,

李朝义等对哺乳动物视网膜神经节细胞的感受野进行深入详细的研究, 提出了神经节细胞的感受野是由中心的兴奋区、周边的抑制区和外围去抑制区共同组合而成的同心圆结构, 即非经典感受野的三高斯函数数学模型^[10]. 非经典感受野模型有边缘增强效应, 还能补偿低空间频率信息的损失, 该特性对于传递大面积亮度和灰度梯度起着及其重要的作用.

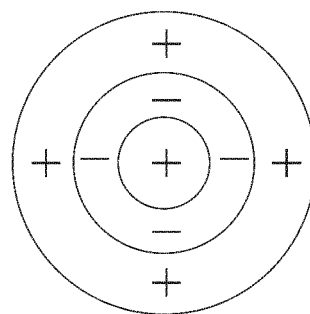


图1 中间兴奋、四周抑制、边缘兴奋的非经典感受野模型

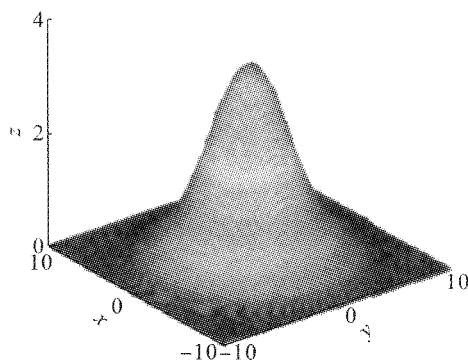
Fig. 1 Disinhibitory properties of concentric receptive field

非经典感受野的三高斯模型结构如图1所示. 中间兴奋区能量大且作用区域集中; 四周抑制区属于辅助抑制作用, 能量较小, 但是作用区域比中间兴奋区大; 边缘去抑制区范围更大、强度更弱. 如式(1)所示:

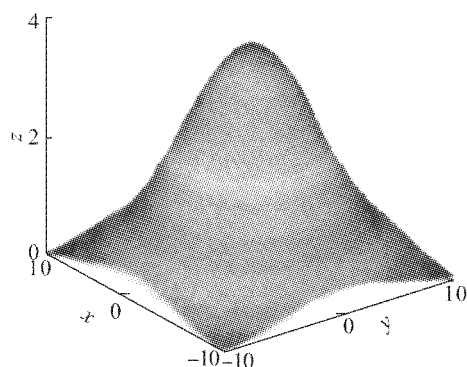
$$G(x, y) = A_1 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_1^2}\right) - A_2 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_2^2}\right) + A_3 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_3^2}\right). \quad (1)$$

式中: $I'(x, y)$ 是输出图像的灰度值, $I(x, y)$ 是输入图像的灰度值; G 为三高斯模型, A_1 、 A_2 、 A_3 分别表示中央、四周和边缘的峰值系数, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别表示中央、四周和边缘的尺度参数.

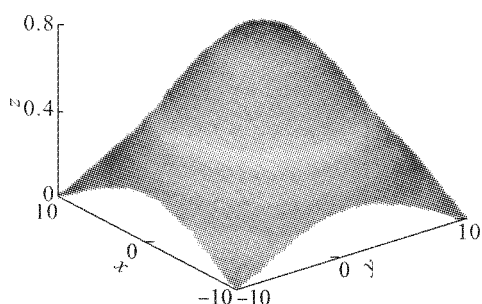
三高斯模型在空间域上的特性如图2所示.



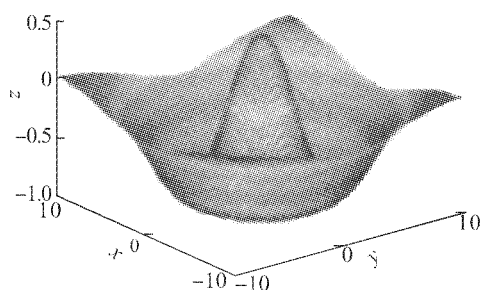
(a) 中间兴奋模型



(b) 四周抑制模型



(c) 边缘兴奋模型



(d) 带去抑制区的三高斯模型

图2 三高斯模型的空间结构

Fig. 2 3-D structure of concentric receptive field

文献[11]基于上述视网膜神经节细胞非经典感受野模型和亮度自适应特性,提出了一种双边滤波的仿生图像增强方法,对于常见的景物图像具有较好的处理效果。但是,指纹特征主要体现于脊、谷的二值化分布,不同于一般图像对色彩和灰度分布特性的视觉需求。因此,采用专门的方法处理指纹图像问题可以获得更好的效果。

本文在文献[11]前期工作的基础上,研究三高斯单边滤波技术取代邻域图像灰度和空间分布的双边滤波,获取像素点的主观感觉亮度,然后对图像进行局部线性调整,并根据指纹图像的谷脊交替分布特性,研究算法中的模型参数取值方法。

1.2 三高斯单边滤波

利用上述三高斯滤波获得当前点主观感觉亮度 $\bar{I}(x,y)$,如式(2):

$$\bar{I}(x,y) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N G_R I(x_i, y_j) / \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N G_R \quad (2)$$

式中: $I(x,y)$ 是输入图像的灰度值,窗口大小为 $M \times N$; G_R 是空间邻近三高斯核函数,如式(1)所示。

非经典感受野的三高斯函数数学模型很强烈地模拟了视网膜神经节细胞的传导特性,使用这一模型来处理指纹图像时,既能增强指纹图像的对比度,还能有效提升图像中的低空间频率成分,提升区域亮度对比信息和亮度梯度信息,自适应地处理低质量指纹图像中的灰暗区域,提高该部分区域亮度。

对于三高斯函数的参数设置,不仅依据视网膜神经节细胞感受野的生理特性,更要结合指纹独特的脊和谷的特征。下面以位于指纹谷中的像素为例说明各参数的设置,如图3所示。

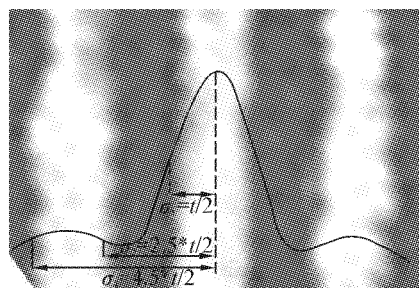


图3 三高斯模型的二维参数示意

Fig. 3 2-D structure of concentric receptive field

中间兴奋区能量大且作用区域集中,为加强谷的能量大小,中央峰值系数 A_1 最大,方差 $\sigma_1 = t/2$ (t 为一个指纹脊或谷的宽度)。为加强图像对比度,四周抑制区使谷相邻的脊能量降低,作用区域比中间兴奋区大,且覆盖半个谷 ($t/2$) 和一个脊的宽度 ($2 \times (t/2)$),所以方差 $\sigma_2 = (1+2) \times (t/2)$;辅助作用总体能量较小,所以峰值 A_2 较低。边缘带去抑制区是范围更大、强度更弱的高斯分布,所以峰值系数 A_3 较低,方差 σ_3 最大,应覆盖半个谷 ($t/2$)、相邻脊 ($2 \times (t/2)$) 和次邻谷 ($2 \times (t/2)$),即 $\sigma_3 = (1+2+2) \times (t/2)$ 。三高斯滤波作用窗口大小不能小于边缘带去抑制区大小,所以 $M = N \geq 2\sigma_3$ 。

结合三高斯滤波函数的生理特性,仿真得到各参数。由于低质指纹图像采集时存在压力不均匀等情况,脊和谷的宽度不一定相等,如图4所示,考虑到算法的通用性,且结合仿真结果,取如下值时效果最稳定(t 为一个指纹脊或谷的宽度):

1) 各峰值: $A_1 = 15, A_2 = 2, A_3 = 1$;

2) 各方差: $\sigma_1 = t/2$, $\sigma_2 = 2.5 \times (t/2)$, $\sigma_3 = 4 \times (t/2)$,

3) 窗口大小: $M = N = 2 \times (t/2)$.

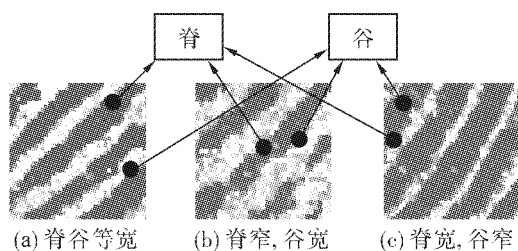


图4 指纹的脊和谷

Fig. 4 Ridges and valleys in a fingerprint image

根据指纹数据库 FVC2000 (the first international fingerprint verification competition) DB2_B 中指纹图像 (256×364) 脊或谷宽度统计数据, 中位数为 8 个像素宽度; FVC2004 (the third international fingerprint verification competition) DB2_B 中指纹图像 (328×364) 脊或谷宽度的统计数据, 中位数为 10 个像素宽度. 取一个脊或谷宽度 t 的经验算式如式(3)所示.

$$t = \lfloor \frac{\min(x, y)}{32} \rfloor. \quad (3)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 为取整, x 为指纹区域长, y 为指纹区域宽.

1.3 局部线性调整

根据人眼的主观感觉亮度与实际光强的差异, 对指纹图像进行局部对比度线性调整.

$$I_0(x, y) = K(I(x, y) - \bar{I}(x, y)) + \bar{I}(x, y).$$

式中: $I(x, y)$ 和 $I_0(x, y)$ 分别表示输入、输出图像的灰度值. $I(x, y)$ 是当前点 (x, y) 处的邻域主观感觉亮度, 反映了人类视觉系统感受到当前点的主观亮度情况. $I(x, y) - \bar{I}(x, y)$ 表示当前点亮度和人眼主观亮度的差异. 系数 K 是正值常数, 为局部线性关系的比例, 用来调整上述差异在图像中的比例. $K > 1$ 表示在指纹图像中增强这种差异, 从而使指纹图像的细节信息增强. K 太小, 细节信息增强不明显, K 过大, 又会将不必要的细节放大, 从而引入噪声, 仿真后取 $K = 2$.

2 实验结果

本文使用 Matlab 作为指纹图像处理算法的仿真平台, 使用数据库 FVC2000 和 FVC2004 中 B 数据库样本. FVC2000 和 FVC2004 都包含 4 个样本库. 3 个不同的指纹扫描仪和 1 个指纹合成软件, FVC2000_DB2 采用电容扫描仪“TouchChip”, 256×364 像素, 8-bit 灰度图; FVC2004_DB2 采用光学扫描仪“U. are. U 4000”, 512×480 像素, 8-bit 灰度图.

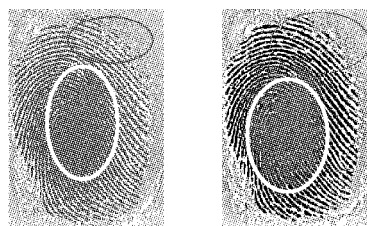
FVC2000 中质量较差的图像如图 5 所示, 从对比实验图中可以看出, 灰度归一化方法能够提高指纹脊和谷的对比度, 但是它使得灰暗区域对比度降低, 无法辨别, 同时使得另一部分指纹出现断裂, 信息丢失. Sigmoid 函数拉伸的效果跟灰度归一化相近, 同样存在对质量差的区域处理不好的问题. 基于块的直方图均衡化方法虽然将暗的区域变亮, 但是将图像的噪声放大, 更不利于特征提取. 维纳滤波能够去除一些脊和谷之间的椒盐噪声, 但是在中心灰暗模糊部分, 引入了椒盐噪声. 双边滤波一定程度上增强了对比度, 但是不明显. 本文提出的三高斯单边滤波的方法将模糊区域的亮度提高, 有利于人眼的观察, 而且将指纹脊和谷的对比度提高, 线条更清晰, 同时没有损失任何细节信息, 不会对后续处理造成损失.



(a) FVC2000 原图 (b) 灰度归一化 (c) Sigmoid 拉伸



(d) 基于块的直方图均衡化 (e) 维纳滤波



(f) 双边滤波 (g) 本文方法

图5 FVC2000 指纹图像对比结果

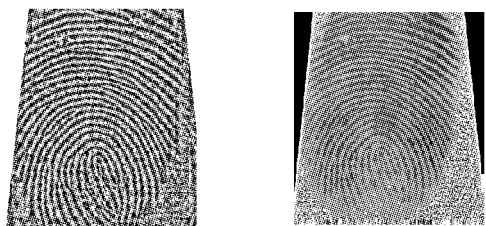
Fig. 5 Results of comparison between our algorithm and others on FVC2000 fingerprint images

FVC2004 中选取的指纹图像质量相对高, 对比实验如图 6 所示, 以上这些方法对质量好的图像处理效果都比较好. Sigmoid 拉伸不能够淡化指纹图像中黑影; 维纳滤波效果和原图对比不明显, 还引入了椒盐噪声; 基于块的直方图均衡化使脊线更清晰, 但是也将噪声放大; 双边滤波只是将图像对比度稍微提高, 且没有淡化黑影; 使用三高斯单边滤波的方法,

对比度提高更多,且自适应地淡化了黑影,效果很好。



(a) FVC2004 原图 (b) 灰度归一化 (c) Sigmoid 拉伸



(d) 基于块的直方图均衡化 (e) 维纳滤波



(f) 双边滤波 (g) 三高斯滤波

图6 FVC2004 指纹图像对比结果

Fig. 6 Results of comparison between our algorithm and others on FVC2004 fingerprint images

3 结束语

本文实验算法合理引入非经典三高斯滤波函数,采用自适应于指纹图像处理的参数,获得邻域主观感觉亮度,再进行局部对比度线性调整,获得最终图像.该算法对于图像质量高的指纹,处理效果不逊于其他方法;对低质量的指纹图像增强效果更加明显,不仅提高了脊和谷的对比度,而且能够自适应地将灰暗区域亮度提高,有利于后续处理的同时,也便于人眼观察,为人工参与鉴别提供帮助。

参考文献:

- [1] MALTONI D, MAIO D, JAIN A K, et al. Handbook of fingerprint recognition [M]. 2nd ed. London: Springer-Verlag, 2009: 131-133.
- [2] HONG L, WAN Y, JAIN A K. Fingerprint image enhancement: algorithms and performance evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777-789.
- [3] KIM B G, PARK D J. Adaptive image normalisation based on block processing for enhancement of fingerprint image [J]. Electronics Letters, 2002, 38(14): 696-698.
- [4] ZHIXIN S, GOVINDARAJU V. Fingerprint image enhancement based on skin profile. Approximation [C]//Proc Int Conf on Pattern Recognition. Hong Kong, China, 2006, 3: 714-717.
- [5] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 78-88.
- [6] WIN Z M, SEIN M M. Fingerprint recognition system for low quality images [C]//SICE Annual Conference 2011. Tokyo, Japan, 2011: 1133-1139.
- [7] AKRAM M U, AYAZ A, IMTIAZ J. Morphological and gradient based fingerprint image segmentation [C]//2011 International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT). Karachi, Pakistan, 2011: 1-4.
- [8] MA J, JING X J, ZHANG Y Y. Simple effective fingerprint segmentation algorithm for low quality images [C]//2010 3rd IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology (IC-BNMT). Beijing, China, 2010: 855-859.
- [9] GREENBERG S, ALADJEM M, KOGAN D. Fingerprint image enhancement using filtering techniques [J]. Real-Time Imaging, 2002, 8(3): 227-236.
- [10] LI C Y, PEI X. Role of the extensive area outside the x-cell receptive field in brightness information transmission [J]. Vision Research, 1991, 31(9): 1529-1540.
- [11] 金小贤,李卫军,陈旭,等.一种基于视觉特性的仿生图像增强算法[J].计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(3): 534-537.
JIN Xiaoxian, LI Weijun, CHEN Xu, et al. Study on biomimetic processing method of face image [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2010, 22(3): 534-537.

作者简介:



赵慧敏,女,1988年生,硕士研究生,主要研究方向为图像处理与模式识别新理论、新方法。



李卫军,男,1975年生,副研究员,主要研究方向为图像处理、模式识别、智能信息处理,发表学术论文多篇。



刘扬扬,女,1976年生,副研究员,主要研究方向为光电成像技术与图像处理、模式识别,发表学术论文多篇。