第 43 卷 第 2 期 计 算 机 工 程 2017 年 2 月
Vol. 43 No. 2 Computer Engineering February 2017

·图形图像处理· 文章编号：1000-3428(2017)02-0248-04 文献标志码：A 中图分类号：TP391

基于 Retinex 与 STFT 的非接触指纹图像增强

唐永鹤，蒋烈辉，侯一凡，王瑞敏

（信息工程大学 网络空间安全学院，郑州 450052）

摘 要： 针对数字相机拍摄的指纹图像存在脊线和谷线对比度低、抖动模糊等问题，提出一种基于 Retinex 理论和短时傅里叶变换（STFT）分析的非接触指纹图像增强算法。依据 Retinex 理论，利用图像各个像素的相对明暗关系消除光照非均衡性影响，提高脊线和谷线的对比度，实现非接触指纹图像的初次增强。采用 STFT 分析的方法获取指纹图像的方向图、频率图等纹理信息，并据此构建角度滤波器和半径滤波器，对初次增强结果进行频域滤波处理，进一步增强图像对比度，同时有效抑制噪声的干扰。实验结果表明，该算法对非接触指纹图像的增强效果较好，可以有效提高指纹脊线和谷线对比度，较好地保持指纹脊线的连续性，而且平均处理速度比同态滤波和 Garbor 滤波相结合的方法也略有提高。

关键词： 非接触指纹图像；Retinex 理论；图像增强；短时傅里叶变换分析；同态滤波；Garbor 滤波

中文引用格式： 唐永鹤，蒋烈辉，侯一凡，等. 基于 Retinex 与 STFT 的非接触指纹图像增强[J]. 计算机工程，2017，43(2)：248-251，256.

英文引用格式： Tang Yonghe, Jiang Liehui, Hou Yifan, et al. Contactless Fingerprint Image Enhancement Based on Retinex and STFT[J]. Computer Engineering, 2017, 43(2): 248-251, 256.

Contactless Fingerprint Image Enhancement Based on Retinex and STFT

TANG Yonghe, JIANG Liehui, HOU Yifan, WANG Ruimin

(School of Cyberspace Security, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

【Abstract】 For the low contrast between ridges and valleys, shake blur and other issues of fingerprint images obtained with digital cameras, a contactless fingerprint image enhancement algorithm based on Retinex theory and Short Time Fourier Transform (STFT) analysis is proposed. According to Retinex theory, the non-uniformity effect of the illumination is eliminated by using the relative brightness and darkness of each pixel in the image, and the contrast between ridges and valleys is increased, which enhances the contactless fingerprint image initially. The method of STFT analysis is used to extract the texture information of the fingerprint image, such as orientation map, frequency map and so on. Then the angle filter and radius filter are built to filter the results of initial enhancement in the frequency domain, which further improves the image contrast while effectively suppressing the interference of noise. Experimental results show that the present algorithm has a better performance on contactless fingerprint image enhancement, which can not only effectively improve the contrast between ridges and valleys of fingerprint, but also maintain the continuity of the ridge better, and its average speed is a little faster than the method combining homomorphic filtering and Gabor filtering.

【Key words】 contactless fingerprint image; Retinex theory; image enhancement; Short Time Fourier Transform (STFT) analysis; homomorphic filtering; Garbor filtering

DOI：10.3969/j.issn.1000-3428.2017.02.041

0 概述

指纹识别技术经过几十年的研究与应用，已经发展成为比较成熟、占有市场份额最大的生物特征识别技术。尽管如此，传统的接触式指纹识别技术仍然存在指纹扭曲变形、纹路残留、对皮肤状况敏感、采集过程易导致细菌传播等缺陷。这些缺陷不仅影响到指纹识别的精度，还可能泄露用户的信息

基金项目： 河南省科技攻关计划项目(162102210035)。

作者简介： 唐永鹤(1983—)，男，讲师、博士，主研方向为图像匹配、生物特征识别；蒋烈辉，教授、博士生导师；侯一凡，讲师、博士；王瑞敏，副教授、硕士。

收稿日期： 2016-01-13 **修回日期：** 2016-03-11 **E-mail：** tyh_983@126.com

甚至危害用户的身体健康[1]。与之相反,非接触指纹识别系统采集指纹图像时指纹表面与摄像机或结构光等传感器不直接接触,不仅可以消除接触式指纹识别系统面临的不利因素,还可以获得肤色、指纹的三维结构等更多信息,因而具有进一步提高指纹识别准确度和安全性的潜力。相应地,非接触指纹识别技术已经成为指纹识别领域一个颇具发展前景的研究方向[2-6]。

虽然非接触指纹识别不存在卫生、指纹变形、纹路残留等问题,但若要获取质量较好的非接触指纹图像,往往需要使用较昂贵的指纹采集设备或需要较复杂的指纹采集装置,使得其应用范围受限。使用手持移动设备上的相机采集指纹图像可以有效克服这一问题,但也面临指纹脊线和谷线对比度低、散焦、抖动模糊等新挑战,往往需要对此类指纹图像进行增强等预处理之后才能识别出来。本文主要研究非接触指纹图像增强算法,目前也有一些学者对此进行了深入研究[7-8]。文献[9]采用同态滤波和 Garbor 滤波相结合的方法增强指纹图像的对比度。文献[10]采用对数对指纹图像进行非线性均衡化处理以增加指纹脊线的清晰度,再利用 Garbor 函数增强脊线的纹理。文献[11]用相干滤波技术对非接触指纹图像进行增强,然后用简化的 Garbor 函数模板进行二次增强。此类算法主要以 Garbor 滤波进行增强,虽然可以在增强脊线对比度的同时有效去除噪声,但也存在着依赖方向图、对指纹模型描述不够准确等不足。鉴于短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform,STFT)算法[12]对接触式指纹图像增强效果较好,文献[13-15]对非接触指纹图像进行归一化处理以消除光照不均的影响,然后采用 STFT 分析的方法对指纹的 ROI 区域进行增强处理。此类算法利用了 STFT 指纹增强算法的良好性能,在正确提取 ROI 区域时增强效果较好,但对于非 ROI 区域或 ROI 区域提取错误时,由于这些区域的脊线和谷线对比度通常较低,增强效果往往欠佳。

基于此,本文提出一种基于 Retinex 和 STFT 的非接触指纹增强算法,根据非接触指纹图像脊线和谷线的明暗关系,采用 Retinex 算法进行对比度增强,通过 STFT 分析的方法对增强后的指纹图像进行处理。

1　算法原理

传统的接触式指纹图像增强算法已经比较成熟,但大多依赖于指纹方向图,而非接触指纹图像由于脊线和谷线的对比度较低,导致直接采用传统指纹增强算法进行处理的效果不佳,因此可以先增加脊线和谷线的对比度,再利用传统的指纹增强算法进行二次增强。本文指纹增强算法的结构框图如图 1所示,先将输入的非接触指纹图像进行灰度化处理,然后一方面通过 Ostu 分割、形态学处理等措施将指纹区域从背景中分割出来,另一方面依次进行基于 Retinex 的对比度增强、基于 STFT 的指纹增强等处理,最后将上述处理结果进行点积运算,从而获得增强后的指纹图像。

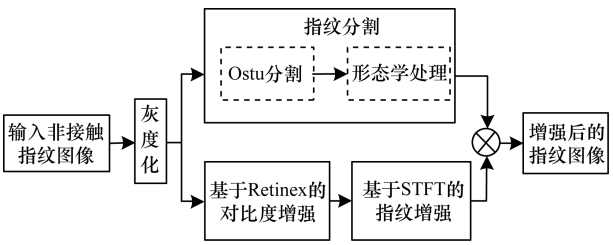


图 1　本文算法结构框图

1.1　基于 Retinex 的指纹对比度增强

Retinex 理论认为人眼感知的图像由光照图像和反射图像构成,可以用式(1)表示。

$$I(x,y)=L(x,y)\times R(x,y) \tag{1}$$

其中,$I(x,y)$表示人眼感知的图像;光照图像 $L(x,y)$ 决定了图像中像素所能达到的动态范围;$R(x,y)$为物体本质的反射属性图像。基于 Retinex 理论的图像增强算法也即采取一定的方法去除或降低光照对图像的影响,得到物体的反射图像,从而产生不受光照非均衡性影响的图像。

由于难以直接从 $I(x,y)$ 中分离出 $R(x,y)$,但若假定相邻像素之间的光照分量是相同的,即若点(x_1,y_1),(x_2,y_2)为相邻的 2 个像素点,假定 $L(x_1,y_1)=L(x_2,y_2)$,则可得$\frac{R(x_1,y_1)}{R(x_2,y_2)}=\frac{I(x_1,y_1)}{I(x_2,y_2)}$,即人眼感知图像相邻像素之间的灰度值之比等于反射图像对应相邻像素之间的灰度值之比。因此,可以根据$I(x,y)$相邻像素之间的比值关系(也即明暗关系)对图像的灰度值进行校正,得到反映物体反射属性的图像,实现图像增强的目的。

基于上述假设,图像上任意两点之间的明暗关系均可以用连续相乘来表示。对于图像上任意起点 S 和终点 D,若在给定路径上有 n 个点,且对应像素点的灰度值为$(d_1,d_2,\cdots,d_n)$,则点 S 和点 D 的明暗关系为:

$$\frac{D}{S}=\frac{d_2}{d_1}\times\frac{d_3}{d_2}\times\cdots\times\frac{d_n}{d_{n-1}}=\frac{d_n}{d_1} \tag{2}$$

由于人眼对亮度的感知能力呈指数型,同时为了避免进行乘积运算,通常在对数域处理像素之间的明暗关系,即:

$$\begin{aligned}\frac{D}{S}&=\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)\times\ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right)\times\cdots\times\ln\left(\frac{d_n}{d_{n-1}}\right)\\&=\ln d_n-\ln d_1\end{aligned} \tag{3}$$

由式(3)可知,不同的路径会产生不同的相对明暗关系,也即会产生不同的灰度校正结果,因此,路径的选取对图像的灰度校正至关重要。

鉴于指纹图像的脊线和谷线区域之间存在明暗相隔的特征,本文采用文献[16]方法对图像各个像素的灰度值进行校正,并在此基础上调整图像灰度的动态范围和分布,实现图像的增强。具体步骤如下:

1)将图像数据由 byte 型转换为 double 型,并将其变换到对数域。

2)根据像素之间的明暗关系,按照文献[16]方法对图像进行灰度校正。

3)对校正后的图像进行线性拉伸。

4)对线性拉伸后的图像进行直方图均衡化处理,增加图像的动态范围,进一步增强图像的对比度。

1.2 STFT 指纹二次增强

经 Retinex 增强处理之后,非接触指纹图像中的脊线和谷线对比度显著增强,与接触式指纹图像中脊线和谷线的对比度相当,但是其并未充分利用指纹图像中的纹理信息,在一定程度上放大了图像中的噪声。由于 STFT 在处理接触式指纹图像时,利用了指纹的方向图、频率图等纹理信息,能够在增强指纹图像的同时有效抑制噪声的干扰,因此采用简化的 STFT 算法对 Retinex 增强后的非接触指纹图像进行处理,以便获得对比度更加清晰的图像。

以 Retinex 算法增强后的非接触指纹图像为输入,STFT 二次增强的具体步骤如下:

1)将指纹图像均匀划分为若干重叠的小块。

2)对各个小块进行 STFT 分析,获得方向场图像 $Oimg$ 和频率场图像 $Fimg$。

3)对方向场图像进行高斯平滑处理,得到图像 $Oimg'$,并根据 $Oimg'$ 计算一致性图像 $Cimg$。

4)对频率场图像进行各向同性扩散,得到图像 $Fimg'$。

5)由 $Oimg'$ 和 $Cimg$ 分别计算子块的局部方向 θ_c 和角度带宽 θ_{BW},并据此构造角度滤波器:

$$H_\theta(\theta)=\begin{cases}\left[\cos\dfrac{\pi(\theta-\theta_c)}{2\theta_{BW}}\right]^2, & |\theta-\theta_c|\leqslant\theta_{BW}\\ 0, & |\theta-\theta_c|>\theta_{BW}\end{cases}$$

6)由 $Fimg'$ 计算子块的局部频率 r_c 和半径带宽 r_{BW},构建半径滤波器:

$$H_r(r)=\sqrt{\frac{1}{1+\left(\dfrac{r^2-r_c^2}{rr_{BW}}\right)^{2n}}}$$

7)在频域用相应的 H_θ 和 H_r 对各个子块进行滤波处理。

8)将滤波结果变换到时域,获得增强后的子块图像。

9)根据增强后的各个子块图像重建出增强后的指纹图像。

2 仿真实验与性能分析

为了验证算法的性能,用 Matlab 仿真实现了本文算法,原始非接触指纹图像如图 2(a)所示,图 2(b)为灰度化处理结果,图 2(c)为 Retinex 初次增强结果,图 2(d)为指纹分割结果,图 2(e)为对图 2(c)进行 STFT 增强的结果,图 2(f)为去除背景后的结果。从图 2 中可以看出,Retinex 初次增强有效突出了脊线和谷线的对比度,确保后续 STFT 二次增强时能够提取出准确的指纹纹理信息,STFT 分析则依据指纹的纹理特征进行有针对性的增强处理,在抑制噪声的同时进一步增强了脊线和谷线的对比度。

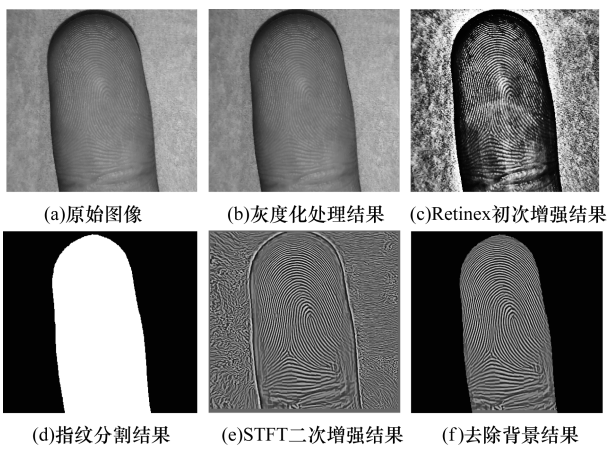


图 2 本文算法非接触指纹图像增强结果

为了进一步验证算法的性能,将本文算法分别与文献[9]算法、文献[13]算法进行比较。测试图像如图 3 所示,大小为 250×188,3 种算法的初次增强结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,Retinex 增强和同态滤波增强都能够显著增强脊线和谷线的对比度,而同态滤波增强需将图像由时域变换到频域,滤波处理后还需要由频域变换到时域,计算比较复杂。归一化处理旨在消除光照不均的影响,虽然也能在一定程度上增强指纹图像的对比度,但在指纹边缘区域和中心区域的脊线和谷线对比度并不明显。

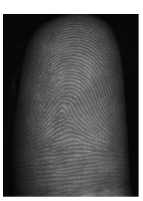
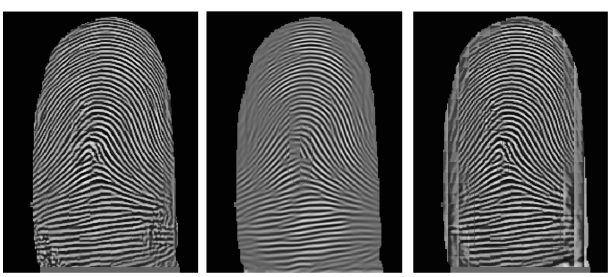


图 3 测试图像

(a)Retinex增强结果　(b)同态滤波增强结果　(c)归一化处理结果

图 4　3 种算法初次增强结果比较

以初次增强结果为输入,本文算法、文献[9]算法和文献[13]算法二次增强结果分别如图 5 所示。从图 5(b)可以看出,文献[9]算法虽然可以显著增强一些脊线曲率变化平缓的指纹,但在脊线曲率变化剧烈的区域,如图 5(b)中的椭圆区域,其指纹增强结果与真实的指纹纹理特征不符,这是由于指纹脊线在高曲率的地方方向变化很大,导致主方向估计不准确,使得滤波结果产生虚假特征。从图 5(c)中可以看出,文献[13]算法在矩形框内的 ROI 区域,除圆形区域内存在指纹断裂之外,基本上能够较好地增强指纹特征,而对于矩形框外的区域,如椭圆区域,其增强效果欠佳,这是由于此处的图像比较模糊,归一化处理未能有效突出这一区域的对比度。从图 5(a)中可以看出,本文算法不仅突出了指纹中心区域的纹理细节,对其他区域增强效果也较好,而且指纹脊线的连续性、走势与测试图像是一致的,这是由于本文算法将 Retinex 初次增强与 STFT 二次增强结合在一起,充分利用了通用增强与有针对性增强的优势。



(a)本文算法　(b)文献[9]算法　(c)文献[13]算法

图 5　3 种算法二次增强结果比较

此外,以图 3 为测试图像对上述 3 种算法的处理速度进行比较,3 种算法的平均处理时间如表 1 所示,其中电脑配置为 Pentium 4 CPU 2.8 GHz, 512 MB内存。从表 1 可以看出,本文算法的处理时间比文献[13]算法稍长,这是由于 Retinex 初次增强的计算量要大于归一化处理,而相对于文献[9]算法,本文算法的处理速度略有提高。

表 1　3 种算法处理时间　s

算法	初次增强时间	二次增强时间	总时间
本文算法	0.188	0.687	0.875
文献[9]算法	0.156	0.765	0.921
文献[13]算法	0.094	0.688	0.921

3　结束语

利用手持设备上的相机采集指纹图像进行指纹识别,不仅可以克服指纹变形、纹路残留、细菌传播等问题,而且具有方便灵活等特点,但此类指纹图像的脊线和谷线对比度较低,影响指纹识别的准确度。基于此,本文提出了一种基于 Retinex 和 STFT 分析的非接触指纹图像增强算法。该算法将基于光学原理的通用增强方法和基于纹理特征的针对性增强方法有机结合在一起,以 Retinex 理论为基础,通过消除光照非均匀性影响增强图像的对比度,在此基础上利用 STFT 分析提取指纹的方向图、频率图等纹理信息,并据此构建频域滤波器进行二次增强,进一步提高脊线和谷线的对比度。实验结果表明,本文提出的非接触指纹图像增强算法明显增强了指纹脊线和谷线的对比度,较好地保持了指纹脊线的连续性,且处理速度也略快于同态滤波和 Garbor 滤波相结合的方法。今后将以此为基础,重点研究非接触指纹图像的匹配识别算法,通过充分挖掘非接触指纹图像蕴含的纹理、二维乃至三维结构等信息,进一步提高非接触指纹识别的准确度。

参考文献

[1] 梁小龙,殷建平,祝　恩,等. 基于纹路的三维指纹模型重建算法[J]. 计算机科学,2012,39(10):282-285.

[2] Kumar A, Zhou Yingbo. Contactless Fingerprint Identification Using Level Zero Features [C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Press,2011:121-126.

[3] Kumar A, Kwong C. Towards Contactless, Low-cost and Accurate 3D Fingerprint Identification[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015,37(3):681-696.

[4] Liu Feng, Zhang D. 3D Fingerprint Reconstruction System Using Feature Correspondences and Prior Estimated Fingermodel[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(1):178-193.

[5] Huang Shujun, Zhang Zonghua, Zhao Yan, et al. 3D Fingerprint Imaging System Based on Full-field Fringe Projection Profilometry [J]. Optics and Lasers in Engineering,2014,52(1):123-130.

[6] Liu Feng, Zhang D, Shen Linlin. Study on Novel Curvature Features for 3D Fingerprint Recognition[J]. Neurocomputing,2015,168:599-608.

(下转第 256 页)

间,而且随着点云数据量的增加,该算法的优势会更加明显。不足之处是本文只是针对文本曲面进行实验。但文本点云曲面曲率波动幅度较小,且位置相对水平,因此,下一步将在本文算法的基础上继续研究针对其他复杂曲面(例如地形等),或者曲面模型在空间中位置较复杂情况时的曲面边界提取算法。

参考文献

[1] 潘荣江,孟祥旭.点云曲面边界提取[J].几何设计与计算的新进展,2005,27(7):52-57.

[2] 吴禄慎,晏海平,陈华伟,等.一种基于散乱点云的边界提取算法[J].计算机应用与软件,2014,31(11):264-268.

[3] 陈义仁,王一宾,彭张节,等.一种改进的散乱点云边界特征点提取算法[J].计算机工程与应用,2012,48(23):177-179.

[4] Gumhold S,Macleod R,Wang Xinlong. Feature Extraction from Point Clouds[C]//Proceedings of the 10th International Meshing Roundtable. Newport Beach,USA:[s. n.],2001:293-305.

[5] 王晏民,郭 明.大规模点云数据的二维与三维混合索引方法[J].测绘学报,2012,41(4):605-612.

[6] Dey P,Noushath S. A Robust Skew Detection Method for Scanned Document Images[J]. Pattern Recognition,2010,43(3):937-948.

[7] 雷 敏,仲思东,屠礼芬.一种三维点云聚类算法的研究[J].科学技术与工程,2014,14(29):20-53.

[8] Hans-Peter K,Marisa P,Matthias S,et al. Efficient Similarity Search on 3D Bounding Box Annotations[C]//Proceedings of Medical Imaging 2012:Advanced PACS-based Imaging Informatics and Therapeutic Applications. San Diego,USA:SPIE,2012:1605-7422.

[9] 李 宝,程志全,党 岗,等.三维点云法向量估计综述[J].计算机工程与应用,2010,46(23):1-7.

[10] 张巧英,陈 浩,朱 爽.密度聚类算法在连续分布点云去噪中的应用[J].地理空间信息,2011,9(6):101-104.

[11] 董洪伟.散乱点云的三角网格重构[J].计算机工程,2005,31(15):30-32.

[12] 徐 杰.一种基于立方格的散乱点云曲面网格化方法[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(2):228-234.

[13] Piegl L A,Tiller W. Algorithm for Finding All k-nearest Neighbors[J]. Computer-Aided Design,2002,4(2):167-172.

[14] 张 毅,刘旭敏,隋 颖,等.基于 K-近邻点云去噪算法的研究与改进[J].计算机应用,2009,29(4):1011-1014.

[15] 叶珉吕,花向红,陈西江,等.基于正交整体最小二乘平面拟合的点云数据去噪方法研究[J].测绘通报,2013(11):37-39.

[16] 程效军,方 芳.基于形态学的散乱点云轮廓特征线提取[J].同济大学学报(自然科学版),2014,42(11):1738-1743.

编辑 金胡考

(上接第 251 页)

[7] Kaur P, Jain A, Mittal S. Touch-less Fingerprint Analysis——A Review and Comparison[J]. International Journal of Intelligent Systems and Applications,2012,4(6):46-52.

[8] Labati R D, Genovese A, Piuri V, et al. Contactless Fingerprint Recognition: A Neural Approach for Perspective and Rotation Effects Reduction[C]// Proceedings of IEEE Workshop on Computational Intelligence in Biometrics and Identity Management. Washington D. C. ,USA:IEEE Press,2013:22-30.

[9] Parziale G. Touchless Fingeprinting Technology, A Chapter in Advances in Biometrics[M]//Ratha N K, Govundaju V. Sensors,Systems and Algorithms. Berlin, Germany:Springer,2007.

[10] Labati R D, Scotti F. A Neural-based Minutiae Pair Identification Method for Touch-less Fingerprint Images[C]// Proceedings of IEEE Workshop on Computational Intelligence in Biometrics and Identity Management. Washington D. C. ,USA:IEEE Press,2011:96-102.

[11] 秦芬芬,廖 斌.非接触指纹图像分割与增强方法的研究[J].传感器世界,2014,20(8):16-19.

[12] Chikkerur S, Cartwright A, Govindaraju V. Fingerprint Image Enhancement Using STFT Analysis[J]. Pattern Recognition,2007,40(1):198-211.

[13] Hiew B, Andrew B, Pang Y. Digital Camera Based Fingerprint Recognition[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications. Washington D. C. ,USA:IEEE Press,2007:676-681.

[14] Hiew B, Teoh A, Ngo D. Preprocessing of Fingerprint Images Captured with a Digital Camera[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Washington D. C. , USA:IEEE Press,2006:1-6.

[15] Hiew B Y, Teoh A B J, Yin O S. A Secure Digital Camera Based Fingerprint Verification System[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation,2010,21(3):219-231.

[16] 李学明.基于 Retinex 理论的图像增强算法[J].计算机应用,2005,22(2):235-237.

编辑 顾逸斐