

基于小波灰度曲面的近红外手指静脉识别方法

徐天扬 惠晓威 林 森

辽宁工程技术大学电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105

摘要 针对手指静脉的身份识别问题,并结合手指静脉具有丰富纹理信息的特点,提出了一种基于小波灰度曲面的近红外手指静脉识别方法。采用直方图均衡化方法对原始静脉图像的感兴趣区域进行灰度调整,再用小波分解降维,提取降维后具有不同分辨率的图像,构建待匹配图像。将两幅待匹配图像中的对应像素值相减,得到灰度差曲面。求出该灰度差曲面的方差,将其作为衡量两个手指静脉特征曲面之间距离的依据,并据此判定两个静脉是否来自同一个手指。应用该方法在国内和国外两个图库中使用典型和流行方法进行了对比实验,结果表明,提出的方法用Haar小波降维后可获得具有不同分辨率的图像,在两个图库上的最低等误率(EER)分别为0%和4.6281%,识别时间仅为0.061 s和0.0502 s。该算法具有一定的优势和可行性,且准确性高、安全保密性好、运行速度快。

关键词 图像处理;手指静脉识别;灰度曲面;小波分解降维;低分辨率

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.041005

A Near Infrared Finger Vein Recognition Approach Based on Wavelet Grayscale Surface Matching

Xu Tianyang Hui Xiaowei Lin Sen

College of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China

Abstract Aiming to identify the finger vein and considering the rich texture characteristics of the finger vein, a near infrared finger vein recognition approach based on wavelet grayscale surface matching is proposed. The region of interest of the original image is adjusted by using the histogram equalization, the different resolution images are extracted after decomposition, and the images for matching are constructed. The gray difference surface is obtained by computing the gray difference of two pixels from two different images. The variance is calculated by using the gray difference surface, and is considered as the distance between two feature surfaces of the finger vein images, and the result is used to determine whether the two finger vein images are from the same finger. The comparison experiments are performed with the typical and popular approaches on two databases. The experimental results show that the lowest equal error rate (EER) is 0% and 4.6281% respectively, and the recognition time is only 0.061 s and 0.0502 s, respectively, when the different resolution images are extracted after Haar wavelet decomposition. The superiority and feasibility of the proposed approach is indicated, and high accuracy, good security and fast running speed of the approach are exhibited.

Key words image processing; finger vein recognition; grayscale surface; dimension reduction by wavelet decomposition; lower resolution

OCIS codes 100.3005; 100.5010; 150.1135

1 引言

随着21世纪信息技术和生物医学的不断发展,金融、信息网络、司法、国家安全等领域对个人身份识别

收稿日期: 2015-09-21; 收到修改稿日期: 2015-10-30; 网络出版日期: 2016-02-17

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2014132)

作者简介: 徐天扬(1985—),女,硕士研究生,主要从事数字图像处理等方面的研究。

E-mail: goodgoodstudy0929@126.com

导师简介: 惠晓威(1958—),男,硕士,教授,主要从事现代通信理论、图像处理与识别、信息处理技术等方面的研究。

E-mail: 759639015@qq.com

的安全要求逐步提高,手指静脉识别技术作为一种新兴的红外生物特征识别技术^[1-4],已成为国内外生物识别领域的前沿研究热点,具有很高的研究价值和应用前景。

目前手指静脉特征的提取方法主要分为基于结构特征的方法、基于子空间的方法和基于纹理分析描述的方法。

1) 用基于结构特征的方法提取手指静脉上的特征点、几何线的结构特征。比如余成波等^[5]提出了利用静脉图像中静脉灰度值所形成的谷型区域来实现特征的提取。张祺深等^[6]选择手掌静脉作为特征点描述其空间三维结构,提出了一种改进的内核相关性分析方法匹配三维点云。由于点特征数量多、计算量大、线特征提取困难,一般来说,结构方法比较直观,但辨识能力相对有限。

2) 用基于子空间的方法利用空间投影变换的数学方法来提取空间特征,得到降维的静脉图像信息。比如余成波等^[7]在2012年将经典的主成分分析(PCA)算法运用到手指静脉识别。彭加亮^[8]提出了将线性判别分析(LDA)方法运用到手指静脉与指纹相结合的多模态生物识别中的算法。陈玉琼^[9]运用二维主成分分析(2DPCA)方法获得了手指静脉识别特征。二维费舍线性判别(2DFLD)的方法被运用到手掌的静脉识别中^[10]。由于图像像素较多,PCA、LDA方法虽然能得到由二维转换成一维的空间矩阵,但降维过程计算量较大、时间较长。2DPCA只在图像的行与列上实现相关的压缩运算,虽然减少了时间和计算量,但压缩效率远不及PCA、LDA方法。2DFLD方法虽减少了由二维转换成一维的维度很高的空间矩阵的计算量,也解决了类内散布空间矩阵奇异问题,缩短了时间,但对光照变化等噪声比较敏感。文献[11]采用7个不变矩原理来提取手指静脉图像特征,算法的复杂度较低,但识别率并不高。

3) 用基于纹理分析描述的方法通过分析静脉图像像素灰度值的分布来提取静脉图像全局或局部特征,是较活跃的研究方向。比如Lee等^[12]和Ojala等^[13]提出局部二元模式(LBP)、局部导数模式(LDP),这两种算法被用于手指静脉图像特征提取,这两种方法对线性光照的变化不敏感,同时又具有很强的描述能力。纹理分析方法适用性比较强,直观上比较符合静脉图像自身特点,在静脉识别领域通用性较强。但是傅里叶变换和Gabor变换分析图像时将图像从空域变换到频域,忽略了原图像丰富的细节信息,受光照条件的影响而产生的不稳定性也较明显,且变换后图像特征仍处在高维空间中,计算量较大,时间较长,辨识能力还有待提高。

以上提到的手指静脉识别方法都是从静脉上提取出来的一些局部特征数据或者是一些0、1编码作为特征提取的目的。一些算法在理论上关注算法的识别效果,却忽略了实际应用中的安全性。用于最后匹配的特征数据相对清楚具体,若被仿冒者窃取,易在中间线路中被仿造插入到手指静脉识别系统中,影响识别系统安全性。而且一些特征提取算法的实现过程比较复杂,虽然提高了识别率,却以牺牲执行时间为代价。为了避免传统方法中的缺陷,兼顾考虑识别系统的准确性、安全保密性和效率,针对静脉纹理特点,从纹理特征出发,本文提出了一种基于小波灰度曲面的近红外手指静脉识别方法。该方法将整个手指静脉图像作为特征,利用手指静脉灰度图像的空间分布呈灰度曲面的特征来进行手指静脉识别,具有较强的防伪性。通过对灰度曲面特征和手指静脉纹理进行深入的分析,证明提出的算法在手指静脉识别领域具有一定优势和可行性,且准确性高、安全保密性好、运行速度快。

2 基于Haar小波灰度曲面的近红外手指静脉识别算法基本原理

2.1 待匹配图像的构建

2.1.1 灰度特征曲面及手指静脉纹理特征分析

基于纹理分析描述的方法是手指静脉特征提取算法中较活跃的研究方向。算法中手指静脉图像的宽和高设定为水平方向 x 轴和垂直方向 y 轴的值,像素灰度级设定为 z 轴方向的值。通过建立三维灰度级空间坐标系,可用坐标 (x,y,z) 表示图像中每个像素点在三维灰度级空间的灰度分布,该分布呈曲面形态,且待匹配图像在三维灰度级空间上的分布曲面被定义为特征曲面。图1所示为手指静脉图像在三维灰度级空间上的分布曲面。手指静脉图像三维灰度级空间上的分布曲面的起伏波动形状与手指静脉纹理分布特征具有明显的对应关系。手指静脉纹理主要由不同直径的粗细血管构成,不同位置血管密度也不相同,使静脉纹理具有天然的多分辨率特征。此外,手指静脉也有较稳定的方向性。这些特征被应用到灰度曲面对手指静

脉进行匹配时显示出一定的优势:每一幅手指静脉图像都存在明显的直径较粗的血管静脉纹理,有些粗静脉分布相对比较密集,类似这样的静脉被视为强静脉,且强静脉纹理对应的灰度较深,可以在低分辨率下采集,对应着手指静脉图像的三维空间分布灰度曲面中较大的凹凸。手指静脉图像上还存在着一些直径较小的血管静脉纹理,类似这样的静脉被视为弱静脉,弱静脉纹理对应的灰度较浅,可以在相对高分辨率下采集,对应着手指静脉图像的三维空间分布灰度曲面中较小的凹凸。这些像素灰度值形成的凹凸像一座座波浪起伏的小山丘,完全反映了手指静脉纹理的强弱信息整体特征。强静脉纹理特征反映到灰度曲面上就是灰度曲面的凹凸程度较大,弱静脉纹理特征反映到灰度曲面上就是灰度曲面的凹凸程度较小。强静脉纹理在进行识别时将起到较大的区分识别作用,不同个体的强静脉存在的明显差异会使两张静脉图像特征曲面的方差更大,识别效果更好。弱静脉纹理在进行识别时起到区分识别作用较小,不同个体的弱静脉存在的差异对两张静脉图像特征曲面的方差影响远不及强静脉。进行识别时很难同时用一个较高的分辨率从图像中较好地提取强静脉和弱静脉,强静脉适宜在低分辨率下提取,弱静脉适宜在高分辨率下提取,降低图像分辨率对强静脉的影响会很小,而对弱静脉的影响相对较大,且对原始静脉图像感兴趣区域作灰度调整能在一定程度上避免外界因素的影响。故本文算法在对原始静脉图像感兴趣区域作灰度调整后,用不同小波在不同的低分辨率下构建待匹配图像。

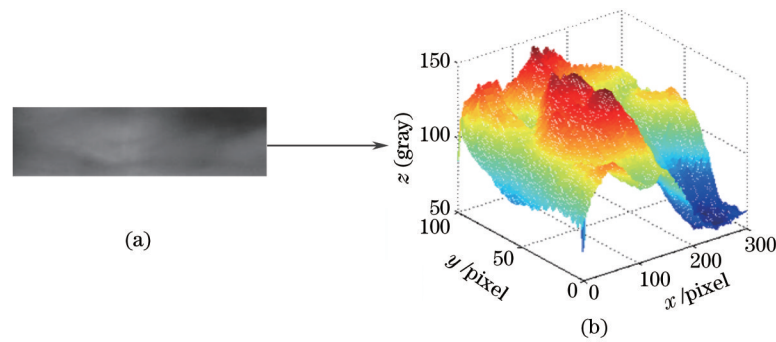


图 1 (a) 尺寸归一化后的手指静脉图像; (b) 手指静脉图像的灰度曲面图像

Fig.1 (a) Finger vein image after size normalization; (b) grayscale surface image of the finger vein

2.1.2 直方图均衡化灰度调整

在手指静脉图像采集集中,不能保证采集时外界因素对静脉图像的影响相同,所以在匹配识别时,静脉图像灰度经常会因光照条件不同和拍摄角度远近不同而受到影响,从而影响方法的识别结果。光照对静脉灰度曲面的影响有^[14]:1) 可能影响图像中反映静脉纹理特征的有用数据的对比度,使纹理深度发生变化,图像每点的灰度值相对于 z 轴所成比例不同,导致灰度空间分布曲面凹凸程度发生变化,起伏相对平缓或剧烈,影响算法识别结果;2) 整个图像的亮度发生变化,灰度曲面的整体灰度平均值即发生变化,曲面会沿着 z 轴方向平移,但纹理对应的凹凸程度和位置不会发生变化,所以不影响算法的识别结果。为消除光照对识别结果的影响,在手指静脉图像的预处理过程中采用直方图均衡化的方法调整手指静脉图像灰度级,使均衡后图像的灰度级跨越更宽灰度级范围,从而可达到增强图像整体对比度的效果,使图像灰度的空间分布曲面凹凸更好地反映强弱静脉纹理细节。

2.1.3 小波分解降维构建待匹配图像

针对静脉具有自然的分辨率特征,算法应用了 Haar、db2、db3 三种小波的多分辨率变换,获取图像低频分量的近似值,有利于不同分辨率特征的提取。正交小波变换的多分辨率分解是将低频部分(近似图像部分)进一步进行分解。最低频子带图像与原始图像极为相似,只是尺寸变小,包含原图的绝大部分能量。小波基具有良好分辨率和光滑特性,但是共同缺点是计算量大、耗费时间长。而且对图像进行小波分析时,通常希望所选择的小波基具有对称性和支撑性,对称性在图像处理中可以很有效地避免相位畸变,支撑性能避免产生边界问题,利于信号能量的集中。然而,Daubechies 已证明除 Haar 小波以外,具有紧支撑性的正交小波基都不具有对称性,非对称性在某些情况下会引起相位失真。因此所提出算法在几种小波基中,最先选用了 Haar 小波基,原因是:1) Haar 小波基实现简单;2) Haar 小波分解运算速度快;3) Haar 小波分解过程可以在自身位置完成小波变换,内存开销小;4) Haar 小波具有对称性。在 Haar 小波分析中,尺度函数

$\phi(x)$ 与小波函数 $\psi(x)$ 起着决定性作用,通过这两个函数所生成的函数簇对信号实现分解,二者关系可表示为

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & x \in \left[0, \frac{1}{2}\right) \\ -1, & x \in \left[\frac{1}{2}, 1\right] \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

(1)式还可以通过函数 $\phi(x)$ 等价表示为

$$\psi(x) = \phi(2x) - \phi(2x - 1). \quad (2)$$

根据 Haar 尺度的性质有

$$\phi(x) = \phi(2x) + \phi(2x - 1), \quad (3)$$

(3)式经常被称为双尺度方程。

对于二维矩阵来讲,每一级 Haar 小波变换需要进行水平方向和竖直方向上的两次一维小波变换,行和列的先后次序对结果没有影响。图 2 所示为 Haar 小波一、二级降维分解图像。

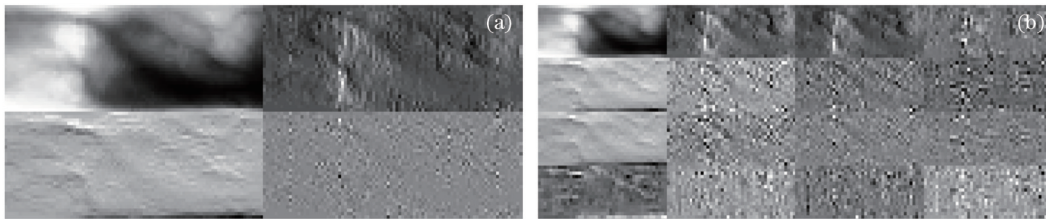


图 2 (a) 手指静脉 Haar 小波一级降维分解图像; (b) 手指静脉 Haar 小波二级降维分解图像

Fig.2 (a) Image of finger vein after 1st-level Haar wavelet dimension reduction;

(b) image of finger vein after 2nd-level Haar wavelet dimension reduction

灰度曲面匹配算法中将两个待匹配图像特征曲面差曲面的方差作为衡量两个特征曲面凹凸程度和位置差异的特征值^[5],将差曲面上两幅待匹配图像特征曲面相减后所有点的一对一灰度值作为一组数据,这组数据的平均数表示这组数据的平均水平或集中位置。当数据分布比较集中(即数据在平均数附近波动较小)时,各个数据与平均数的差的平方和较小。当数据分布比较分散(即数据在平均数附近波动较大)时,各个数据与平均数的差的平方和较大。因此方差越小,表示灰度值的波动越小, R 与 S 相似度越大,其中 R 为已登录手指静脉图像的特征曲面, S 为已注册手指静脉图像的特征曲面。方差越大,表示灰度值的波动越大, R 与 S 相似度越小。因此方差作为描述波动情况的特征值,能有效衡量差曲面灰度值的波动范围,相似特征曲面的特征值远小于不相似曲面的特征值,根据特征值可判定两张静脉图像是否来自同一手指。

图 3 所示为预处理后的手指静脉原图像、Haar 小波二级降维后的手指静脉图像、对应灰度曲面、不同图像的差曲面、差曲面对应的第 10 行横截面灰度的二维分布图。图 3(a)、(b)为手指 1 的直方图均衡化后的两幅静脉图像,图 3(c)为手指 2 的直方图均衡化后的静脉图像,图 3(d)为图 3(a)的灰度曲面图,图 3(e)为图 3(b)的灰度曲面图,图 3(f)为图 3(c)的灰度曲面图,图 3(g)为图 3(d)、(e)的灰度差曲面,图 3(h)为图 3(e)、(f)的灰度差曲面,图 3(i)为图 3(d)、(e)的灰度差曲面的第 10 行横截面的二维分布图,图 3(j)为图 3(e)、(f)的灰度差曲面的第 10 行横截面的二维分布图。

由图 3 看出,来自同一个手指静脉的不同图像在 Haar 二级降维之后的灰度差曲面上每点的值都很接近 0 而且相同,说明两幅特征曲面平行,这是由第二种光照影响造成的。来自不同手指静脉的不同图像的灰度差曲面上的点的值是变量,其灰度值在 0~200 之间,变化程度很大。这说明当 R 与 S 来自同一手指时,由于静脉纹理特征的不变性,它们的凹凸形状和位置应该相同或相似,所形成的差曲面上两幅待匹配图像特征曲面相减后所有点的一对一灰度值波动范围很小,当 R 与 S 来自不同的手指时,由于静脉的纹理特征发生了变化,它们的凹凸形状和位置会出现较大的差异,所形成的差曲面上两幅待匹配图像特征曲面相减后所有点的一对一灰度值的波动范围很大。

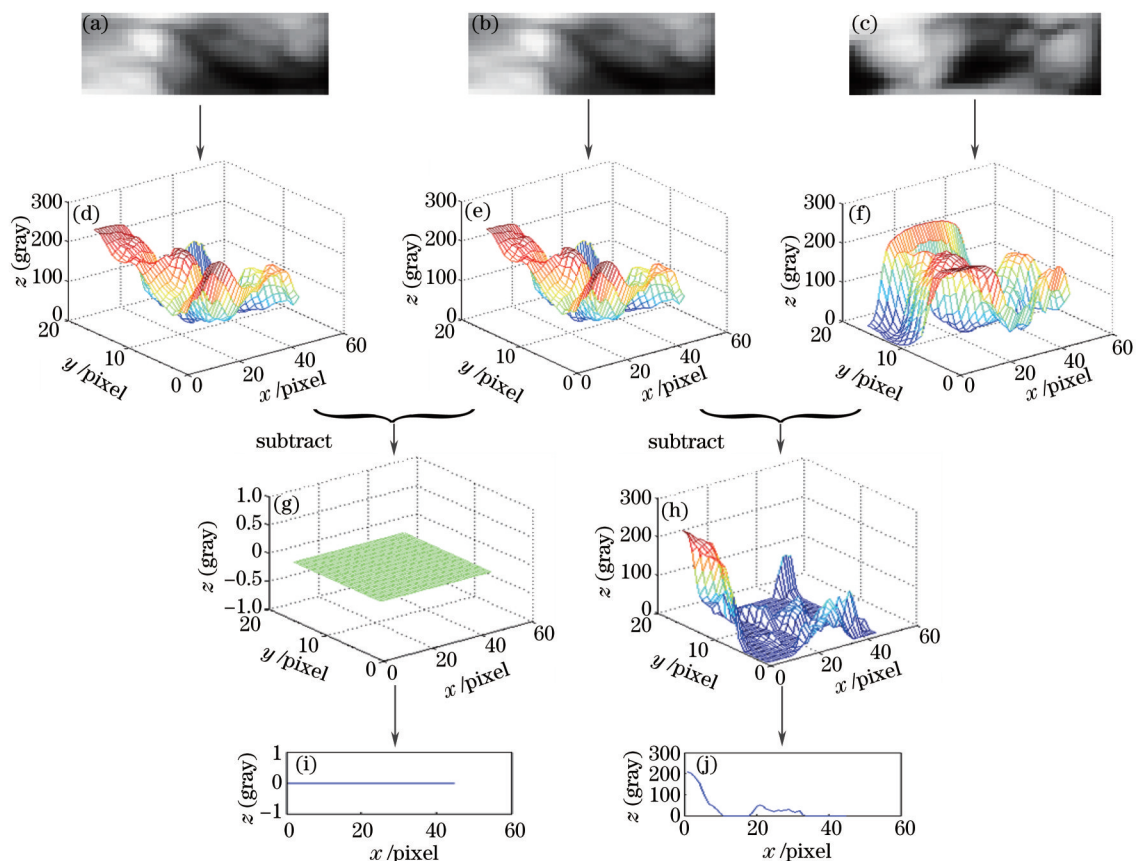


图3 灰度曲面图

Fig.3 Grayscale surface diagrams

2.2 灰度曲面对手指静脉识别区域的匹配

当 R 与 S 来自同一手指时,由于静脉纹理特征的不变性,它们的凹凸形状和位置应该相同或相似,所形成的差曲面灰度值波动范围很小,两个待匹配图像特征曲面差曲面的方差较小,可能出现三种情况:

- 1) 差曲面上每点的值都是0,表明两特征曲面完全重合,几乎没有受到光照影响;
- 2) 差曲面上每点的值都相同但不是0,表明两特征曲面平行,这是由上述第二种光照影响造成的;
- 3) 差曲面上各点的值是一个变量,变化范围很小,表明两特征曲面凹凸形状和位置相似,这是由于受到光照不均的影响。

当 R 与 S 来自不同的手指时,由于静脉的纹理特征发生了变化,它们的凹凸形状和位置会出现较大的差异,所形成的差曲面上点的灰度值的波动范围很大,两个待匹配图像特征曲面差曲面的方差较大,最后通过分别计算所有类内和类间图像特征曲面差曲面的方差形成的曲线来选取阈值,由方差与阈值的关系判断是同类还是异类,得出识别结果。具体算法步骤可以描述如下:

- 1) 分别建立已登录手指静脉图像特征曲面 R 和已注册手指静脉图像特征曲面 S ;
- 2) 计算曲面 R 和 S 对应位置上像素的灰度差,得到曲面 R 和 S 的灰度差为

$$D_{ij} = R_{ij} - S_{ij}, i = 0, 1, 2, \dots, N-1, j = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad (4)$$

式中 D_{ij} 表示灰度差曲面 D 上 (i, j) 处的灰度值, R_{ij} 和 S_{ij} 分别表示曲面 R 和 S 上 (i, j) 处的灰度值, M, N 表示差曲面图像的宽和高;

- 3) 计算灰度差曲面 D 的方差为

$$\begin{cases} V = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (D_{ij} - X)^2 \\ X = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (D_{ij}) \end{cases}, \quad (5)$$

式中 M 、 N 为差曲面图像的宽和高, X 为差曲面图像的平均值, V 为方差;

4) 计算出类内、类间方差, 给出方差曲线;

5) 将曲线的交点所对应的方差值确定为阈值 t , 根据方差 V 与阈值 t 的大小关系判断给出识别结果。当 V 满足

$$V < t, \quad (6)$$

则认为 R 和 S 是来自相同手指的静脉而被接受, 否则认为 R 和 S 是来自不同手指的静脉而被拒绝。

3 实验及结果分析

3.1 评价指标定义和算法测试环境

采用类内、类间匹配实验测试评估算法的综合性能。其中类内匹配是指对来自同一手指的不同图像进行匹配, 类间匹配是指对来自不同手指的图像进行匹配^[16]。以错误拒绝率 R_{FRR} 、错误接受率 R_{FAR} 、相等错误率 EER 、识别时间 T 指标衡量识别性能。在同一直角坐标系内, 以 R_{FAR} 为横坐标, R_{FRR} 为纵坐标绘制受试者工作特征(ROC)曲线, R_{FAR} 随阈值增大而减小, R_{FRR} 随阈值增大而增大, 在某个阈值下 R_{FAR} 与 R_{FRR} 的等值点即为 EER 。习惯上用这一点的值来衡量算法的综合性能, EER 值越小表示算法的整体性能越高。 R_{FRR} 和 R_{FAR} 计算公式为

$$R_{\text{FRR}} = \frac{N_{\text{NFR}}}{N_{\text{NEA}}} \times 100\% \quad , \quad (7)$$

$$R_{\text{FAR}} = \frac{N_{\text{NFA}}}{N_{\text{NIA}}} \times 100\% \quad , \quad (8)$$

式中 N_{NEA} 和 N_{NIA} 分别是合法用户和假冒(非法)用户分别尝试的总次数, N_{NFR} 和 N_{NFA} 分别是错误拒绝和错误接受的次数。算法的测试环境为安装了 Matlab 2014a 的便携式计算机, 基本配置为主频 2.40 GHz 的 Intel 双核心处理器, 4 GB 内存, 64 位操作系统。

3.2 天津市智能信号与图像处理重点实验室图库实验

实验所用国内图库是天津市智能信号与图像处理重点实验室图库。实验建立的数据库有 64 个手指样本, 每个手指有 15 幅图像, 其分辨率为 180 pixel×64 pixel。数据库经过了精确的 ROI(感兴趣区域)提取, 可以直接测试手指静脉识别的算法。对上述 64 类图像样本进行了 460320 次匹配实验, 其中类内匹配 6720 次, 类间匹配 453600 次。

表 1 所示为在此图库上基于不同小波灰度曲面匹配方法的 EER , 表 2 所示为对应的算法执行时间, 表 3 所示为小波灰度曲面方法和其他方法 EER 对比, 表 4 所示为对应的算法执行时间。提出的算法在应用 Haar 小波二级分解降维后, 和其他方法比较得到最低 EER , 即 EER 为 0。且 Haar 小波性能最优, 有效地降低了 EER , 与其他方法相比识别时间较短, 具有一定优势。

表 1 基于不同小波灰度曲面匹配方法的 EER

Table 1 EER based on different wavelet gray surface matching methods

Algorithm	Original image	1 st level (Haar)	2 nd level (Haar)	1 st level (db2)	1 st level (db3)
EER /%	1.8008	1.7973	0	1.8015	1.8095

表 2 提出算法执行时间

Table 2 Execution time of the proposed algorithm

Algorithm	Original image	1 st level (Haar)	2 nd level (Haar)	1 st level (db2)	1 st level (db3)
Feature extraction time /s	0	0.0284	0.0450	0.1633	0.1506
Matching time /s	0.0175	0.016	0.015	0.0172	0.0173
Total time /s	0.0175	0.0444	0.060	0.1805	0.1679

表 3 小波灰度曲面方法和其他方法 EER 对比

Table 3 EER of wavelet gray surface matching method and other methods

Algorithm	Proposed method	2Dfisher	PCA	LDA	2DPCA
EER /%	0	0.4785	2.9276	0.2986	2.3101

表4 提出算法和其他方法执行时间对比

Table 4 Execution time of the proposed algorithm and other methods

Algorithm	Proposed method	2Dfisher	PCA	LDA	2DPCA
Feature extraction time /s	0.045	0.06078	0.30575	0.3049	0.3047
Matching time /s	0.015	0.005427	0.019	0.020	0.019
Total time /s	0.060	0.066207	0.32475	0.3249	0.3237

3.3 国外实验室图库实验

USM (FV-USM) 是国外开发的一个近红外指纹图像数据库,该数据库包括手指静脉信息。数据库中的图像源自 123 名工作人员和来自马来西亚科学大学的学生志愿者,每个主体提供 4 个手指,共得到 492 个手指类,每个手指采集 6 幅图像。手指静脉图像的高度和宽度分辨率为 300 pixel×100 pixel。灰度级范围为 0~255。对上述 492 类图像样本进行了 4355676 次匹配实验,其中类内匹配 7380 次,类间匹配 4348296 次。

表 5 为在此图库上基于不同小波灰度曲面匹配方法的 EER,表 6 为对应的算法执行时间,表 7 为小波灰度曲面方法和其他方法的 EER 对比,表 8 为对应的算法执行时间。从中可以看出,本文算法在应用 Haar 小波一级分解降维后,和其他方法比较获得了最低 EER,为 4.6281%。与其他小波构建的低频图像相比较,Haar 小波性能最优,有效地降低了 EER,而且识别时间较短,具有一定优势。

表 5 基于不同小波灰度曲面匹配方法的 EER

Table 5 EER based on different wavelet gray surface matching methods

Algorithm	Original image	1 st level (Haar)	2 nd level (Haar)	1 st level (db2)	1 st level (db3)
EER /%	5.4523	4.6281	5.4481	5.4891	5.4453

表 6 算法执行时间

Table 6 Execution time of the proposed algorithm

Algorithm	Original image	1 st level (Haar)	2 nd level (Haar)	1 st level (db2)	1 st level (db3)
Feature extraction time /s	0	0.0342	0.0477	0.1851	0.1584
Matching time /s	0.0192	0.016	0.016	0.0213	0.0201
Total time /s	0.0192	0.0502	0.0637	0.2064	0.1785

表 7 小波灰度曲面方法和其他方法 EER 对比

Table 7 EER of wavelet gray surface matching method and other methods

Algorithm	Proposed method	2Dfisher	PCA	LDA	2DPCA
EER /%	4.6281	4.6354	6.4564	5.4253	5.4355

表 8 提出算法和其他方法执行时间对比

Table 8 Execution time of the proposed algorithm and other methods

Algorithm	Proposed method	2Dfisher	PCA	LDA	2DPCA
Feature extraction time/s	0.0342	0.4759	0.5245	0.5339	0.3118
Matching time /s	0.016	0.0246	0.018	0.019	0.020
Total time /s	0.0502	0.5005	0.5425	0.5529	0.3318

3.4 实验结果分析

传统方法对手指静脉图像采集时的外界噪声和光照变化等比较敏感,辨识能力相对有限,而且 PCA、LDA、2DPCA 等一些特征提取算法的实现过程比较复杂,虽然实现了较高的识别率,却以牺牲执行时间为代价。2DFLD 虽克服了最后很高的空间矩阵的计算量,也解决了类内散布空间矩阵奇异问题,缩短了时间,但识别精度在某些情况下依赖图像预处理手段,限制了应用范围。而本文算法将灰度曲面匹配的方法运用到手指静脉识别,对静脉图像采集时尤其是非接触环境采集时的外界噪声等具有一定的稳健性,且算法复杂度相对较低,提升了处理效率,用特征曲面构建待匹配图像,安全保密性好,运行速度快。

和其他小波相比,Haar 小波性能最优,提供了更显著的区分判别信息,有效提高了识别性能,降低了 EER,有效降低了数据维度,缩短了计算时间。

4 结 论

针对静脉纹理特点,从基于静脉纹理分析描述的角度出发,提出了基于小波灰度曲面的近红外手指静脉识别算法。用小波分解降维提取的不同低分辨率图像进行基于灰度曲面匹配方法的识别,在天津市智能信号与图像处理重点实验室图库和国外 USM (FV-USM) 图库上的实验结果显示,与其他流行典型算法相比,本文算法兼顾考虑了识别系统的准确性、安全保密性和效率,而且具有一定的稳健性,可获得最低为 0% 和 4.6281% 的 EER,识别时间仅为 0.061 s 和 0.0502 s,具有准确性高、适用性较强、安全保密性好、运行速度快的特点。与其他流行典型算法相比,该算法虽然识别速度提高比较明显,但识别效果改善仍较为有限,主要是由于仅用一个特征方差作为衡量两个特征曲面凹凸程度和位置差异的特征值,与多个特征值相比,在识别时辨识能力相对有限。今后要在有效提高识别率方面多作努力,如考虑将灰度曲面匹配方法同时用到指纹和静脉双模态融合方法中或融合手指静脉全局与局部多样性特征来增强系统的识别能力、抗伪造能力、安全性和可靠性等。由于特征曲面具有较强的防伪性,可有效防止系统被攻击。该算法更适合众多小规模手指静脉识别领域的安全性和实用性需要。

参 考 文 献

- 1 Qu Rui, Deng Jian. Methods of correcting between-band chromatic aberration in infrared dual-band dual-field of view athermalized optical design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0122006.
曲 锐, 邓 键. 红外双波段双视场消色差光学系统设计中消波段间色差条件(方法)的研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0122006.
- 2 Chen Lei, Yang Fengbao, Wang Zhishe, *et al.*. Research on fusion algorithm of infrared and visible imagery based on variational enhanced model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 041003.
陈 磊, 杨风暴, 王志社, 等. 红外与可见光图像的变分增强融合算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 041003.
- 3 Zhao Shuaiqun, Liu Gang, Ou Quanhong, *et al.*. Study of different tree peony varieties by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(s1): s115002.
赵帅群, 刘 刚, 欧全宏, 等. 不同品种牡丹花的傅里叶变换红外光谱研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(s1): s115002.
- 4 Zhao Xingxiang, Liu Gang, Li Weixing, *et al.*. Infrared spectroscopy combined with LDA and BPNN based on wavelet transform to detect citrus Osbeck anthracnose[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(s1): s115003.
赵兴祥, 刘 刚, 李伟星, 等. 红外光谱结合基于小波变换的 LDA 和 BPNN 研究甜橙炭疽病[J]. *中国激光*, 2014, 41(s1): s115003.
- 5 Yu Chengbo, Qin Huafeng. Research on extracting human anger vein pattern characteristics[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(24): 175-177.
余成波, 秦华锋. 手指静脉图像特征提取算法的研究[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(24): 175-177.
- 6 Zhang Qishen, Zhou Ya, Hu Xiaoming, *et al.*. Hand vein recognition based on three dimensional point clouds matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0115005.
张祺深, 周 雅, 胡晓明, 等. 基于三维点云匹配的手掌静脉识别[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0115005.
- 7 Yu Chengbo, Tan Jun, Yu Lei, *et al.*. A finger vein recognition method based on PCA-RBF neural network[J]. *Hans Journal of Biomedicine*, 2012, 2(4): 23-27.
余成波, 谭 俊, 余 磊, 等. 基于 PCA-RBF 神经网络的手指静脉识别[J]. *生物医学*, 2012, 2(4): 23-27.
- 8 Peng Jialiang. Research on key issues of multi-modal biometric verification[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
彭加亮. 基于手指多模态生物特征的身份认证关键问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- 9 Chen Yuqiong. Recognition algorithm of finger vein image[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2014.
陈玉琼. 手指静脉图像识别算法[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
- 10 Yuan Weiqi, Wang Yan, Sun Shuhui. Palm-dorsa vein recognition based on two-dimensional Fisher linear discriminant[J]. *Journal of Computer Application*, 2010, 30(3): 646-649.
苑玮琦, 王 燕, 孙书会. 基于 2DFLD 的手背静脉识别算法[J]. *计算机应用*, 2010, 30(3): 646-649.
- 11 Qian X, Guo S, Li X, *et al.*. Finger vein recognition based on the score level moment invariants fusion[C]. *International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, 2009.
- 12 Lee E C, Jung H, Kim D. New finger biometric method using near infrared imaging[J]. *Sensors*, 2011, 11(3): 2319-2333.
- 13 Ojala T, Pietikainen M, Moenpaa T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 971-987.

- 14 Yuan Weiqi, Fan Yonggang, Ke Li. Palm print recognition method based on gray surface matching[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2009, 20(6): 807-811.
苑玮琦, 范永刚, 柯 丽. 基于灰度曲面匹配的掌纹识别方法[J]. 光电子·激光, 2009, 20(6): 807-811.
- 15 Yuan Weiqi, Xu Lu, Lin Zhonghua. Iris identification method based on gray surface matching[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(10): 1537-1542.
苑玮琦, 徐 露, 林忠华. 基于灰度曲面匹配的虹膜识别方法[J]. 光学学报, 2006, 26(10): 1537-1542.
- 16 Wu Wei, Yuan Weiqi, Lin Sen, *et al.*. Fast palm vein identification algorithm based on grayscale surface matching[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1015004.
吴 微, 苑玮琦, 林 森, 等. 基于灰度曲面匹配的快速手掌静脉识别[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1015004.

栏目编辑: 吴秀娟