

基于指节纹的个人身份自动识别

竺乐庆^{1,2} 张三元² 幸锐²

摘要 人体的指节纹具有稳定性且对于不同的人具有不同的位置和结构特征, 可作为身份识别的依据. 本文提出了一种基于指节纹的身份识别新方法: 对采集的手掌图像首先通过预处理分割出各手指并旋转至水平位置; 然后用 Sobel 算子求其水平梯度, 对梯度图二值化后经垂直投影得到一维向量; 对此向量应用小波去噪, 生成手指指节纹特征向量; 通过用余弦函数计算指节纹特征向量之间相似度实现最后的匹配. 本文用该方法对来自 190 个手掌的 1900 个样本进行了测试, 取得了 0.67% 的等误率, 单次匹配时间低于 2ms. 实验结果表明该方法具有较高的识别精度, 而且识别速度快, 适合在大规模手掌库中实现手掌筛选.

关键词 生物测定学, 身份识别, 指节纹, 小波消噪, 余弦函数
中图分类号 TP391.41

Automatic Personal Authentication Based on Finger Phalangeal Prints

ZHU Le-Qing^{1,2} ZHANG San-Yuan² XING Rui²

Abstract Finger phalangeal prints are stable and unique for each individual, thus can be used in personal authentication. A novel personal recognition method is proposed based on the finger phalangeal print in this paper. The captured image is first preprocessed to segment out fingers and rotate them to the horizontal direction; Sobel operator is used to get the horizontal gradient which is binarized and projected to the horizontal axis. The 1-D projection is then denoised with wavelet and downsampled to get the feature vector. Finally, the similarity of the two matching vectors is measured by using cosine function. The proposed method was tested on the database which contains 1900 samples from 190 different palms. The equal error rate (EER) was no more than 0.67% and one match time consumption was less than 2ms. Experiments suggested that a high recognition accuracy and efficient matching performance can be achieved with the proposed algorithm, which can meet the requirement of real time searching in large palm database.

Key words Biometrics, personal identification, finger phalangeal prints, wavelet denoising, cosine function

基于生物测定学的个人身份认证技术正越显重要, 目前已开发的身份认证技术有指纹、人脸、语音、虹膜等, 各种身份认证技术在用户亲和力、成本和性能方面各有优缺点^[1]. 人脸对姿势、附加装饰物、表情和光线变化敏感; 基于虹膜的识别要求特定的照明条件, 其采集过程使用户倍感不适; 指纹识别则要求手指有较完整的表皮, 将近 4% 的人由于指纹特征不够明晰而无法注册^[1]. 指节纹是手指基节和中节的乳突花纹, 花纹结构简单, Plotz-Readmann 将指节纹划分为 4 种基本型和 8 种复合型^[2]. 指节纹

是手纹的一个重要组成部分, 是手指前表面上仅次于指纹的显著特征, 具有稳定性且对于不同的人具有不同的位置和结构特征^[3], 可以作为人体生物特征识别的依据, 但由于没有指纹、掌纹的明显规则, 较少受到研究者的注意. 迄今为止, 基于掌纹特征的生物识别技术已取得长足发展^[4-6], 然而基于指节纹的生物识别技术文献还相当少见^[7-8], 罗荣芳等提出了一种基于 Radon 变换和奇异值分解的指节纹身份识别方法^[9], 主要提取手指的第一和第二折痕线的特征; 李强等则提出了基于 Gabor 滤波、互相关点匹配及决策级分数融合的指横纹识别方法, 提取的是中指第二节指节纹^[10]; 而本文引入的指节纹特征除包含第一第二指节纹, 还包含指根折痕线特征.

指节纹的采集设备具有侵犯性小、低成本、用户接口易实现、数据存储量低等优点, 这使得指节纹识别成为颇具吸引力的选择. 如果把指节纹、手形与掌纹识别技术结合起来, 则可以使指节纹、手形识别的高效性与掌纹识别的高辨识精度相辅相成, 优势互补.

本文介绍的基于指节纹的个人身份验证方法提取的特征数据量小, 匹配时间短, 而且也能取得较

收稿日期 2008-07-04 收修改稿日期 2008-12-08
Received July 4, 2008; in revised form December 8, 2008
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2007AA01Z311, 2007AA04Z1A5), 国家自然科学基金 (60473106), 浙江省科技计划项目 (2007C21006)

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2007AA01Z311, 2007AA04Z1A5), National Natural Science Foundation of China (60473106), Zhejiang Province Science and Technology Program of China (2007C21006) 资助

1. 浙江工商大学计算机与信息工程学院 杭州 310018 2. 浙江大学计算机科学与技术学院 杭州 310027

1. College of Computer Science and Information Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018 2. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027

DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.00875

高的识别精度, 适用于在大的手掌库中进行中高层粗匹配, 筛选出最相似的库本进入下一层进行精细匹配.

本文的结构组织如下, 第 1 节介绍图像预处理过程, 包括手掌的分割、关键点的求取及各手指的分割; 第 2 节介绍指节纹特征向量生成; 第 3 节是特征匹配; 第 4 节是实验结果; 最后是总结和展望.

1 图像预处理

本文的手掌图像是基于网络摄像头的非接触方式采集的, 采集设备保证手掌与摄像头的距离保持不变, 采集时要求用户五指张开.

1.1 掌形图像预处理

掌形图像预处理的目的是把手掌轮廓从背景中提取出来, 为了提高手掌分割的鲁棒性, 本文采用了先用 Mean shift^[11] 对采集的 RGB 图像 (图 1(a)) 进行平滑滤波 (图 1(b)), 再灰度化 (图 1(c)); 二值化则采用 Ostu^[12] 方法, 用 Ostu 二值化并取感兴趣区域 (Region of interest, ROI) 的结果如图 1(d) 所示. 从图 1(d) 提取出最大轮廓, 如图 1(e).

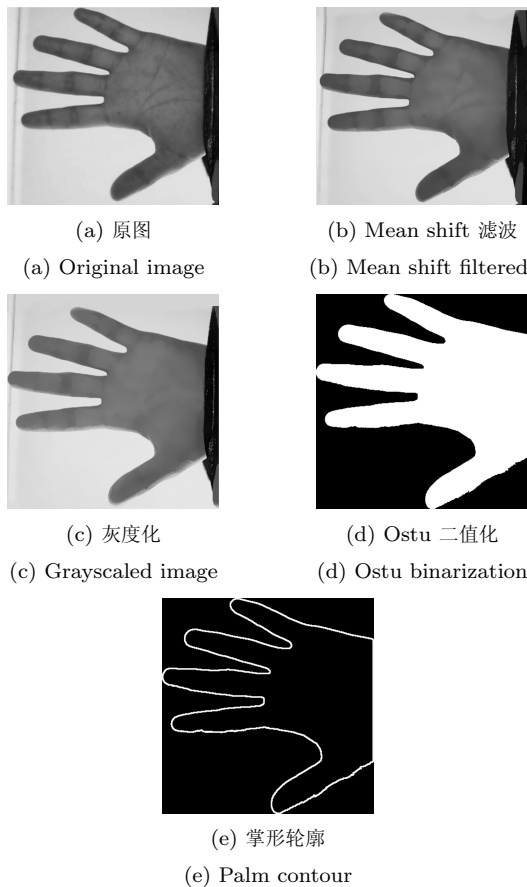


图 1 掌形图像预处理各步骤结果

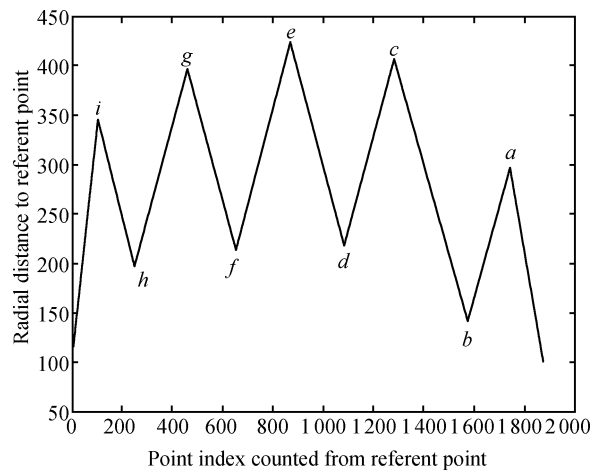
Fig. 1 Middle results of hand image preprocessing

1.2 手指图像分割

为提取每个手指的指节纹特征, 首先要把手指有效区域从整个手掌分离出来并为每个手指确定坐标系, 本文只提取食指、中指、无名指和小指的指节纹特征, 拇指姿势变化较大, 因此本文不作为特征予以考虑.

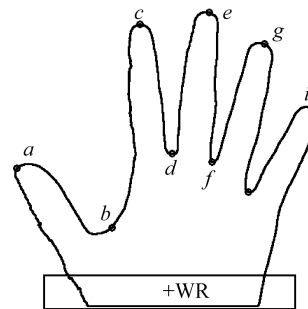
1.2.1 指谷和指尖关键点确定

一种比较鲁棒的指谷、指尖关键点提取技术是求解到腕部参考点的射线距离, 腕部参考点的求取参考文献 [13], 沿逆时针方向跟踪轮廓上点与该腕部参考点的距离, 将得到如图 2(a) 所示的 5 个峰值点与 4 个谷值点, 5 个峰值对应五指指尖关键点, 4 个谷值对应指谷关键点, 如图 2(b) 所示.



(a) 极值点对应指尖指谷

(a) Tracking radial distance



(b) 求取指尖指缝关键点

(b) Finger tops and valleys

图 2 跟踪轮廓与腕部参考点射线距离

Fig. 2 Locating finger tops and valleys according to radial distance variance

1.2.2 确定手指主轴

用上一节求取的关键点分割出每个手指的两侧边缘点集, 用直线拟合每个手指边缘, 以两边缘直线的中分线作为每个手指的主轴.

手指边缘直线的拟合用最小二乘法实现, 假设直线方程为

$$y = k_j x + b_j \quad (1)$$

则

$$k_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} x_i^j \times \sum_{i=1}^{n_j} y_i^j - n_j \times \sum_{i=1}^{n_j} (x_i^j \times y_i^j)}{\left(\sum_{i=1}^{n_j} x_i^j\right)^2 - n_j \times \sum_{i=1}^{n_j} (x_i^j)^2} \quad (2)$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} y_i^j - k_j \times \sum_{i=1}^{n_j} x_i^j}{n_j} \quad (3)$$

其中, $\{(x_i^j, y_i^j) | i = 1, 2, \dots, n_j\}$ 是第 j 条手指边缘上点的坐标 ($j = 1, 2, \dots, 10$). 顺时针方向跟踪掌形轮廓并将跟踪到的轮廓点坐标按序入队列, 如图 2(b) 中, a, c, e, g, i 等指尖关键点在队列中的下标加一定偏移量 (如 ± 20 , 加该偏移量可以使边缘不包括指尖弯曲轮廓点) 的邻近轮廓点为手指两边边缘起点, 如图 2(b) 中 d, f, h 等指谷关键点为相应手指边缘终点; 对拇指两边边缘、食指左边缘, 小指右边缘终点的确定, 可以用指尖与最邻近指谷的距离作为参考值, 沿轮廓对应方向跟踪, 找到与指尖距离最接近该参考值的轮廓点作为边缘终点. 队列中边缘起点与终点之间的元素即为 (x_i^j, y_i^j) , 元素个数为 n_j .

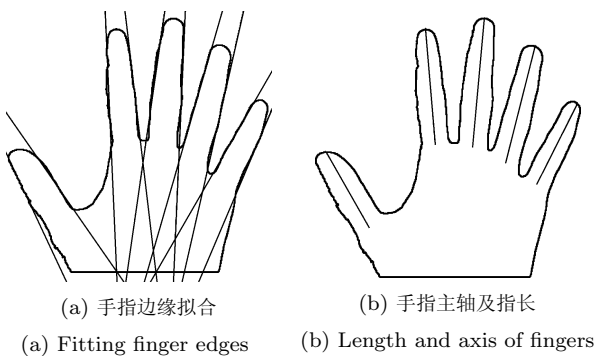


图 3 用直线拟合手指边缘及手指主轴求取

Fig. 3 Fitting finger edges with lines and computing finger axis

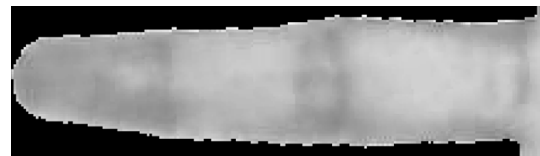
拟合结果如图 3(a) 所示, 由手指边缘的中分线求得手指主轴, 同时获得每手指长度 (如图 3(b)), 指长为手指主轴与指尖轮廓交点到指根的距离, 对中指和无名指, 指根为两相邻指谷点连线与主轴的交点, 对其余手指, 则是最相邻指谷点到主轴的垂足.

1.2.3 分割手指并确定各手指坐标系

以手指主轴与手掌轮廓在指尖附近的交点作为原点, 主轴作为水平坐标轴确定每个手指的坐标系, 并分割出每手掌食指至小指的四个手指. 每个手指的坐标变换通过下式实现:

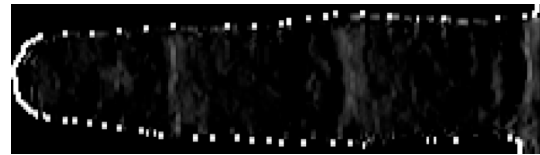
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_k & \sin \theta_k \\ -\sin \theta_k & \cos \theta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0^k \\ y - y_0^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{h_k}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, θ_k 是手指主轴与水平轴的夹角, (x_0^k, y_0^k) 是指尖点坐标, h_k 为手指的最大宽度, 对中指和无名指而言, 该宽度为相邻两指谷距离, 对食指和小指, h_k 则是最邻近指谷关键点到主轴的距离的两倍. 其中 $k = 0, 1, 2, 3$ 分别代表小指、食指、中指和无名指. 分割的手指经旋转移位后如图 4(a) 所示.



(a) 分割并旋转至水平的手指

(a) Segmented finger rotated to horizontal



(b) Sobel 算子求水平梯度

(b) Compute horizontal gradient with Sobel operator



(c) 梯度图像二值化结果

(c) Binary result

图 4 指节纹检测及二值化

Fig. 4 Phalangeal print detection and binarization

2 指节纹特征提取

2.1 求水平梯度并二值化

由于指节纹在每个手指上呈横向分布, 因此沿手指的伸展方向求解手指图像灰度梯度变化将得到比较完整的指节纹信息. 手指旋转至水平方向后, 可以通过垂直边沿检测算子提取到较完整的指节纹信息. 本文中采用 Sobel 算子^[14] 来提取垂直边缘, 该

Sobel 算子的矩阵表达式为

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

该 Sobel 算子对灰度图像的卷积运算如下

$$g(x, y) = \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 S_x(k+2, l+2) f(x+k, y+l) = \\ - [f(x-1, y-1) + 2f(x-1, y) + \\ f(x-1, y+1)] + [f(x+1, y-1) + \\ 2f(x+1, y) + f(x+1, y+1)] \quad (6)$$

图 4(a) 所示的手指灰度图用 Sobel 算子求得
的水平方向梯度图如图 4(b) 所示, 该梯度图用固定
阈值二值化结果如图 4(c) 所示.

2.2 垂直投影

从图 4(c) 可知, 指节纹基本呈垂直分布, 因此
对该图向横轴投影所得结果将较充分地反映指节纹
的位置及分布特性, 同时把二维的梯度图降维为一
维向量, 如图 4(c) 经投影后得到的一维分布如图
5(a) 所示.

2.3 小波消噪

从图 4(c) 可知, 二值化得到的指节纹图像还包
含了随机噪声信息, 鉴于提取指节纹信号为非平稳
信号, 具有空频局部性, 适合采用小波消噪技术对
其进行消噪. 应用小波分析进行消噪主要涉及到小
波的分解与重构, 含有噪声的一维信号可以表示成
如下的形式:

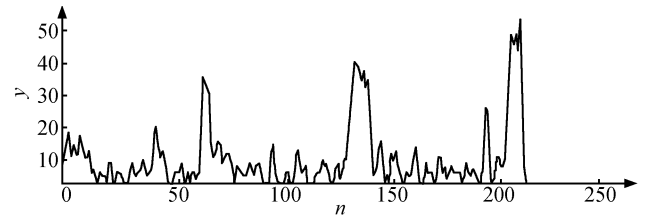
$$s(i) = f(i) + e(i), \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (7)$$

其中, $f(i)$ 为真实信号, $e(i)$ 为方差为 σ^2 的高斯白
噪声, 噪声级为 1; $s(i)$ 为含噪声的信号.

对信号 $s(i)$ 进行消噪的目的就是要抑制信号中
的噪声部分, 从而在 $s(i)$ 中恢复出真实信号 $f(i)$.
在实际工程中, 有用信号通常表现为低频信号或一
些比较平稳的信号, 而噪声信号则通常表现为高频
信号. 参考 Donoho 等提出的消噪方法^[15], 一维
信号的消噪算法可以分为三个步骤进行^[16].

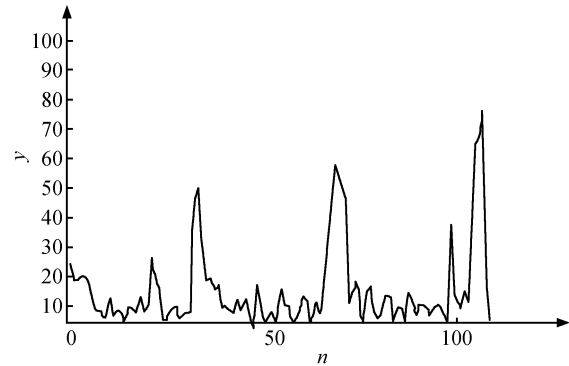
步骤 1. 对包含噪声的信号 $s(i)$ 进行离散正交
小波变换

选择一个小波并确定一个小波分解的层次 N ,
然后对信号 s 进行了 N 层小波分解, 图 5(a) 所
示的投影向量经 Daubechies 4 小波一级分解所得的
近似信号 A_1 如图 5(b), 而一级小波分解的细节系
数则如图 5(c).



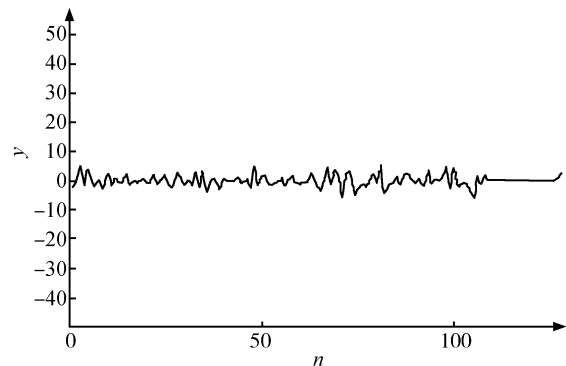
(a) 垂直投影结果

(a) Vertical projection of phalangeal print



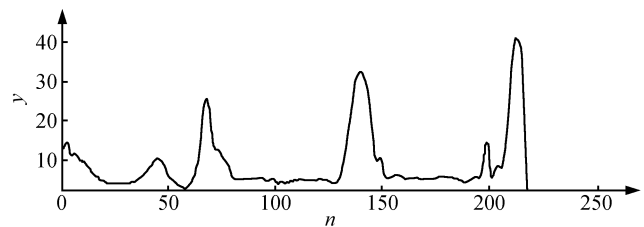
(b) 一级小波分解近似信号

(b) L1 wavelet decomposed approximate signal



(c) 一级小波分解的细节系数

(c) L1 wavelet decomposed detail coefficients



(d) 小波消噪后的重构信号

(d) Reconstructed signal after wavelet denoising

图 5 指节纹垂直投影及小波消噪结果

Fig. 5 Vertical projections of phalangeal print and wavelet denoised results

步骤 2. 小波分解高频系数的阈值量化

对第 1 层到第 N 层的每一层高频带系数选择
一个阈值 t 进行量化处理, 噪声部分通常包含在细

节信号 D_1, D_2, \dots, D_N 中, 因此, 可以用门限阈值等形式对小波系数进行处理, 即令分解得到的细节系数部分为零, 或者适当减小。

步骤 3. 对信号进行重构

用经阈值处理后的小波变换系数进行逆小波变换而重构信号 $s(i)$ 的估计, 从而达到消噪的目的, 小波消噪处理的关键是步骤 2 的消噪算法, 其依据是噪声信号随分解层次的增加迅速衰减. 图 5(d) 为图 5(a) 经三级 Daubechies 4 小波消噪后的波形。

2.4 特征向量生成

将上述重构得到的信号进行一次降采样, 构成一个长度为 150 的向量 (该长度大于在本文实验设备采集的手指降采样后的最大长度), 如果降采样后得到的信号长度小于 150, 则填零补齐, 所得到的向量如图 6 所示。

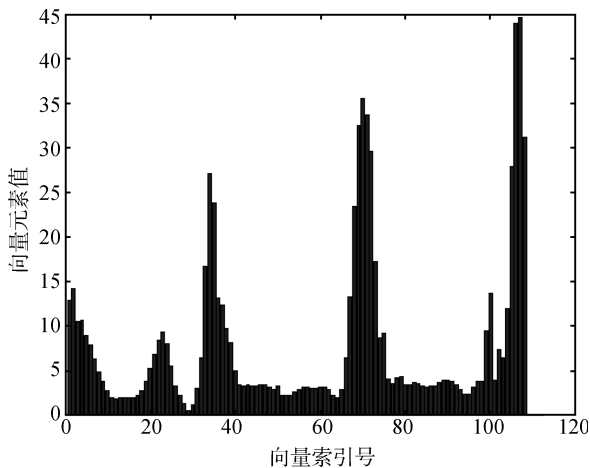


图 6 指节纹特征向量

Fig. 6 Feature vector of finger phalangeal print

3 特征匹配

特征匹配通过计算特征向量之间的相似度实现, 相似度计算公式如下:

$$SIM(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{\mathbf{X} \cdot \mathbf{Y}}{\|\mathbf{X}\| \|\mathbf{Y}\|} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} x_i^2 \sum_{i=0}^{n-1} y_i^2}} \quad (8)$$

其中, n 为向量长度, 本文取 $n = 150$. 考虑到手指分割时还存在少量的平移变化, 为消除平移的影响, 将提取的特征向量前向和后向平移若干点后在每一个平移位置上计算相似度, 然后把所有这些相似度中的最大值作为最终匹配度, 即

$$SIM(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \max_{-w \leq k \leq w} \frac{\sum_{i=w}^{n-w-1} (x_i y_{i+k})}{\sqrt{\sum_{i=w}^{n-w-1} x_i^2 \sum_{i=w}^{n-w-1} y_{i+k}^2}} \quad (9)$$

本文取 $w = 3$. 假如有阈值 δ 和判别函数 J :

$$J(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \begin{cases} 1, & \text{若 } SIM(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) > \delta \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (10)$$

$J = 1$ 时表示接受, $J = 0$ 时表示拒绝。

对于整个手掌而言, 只有四个手指 (不考虑大拇指) 都接受时才认为匹配成功, 否则匹配失败, 即

$$Score = \sum_{k=0}^3 J(\mathbf{F}_k^s, \mathbf{F}_k^d) \quad (11)$$

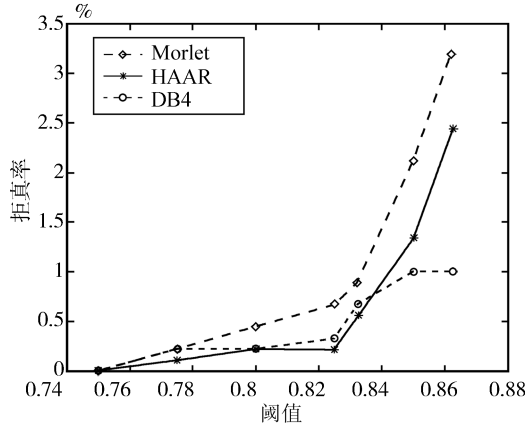
当 $Score = 4$ 时接受, $Score < 4$ 时拒绝, 其中 $k = 0, 1, 2, 3$ 分别代表小指、食指、中指和无名指. 由于计算相似度的余弦函数取值在 $[0, 1]$ 区间上, 其值越接近 1 则两向量相似程度越高, 而与向量元素值大小无关, 所以四个手指相似度阈值可取相同值。

4 实验结果

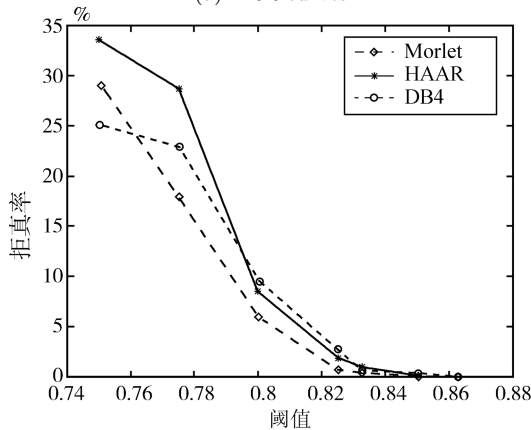
实验数据库由 1900 个样本组成, 这些样本采集自 190 个手掌, 每手掌 10 个样本, 采集设备由光源、采集箱和数字摄像头组成, 采集箱保证采集时手掌离摄像头的距离保持不变, 采集时手掌五指张开. 用 10 个样本之一提取其特征作为模板, 其余 9 个样本进行测试, 把每一个测试样本和库中的每一个模板进行匹配, 共进行了 $9 \times 190 \times 190 = 324900$ 次匹配, 其中的 $9 \times 190 = 1710$ 次是在同一手掌的各指节纹之间进行的. 本文分别用 Daubechies 4 (DB4) 小波、HAAR 小波和 Morlet 小波消噪后生成特征向量进行匹配. 用不同阈值得到识别结果以拒真率 (False rejection rate, FRR) (如图 7(a) (见下页)) 和认假率 (False acceptance rate, FAR) (如图 7(b)) 曲线形式给出. 同时也给出了三种小波消噪方法下的 ROC (Receiver operating characteristic) 曲线, 如图 7(c).

从图 7(a) 和 (b) 可知, 三种小波消噪后的特征向量都取得了较高的识别精度, 当 $FRR = 0$ 时, FAR 为 25%、29%、33%, 当 $FAR = 0$ 时, FRR 为 1%、2.4%、3.2%. 从本文数据库的实验结果可知, Morlet 小波消噪后的特征向量匹配比 DB4 和 HAAR 小波在各阈值下有较低的 FAR, 但 FRR 相对较高; DB4 小波消噪与 HAAR 小波消噪后匹配统计结果总体较为接近, 但 DB4 在低阈值下的 FAR 和高阈值下的 FRR 都要低于 HAAR 小波. 从图

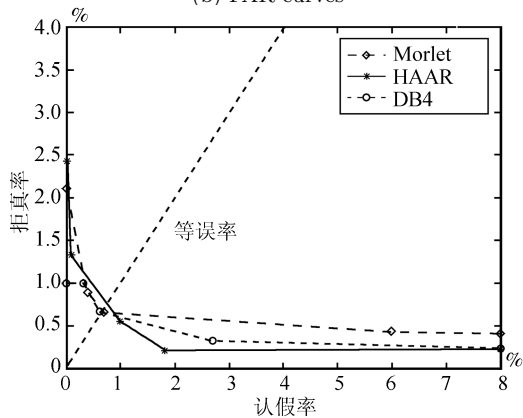
7(c) 所示的 ROC 曲线可以看出, 三种小波消噪方式下, 用 DB4 消噪的总体识别精度要优于 HAAR 和 Morlet 小波, 但三种小波消噪方式得到的信号在最后的等误率都低于 1%, 说明指节纹特征作为人体生物特征之一, 具有良好的区分性能。



(a) FRR 曲线
(a) FRR curves



(b) FAR 曲线
(b) FAR curves



(c) ROC 曲线
(c) ROC curves

图 7 不同小波消噪后所得的 FRR 和 FAR 以及 ROC 曲线
Fig. 7 Resulting FRR, FAR, and ROC curves denoised with different wavelets

存储一个手指的指节纹特征最大存储量为 150 个字节, 存储一个手掌 4 个手指则最多需要 600 字节. 本文所有实验均在装有 Windows XP 系统 Intel Pentium IV 2.4 GHz 的 PC 机上用 Visual Studio 2005 和 OpenCV 实现. 用在预处理、指节纹特征提取和匹配各阶段的时间如表 1 所示, 由表 1 可知, 该基于指节纹识别算法能够满足实时掌纹识别的要求。

表 1 三种小波消噪方式下的指节纹识别性能
Table 1 Phalangeal prints recognition performance denoised with three different wavelets

小波类型	DB4	HAAR	Morlet
平均预处理时间 (ms)	715	715	715
特征提取时间 (ms)	4.7	6.4	13
平均特征匹配时间 (ms)	1.96	1.96	1.96
等误率 (%)	0.67	0.79	0.67

表 2 给出了罗荣芳等提出的手指折痕识别算法^[9]在本文数据库上的测试结果以及与本文算法的比较, 从表 2 知, 文献 [9] 算法的特征提取时间和等误率都要远高于本文提出的方法, 而特征匹配时间则相当; 李强等提出的指横纹识别算法^[10]是在 CCD 数码相机采集的手指图像上实现的, 对图像分辨率要求较高, 对本文所采集的低分辨率手部图像数据库不能适用. 以上结果充分体现了本文方法在指节纹识别上的优势。

表 2 在本文数据库上不同算法性能比较
Table 2 Performance comparison of different algorithms on the same database

实现算法	本文方法	Radon 变换和奇异值分解 ^[9]
平均预处理时间 (ms)	715	715
特征提取时间 (ms)	4.7	217
平均特征匹配时间 (ms)	1.96	1.5
等误率 (%)	0.67	21.6

5 结论与展望

本文介绍了一种新颖的基于指节纹的个人身份识别方法. 手掌图像由低分辨率数字摄像头用非接触方式采集得到, 采集装置不需要任何定位柱, 采集速度快且对用户友好. 本文从分割得到的每个手指图像中提取出反映指节纹信息的一维特征向量, 并采用小波消噪的方法滤除随机噪声的影响, 而保留稳定的特征信号. 实验结果表明, 这种身份识别方法取得了较高的识别率, 证明了使用指节纹进行身份识别的有效性; 此外, 由于提取的特征为小数据量的一维信号, 算法简洁, 使得匹配过程快速高效. 今后我们将结合以前所作的掌纹识别方面的工作, 使指

节纹、手形特征与掌纹特征相结合, 组成一套完整、精确、高效的基于手部生物特征的身份识别系统。

References

- Jain A K, Ross A, Prabhakar S. An introduction to biometric recognition. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, **14**(1): 4–20
- Plotz-Readmann M. Die hantleistenmuaster der untern beiden fingerglieder der menschlichen hand. *Z Morph Anthropol*, 1937, 36
- Takeda M, Uchida S, Hiramatsu K, Matsunami T. Finger image identification method for personal verification. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Pattern Recognition*. Atlantic, USA: IEEE, 1990. 761–766
- Zhang D, Kong W K, You J, Wong M. Online palmprint identification. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(9): 1041–1050
- Pan X, Ruan Q Q, Wang X Y. An improved 2DLPP method on Gabor features for palmprint recognition. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*. San Antonio, USA: IEEE, 2007. 413–416
- Hu D W, Feng G Y, Zhou Z T. Two-dimensional locality preserving projections (2DLPP) with its application to palmprint recognition. *Pattern Recognition*, 2007, **40**(1): 339–342
- Joshi D G, Rao Y V, Kar S, Kumar V, Kumar R. Computer-vision-based approach to personal identification using finger crease pattern. *Pattern Recognition*, 1998, **31**(1): 15–22
- Fratric I, Ribaric S. A biometric identification system based on eigenpalm and eigenfinger features. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, **27**(11): 1698–1709
- Luo Rong-Fang, Lin Tu-Sheng, Wu Ting. Personal recognition with finger crease pattern. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(6): 116–121
(罗荣芳, 林土胜, 吴霆. 基于人体手指指节折痕的身份识别方法. *光学工程*, 2007, **34**(6): 116–121)
- Li Qiang, Qiu Zheng-Ding, Sun Dong-Mei, Zhang Yan-Qiang. A novel biometric: knuckleprint. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(6): 596–601
(李强, 裘正定, 孙冬梅, 张延强. 指横纹: 一种新的生物身份特征. *自动化学报*, 2007, **33**(6): 596–601)
- Comaniciu D, Meer P. Mean shift: a robust approach. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **24**(5): 603–619
- Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, **9**(1): 62–66
- Yorük E, Konukoglu E, Sankur B, Darbon J. Shape-based hand recognition. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(7): 1803–1815

- Jia Yong-Hong. *Digital Image Processing*. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. 253
(贾永红. 数字图像处理. 武汉: 武汉大学出版社, 2003. 253)
- Donoho D L. De-noising by soft-thresholding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, **41**(3): 613–627
- Xu Tian-Zhou, Huang Chun-Guang. *The Theory, Algorithm and Application of Wavelet Analysis*. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 235
(许天周, 黄春光. 小波分析理论、算法及其应用. 北京: 国防工业出版社, 2007. 235)



竺乐庆 浙江工商大学计算机与信息学院讲师, 浙江大学计算机科学与技术学院博士研究生. 2006 年获得杭州电子科技大学自动化学院控制理论与控制工程专业硕士学位. 主要研究方向为图像处理及嵌入式系统. 本文通信作者.

E-mail: zlq_26@163.com

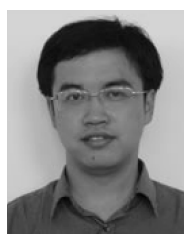
(ZHU Le-Qing Ph. D. candidate at the College of Computer Science and Technology, Zhejiang University. She received her master degree from Hangzhou Dianzi University in 2006. Her research interest covers image processing and embedded system. Corresponding author of this paper.)



张三元 浙江大学计算机科学与技术学院教授. 1986 年, 1989 年, 1992 年分别获得浙江大学学士, 硕士和博士学位. 主要研究方向为计算机辅助设计、计算机图形学、网络图论.

E-mail: syzhang@cs.zju.edu.cn

(ZHANG San-Yuan Professor at Zhejiang University. He received his bachelor, master and Ph. D. degrees from Zhejiang University in 1986, 1989 and 1992, respectively. His research interest covers CAD, computer graphics, and network graphics.)



幸锐 浙江大学计算机科学与技术学院博士研究生. 2003 年获得浙江大学计算机学院硕士学位. 主要研究方向为图像处理与模式识别.

E-mail: xingrui@zju.edu.cn

(XING Rui Ph. D. candidate at the College of Computer Science and Technology, Zhejiang University. He received his master degree from Zhejiang University in 2003. His research interest covers image processing and pattern recognition.)