

一种基于线性分类器的通用指纹分割方法

邓 亮¹, 张新曼¹, 沈虹晖², 许学斌¹, 张海涛², 田中民³, 韩九强¹

(1 西安交通大学 智能网络与网络安全教育部重点实验室, 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049;

2 中国航天科技集团公司第四研究院, 陕西 西安 710025; 3 西安交通大学 生命科学学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 针对不同传感器采集的指纹难以进行统一准确的分割的问题, 提出主频率带能量比值, 归一化的灰度均值及灰度对比度值三个更为通用的指纹描述特征, 并利用这三个指纹特征, 使用 SVM 方法训练一个线性分类器, 对指纹进行有效分割. 实验表明, 该方法不仅实现了对指纹的准确分割, 在 FVC2002 指纹数据库上平均分割误差约为 2%, 并且该分割方法具有很好的通用性, 适用各种传感器采集的指纹.

关键词: 指纹分割; 线性分类器; 主频率

中图分类号: TN911. 22

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2011)12—0124—05

A Universal Fingerprint Segmentation Algorithm Based on Linear Classifier

DENG Liang¹, ZHANG Xin-man¹, SHEN Hong-hui², XU Xue-bin¹,
ZHANG Hai-tao², TIAN Zhang-min³, HAN Jiu-qiang¹

1 MOE Key Lab for Intelligent Networks and Network Security, School of Electronics and Information Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2 The Fourth Research Institute, China Aerospace Science
and Technology Corporation, Xi'an 710025, China)

Abstract: Fingerprints are always captured from different sensors, and to segment these fingerprints accurately with a united algorithm is very difficult. A universal algorithm based on linear classifier is proposed to solve the problem. This algorithm uses three new general features extracted from the fingerprint to train a linear classifier with SVM, and then segment the fingerprints with the classifier. These new general features include the dominant frequency band energy ratio, the normalized gray mean value and the gray contrast. The experiments in the fingerprint database FVC2002 show that, this algorithm can segment the fingerprints accurately, with the average error rate of only about 2%, and it is universal in the fingerprint database acquired from different sensors.

Key words: fingerprint segmentation; linear classifier; dominant frequency

1 引言

指纹分割是指纹识别系统中的一个重要组成部分, 早期的指纹分割方法主要利用指纹图像中前景的梯度变化及灰度信息与背景不一致等特点^[1]. 由于指纹图像具有方向性, Gabor 小波及其变形在指纹的提升与分割上得到了广泛应用^[2], 后来指纹频谱能量也用于指纹的分割与提升^[3]. 这些方法都采用比较单一的信息, 不能够适用不同情况下指纹分

割. 文献[4—5]等采用统计的方法, 利用指纹的多个局部特征, 训练分类器对指纹进行分割, 这些基于统计的方法很好地利用了指纹的多方面信息, 能够比较准确地对指纹进行分割, 但其通用性比较差^[6], 在每个指纹库上都要进行单独的分类器设计, 这主要是由于其选取特征或特征没能进行较好的归一化造成的. 本文采用指纹主频率带能量比值, 归一化的灰度均值及灰度对比度值三个更加通用的特征, 利用 SVM 方法训练一个线性分类器对指纹进行分割, 在

收稿日期: 2011—03—18; **修回日期:** 2011—05—20

基金项目: 国家自然科学基金项目(600972146, 60602025); 中国博士后科学基金(20110491661); 中央高校基本科研业务最专项资金

不同传感器采集的指纹数据库上都达到了较好的效果。

2 通用指纹描述特征提取与线性分类器

本文提出主频率带能量比值、归一化的灰度均值及灰度对比度三个更通用的指纹描述特征来描述指纹,这三个特征都是针对指纹块的。将指纹分成大小相等的块(16×16),然后计算每个指纹块上的这三个特征值,再利用这些特征训练线性分类器对背景纹理块与前景纹理块进行分类。这里使用 FVC2002 指纹数据库^[7]进行实验测试,FVC2002 数据库包括 DB1,DB2,DB3 和 DB4 四个子数据库,数据库 DB1 使用 TouchView II 光学传感器采集的,分辨率为 500 dpi;数据库 DB2 使用 FX2000 光学传感器采集的;分辨率为 569 dpi,数据库 DB3 使用 100 SC 电容传感器采集的,分辨率为 500 dpi;数据库 DB4 是用 SFinGe (Synthetic Fingerprint Generator)方法产生的,分辨率约为 500 dpi。

2.1 主频率带能量比值

(1) 基于 DFT 方法的指纹频率场计算

指纹的频率信息能够很好得表达指纹特征,同样也可以用于对指纹进行分割^[3]。使用文献[8]中的方向窗口计算指纹的局部块频率,如图 1 所示,沿着指纹脊的局部方向设置一个窗口,其中 x 轴与局部脊方向垂直, y 轴与局部脊方向平行。将窗口内的像素垂直累加到 x 轴上,就会形成图 1 右边的灰度投影直方图,文献[8]中采用的是统计相邻峰值之间的距离,然后求平均的方法,该方法在指纹质量较差时效果不佳。文献[3]中使用短时傅里叶变换来对频率进行估计,但在二维情况下短时傅里叶变换的计算量较大,这里考虑在方向窗口的基础上使用 DFT 来计算局部指纹块的频率。

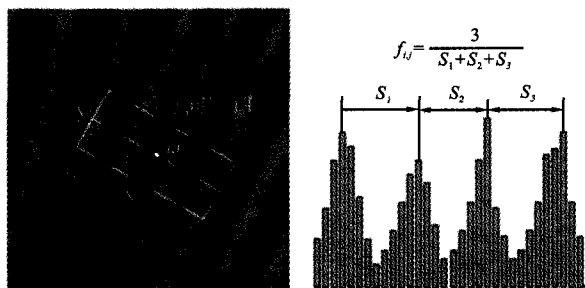


图 1 文献[8]中计算指纹频率的方法

如图 2(a) 所示,实线为一个基于方向窗口的灰度投影,由于噪声的干扰灰度投影中产生了一个本不存在的一个峰值,如果采用求相邻峰值点间距离

的方法,此噪声会给结果造成较大的影响。图 2(b) 所示为该灰度投影的 DFT 模值图(直流分量已去掉),从图中可以看出,在最大峰值的左边产生了另外一个较大的峰值,这就是噪声的能量。在频率谱中估计纹理频率的一个好处就是,只需在频谱中找到频率最大的频率点即可,对其他离得较远的峰值频率点直接忽略掉。图 2(a) 中的虚线就是利用频率最大值点的频率模拟的灰度投影图,可以看出由此得到的频率指纹纹理频率非常的吻合。在实际操作中,为了更精确地估计指纹的纹理频率,一般利用峰值频率点及其左右两个频率点计算中心频率。

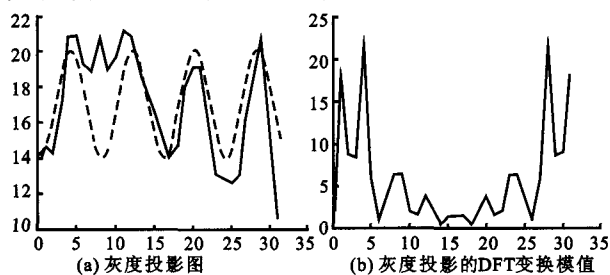


图 2 灰度投影及其 DFT 变换模值

(2) 主频率带能量比值

主频率定义为指纹前景中的平均频率,但是计算主频率时还没有对指纹进行分割。我们利用指纹特性与一些简单的先验知识对指纹进行初步分割,然后利用这些分割出来的前景来估计主频率。

指纹图像的频率大致集中在两个区域,一是以背景为主的低频区域,一是以指纹前景为主的中频区域,对于一些高频区域可以直接认为是噪声。另外,可以先对指纹的脊间距进行初始的估计,例如对于采集分辨率为 300 ~ 600 dpi 的指纹图像,可以估计其脊间距为 3 ~ 16 个像素,对应的频率范围是 $[2\pi/16, 2\pi/3]$,这个是可以比较容易做到的。估计主频率的范围为 $[w_L, w_U]$,将指纹分成较小的纹理块,利用前面所述的方向窗口与 DFT 的方法计算纹理块的频率,如果得到的频率在 $[w_L, w_U]$ 范围内则认为其是前景,否则视为指纹背景,不用于计算指纹的主频率。主频率估计误差定义为 $E_f = \|f_a - f_m\| / f_m \times 100\%$,其中, f_m 为手动分割指纹后得到的指纹主频率, f_a 为用上述频率范围分割指纹后得到的指纹主频率,在 FVC2002 中 4 个指纹库上,估计指纹的主频率范围为 $[2\pi/16, 2\pi/6]$,指纹主频率估计的平均误差为 $E_f = 2.8\%$,误差比较小。

如果是质量非常好的指纹,其方向窗口的灰度投影的频率非常集中,除一个最大的峰值频率点外,不存在其他的峰值频率点,也就是说指纹的主频率

能量占频率能量的绝大部分;相反,如果主频率带的能量不能占总能量的绝大部分,则说明这里的局部纹理很差,不存在很好的结构信息。

第 i 个指纹块的主频率带能量比值 pf_i 定义如下:

$$pf_i = \frac{\int_{w_1}^{w_2} f_i(w)^2 dw}{\epsilon + \int_{0^+}^{\pi} f_i(w)^2 dw} \quad (1)$$

式中, $w_0 = 2\pi/T_0$ 为主频率, $w_1 = 2\pi/T_1$ 为主频率带的下限频率, $w_2 = 2\pi/T_2$ 为主频率带的上限频率, 并且有 $w_1 < w_0 < w_2$, $f_i(w)$ 为第 i 个指纹块频谱模值函数, 注意这里的频率不包括零频率附近的值(直流分量不具有结构信息). ϵ 是为了防止分母为零而加上一个较小的正值。

由于数字频率的意义不太直观, 主频率带范围不直接从频率给出, 而是先估计其上下限频率对应的周期范围, 再通过 $w = 2\pi/T$ 计算出频率的范围. 首先通过主频率 w_0 计算其对应的周期 T_0 , 指纹的周期误差范围可以直接给出, 一般周期较大时, 误差 $dT = 3$ 或 4, 周期较小时, 误差 $dT = 1$ 或 2. 那么上下限频率值对应的周期为 $T_2 = T_0 - dT$, $T_1 = T_0 + dT$, 根据此周期范围再计算频率范围. 另外, 频率范围应该在 $[2\pi/16, 2\pi/3]$ 范围内. 周期跟频率的关系并不是线性的, 当固定周期范围误差 dT 时, 对应的频率带范围在低频时变得很窄, 在高频时变得很宽, 这个特点对指纹分割的影响在实验部分讨论。

(3) 主频率带能量比(pf)对指纹分割有效性

将 FVC2002 中的指纹分为 16×16 大小的块, 每一指纹块纹理可以认为是均匀且方向一致的. 利用前面的方法, 先估计每个指纹图像主频率, 求出其对应的周期, 设周期的误差范围 $dT = 4$, 计算出主频率带的上下限频率值. 指纹图像的前景与背景通过手动分割, 作为算法的参考标准. 图 3 是指纹图像的背景与前景纹理块的主频率能量比值分布, 其中每个数据库中的实线是背景的背景 pf 分布, 虚线是前景的 pf 分布. 从图中可以看出, 主频率能量比值不仅能够很好对指纹图像进行分割, 并且对使用不同传感器采集的指纹表现得非常一致. 当主频率带能量比值取 0.5 时, 整个指纹库可以获得较小的误差 $E = 10.16\%$ 。

2.2 归一化的灰度均值

指纹分块灰度均值特征归一化后定义如式(2):

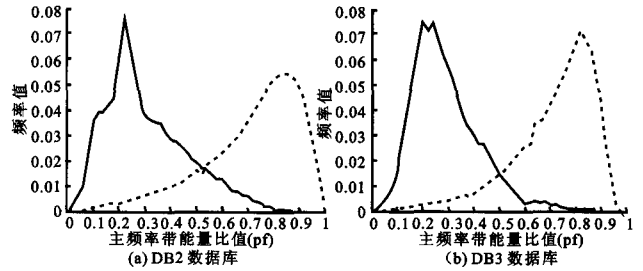


图 3 FVC2002 部分指纹数据库分块纹理的主频率带能量比分布, 实线为背景, 虚线为前景

$$dM_i = \frac{Mb_i - Mg}{Vg} \quad (2)$$

式中, Mb_i 为第 i 个指纹快的平均灰度值, Mg 为指纹的全局平均灰度值, Vg 是指纹的全局灰度标准方差. 指纹块的灰度均值特征在其它指纹分割方法中都有应用, 如文献[5]中直接利用指纹块与全局指纹的灰度均值差作为分割的一个特征, 归一化后的灰度均值更能够适用不同的指纹传感器. 如图 4 所示, FVC2002 指纹数据库的背景和前景灰度均值的分布基本一致. 当灰度均值 $dM = 0.25$, 四个指纹库的平均分割误差为 $E = 13.77\%$ 。

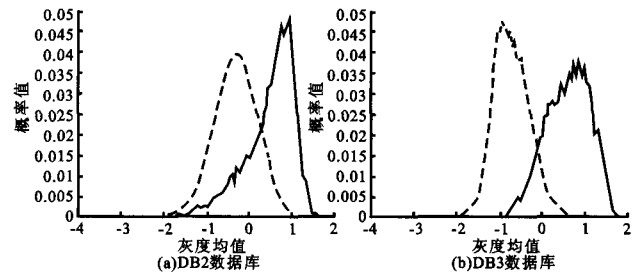


图 4 FVC2002 部分指纹库灰度均值分布, 虚线为前景, 实线为背景

2.3 灰度对比度

指纹的灰度对比度是根据梯度定义的, 第 i 个指纹块的相对对比度定义如下:

$$Cr_i = \frac{Ca_i}{Cg}$$

$$Ca_i = \frac{\sum (G_x^2(n_i) + G_y^2(n_i))}{N \times N} \quad (3)$$

$$Cg = \frac{\sum_{row \times vol} (G_x^2(n) + G_y^2(n))}{row \times vol}$$

式中, Ca_i 和 Cg 分别为第一个指纹的绝对对比度和指纹的全局对比度, G_x 与 G_y 分别为指纹图像在行方向与列方向的梯度, n_i 为第一个指纹块中像素序号, $N \times N$ 为指纹块的尺寸, $row \times vol$ 为指纹的尺寸. 在 FVC2002 上, 当归一化的对比度 $Cr = 0.4$ 时, 可以获得最小分类误差 $E = 4.39\%$, 并且它对有不

同的传感器采集的指纹分割一样有效如图 5 所示.

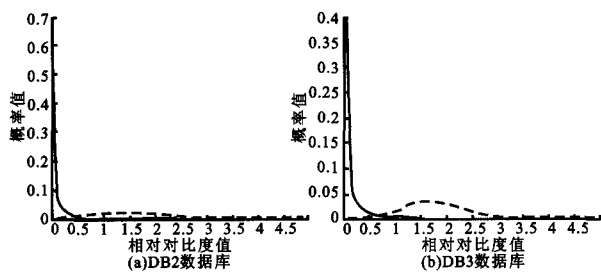


图 5 FVC2002 部分指纹库对比度值的分布,
实线为背景,虚线为前景

2.4 基于 SVM 的线性分类器指纹分割方法

主频率带能量比值 (pf), 归一化灰度均值 (dM) 及相对对比度值 (Cr) 都可以从不同的角度对指纹进行分割,为了考虑各个特征的综合分割能力,我们使用 SVM 训练线性分类器来对指纹进行分割,分类器的计算结果为 $r = w_{pf} \times pf \times w_{dM} \times dM + w_{Cr} \times Cr + dw$, 设 $w = [w_{pf}, w_{dM}, w_{Cr}, dw]$ 线性分类的权值向量, $x = [pf, dM, Cr, 1]$, Bb 为背景纹理块, Bf 为前景纹理块,分割的结果如式(4) 所示:

$$\hat{w} = \begin{cases} Bb, wx^T \leq 0, \\ Bf, wx^T > 0 \end{cases} \quad (4)$$

由于指纹图像有自己的特性,分割完后利用一些先验知识进行处理是一个通用的方法,这里我们使用数学形态学方法去除分割出来的孤立的前景纹理块和孤立的背景纹理块.

指纹分割的误差定义如式(5) 所示:

$$E = p(Bb)p(Bf | Bb) + p(Bf)p(Bb | Bf) \quad (5)$$

式中, p 为对应的各种概率值.

3 实验及结果分析

用 FVC2002 中的指纹库进行分类器训练,指纹图像的分块大小为 16×16 , 共获得背景纹理块 67 891 个,前景纹理块 82 426 个,采集的特征非常的多,训练分类器有一定的困难.采用一些条件来减少特征,将背景中满足条件:① 主频率带能量比值 $pf < 0.2$ 的纹理块去掉,不参与分类器的训练;将前景中满足条件:② 主频率带能量比值 $pf > 0.8$ 或条件 ③ 主频率带能量比值 $pf > 0.6$ 且对比度 $Cr > 1.5$ 的纹理块去掉,不参与分类器的训练.纹理块特征数目将大大减少,用这些特征训练 SVM 线性分类器,得到的权值向量为 $\omega = [2.880\ 2, -0.781\ 2, 1.661\ 7, -2.848\ 2]$.

(1) 指纹分割结果比较

分割结果如表 1 所示,文献[3] 中只采用了指纹频率能量一个特征进行自适应的分割,结果远没有像文献[5] 和本文中的使用线性分类器的效果好.而文献[5] 中在每个指纹子数据库上训练了一个分类器,分类器的通用性要比本文的方法差.该方法不仅获得了更低的指纹分割平均误差率,更重要的本文方法只训练了一个线性分类器,该分类器能够适用于由不同传感器采集的指纹数据(FVC2002 四个指纹库是由不同的传感器采集的).

(2) 指纹主频率范围的估计对指纹分割准确率的影响

表 1 指纹分割误差率比较

		FVC2002 上的分割误差 E				平均误差
	分类器个数	DB1/%	DB2/%	DB3/%	DB4/%	
文献[3] 中方法	1	5.03	9.46	8.32	4.32	6.78
文献[5] 中方法	4	1.80	2.93	3.53	1.55	2.45
本文提出的方法	1	2.38	2.47	1.79	1.57	2.05

提出的方法中唯一一个需要提供的先验知识,就是计算主频率值时对指纹主频率大致范围 $[w_L, w_U]$ 的估计,下面讨论这个频率范围的估计对分割结果的影响,分类器使用前面训练好的线性分类器.在 FVC2002 DB3 指纹库上进行实验,该指纹库的指纹主频率 w_0 在 $[2\pi/11, 2\pi/8]$ 之间,对主频率带范围的估计时,设其固定周期误差 $dT = 4$.

将主频率估计范围的最高频率固定为 $w_U = 2\pi/3$ (对应最小周期 $T_U = 3$),最低频率 w_L 在

$[2\pi/28, 2\pi/9]$ 之间变动(对应最大周期在 $[9, 28]$ 之间变动),分割误差结果如图 6(a) 所示,平均误差 E 在整个 T_L 的变动过程中变化较小,误差一直在 $[1.79, 2.68]$ 范围内.随着周期 T_L 的增加(频率范围的下限变小),计算得到的指纹主频率 w_0 值减小,而一般指纹背景的频率比指纹前景的频率低,这样指纹图像的主频率值向背景区域移动.尽管如此,由于我们对主频率带的范围 $[w_1, w_2]$ 估计采用的是固定周期误差范围的方法,当主频率值 w_0 变小时,由

固定周期误差范围得到的频率带 $[w_1, w_2]$ 变得越来越窄,这样计算得到主频率带能量比值 p_f 值没有变大,反而减小,所以误差 $p(B_f | B_b)$ 下降;误差 $p(B_b | B_f)$ 的增加由于两方面造成的,一是前面所讲的主频率带范围的变窄,二是主频率偏离了前景纹理的频率区域. 综合考虑,主频率的估计范围的下限 w_L 不能过大地偏离指纹的实际主频率值,对分辨率为 $500 \sim 600$ dpi 的指纹,频率下限一般设为 $w_L = 2\pi/16$ 即可.

图 6(b) 是固定主频率估计范围的最低频率为 $w_L = 2\pi/16$,改变其最高频率 w_U 的实验结果,当上限频率 w_U 变低(周期 T_U 变大),指纹的主频值 w_0 变小,同图 6(a)一样的原因,误差 $p(B_f | B_b)$ 下降,误差 $p(B_b | B_f)$ 增加. 但是,指纹中比前景中的指纹纹理频率大的区域很少,所以当这上限频率 w_U 超过 $2\pi/8$ (周期小于 8, 指纹的主频率值对应的周期为 $8 \sim 9$) 时,分割误差基本上不发生改变. 所以,在应用中,将这一上限频率设为 $w_U = 2\pi/3$ 高频.

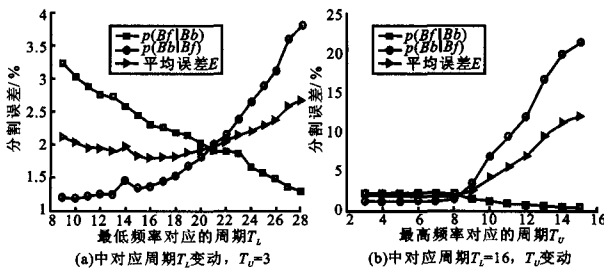


图 6 主频率范围估计对分割误差的影响

4 结束语

本文提出了主频率能量比值,归一化的灰度均值及灰度对比度值三个更为通用的指纹描述特征,使用 SVM 训练了一个基于这三个描述特征的线性分类器对指纹进行分割,在 FVC2002 指纹数据库上达到了约 2% 的平均分割误差. 该指纹分割方法在

由不同传感器采集的 FVC2002 指纹库的 4 个子数据库上都实现较好的分割,具有很好的通用性.

参考文献:

- [1] Ratha NK, Chen SY, Jain AK. Adaptive flow orientation-based feature extraction in fingerprint images, [J]. Pattern Recognition, 1995, 28(11): 1657 - 1672.
- [2] Wang W, Li JW, Huang FF, et al. Design and implementation of Log-Gabor filter in fingerprint image enhancement[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(3): 301 - 308.
- [3] Chikkerur S, Cartwright AN, Govindaraju V. Fingerprint enhancement using STFT analysis [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(1): 198 - 211.
- [4] Yin JP, Zhu E, Yang XJ, et al. Two steps for fingerprint segmentation[J], Image and Vision Computing, 2007, 25(9): 1391 - 1403.
- [5] Chen XJ, Tian J, Cheng JG, et al. Segmentation of fingerprint images using linear classifier[J]. Eurasip Journal on Applied Signal Processing, 2004(4): 480 - 494.
- [6] Maltoni D, Maio D, Jain AK, et al. Handbook of Fingerprint Recognition[M]. Second Edition. London: Springer Verlag, 2009.
- [7] FVC2002 fingerprint database[EB/OL]. [2011-03-18]. <http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/default.asp>.
- [8] Hong L, Wan YF, Jain AK. Fingerprint image enhancement: Algorithms and performance evaluation[J], IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777 - 789.

作者简介:

邓亮男, (1985-), 硕士. 研究方向为生物特征识别.
张新曼女, (1973-), 副教授, 博士生导师. 研究方向为机器视觉、多模生物特征识别.