

一种指纹纹线距离估计算法*

任春晓 尹义龙 马 军 詹小四

(山东大学 计算机科学与技术学院 济南 250101)

摘 要 指纹图像的平均纹线距离是指纹纹理属性的一个重要特征. 作为一个重要的参数, 平均纹线距离的估计精度可能对分割、增强和分类结果造成严重影响. 文中提出一种指纹图像平均纹线距离估计算法. 通过使用傅立叶变换、熵和加权欧氏距离等方法实现对平均纹线距离的精确估计. 为评价算法性能, 提出使用人工数据集和典型指纹图像对算法进行测试的实验方案. 实验结果表明, 本文算法可以对指纹平均纹线距离实现精确估计.

关键词 指纹识别, 纹线距离, 傅立叶变换, 熵, 加权欧氏距离

中图法分类号 TP 391.4

An Algorithm for Fingerprint Ridge Distance Estimation

REN Chun-Xiao, YIN Yi-Long, MA Jun, ZHAN Xiao-Si

(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan 250101)

ABSTRACT

The average ridge distance of a fingerprint image is an important characteristic of fingerprint texture attribute. As an important parameter, the precision of estimation seriously affects the results of segmentation, enhancement and classification of fingerprint recognition. An algorithm is proposed to compute the average ridge distance of fingerprint accurately by using discrete Fourier transform, discrete information entropy theory, and weighted Euclidean distance. To evaluate the performance of the proposed algorithm, an experimental scheme is put forward based on man-made experimental datasets and typical fingerprint images. The experimental results show that the proposed algorithm estimates the average ridge distance accurately.

Key Words Fingerprint Identification, Ridge Distance, Fourier Transform, Entropy, Weighted Euclidean Distance

* 国家自然科学基金项目(No. 60403010)、山东省高新技术自主创新工程专项(No. 2007ZCB01030)和山东省自然科学基金重点项目(No. Z2008G05)资助

收稿日期:2008-04-30;修回日期:2008-08-25

作者简介 任春晓,男,1978年生,博士研究生,主要研究方向为图像处理、模式识别. E-mail: renchunxiao@gmail.com. 尹义龙,男,1972年生,博士,教授,主要研究方向为模式识别、机器学习. 马军,男,1956年生,博士,教授,主要研究方向为信息检索、人工智能. 詹小四,男,1975年生,博士,副教授,主要研究方向为图像处理、模式识别.

1 引 言

指纹识别是生物特征识别领域中最先获得应用的技术之一,近年来在个人身份验证中得到广泛应用^[1]. 指纹图像一般是由脊线和谷线组成的,它们分别是指图像中深色和浅色的纹线^[2]. 自动指纹识别系统主要由指纹采集、图像预处理、特征提取和指纹匹配等步骤组成^[3]. 指纹图像的平均纹线距离是纹线的重要纹理属性之一,在一些指纹分割、增强和分类算法中,平均纹线距离经常作为一个重要参数被用于计算. 例如,指纹增强方法经常使用平均纹线距离作为参数来构造滤波器^[4-5],有些指纹分割方法可通过平均纹线距离来实现指纹前景和背景区域的分离^[6]. 在某些指纹分类方法中,平均纹线距离也经常被作为分类指标使用^[7]. 所以,精确的平均估计纹线距离对自动指纹系统的实现有着重要意义.

通常,脊线与相邻谷线的间距被定义为指纹纹线距离^[8]. 从技术实现的角度来考虑,一般通过计算脊线中心到谷线中心的长度作为纹线距离. 设指纹图像中有 n 条宽度分别为 w_1, \dots, w_n 的脊线,被 $n-1$ 条宽度为 v_1, \dots, v_n 的谷线分隔,如图 1 所示. 则

纹线分叉和纹线融合两种错误现象的发生. 纹线分叉是指一条指纹纹线在增强后显示成两条. 相应的,纹线融合是指两条指纹纹线在增强后显示为一条.

对于指纹纹线距离的估计方法,已经有一些文献进行论述. O' Gorman 和 Nickerson^[9]在指纹滤波器设计中将纹线距离作为滤波器的一个关键参数来使用. Hung^[10]在整幅指纹图像上估计纹线的平均距离,并用于指纹增强和特征选择. Kovac-Vajna^[8]提出纹线距离估计的两种方法:几何法和谱分析法. Mario 和 Maltoni^[6]给出局部纹线频率的旋渡数学特征并用二维模型近似纹线模式. 尹义龙^[11]提出一种基于统计窗的纹线距离估计方法,在空间域实现纹线距离估计. 祝恩^[12]提出将各局部区域在一条穿过该区域中心并且各点切线方向都和纹线走向垂直的曲线上投影,据此计算出整个图像的平均纹线距离. 詹小四^[13]对纹线距离估计算法的思想进行讨论,并对每类算法进行性能评价.

目前,虽然已有多种纹线距离估计方法,但在某些应用中,其性能仍不能令人满意. 尤其是对此类算法的性能评价方案的研究尚不成熟. 本文提出一种综合使用傅立叶变换、熵和加权欧氏距离对纹线距

$$|G_{(u,v)}| = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \sqrt{(g_{(x,y)} \cos(-\frac{2\pi}{N} \langle (x,y)(u,v) \rangle))^2 + (g_{(x,y)} \sin(-\frac{2\pi}{N} \langle (x,y)(u,v) \rangle))^2}$$

定义径向分布函数为

$$Q(r) = \frac{1}{\#C_r} \sum_{(u,v) \in C_r} |G_{(u,v)}|,$$

其中, C_r 代表满足 $\sqrt{u^2 + v^2} \approx r$ 的各坐标点的集合, $\#C_r$ 代表 C_r 中元素的个数, 则 $Q(r)$ 表示在 $N \times N$ 的图像上纹线距离为 N/r 的信号分布强度, $Q(r)$ 的峰值位置对应的 r 的取值即为该图像区域内主导信号出现的次数。

图 2 显示指纹图像及其频谱图像和在直角坐标系中的分布。其中, (a) 是原始指纹图像, (b) 是使用离散傅立叶变换后指纹图像在频域中的表现, (c) 是 (b) 使用径向分布函数转换到直角坐标系的表现。图中, 横坐标表示到频谱图像中心的距离, 纵坐标表示以某距离为半径的频谱能量的和。

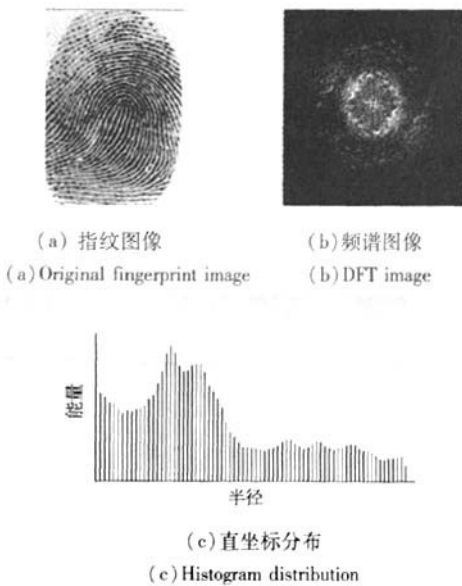


图 2 指纹图像及其频谱图像和在直角坐标系中的分布
Fig.2 Fingerprint image, DFT image and histogram distribution

2.2 熵估计

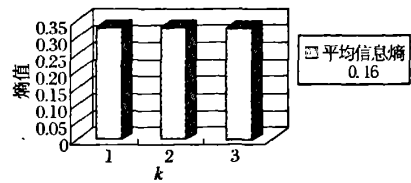
在频谱图像中, 能量越集中的区域越能代表整幅图像的纹线距离。为了获得频谱图像中能量密度最大的环, 可通过使用熵估计的方法对图中亮度最大的环进行定位。香农信息熵理论被广泛应用于对

$$H(X) = - \sum_{k=1}^K p_k \log p_k$$

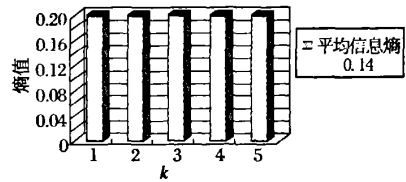
对于离散随机变量来说, 其信息熵随范围和分布的均匀性增大而增大。信息熵 $H(X)$ 越大的区域包含的信息也越多。可定义离散随机变量在范围为 k 的区域内的平均信息熵为

$$\overline{H(X)} = \frac{H(X)}{k}$$

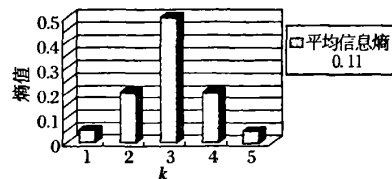
平均信息熵越高, 说明在一定范围内所包含的信息越集中。如图 3 所示, 3 个子图中存在的信息总量相等, 由于其分布不同, 因此平均信息熵值也不同。



(a) 分布 1
(a) Distribution 1



(b) 分布 2
(b) Distribution 2



(c) 分布 3
(c) Distribution 3

图 3 平均信息熵示例

Fig.3 Examples for average entropy

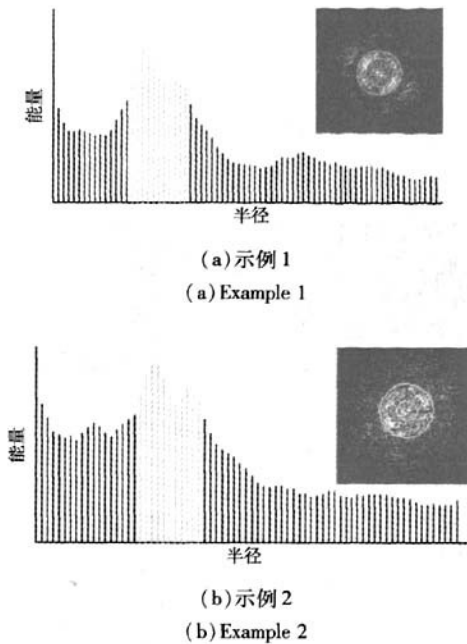


图 4 最大熵密度区域

Fig.4 Area with largest density of entropy

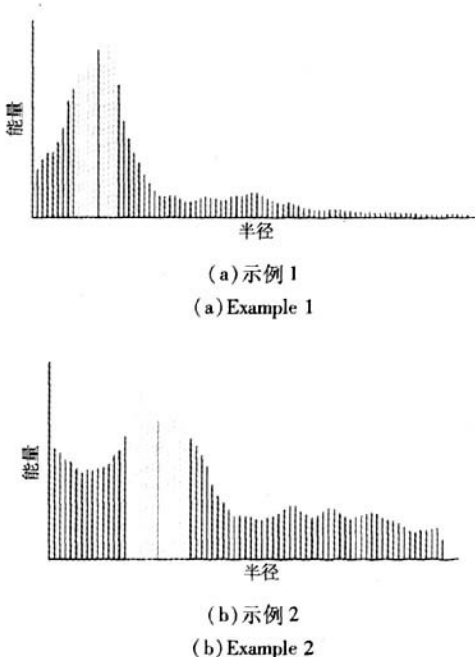


图 5 本文算法获得的纹线频率

Fig.5 Ridge frequency by proposed method

所对应的能量环在频谱图中用白色标出。

2.3 加权欧氏距离

为了找到最大熵密度区域中最有代表性的纹线

频率,使用加权欧氏距离来度量环带中每个环的代表性^[15]. 加权欧氏距离定义为

$$d_k(i, j) = \sqrt{\sum_{k=1}^j p_i(x_{ik} - x_{jk})^2},$$

其中, p_k 是环 k 的能量, x_{ik}, x_{jk} 分别代表 i 到 k 和 j 到 k 的距离. 所以, 环带中最具代表性的频率 F 为 $d_k(i, j)$ 取得最小值时的频率, 即

$$F = [\min d_k(i, j) | k = i, \dots, j].$$

图 5 显示所求出的纹线频率, 灰色区域显示最大熵密度区域, 求得的纹线频率用灰色区域内的黑色直线标出。

3 实验方案及结果

目前, 如何对纹线距离估计算法进行精确的性能评价仍然是一个较困难的问题. 造成这个问题的一个主要原因是由于纹线距离的真实结果很难精确获得. 一般情况下, 通过采用人工标定的方法与估计算法的结果进行比较, 来评价算法性能. 人工标定的方法主要存在着操作繁琐和客观性较弱两个方面的问题, 这在一定程度上影响估计算法性能评价结果的可信性. 基于以上分析, 提出基于人工实验数据集和典型指纹图像的实验方案, 试图对估计算法的性能进行较为精确的测试. 另外, 本文也在标准实验数据集 FVC2000 DB1^[16] 上进行基于人工标定方法的实验.

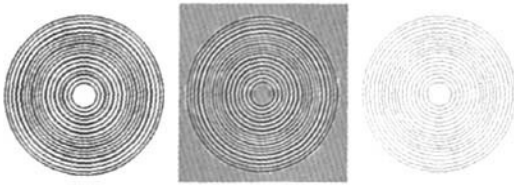
3.1 基于人工实验数据集的实验

使用黑白相间的同心圆对指纹进行模拟, 是指纹识别测试中经常使用的方法^[5]. 参考这种思路, 建立 3 组人工实验数据集, 每组有 50 幅图像, 共 150 幅图像. 每幅图像都是 1 组同心圆, 其中的每个圆环的宽度都是在一定范围内随机确定的. 3 组同心圆的圆环宽度范围分别为 2-4 像素、2-6 像素和 2-8 像素.

由于纹线距离的估计结果对增强过程有着重要的影响, 因此通过测试增强和细化结果对估计算法进行量化的评价. 首先, 通过估计算法获得测试图像的纹线距离. 然后, 以获得的纹线距离为参数增强和细化此测试图像. 最后, 对比原始图像和细化后的图像, 从而获得精确的识别率. 图 6 显示实验数据集图像及其在增强和细化后图像的例子.

通过统计增强和细化后纹线分叉和纹线融合现象出现的次数, 采用以下指标评价纹线估计算法的性能: 1) $p(\hat{\omega}_1 | \omega_0)$ 表示出现纹线分叉现象的概率;

2) $p(\hat{\omega}_0 | \omega_1)$ 表示出现纹线融合现象的概率;3) P_r 表示未出现纹线分叉和纹线融合现象的概率,其中, ω_0 代表为 1 条纹线的情况, ω_1 代表为 2 条纹线的情况. 本文在人工实验数据集上, 对比文献[11]的方法进行实验, 实验结果如表 1 所示.



(a) 实验数据图像 (b) 增强后的图像 (c) 细化后的图像
 (a) Original experimental image
 (b) Image after enhancement
 (c) Image after thinning

图 6 实验数据图像及其在增强和细化后的图像
 Fig. 6 Results after enhancement and thinning

表 1 2 种算法在人工实验数据集上的结果对比

Table 1 Result comparison between 2 methods on artificial dataset

数据集		%		
		第 1 组	第 2 组	第 3 组
文献[11]算法	$p(\hat{\omega}_1 \omega_0)$	0.33	1.41	4.88
	$p(\hat{\omega}_0 \omega_1)$	0.00	0.00	0.35
	P_r	99.67	98.59	94.77
本文算法	$p(\hat{\omega}_1 \omega_0)$	0.00	1.27	4.36
	$p(\hat{\omega}_0 \omega_1)$	0.00	0.00	0.70
	P_r	100.00	98.73	94.95

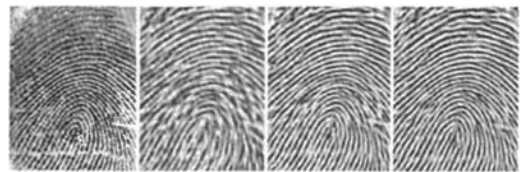
通过实验可以看出, 基于人工实验数据集的测试方案针对指纹增强过程进行模拟, 可获得量化的实验结果, 利于不同估计算法的性能对比, 从而可以有效进行纹线距离估计算法性能评测. 本文算法在 3 组人工实验数据集上的表现均优于文献[11]算法.

3.2 基于典型指纹图像的实验

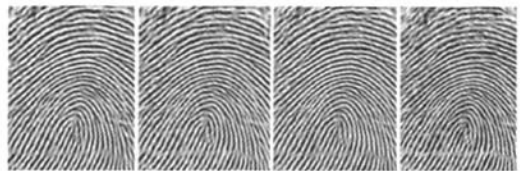
通常, 传统的纹线距离估计算法实验使用 1 副指纹图像进行测试, 通过增强效果说明估计算法的性能. 这种实验方案难以直接说明估计算法的性能. 为了显示纹线距离估计的准确性, 对同一幅典型指纹图像使用不同的纹线频率进行增强, 对比多幅增强结果图, 可清楚看出估计算法是否可靠.

以本文算法获得的纹线距离为基准, 分别用

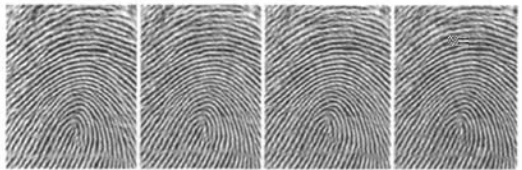
增强效果也经历由较差(表现为严重的纹线融合现象)到较好再到较差(表现为严重的纹线分叉现象)的过程. 基于典型指纹图像的对比实验可有效描述纹线距离估计的趋势, 利于定性的估计算法性能, 也可用于纹线距离估计算法性能评测. 从图 7 可以看出, 本文算法估计的纹线距离较为准确.



(a) 原始图像 (b) 50% (c) 60% (d) 70%
 (a) Original image



(e) 80% (f) 90% (g) 100% (h) 110%



(i) 120% (j) 130% (k) 140% (l) 150%

图 7 使用不同百分比纹线距离为参数获得的增强图像
 Fig. 7 Enhanced images with different percentage of ridge distance

3.3 基于手工标定的实验

通过使用传统手工标定的方法, 同样可对纹线距离估计算法进行性能评价. 本文使用标准指纹数据库 FVC 2000 DB1 指纹库^[16] (包含 800 幅活体指纹图像, 100 个不同手指, 每个手指 8 幅图像, 图像大小为 300×300 , 256 色灰度图像) 中的 100 幅典型图像(每个手指的第 1 幅图像), 使用本文算法估计平均纹线距离, 并对分块图像 (30×30) 的纹线距离进行人工测量.

使用估计精度 (Estimation Accuracy, EA) 作为

$$EA = \left(1 - \left| 1 - \frac{E_{(i,j)}}{\frac{1}{s} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} T_{(i,j)}} \right| \right) \times 100\%$$

其中, (i, j) 为非背景区图像块, s 为指纹中可直接估计出纹线距离的图像块的总数目。

平均估计精度为

$$\overline{EA} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P EA(i),$$

其中 P 为图像数。

经过实验,本文算法的平均估计精度 $\overline{EA} = 92\%$ 。

4 结束语

指纹图像的平均纹线距离是指纹纹理属性的一个重要特征。作为一个重要的参数,平均纹线距离在指纹分割、增强和分类算法中有着广泛应用。本文提出一种综合使用傅立叶变换、嫡和加权欧氏距离对指纹平均纹线距离进行估计的算法。首先利用傅立叶变换将指纹图像变化为频域图像,然后通过嫡估计确定能量最为集中的区域,最后通过加权欧氏距离获得精确的纹线距离。针对指纹纹线距离估计算法难以有效评测的问题,本文提出使用人工数据集和典型指纹图像对算法进行测试的实验方案。实验结果表明,本文算法可对指纹平均纹线距离实现精确的估计。

由于指纹图像的平均纹线距离与指纹采集器有着密切的关系,因此对于实现指纹采集设备互操作性有着重要的意义,今后我们将在这个方面开展工作。

参 考 文 献

- [1] Maltoni D, Maio D, Jain A K, *et al.* Handbook of Fingerprint Recognition. New York, USA: Springer-Verlag, 2003
- [2] Bazen A M, Gerez S H. Segmentation of Fingerprint Images // Proc of the 12th Annual Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing. Veldhoven, Netherlands, 2001: 276 - 280
- [3] Jain A J, Flynn P, Ross A A. Handbook of Biometrics. New York, USA: Springer-Verlag, 2007
- [4] Hong Lin, Jain A K, Pankati S, *et al.* Fingerprint Enhancement // Proc of the IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. Sarasota, USA, 1996: 202 - 207
- [5] Zhu En, Yin Jianping, Zhang Guomin, *et al.* A Gabor Filter Based Fingerprint Enhancement Scheme Using Average Frequency. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2006, 20(3): 417 - 430
- [6] Maio D, Maltoni D. Ridge-Line Density Estimation in Digital Images // Proc of the 14th International Conference on Pattern Recognition. Brisbane. Australia, 1998, I: 534 - 538
- [7] Zhu En, Yin Jianpin, Zhou Jing. Fingerprint Classification by Using Average Period. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(4): 22 - 26 (in Chinese)
(祝恩,殷建平,周婧.使用平均周期进行指纹分类.国防科技大学学报,2004,26(4):22-26)
- [8] Kovacs-Vajna Z M, Rovatti R, Frazzoni M. Fingerprint Ridge Distance Computation Methodologies. Pattern Recognition, 2000, 33(1): 69 - 80
- [9] O'Gorman L, Nickerson J V. An Approach to Fingerprint Filter Design. Pattern Recognition, 1989, 22(1): 29 - 38
- [10] Hung D C D. Enhancement and Feature Purification of Fingerprint Images. Pattern Recognition, 1993, 26(11): 1661 - 1671
- [11] Yin Yilong, Tian Jie, Yang Xiukun. Ridge Distance Estimation in Fingerprint Images: Algorithm and Performance Evaluation. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2004, 4: 495 - 502
- [12] Zhu En, Yin Jianpin, Zhang Guomin. Computation of Fingerprint Inter-Ridge Distance. Microelectronics & Computer, 2004, 21(10): 7 - 9 (in Chinese)
(祝恩,殷建平,张国敏.指纹纹路间距的计算.微电子学与计算机,2004,21(10):7-9)
- [13] Zhan Xiaosi, Sun Zhaoai, Yin Yilong, *et al.* Fingerprint Ridge Distance Estimation: Algorithms and the Performance // Proc of IA-PR International Conference on Biometrics. Hongkong, China, 2006: 294 - 301
- [14] Zuo Junyi, Zhao Chunhui, Pan Quan, *et al.* A Novel Binary Image Filtering Algorithm Based on Information Entropy // Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, China, 2006, II: 10375 - 10379
- [15] Gower J C, Legendre P. Metric and Euclidean Properties of Dissimilarities Coefficients. Journal of Classification, 1986, 3(1): 5 - 48
- [16] Maio D, Maltoni D, Cappelli R, *et al.* FVC2000: Fingerprint Verification Competition. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(3): 402 - 412

