

指纹识别技术研究进展

戴 平 阳

(厦门大学计算机科学系, 福建 厦门 361005)

摘要: 指纹识别由于具有唯一性、可靠性, 在安全领域得到了广泛的应用. 本文介绍了指纹识别技术的历史、现状和发展情况, 对指纹识别系统的指纹图像增强、特征提取及特征匹配环节的各种技术以及新的发展动态进行了详细的讨论和分析.

关键词: 指纹识别; 图像增强; 特征提取; 特征匹配

中图分类号: TP 391.4

文献标识码: A

人们使用指纹进行个人身份鉴定已经有很长的历史. 早在公元 650 年, 唐代作家贾公秀在其作品中就着重提到了指纹是确认个人身份的方法^[1]. 我国将指纹应用于民间契约及断案有悠久的历史, 但是由于缺乏专门性研究, 未能将指纹识别技术上升为一门科学. 现代指纹识别起源于 16 世纪后期. 苏格兰医生 Henry Fauld^[2] 于 1880 年 10 月 28 日首次在英国《Nature》上发表论文, 指出指纹人各不同, 恒久不变, 并利用现场指纹来鉴定罪犯. 接着, William Herschel^[3] 也在《Nature》上发表了他本人关于指纹研究 20 多年来的成果, 从此揭开了现代指纹识别的序幕. 1892 年, 英国 Sir Francis Galton^[4] 对指纹进行了系统地研究, 并提出了指纹细节特征分类, 将指纹分为斗(whorl)、箕(loop)、弧(arch)三大类, 使指纹识别应用进入了一个崭新的时期. 1899 年, 英国 Edward Henry^[5] 建立了著名的 Henry 指纹分类系统并于 1901 年被英国政府正式采用, 随后西方各国亦相继采用, 指纹识别应用正式走上了科学化道路. 随着电子计算机的出现, 采集技术的发展以及对指纹识别的研究, 人们逐渐将人工的指纹识别向指纹自动识别(Automated Fingerprint Identification System) AFIS 转变. 美国最早于 1963 年首先开展有关软件的研制, 于 1975 年成功推出第一个商业化系统 print-

rak250^[6]. 日本在 1975 年开始进行研究, 并于 1982 年将 NECAFIS 投入使用^[2]. 我国也在 80 年代初对指纹识别展开研究. 随着越来越多的电子设备进入人们日常生活以及互联网的兴起, 计算机、ATM、门禁控制、各种智能卡对个人安全, 方便的身份识别技术要求越来越高, 人们迫切需要有准确、安全、方便的识别技术. 而指纹识别由于具有唯一性、稳定性使得其在安全领域得到了广泛的应用.

指纹识别是模式识别领域中使用最早的, 也是最为成熟的生物鉴定技术, 它是集传感器技术、生物技术、电子技术、数字图像处理、模式识别于一体的高技术. 一般说来, AFIS 系统主要由以下部分组成如图 1 所示.

以下是对 AFIS 系统的详细介绍.

1 指纹图像输入

AFIS 系统中获取指纹图像一般采用两种方式, 光学扫描采集和固体传感器采集. 光学扫描采集指纹图像一般采用全反射技术(FTIR). 当手指放在棱镜上, 手指的脊和棱镜相接触而谷不和棱镜接触, 激光以一定角度照射棱镜产生全反射, 由 CCD 阵列接收并获取指纹图像. 固体传感器采集图像时, 是利用当手指放在传感器表面, 传感器感受接触点并改变电容器的电压从而获取图像. 固体传感器与光学扫描相比具有体积小、集成度高、数字化等特点, 但采集范围较小, 而光学扫描在采集范围大小则很少受到限制. 最近也出现了超声波传感器采集图像, 它

收稿日期: 2002-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(60175008), 高等学校骨干教师资助计划, 福建省自然科学基金(A0110004)资助项目

作者简介: 戴平阳(1975—), 男, 硕士研究生.

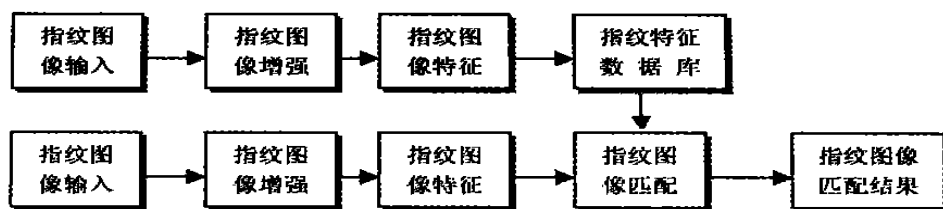


图1 指纹识别系统简图

Fig. 1 Overview of fingerprint verification system

是利用超声波反射测距来采集的,对受损坏的指纹图像抗干扰较强,能够获取比较清晰的指纹图像。

指纹图像的性质因采集设备的不同而不同。一般来说,采集图像为8位256级灰度图,分辨率从250 dpi到625 dpi不等,图像大小也不相同,从 $1.27 \text{ cm}^2 \sim 3.175 \text{ cm}^2$ 不等。其中一般又以美国FBI推荐的500 dpi, 2.5 cm^2 大小图像为标准。

2 指纹图像增强

采集得到的图像是手指表面脊和谷的映像组合。每个人都有其独特的指纹,而这一独特性则取决于其局域脊特征及其关系。指纹图像的特征定义有许多种。美国国家标准局提出用于指纹匹配细节的四种特征为脊终点,分叉点,复合特征(三分叉或交叉点)以及未定义。但目前最常用细节特征的定义是美国FBI提出的细节模型。它将指纹图像的最显著特征分为脊终点和分叉点。每个清晰指纹一般有40~100个这样的细节点。AFIS依赖于这些局部脊特征及其关系来确定身份。

细节特征提取算法的性能严重依赖于输入指纹图像的质量。然而源指纹图像同真实指纹由于图像的变形而会导致不同,其中许多畸变、变形是由指纹图像获取时产生的^[3]:(1)不一致的接触。我们所获得的指纹图像是三维的手指映像二维表面所成的像,由于每次采集压力不同会使得采集得到的指纹图像产生一定的畸变。一般说来,这种映像过程是很难控制的。(2)不均匀接触。如果手指与采集设备完全接触,那么手指的脊结构信息将会完全被采集。但是手指皮肤的干燥程度、汗渍、污渍、皮肤病等因素都会导致指纹图像的失真,如部分脊结构信息不能与采集板接触。这样会导致一些错误信息被采集。(3)不可再现的接触。采用人工采集指纹、手指受伤等都会永久或暂时改变手指的细节信息,导致假信息被采集。(4)采集设备本身的噪声干扰。这些因素将导致待分析的指纹图像产生一定数量的可疑特征点以及大

量真实特征点被忽略并引入大量的错误信息。为了确保细节特征算法的性能,我们需要进行指纹图像增强。

在指纹图像中,脊和谷清晰,可以正确提取出特征点的区域称为良好区域,脊和谷信息被少数折痕和污渍破坏,但它们仍然可见且相邻区域可以提供足够的脊和谷信息的区域称为被破坏可恢复区域。若脊和谷信息被大量噪声破坏,并且相邻区域无法提供足够的脊和谷信息的区域称为不可恢复区域。前二者一般称为可恢复区域^[4]。指纹图像增强的目的就在于提高可恢复区域的脊信息清晰度同时删除不可恢复区域。

一般来说,图像的增强采用平滑、滤波、二值化、细化等数字图像处理方法来处理。实际实现时,指纹图像增强一般采用以下几个环节:规格化,方向图估计,频率图估计,生成模板,滤波。一幅指纹图像经过规格化后,才能将该图的均值和方差控制在给定范围,以便后续处理。对指纹图像规格化目的是将该灰度图的方差降低。规格化一般采用如下公式^[4]:

$$N(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{\text{Var}_0(I(i, j) - M^2)}{\text{Var}}} & \text{如果 } I(i, j) > M \\ M_0 - \sqrt{\frac{\text{Var}_0(I(i, j) - M^2)}{\text{Var}}} & \text{否则} \end{cases}$$

其中, $N(i, j)$ 是规格化后的图像, $I(i, j)$ 是源图像, Var 和 M 是图像 I 的方差和均值, Var_0 和 M_0 是预设的方差和均值。方向图估计则计算出指纹图像划分后的每个小区域指纹脊和谷的方向。一般采如下公式^[4]:

$$V_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{W}{2}}^{i+\frac{W}{2}} \sum_{v=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} 2G_x(u, v)G_y(u, v),$$

$$V_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{W}{2}}^{i+\frac{W}{2}} \sum_{v=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} (G_x^2(u, v) - G_y^2(u, v)),$$

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{V_x(i, j)}{V_y(i, j)} \right)$$

其中, 指纹图像被划分为 $W \times W$ 大小的块区域, G_x , G_y 是点 (i, j) x 和 y 方向上的梯度, $\theta(i, j)$ 是以点 (i, j) 为中心的块区域的方向. 文献[4]中, Hong 等给出了一种详细的求频率估计和生成模板的方法. 最后通过滤波, 达到指纹图像的增强. 指纹图像增强的主要问题是设计合适的滤波器和取得合适的阈值.

指纹图像的一个特点在于许多脊是平行的. 利用这个信息, 即使当前脊是不连续的, 我们通过观测很小的局部邻域脊的方向, 也可以得出该脊的方向, 而在该小邻域内与脊方向不同的点往往正是附加了噪声的点. 因此, 利用这个特点, 可以设计出自适应的匹配滤波器. 对于指纹图像的每一个点, 根据其邻域信息, 对该点使用滤波器, 滤波器可以使与脊方向相同的点得到增强, 而其它不同方向的点则减弱, 从而使得指纹图像的噪声得到抑制, 达到图像增强的目的. 又由于每个小区域的方向图往往不同, 因此, 根据各个区域不同方向, 需要采用不同参数的滤波器, 因此, 实现时往往采用自适应滤波器. 许多文献对指纹图像增强进行了探讨. 文献[5]中, Coetzee 等对输入的灰度图使用 Marr-Hildreth 边缘算子得到脊边缘图, 并采用卷积模板来进行增强, 在文献[6]中, Randolph 等也提出了一种使用方向滤波器组来对输入的二值图像来进行增强的方法, 文献[7]中, O'Gorman 等由局域脊方向图得出 $k \times k$ 模板系数, 并给出了详细的滤波器设计的讨论, 在文献[8]中, Sherlock 等采用了傅立叶滤波器, 来增强指纹图像都取得了较好的效果. 但是, 对于输入指纹图像较差的情况, 由于局域的方向图估计难以准确得到, 因此, 上述方法存在一定的局限性. Hong 提出了使用同时具有频率选择和方向选择 Gabor 滤波器的方法来增强指纹图像. 该方法将输入指纹图像通过一系列的 Gabor 滤波器得到滤波图像, 并根据这些滤波图像估计出方向图. 这种方法能够在指纹图像质量很差的情况下取得很好的效果, 但是由于其在计算局部区域方向图时开销很大, 难以在网络系统中运行, 因此, Hong 等在文献[4]中提出了改进后的算法, 减少了计算量.

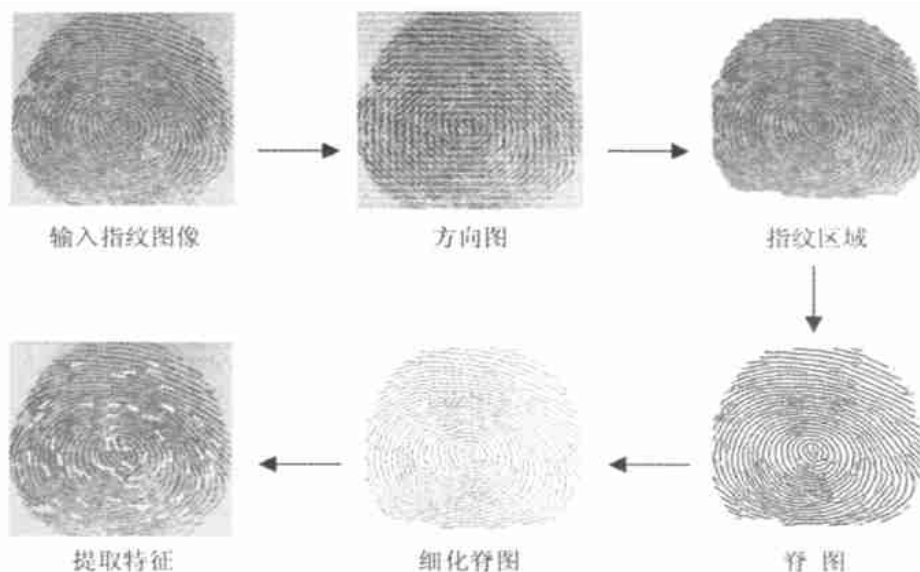
3 指纹图像特征提取

匹配两幅指纹图像大量地采用基于比对两幅指

纹图像的点的模式的方法. 用来匹配的点称为特征点. 通常指纹特征可以分为两类: 细节特征和单独点. 用来匹配指纹图像的点称为细节点, 在指纹图像拓扑中, 它们是脊终点和分叉点. 单独点包括中心点和三角点. 三角点和中心点之间的距离以及脊线的数目一般认为不会随图像变换、旋转、放大和缩小而改变. 因此, 往往利用这一特性来减少匹配时数据库的搜索空间.

关于单独点的提取, 已经有许多的方法^[9]. Tou 和 Hankley 提出了检测模拟的无噪声指纹图像的中心点方法; Ausherman 提出了用傅立叶变换的方法来获取中心点的方法, 但是由于在频域的工作量太大, 开销太大; Rao 和 Kawagoe 使用对称语法树来自动检测这些点, 该方法混合了用来降噪的相关方法以及基于邻域的剪枝方法. 上面的方法都在很大程度上依赖于邻域信息的可靠性. 但是在现实中, 指纹图像由于前述原因, 即使进行了指纹图像增强, 也还往往带有噪声, 因此这些方法将不能得到很好的效果. Srinivasan 和 Murthy 提出了在邻域中使用方向直方图的方法, 用来平均噪声. 由于该算法是由邻域信息和方向直方图推导提取出特征单独点而不是由单个点得出的, 因此该方法将允许容忍较大的噪声. Ching-Tang Hsieh 等提出了一种方法来建立描述指纹图像的方向矩阵^[10], 利用二值化, 细化, 生成方向矩阵, 提取方向矩阵然后通过方向矩阵来提取模糊及污损指纹图像的中心点和三角点并取得了较好的效果. Wai Mun Koo 和 Alex Kot 则提出了一种分析指纹图像脊的曲率的方法^[11], 同时利用多分辨分析的方法消除噪声来检测单独点, 取得了比较高的准确率.

细节特征的提取就是在指纹图像中找到脊终点和脊分叉两个细节特征. 一般说来, 如果指纹图像能够很好地分割, 那么对于细节特征提取来说, 就仅仅是对细化的指纹图像进行沿脊线的点的判断. 然而, 在实践中由于指纹图像本身存在噪声或在提取特征时, 滤波和细化引入了噪声, 我们无法得到完美的指纹图像细化图, 在提取特征时会产生一些虚假细节特征. 虚假细节特征的存在会同时提高指纹图像匹配时的误识率和拒识率. 因此, 在特征提取时, 往往需要进行虚假细节特征删除. 一般, 采用启发式算法对虚假特征进行删除. 对于一个分叉点的分支如果小于某个给定阈值, 就将其当作毛刺删除; 如果脊线的两个端点很近, 那么该脊线有可能是噪声引起的, 应删除; 在指纹图像边缘的脊终点也应删除. 文献

图2 细节特征提取算法^[12]Fig. 2 Minutia extraction algorithm^[12]

[12~14]中,仅仅针对删除虚假特征提出了一些简单的关于距离和连接的准则.Xiao和Raafat则提出了一种利用统计和结构信息的方法来删除虚假特征^[15],然而,这些方法在删除虚假特征的同时也会删除一些真正的特征,而且难以容忍模糊和低质量的指纹图像.Seonjoo Kim^[16]等提出了有效的特征提取及删除虚假信息的算法.该算法不仅利用了细节特征的距离和连接关系,还使用了方向图和脊方向作为处理的依据,取得了较好的效果.

一个典型可靠的细节特征提取算法包括方向估计、分割、脊提取、细节特征提取及后处理,如图2所示.方向估计如前指纹图像增强所述.分割一般采用全局或自适应阈值来获得指纹图像前景.Ratha等提出了一种新的有效的分割方法^[14].脊提取则一般采用现有的标准细化方法^[17].一旦得到细化的脊图,那么根据对脊上的点的邻域进行检测,很容易就可以得出脊终点和脊分叉.后处理则如前删除虚假信息所述.Ratha等^[14]提出了细节特征提取的算法,Jain等^[13]对该算法进行了改进并取得了较好的效果.Maio和Maltoni^[12]提出了直接从灰度图提取细节特征的方法,而没有采用二值化和细化等环节.Tico等^[18]也没有应用任何的图像增强环节,直接对灰度图采用小波变换来提取指纹的细节特征,并取得了较高识别率.该算法的高识别率和低计算复杂度很适合在小规模指纹图像库的识别系统使用.

特征提取的结果一般保存为特征模板,它包括

脊终点或分叉类型、位置坐标以及该特征的方向.一般的指纹图像提取的特征在10~100之间.大多数文献均认为至少应该有12个特征点才能进行匹配.

4 指纹图像匹配

指纹图像匹配就是对两个输入指纹的特征集合(模板)判断是否属于同一指纹.指纹匹配算法方法很多,包括基于图像的匹配、脊模式匹配、点模式匹配及基于图形的匹配.点模式匹配是预先从指纹图像中提取出的特征点集与输入的待匹配的指纹图像中提取出的特征点集的匹配.如果两幅指纹图像是匹配的,那么这两个点集通过某些变换,如旋转、伸缩及平移,可以得到较好的匹配.

点模式研究者提出了许多关于点模式匹配算法.Ranade和Rosenfeld^[19]提出了点模式匹配的松弛算法.该方法计算匹配变换的可靠度并将可靠度迭代计算,因此计算速度较慢.点模式匹配也可以从能量最小的角度来描述实现.Starink和Backer^[20]使用了模拟退火算法,但计算代价也比较大.Ansari等^[21]则采用了遗传算法,漆远等^[22]也提出了一种改进的点模式匹配,并利用遗传算法及结合利用指纹图像的结构信息的初匹配算法,提高了匹配的速度,并能容忍一定的噪声,识别残缺指纹图像.Stockman等在文献[23]中提出了基于Hough变换的方法,将点模式匹配转化为对转换的Hough空间的峰值检测.然

而,如果提取出的特征点少于 30,这种方法很难在 Hough 空间积累足够的证据来确保可靠的匹配。Hrechak 等^[24]提出了基于结构信息的指纹特征匹配,Isenor 等^[25]则使用了图匹配的方法来进行指纹图像匹配。由于这些方法利用了指纹的结构信息,因此,在一定程度上克服了噪声、旋转及变形对指纹识别的干扰。

但基于图像的匹配无法容忍大量的脊结构信息变形干扰,匹配准则依赖于脊提取及其连接信息将导致匹配性能随输入指纹图像的下降而恶化。因此,一般认为,点模式匹配(细节特征匹配)采用很小的特征模板,却有较高的鲁棒性和快速的匹配算法,是比较合理的方法。在实践中,在线的指纹识别应用显得特别重要。Jain 和 Hong 在文献[13]提出了一种可行的在线指纹点模式匹配方法。同时采用多种匹配方法也可以提高指纹识别系统的可靠性及识别率, Jain 等^[26]对 3 种不同匹配方法的系统集成进行了讨论,并用以提高指纹识别系统的性能。

5 小 结

指纹识别技术虽然已日渐成熟,图像处理及模式识别界曾一度认为 AFIS 技术已经得到很好的解决,但实际上,作为指纹识别的核心技术仍然存在许多尚未解决的难题,尤其是残缺、污损指纹图象的识别的鲁棒性、适应性方面不能令人满意。指纹识别系统将随着更小更廉价的指纹输入设备的出现、计算能力更强更廉价的硬件以及互联网的广泛应用而进一步拓宽其应用。其中,能适应联网在线指纹自动识别系统的应用算法有待进一步改进,多种指纹识别方法的集成应用以及包括指纹识别的多种生物特征鉴定的集成应用也将是今后研究发展的方向。近年来,国外指纹识别相关研究又有升温趋势。因此,AFIS 现在是,未来几年仍然是一个重要的、极具挑战性的模式识别研究课题。

参考文献:

[1] 刘少聪. 新指纹学[M]. 合肥: 安徽人民出版社, 1984.
[2] Lee H C, Gaensslen R E. Advances in Fingerprint Technology[M]. New York: Elsevier, 1991.
[3] Jain A K, Prabhakar S. Matching and Classification: A Case Study in Fingerprint Domain. Tech Report MSU-CSE-99-34, <http://www.cse.msu.edu/cgi-user/web/tech/document?ID=423>, 1999-09.

[4] Hong L, Wan Y, Jain A K. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777—789.
[5] Coetzee L, Botha E C. Fingerprint recognition in low quality images [J]. Pattern Recognition, 1993, 26(10): 1441—1460.
[6] Ranolph T R, Smith M J. Fingerprint image enhancement using a binary angular representation. Acoustics, Speech and Signal Processing [C]. USA: Salt Lake City, 2001, 3. 1561—1564.
[7] O' Gorman L, Nickerson J V. An approach to fingerprint filter design [J]. Pattern Recognition, 1989, 22(1): 29—38.
[8] Sherlock D, Monro D M, Millard K. Fingerprint enhancement by directional fourier filtering [J]. IEEE Proc. Visual Image Signal Processing, 1994, 141(2): 87—94.
[9] Srinivasan V S, Murthy N N. Detection of singular point in fingerprint images [J]. Pattern Recognition, 1992, 25(2): 139—153.
[10] Ching-Tang Hsieh, Zhuang Yuan Lu, Tan Chi Li, et al. An effective method to extract fingerprint singular point. IEEE High Performance Computing in the Asia-Pacific Region [C]. China: Beijing, 2000, 2. 696—699.
[11] Wai Mun Koo, Alex Kot. Curvature-Based singular point detection. Audio and Video-Based Biometric Person Authentication, Third International Conference, AVBPA 2001 [C]. Sweden: Halmstad, 2001, 6—8. 229—234.
[12] Miao D, Maltoni D. Direct Gray-Scale minutiae detection in fingerprints [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(1): 27—39.
[13] Jain A K, Hong L, Boll R. On-line fingerprint verification [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(1): 302—313.
[14] Rath N K, Chen S, Jain A K. Adaptive flow orientation based feature extraction in fingerprint images [J]. Pattern Recognition, 1995, 28(11): 1657—1672.
[15] Xiao Q, Raafat H. Fingerprint Image Postprocessing: A combined statistical and structural approach [J]. Pattern Recognition, 1991, 24(10): 985—992.
[16] Seonjoo Kim, Dongjae Lee, Jaihe Kim. Algorithm for detection and elimination of false minutiae in fingerprint images. Audio and Video-Based Biometric Person Authentication, Third International Conference, AVBPA 2001 [C]. Sweden: Halmstad, 2001. 235—240.
[17] Naccache N J, Shinghal R. An investigation into the skeletonization approach of hilditch [J]. Pattern Recognition, 1984, 17(3): 279—284.

- [18] Tico M, Inmonen Eero, Rämö Pauli et al. Fingerprint recognition using wavelet features. IEEE Circuits and Systems, ISCAS 2001[C] . Australia: Sydney, NSW, 2001, 2. II: 21—24.
- [19] Ranade A, Rosenfeld A. Point pattern matching by relaxation[J] . Pattern Recognition, 1993, 12(2): 269—275.
- [20] Starink J P, Backer E. Finding point correspondence using simulated annealing[J] . Pattern Recognition, 1995, 28(2): 231—241.
- [21] Ansari N, Chen M H, Hou E S H. A Genetic Algorithm for Point Pattern Matching[M] . Chapt. 13. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [22] 漆远, 田捷, 邓翔. 基于遗传算法的指纹图匹配算法及应用[J] . 软件学报, 2000, 4: 488—493.
- [23] Stockman G, Kopstein S, Benett S. Matching images to models for registration and object detection via clustering[J] . IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1982, 4(3): 229—241.
- [24] Hrechak A K, McHugh J A. Automated fingerprint recognition using structural matching[J] . Pattern Recognition, 1990, 23(8): 893—904.
- [25] Isenor D K, Zaky S G. Fingerprint identification using graph matching[J] . Pattern Recognition, 1986, 19(2): 113—122.
- [26] Jain A K, Prabhakar Sali, Chen Shaoyun. Combining multiple matchers for a high security fingerprint verification system[J] . Pattern Recognition Letters, 1999, 20: 1 371—1 379.

Overview of Fingerprint Verification Technologies

DAI Ping-yang

(Department of Computer Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Fingerprint verification has been widely used in security area for its uniqueness and reliability. This paper contains an overview of fingerprint verification technologies about its history and development., discuss on enhancement, minutia extraction, minutia matching technologies.

Key words: fingerprint verification; image enhancement; minutia extraction; minutia matching