

手指静脉身份识别技术最新进展

谭莹^{1,2}, 王军^{1,2}

(1. 北京大学 机器感知与智能教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 北京大学 信息科学技术学院, 北京 100871)

摘要: 基于手指静脉的身份识别是一种新兴的生物身份识别技术, 由于手指静脉身份识别具有强防伪、低成本、易获取等优良特性, 在许多领域得到广泛应用, 成为一种最重要的生物识别技术之一。对手指静脉身份识别技术的现状和发展进行了总结和评述。首先, 回顾了手指静脉身份识别的起源和发展过程, 然后, 总结了该技术的通用实现流程, 对实现手指静脉的几大关键技术(如样本获取、图像增强、特征提取和匹配方法等)的最新研究成果进行了全面介绍。进一步, 对现有典型方法的性能进行了系统评估。最后, 总结了现有手指静脉识别技术的应用现状, 展望了其发展前景, 并指明了下一步的研究方向。

关键词: 生物特征身份识别; 手指静脉; 图像增强; 特征提取; 模式匹配

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2011)06-0471-12

Recent advances in finger vein based biometric techniques

TAN Ying^{1,2}, WANG Jun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Machine Perception (MOE), Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Biometrics based on finger vein patterns is a burgeoning biometric technique. It will undoubtedly become one of the most important techniques and receive extensive application in many fields because of its many virtues, such as protection against forgery, low cost, and ease of capture. This paper surveys the present condition and development of biometrics based on finger veins. First of all, the origin and development of finger vein based biometrics were reviewed; then, the general framework of finger vein based biometrics was presented. In particular, several key techniques for realizing finger vein based biometrics were examined, including sample image acquisition, image enhancement, feature extraction, and pattern matching. Furthermore, the performance of the state-of-the-art algorithms for finger vein based biometrics was systematically evaluated. Finally, the current situation and development prospects of the application of finger vein based biometrics were summarized and its future research direction was further indicated.

Keywords: biometric identification; finger vein; image enhancement; feature extraction; pattern matching

当今社会,随着人们交往范围的扩大和业务沟通的频繁,越来越需要自动确定交往对象的身份。随着人们对于安全的重视,身份识别已经不限于传统的金融、政府、机场等要害部门,也越来越多地出现在智能化楼宇、个人电脑访问、ATM取款、考勤和门禁等民用领域。这些身份管理的中心任务是判定个体的身份,它可被视为特定身份管理系统中与个

体相关联的信息^[14]。身份识别包括2个方面:认证(authentication)是指确定对象的身份;授权(authorization)是与认证密切相关的一种操作,经过认证的用户被赋予执行特殊业务的权力^[4]。

在当今的数字化时代,身份识别往往都是通过计算机来自动进行。当面对一个计算机系统时,如何辨识一个人一般基于3种方式:你知道什么,你有什么和你是什么^[4]。第1个层面:“你知道什么”,就是传统的口令和PIN码方式。这是一种低可靠性的方式,口令或PIN码可能会遗忘或丢失,也可能被窃取

收稿日期:2011-09-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60875080,61170057).

通信作者:谭莹. E-mail: ytan@pku.edu.cn.

或猜测出.第2个层面“你有什么”,常用的有IC卡或电子口令卡的方式,中国古代的虎符也是这种方式,这种身份证明方式的风险也是可能丢失或被盗用.生物特征识别第3种方式“你是什么”,就是通过检测对象的本身所特有的属性来确定身份.这种方式目前是最为安全可靠的身份识别方式,因为它只属于个体所有而且难于被窃取和伪造.自动的生物识别系统出现也不过是近几十年的事,这是得益于计算机处理技术的突飞猛进,但是识别方式的许多创意却已有数百年甚至上千年的历史.从文明起源开始,人们就会通过人脸来判别熟人或生人^[2,5].基于生物特征的身份识别通常分为基于行为和物理2类.行为方式包括签名识别、声音识别、击键习惯、步态分析等;物理方式包括指纹^[6]、虹膜^[7]、人脸、掌纹、掌形、DNA、手掌静脉、手指静脉等^[1-2].

最新出现的生物身份识别技术是手掌血管模式(hand vascular pattern),这是通过分辨手部血管的网络模式来辨别个体身份.其基本原理是不同个体的血管模式是不同的,而个体本身却保持稳定,因此可以用来区分个体.1992年Shimizu最早关注到手掌血管模式的潜在应用^[8].1995年Cross和Smith使用热成像技术来获取手背的血管模式并将其应用到生物身份识别^[9].

2000年Kono等提出仅需检测手指中的静脉就能进行个体的身份验证^[10].血管识别技术分成了3个分支,分别是手掌、掌背血管和手指静脉^[1].

手指静脉模式一经提出就受到了学界^[3,11-14]和商界^[15-18]的广泛关注.Yanagawa等对不同性别、不同年龄段的506个人手指进行统计发现,不仅不同人处于同一位置的手指静脉特征不同,同一个人不同位置的手指静脉特征也有明显差异,能够清楚地地区分开^[19].与其他血管模式相比,它具备其他血管模式的所有优点,并且由于手指的灵活性带来获取设备的多样化和小型化.与其他的基于生物特征的身份识别方式相比,手指静脉有如下优势^[11,17,20]:

1)具有很强的普遍性和惟一性,绝大多数人的静脉血管图像随着年龄增长不会发生根本性的变化,而不同人拥有不同的静脉图像.

2)由于手指静脉藏匿于身体内部,所以不存在仿制或失窃的风险,人类手部表面的皮肤条件不会对识别工作造成影响.

3)采用红外线成像技术,其非侵入性和非接触性,可以确保使用者的便捷性和清洁性.

4)由于手指静脉的形状相对稳定,在CCD上的

成像也较为清晰,可以采用低分辨率设备进行样本采集,得到较小尺寸的样本图片,图像处理方法也相对简单.目前,基于手指静脉的身份识别装置已经应用在ATM机、汽车点火装置、门禁和计算机安全等诸多方面^[13,17,21].在这些方面,手指静脉已经开始逐步取代传统的生物身份识别技术,如指纹、掌纹、虹膜等.

1 手指静脉身份识别原理与流程

1.1 原理

手指静脉身份识别的原理是:当使用波长为700~1000 nm的红外光源照射手指时,红外线会穿透多数人体组织,静脉中的血红素会吸收这些波长的红外线,因此,静脉的光反射就会低于周围的组织,手指静脉图像就可以使用红外敏感的CCD(charge-couple device)摄像头来获取到^[9-12,22],通过比较输入手指静脉的红外图像特征与预先存储的个体的图像特征,就可以实现对身份进行判别.

1.2 流程

手指静脉身份识别的一般流程如图1所示,按照功能划分可大体分为3个模块:注册、匹配和判别^[3,12].

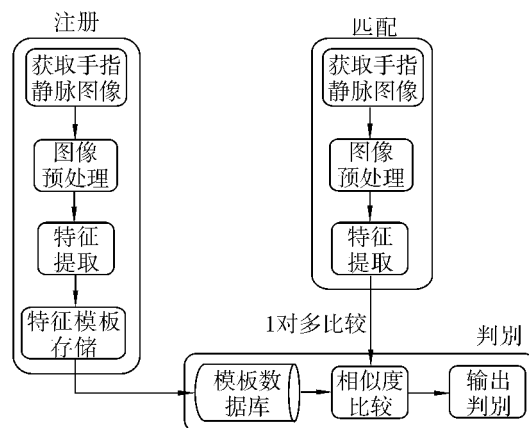


图1 手指静脉身份识别流程.

Fig.1 Flowchart of finger vein authentication

1)注册.注册是构建用户信息的过程,通过预先收集用户的手指静脉特征建立用户特征数据库.这一过程中包含了获取手指静脉图像,对图像进行预处理,提取特征,把特征模板存储到数据库中.

2)匹配.匹配是用户信息验证的过程.在需要进行用户身份验证的时候,采集用户的手指静脉图像用于比对.该过程包括获取手指静脉图像、图像预处理和特征提取3部分.这一过程与注册过程相似,但是也有许多不同,除了在处理流程上与注册过程不同外,也有很多方法在注册和匹配过程中使用了不同的特征提取方法.

3) 判别. 手指静脉的特征判别是对输入的用户手指静脉特征与数据库中的存储特征进行比对, 输出判别结果. 判别过程又分为认证和识别. 所谓认证是指判断输入的手指静脉特征是否属于特定用户, 是一对一的匹配过程. 而识别是指判定输入的手指静脉特征是哪一个用户, 是一对多的匹配.

2 手指静脉身份识别的关键技术

2.1 手指静脉图像的获取

获取手指静脉的图像是手指静脉身份识别的基础, 通过对手指静脉图像及其处理结果进行个体分辨. 本节首先介绍获取手指静脉图像的研究.

2.1.1 手掌血管图像的获取

手指静脉研究是手掌血管研究的进一步拓展, 最初的手指静脉获取设备也是从手掌血管研究领域的沿用. 因此, 首先介绍手掌血管的获取方法. 手掌上的血管被皮肤和肌肉覆盖, 肉眼很难观察到, 使用普通的图像采集设备也无法获得足够清晰的血管图像. 很多研究者利用了血管的物理特性, 使用各种辅助手段来获取清晰的血管图像. 根据采用的原理不同, 主要分为2个分支:

1) 利用热成像原理获取静脉图像.

1993年, Mehnert等^[23]发现能在红外光谱中通过热成像标记血管并剔除其他部位的方法获取清晰的血管图像. 原理是血管与周围组织的温度差异比肉眼所见的差异要明显得多. 但是由于当时设备的灵敏度不够和成本的原因, 这一方法所取得的静脉图像效果不是很好.

2004年, Lin和Fan^[24]提出一种使用热成像的方法来获取掌背静脉血管图像的方法. 原理同样是基于静脉血管与周围皮肤的温度不同, 并且皮肤的温度形成一定的梯度, 通过热辐射定律— Stefan-Boltzmann定律^[25], 使用式(1)来获得静脉的热成像.

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (1)$$

式中: W 是光辐射 (W/cm^2), ε 是辐射率, σ 是 Stefan-Boltzmann 常数 (约为 $5.6705 \times 10^{-12} W/cm^2$), T 是目标的表面温度单位.

人体的红外辐射依赖于皮肤的辐射度、皮肤温度、空气分子组成、空气湿度以及成像设备与皮肤的距离等^[25]. 从 Planck 曲线可以看到, 光谱辐射度与波长有关^[25]. 从式(1)中可以看出, σ 是常数, ε 对于同类探测目标也是常数, 如果采集设备能够避免空气变化的直接影响, 介质的影响也可被忽略. 因此皮肤表面温度 T 直接决定 W , 也就决定了图像的对比度和质量. 使用工作波长为 $3 \sim 5 \mu m$ 或 $8 \sim 14 \mu m$

的红外摄像头就可以避开 $400 \sim 700 nm$ 的可见光范围, 取得清晰的红外图像.

2) 利用血管对红外线吸收的特性获取静脉图像.

1995年, Cross等^[9]在研究中发现, 虽然普通 CCD 被设计为工作在可见光区域, 但对于近红外光谱仍然足够敏感, 工作光谱能够达到 $1100 nm$. 人体向外辐射红外线在光谱 $3000 \sim 14000 nm$ 时达到峰值 $10 W/cm^2$ ^[25]. CCD 的工作频率范围不足以达到捕获人体红外辐射峰值的能力, 而且人体辐射红外线也太弱, 无法被 CCD 所捕获. 他们使用波长为 $900 nm$ 的冷红外光源照射手掌, 发现静脉中的血红素吸收多数的红外光而周围组织基本不吸收红外光, 静脉在图像上比周围组织更暗, 因此 CCD 能够清晰的获取到静脉的图像. 之后, Zhao等^[14]用类似 Cross等^[9]的方法使用低成本的 CCD 来获取到清晰的手掌血管图像. 这是因为, 尽管普通 WEB 摄像头 CCD 的感光峰值处于可见光范围内, 在近红外波段已经大大降低, 但是也有较好的响应^[22], 使用这种方式, 就能大大降低采集设备的成本.

2.1.2 手指静脉图像的获取

手指静脉图像获取方法基本上都是根据 Cross等^[9]的方法的原理, 使用波长为 $700 \sim 1000 nm$ 的红外光源照射手指, 红外线会穿透多数人体组织, 静脉中的血红素会吸收这些波长的红外线, 手指静脉会在 CCD 上成像出来^[11-12, 22].

2002年 Kono等^[26]首先用波长为 $810 nm$ 的 LED 近红外光源照射, 从 CCD 中获取到静脉成像. LED 阵列照射手指时, 由于手指厚度不同, 因此光线强弱不均, 因此需要手动调节不同位置灯的强度 (如图2).

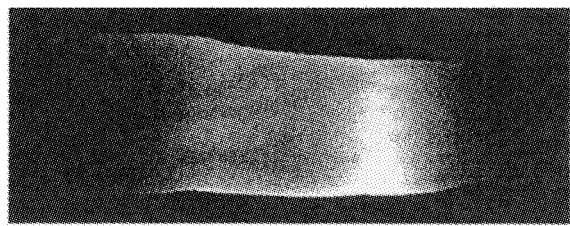


图2 Kono 等的方法采集的手指静脉图像^[26]

Fig. 2 Finger vein image captured by Kono et al's method^[26]

2006年 Hashimoto 总结了 Hitachi 公司的研究成果, 比较了使用不同角度光源对成像的影响 (如图3)^[17]. 从图3中可见, 穿透式照射的成像效果最佳, 但是占用空间比较大, 影响了设备的小型化, 反射式占用空间最小但是成像效果不佳. Hashimoto 还给出了一种从两侧照射的设计方式, 没有给出效果图, 但

从原理而言,是以上2种方法的折衷,在减小设备空间的同时也只付出少量的成像质量作为代价.

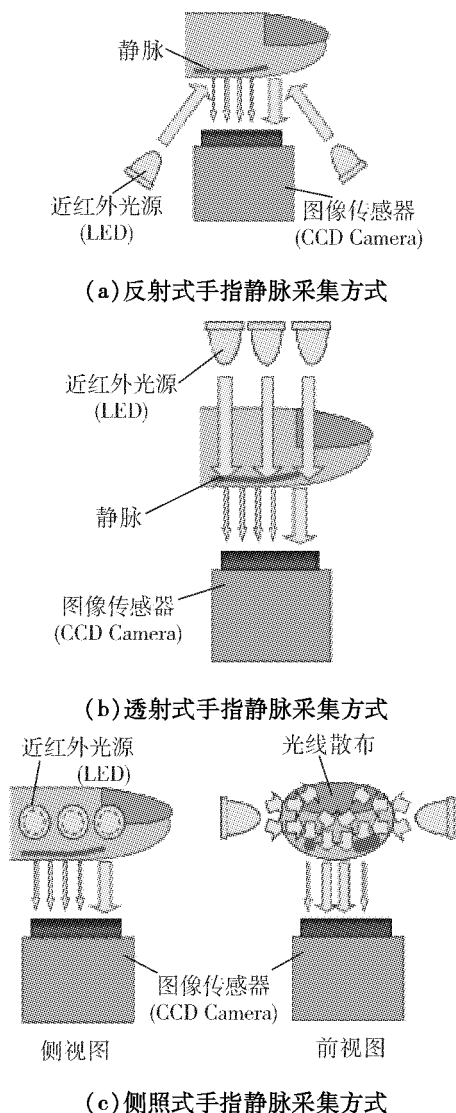
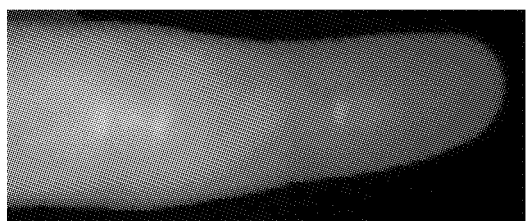


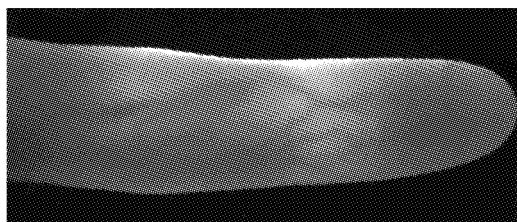
图3 Hashimoto 提出的采用不同光照方式进行图像采集^[17]

Fig.3 Hashimoto's proposed methods to obtain finger vein images by different illumination directions^[17]

2008年 Dai等^[11]提出使用一种自适应的可控光源方法来实现手指静脉采集中的光照一致.摄像头根据收到图像中的光线强度分配将调节信息反馈到光源控制单元,调整不同位置的光强,使得获取的图像光照均衡.这样有效地提高了手指静脉红外图像的质量(如图5).



(a)反射式



(b)透射式

图4 Hashimoto 方法采集的手指静脉图像^[17]

Fig.4 Finger vein images captured by Hashimoto's method^[17]

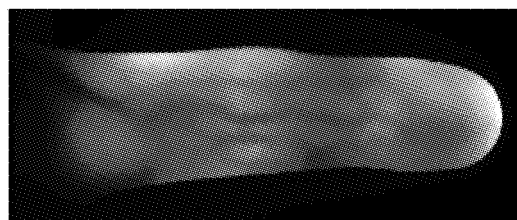


图5 Dai 等的方法采集的 CCD 成像的手指静脉图像^[11]

Fig.5 Finger vein image captured by Dai et al's method^[11]

2.2 手指静脉图像的预处理

由图像获取装置直接得到的手指静脉图像是不能直接用于后续处理.因为,首先图像可能会有偏移和变形,其次图像中存在大量的噪声信息,影响到对有用信息的解读.因此,通过对图像进行必要的预处理使之能够更符合后续操作的要求具有重要的实用意义^[27-28].红外设备获取到的手指静脉图像需要进行如下的预处理过程,将其转化为适合处理的对象(如图6)^[3,29].

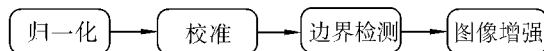


图6 手指静脉红外图像预处理流程

Fig.6 Pre-processing procedures of infrared finger vein image

1) 归一化图像.归一化是指把图像处理成统一规格的图像.将图像大小变换到适合处理的统一尺寸,既可以提高处理速度,又保证了匹配是在有效的范围内进行.

2) 校准.在获取手指静脉的红外图像时,很难保证手指的位置完全一致.手指的放置可能会偏离 CCD 主轴线,存在偏移和倾斜2种影响图像质量的因素.

3) 边界检测.设备获取的手指静脉红外图像包含背景噪声,在特征提取时会影响到有效特征的获取.为了获取关注的区域(region of interest, ROI)中的静脉特征图像,需要去除背景,保留手指图像.这一操作通过检测手指边缘与背景的灰度梯度变化来

获得。

4) 图像增强. 图像增强技术是预处理工作的另一个重要方面,其主要作用一是去除图像中的噪声,二是增强关注的特征^[30-31]. 经过增强的图像消除了噪声影响,使特征更为明显,可以有效地提高特征提取的质量,以利后续的其他方法使用. 通过对廉价设备采集的图像进行增强处理,提高特征提取质量,在保证识别率的情况下,就可以不必采用昂贵的采集设备,降低成本. 传统的图像增强方法分为频域和空间域方法两大类^[32]. 频域的图像处理方法是一维信号处理在二维空间的扩展^[27,32-33].

这其中最为关键的环节是图像增强处理,通过提高图像的品质能够有效地提取出更加完整的特征. 前面提到的滤波算法的去噪能力是有限的,另一方面,在去除噪声的同时也模糊了图像的细节,不能满足后续的特征提取的需要. 在传统的基于滤波的图像增强操作上,已经有研究者使用遗传算法 (genetic algorithm, GA) 或遗传规划算法 (genetic programming, GP) 来自动生成基本操作的序列组合^[34-35]. 这一途径有效地解决了搜索空间巨大的问题,但是由于缺乏对训练结果的有效评估方法,仍然需要人工干预. GA 与 GP 的形态学操作算法使用图像本身和指令代码作为端点集,图像操作的命令作为函数集,这一分支明显对于图像处理有更强的针对性^[36-38]. 同时,在进化过程中对于图像效果增强使用自动评估的方式^[39],能够有效地提高进化的效果,避免人为干预,实现图像增强的自动进行. 由 Wang 和 Tan 等^[40-41]采用 GP 结合形态学图像处理对手指静脉红外图像增强进行了研究. 通过这一方法手指静脉红外图像得到了很好的增强,能够提取出来更清晰连续的特征,得到更好的识别效果.

2.3 手指静脉特征提取方法

由于手指静脉隐藏在皮肤下面,由红外 CCD 获取的图像经过预处理后效果有所提升,但并不能清晰到能直接用于匹配. 为了提高匹配的效果和运算的效率,需要从图像中提取出静脉的特征,以此作为匹配的依据.

2.3.1 沿用手掌静脉特征提取方法

在手指静脉之前,很多研究者对手掌静脉的特征提取研究已经有很多年了,并提出了很多有效的方法. 因此,首先研究提取手掌静脉的方法,并试图将一些典型方法用于手指静脉的特征提取.

2000 年 Im 等提出一种基于高效 DSP 芯片处理的手掌静脉特征提取方法^[42-43],它集成了低通滤波、高通滤波、阈值化等操作. 这一方法,不必使用计

算机来进行处理,实现了设备的小型化,但是由于处理方法和处理能力的有限,特征提取效果不佳.

2005 年丁宇航等^[44]提出了使用动态阈值的方法来提取手掌静脉特征的方法 (TIM). 其原理是静脉在图像上的成像会比背景图像暗,并且静脉占据的空间少于背景,因此计算某点邻域的平均值,如果低于这个均值就认为是静脉特征. 该方法用于手掌静脉特征提取时极易受到噪声的影响,需要前置的滤波去噪. 该方法提取到的手掌静脉图像,虽然手掌静脉的图像较为清晰,但提取出的静脉特征仍有大量的噪声信号. 把该方法实现后应用到手指静脉的特征提取时,发现即使经过平滑滤波,最终结果仍然有大量的噪点,而且由于窗口选择比较大,运算速度较慢.

2006 年王凌宇^[45]提出利用 Watershed 方法提取手掌静脉的图像,取得了不错的效果. Watershed 方法是一种形态学图像操作方法,模拟对象沉入水底,这个过程中在脊线上建立起分割不同区域的大坝,最终完成对不同区域的分割^[32,46]. 2009 年 Wang Kejun 等^[47]进一步对该方法进行了研究,使用标注最低点的方法来获取较好的分割,但是将该方法实现应用到手指静脉特征的提取后发现效果不佳. 原因是手指静脉图像相对于手掌太小,过于密集,手掌静脉提取可以只考虑较粗的静脉,能够保证足够的特征,但是手指静脉必须提取到很细的静脉. 究其原因,还是由于获取图像的噪声过多,最终导致图像过于破裂,这也是 Watershed 方法本身的限制^[32,46].

2.3.2 手指静脉特征提取方法

手掌静脉的特征提取方法直接用于手指静脉效果不明显,很多研究者针对手指静脉的特点提出了针对手指静脉的特征提取方法.

2004 年 Miura 等^[12]提出一种沿着静脉方向提取静脉特征的算法. 如图 7 所示,假设当前已经处理完毕的点在 (x_c, y_c) , 在以此点为圆心,半径为 r 的圆上点 p 中选取 $(s+t-2p)$ 值最大的 θ 角度作为前进方向,重复这一过程直到静脉的末端. 这一方法的原理是静脉底部的灰度值低于两侧的背景,通过这一特性将静脉检测出来. 虽然该方法对于质量较好的图像比较有效,但应用在噪声较大的红外图像下,效果就很差. 如图 7 中 s, t, p 3 个点,如果任意一个点是个噪声点 (过高或者过低的灰度),那么结果就会受到影响.

2005 年 Miura^[48]又提出一种通过检测横截面上曲线变化来判断静脉特征的算法. 这一方法同样利用了静脉图像的灰度特征,故该方法也易受噪声

的影响.

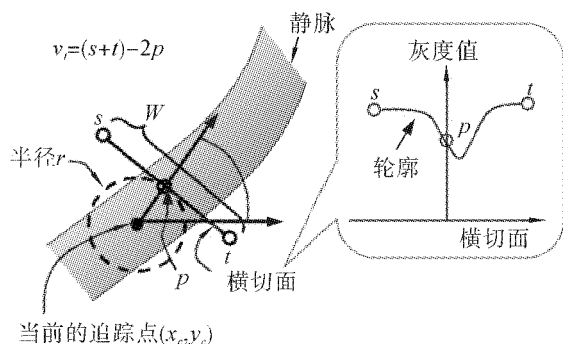


图7 沿静脉方向提取特征

Fig. 7 Feature extraction along vein direction

2006年, Hashimoto^[17]提出了谷型算法,它利用静脉的横截面在红外CCD上的成像是由浅到深然后再变浅的特性,这样灰度值在这个剖面上就是一个山谷的形状,如图8所示.这种山谷形状不随着静脉的方向改变而产生变化,通过对谷型谷底的检测,就得到相应的静脉图像.这种方法的优势在于不需要前置的去噪过程,具备了较快的计算速度.但是根据研究发现,当图像清晰度较高的时候,这种方法能够忽略掉少量噪声,但是当图像噪声较大时,这种方法效果就不好,2008年余成波等^[20]在此基础上作了改进(VR),使用模板的方法进行快速的谷型验证,提高了计算速度,但是更易受到噪声的影响.

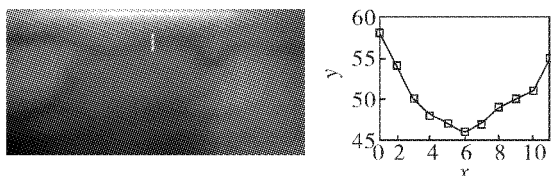


图8 静脉图像的山谷状横截面

Fig. 8 The valley region of the cross section of finger vein image

2.3.3 频率域的手指静脉特征提取

以上方法都是通过空间域图像处理,然后提取手指静脉图像的特征.还有研究者采用频率域图像处理,基于频率域的特征进行手指静脉图像的特征提取,如离散余弦变换(DCT)、离散小波变换(DWT)^[49]、Random变换^[13].由于静脉特征与周围的像素具有很强的相关性,因此通过少量在变换域的特征点就能够代表整幅图像的内容.频率域的变换也有很独特的特性,如Random变换对仿射变换不敏感,因此对于图像旋转具有很强的鲁棒性^[13].

2.3.4 小结

根据对以上各种方法的总结,应当针对手指静脉图像的特点来进行特征提取研究.手指静脉成像中静脉底部的灰度值低于两侧的背景,根据手指静

脉成像时与背景形成的局部特征来提取手指静脉特征,就会得到比较好的结果,如文献[12, 17],但是此类方法的效果均易受到噪声的影响.借鉴频域处理方法中,考察静脉特征与周围的像素具有很强的相关性,变换域的少量特征点就能够代表全局信息.因此,综合考虑局部信息和全局信息,从2个方面进行特征提取的研究,以这2类信息的综合作为手指静脉特征,这是解决这一问题的有效途径.

2.4 手指静脉特征匹配方法

根据手指静脉的图像鉴别个人身份是一个典型模式识别问题,即给定一个手指静脉图像,根据数据库中存储的已有图像,判别其是否符合数据库中的样本来鉴别身份.模式识别的方法主要分为基于模板匹配、基于统计、基于句法分析和基于神经网络等^[50].就手指静脉特征的模式匹配,有结构化匹配、模板匹配方式和智能方法.

2.4.1 结构化的手指静脉特征匹配

结构化匹配是提取特征点集,包括线条的端点和分叉点,然后匹配相应的点.这一方法在手掌静脉特征匹配中应用得较多^[44, 51-53],分别使用静脉的端点和分叉点来匹配手掌静脉.由于手掌静脉比较清晰,因此所能获取的特征端点能够起到较好的匹配效果.也有研究者将这种方法应用到手指静脉的特征匹配上^[11, 29],但是手指静脉本身尺寸较小,并且获取的特征不够清晰,能够得到的端点比较少,因此这种方法不适合手指静脉特征匹配.

2.4.2 基于模板的手指静脉特征匹配

模板匹配是最早应用于模式识别的方法,也是最简单直观的一种方法,通过度量样本中的点或线条的距离或对应情况,来判断相似程度^[50].手指静脉的识别当前使用最多的也是基于模板匹配的方法,它是指给定2幅图像,度量其相似度.2004年, Muira等^[12]最早用模板匹配的方法进行手指静脉特征匹配.为了避免直接的模板匹配受模式变形的影响,他们提出了“模糊空间”的概念,对于提取出的手指静脉特征,忽略微小的错误来匹配.用于度量模板距离的常用方式有海明距离(Hamming distance)^[4]和Hausdorff距离^[54-57].

Hausdorff距离及其改进在手指静脉特征匹配中应用得比较多.2005年Wang等^[58]使用线段Hausdorff(Line segment Hausdorff Distance)距离来进行手掌静脉的匹配.这一方法能有效地避免Hausdorff距离的缺点,带来更准确的匹配.2008年Wang等^[51]采用了改进的Hausdorff距离(modified Hausdorff distance)进行匹配.这一方法在匹配中比

原始的 Hausdorff 距离更为有效^[59]. 2009 年 Yu 等^[29]使用改进的 Hausdorff 距离结合分支点来进行模板匹配. 其方法是提取出的手指静脉特征, 经过细化后成为线条, 计算测试图像与目标图像的改进 Hausdorff 距离, 以此来判定图像是否属于同一类. 2009 年, Lee 等^[60]使用手指静脉的分叉点和交叉点的 MHD 来进行特征匹配, 效果不是很明显.

2.4.3 采用智能分类技术的手指静脉特征匹配

有的研究者使用智能方法来进行手指静脉特征匹配. 机器学习的手指静脉匹配这一分支出现得比较晚, 但是有较好的发展前景. 目前用于其他身份识别技术的方法能直接拓展到这个领域^[3]. 这一分支把身份识别问题当作纯粹的模式识别问题^[3], 使用人工智能^[13]或机器学习^[61]的方法来处理.

2004 年, Shimooka 和 Shimizu 提出使用人工免疫的方法来进行手指静脉的模板匹配^[62], 使用手指静脉图像作为抗原, 抗体是一些部分的模板, 通过分割同一手指的图像来获得. 自体 and 异体的描述通过正向选择和反向选择来进行. 正向选择是指减少难于与自体组织结合的淋巴细胞, 反向选择是减少与自体组织结合的淋巴细胞. 这一方式有一定的效果, 但性能还比较差. 2009 年, Wu 和 Ye 提出了使用 RBF (radial basis function) 网络和 PNN (probabilistic neural network) 来进行手指静脉特征分类^[13], 都取得了不错的效果. 2010 年, Liu 等^[61]提出使用流型学习的方法来进行手指静脉特征的分类, 这一方法的效果与注册时采集的样本数量正相关, 达到有效的性能需要采集数十个样本, 这样就降低了可行性.

3 当前方法的性能评价

手指静脉身份识别作为一种新兴的生物识别技术, 必须达到一定的安全强度才能取得人们应用的信心. Yanagawa^[63]在文献[19]中给出了足够安全强度的指标预期值. IBG (international biometrics group) 在对于 Hitachi 的商用手指静脉识别装置进行了测试. 本文中介绍的各种方法大都给出了自己的实验结果, 也有些只是介绍了方法, 对于方法使用的实际效果没有给出. 不同文献中使用了不同的评价指标, 根据分析发现, 在各个方法中共有的对方法评价有意义的指标有如下 5 个:

1) 错误匹配率 (false match rate, FMR), 也叫做 FAR (false accept rate). 用于度量输入模式与数据库中模板错误匹配的比例. 即不该被认证的个体被系统错误接受的百分比.

2) FNMR (false non-match rate) 是指错误未匹配率, 也叫做 FRR (false reject rate). 用于度量输入模式未被数据库中模板匹配的比例. 即本该被系统接受的输入模式却被拒绝的比例. FMR 和 FNMR 是阈值 T 的函数, 当 T 从 0 变化到 1, FMR 从 1 变化到 0, 与此同时, FNMR 从 0 变化到 1.

3) ROC (receiver operating curve) 用于揭示 FMR 与 FNMR 的关系的曲线. 以 FMR 和 FNMR 分别为纵横坐标, 所构成的曲线就是 ROC 曲线.

4) EER (equal error rate) 是 FMR 与 FNMR 相等时的值. EER 可从 ROC 曲线图上得到 (ROC 曲线与 $y = x$ 的交叉点). 用于比较不同的 ROC 曲线的效果, 一般来说, 较小的 EER 代表较好的效果.

5) 响应时间 (response time). 一个实用系统必须在识别率和识别速度上进行折衷. 单个个体特征处理的时间和样本空间的大小, 决定了处理的整体时间. 因此在样本空间足够大的时候就对单个个体的处理时间提出了要求. Tang 在文献[64]给出了一个牺牲少量精度的情况下, 但是仅用了原有方法的 0.4% 的时间. 这一结果是 2 种方法都是 C++ 语言在 Windows7 操作系统上, CPU 是 Intel E8400 3.00 GHz, 4 GB 内存条件下取得的.

表 1 和表 2 给出了各种方法的识别效果的比较. 从表中可以看出有的方法尽管效果非常好, 但是由于采用的数据集太小, 并不能真正代表真实水准. 由于公共数据集的缺乏, 即使是给出应用效果的方法, 往往也只是在自己的数据集上进行的测试. 这些自行采集的数据集存在主要问题有: 首先是数据集的规模较小, 只有几十个样本和几百幅图像; 其次是数据集的典型性不够, 采集的对象往往是在实验室内部或者熟人之间; 第三是采集设备参差不齐, 采用高成本、高精度的设备取得的图像本身质量较高, 也未必能代表方法的有效性. 这些原因使得各个方法的可信度受到质疑. 现在公认的是, 一个可信的数据集应该是包括不同的性别、种族和充分分散的年龄阶段^[51]. IBG 在进行手指静脉测试时, 还考虑了在不同的日期进行测试, 同一天的测试往往会比隔日的测试效果好些^[63]. 目前, 文献[65]提供了一个公共测试平台, 包括了 5 208 个人的 50 700 幅手指图像, 其他研究者可以提交自己算法的程序在此平台上验证. 文献[64, 66]是这个平台上的结果. 这个数据集虽然在样本数量上达到了要求, 但是仍然存在人种和年龄分布较为单一的不足.

表1 典型方法的实验条件

Table 1 Experimental conditions of typical methods

| 序号 | 方法 | 手指 | 样本数 | 人数 | 每人采样 |
|----|-----------------------------|----------|--------|-------|-----------|
| 1 | Kono(2002) ^[26] | 左小指 | 1 356 | 678 | 2 |
| 2 | Miura(2004) ^[12] | 未知 | 678 | 未知 | 每手指 2 幅 |
| 3 | Miura(2005) ^[48] | 未知 | 678 | 未知 | 每手指 2 幅 |
| 4 | Zhang(2006) ^[67] | 未知 | 3 200 | 未知 | 每手指 8 幅 |
| 5 | Lee(2009) ^[60] | 除拇指外其他手指 | 6 400 | 80 | 每手指 10 个 |
| 6 | Wu(2009) ^[13] | 中指 | 250 | 25 | 10 |
| 7 | Yu(2009) ^[29] | 未知 | 500 | 未知 | 每手指 10 幅 |
| 8 | Liu(2010) ^[61] | 中指 | 11 480 | 164 | 70 |
| 9 | Huang(2010) ^[66] | 未知 | 50 700 | 5 208 | 每手指 5 幅 |
| 10 | Tang(2010) ^[64] | 未知 | 50 700 | 5 208 | 每手指 5 幅 |
| 11 | Wang(2011) ^[41] | 未知 | 1 896 | 未知 | 每手指 4~6 幅 |

表2 典型方法的技术特点与性能比较

Table 2 The technique characteristics and performance comparisons of typical methods

| 序号 | 技术特点 | 性能 |
|----|--|--|
| 1 | 首次提出使用近红外光源获取手指静脉图像 | FAR = 0.000 035 山 0.046% FRR = 0.1% |
| 2 | 使用追踪静脉截面谷形的改变方向来提取手指静脉特征 | EER = 0.145% |
| 3 | 使用手指红外图像的横截面上最大的曲率来提取手指静脉特征 | EER = 0.000 9% |
| 4 | 使用了多尺度自适应的 Curvlet 方法增强图像,提高特征提取效果 | EER = 0.128% |
| 5 | 通过估计光线穿透皮肤的散射函数来使手指静脉红外成像的效果更加突出 | EER = 0.76% |
| 6 | 使用 Radon 变换来提取手指静脉特征,并首次将这一技术应用到汽车驾驶员识别上 | 识别率 >99.2% |
| 7 | 提出了一种简单的基于谷形模板的手指静脉特征提取方法 | EER = 0.761% |
| 8 | 使用 ONPP 的方法对图像进行降维,并使用了 Manifold 来进行分类 | 识别率 = 97.8%, EER = 0.8% |
| 9 | 利用宽线条检测的方法将手指静脉与背景区分来提取特征 | EER = 0.87% |
| 10 | 将提取的手指静脉特征比例缩小后编码,精度损失很小的前提下极大地提高了匹配速度 | Hit Rate = 98.5% |
| 11 | 使用基于 GP 的方法进行图像增强,提高手指静脉特征的提取精度 | FAR = 3.9% |

4 手指静脉身份识别的发展趋势

4.1 应用前景

自从 1997 年第一个使用手掌血管模式的商用设备投入应用以来,上万个使用手掌或手指静脉身份验证的设备被广泛应用于存取控制、医院、学校、银行等部门。尤其是自手指静脉模式得到重视后,其以设备小巧、成本低廉,更是取得了广泛应用,已经

在门禁、考勤等应用方面开始逐步取代指纹识别。根据 IBG (International Biometric Group) 2009 年的报告,生物身份验证已经是一个年度交易近 50 亿美元的行业。尽管是最新出现的生物身份验证技术,静脉识别已经得到了广泛的应用,已经占到了生物身份验证市场的 2.4% (如图 9),并且份额还在逐步扩大^[18]。Sony^[16]、Hitachi^[15] 等公司都已推出了便携的 USB 方式的验证装置。在 2006 年的 IBG 测试中,东

芝公司的手指静脉验证装置效果与 IrisGuard 的虹膜验证效果不相伯仲^[63]. 2008 年吴等提出用手指静脉验证汽车驾驶员的身份. 2010 年 7 月第一台使用手指静脉验证身份的 ATM 设备在波兰投入应用^[21]. 2006 年 Hashimoto 对手指静脉身份验证的应用前景进行了展望^[17], 目前来看, 这些展望多数已经得到了实现.

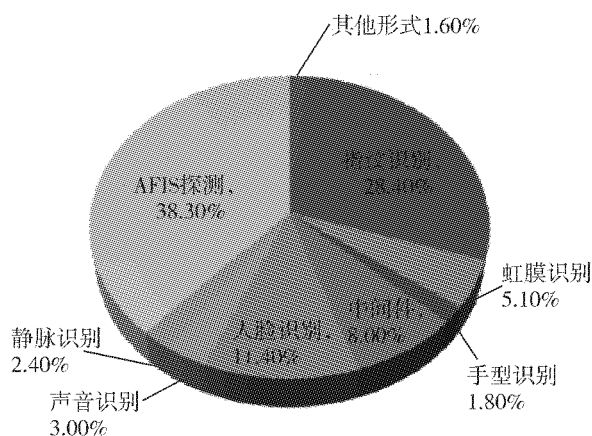


图9 2009年不同的生物特征身份识别所占市场份额^[18]

Fig. 9 The market shares of different biometric authentications in 2009^[18]

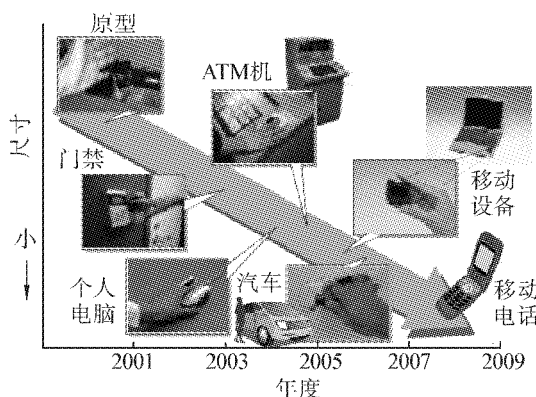


图10 Hashimoto 对手指静脉识别发展的展望^[17]

Fig. 10 Hashimoto's prospect about the application of finger vein authentication^[17]

4.2 技术研究方向

手指静脉模式是一种相对较新的技术,但已经在生物身份识别领域受到广泛重视. 最近几年来,很多研究者投入了大量的精力来提升这一技术. 这一技术已经得到了广泛的认同,并且已经得到广泛应用,由此可以预见,将来会取得更大的发展. 尽管手指静脉模式提供了高准确度和高可靠性,其性能还是会受到某些外在条件的影响,例如过冷的天气、不确定的干扰噪声等. 未来需要在以下几个方面进行深入研究:

1) 研究更有效的手指静脉图像获取设备. 获取

设备应当适应各种工作条件,并具有高可靠性,不受天气、光照、温度的影响. 并且设备应该重点朝小型化发展,以便能应用到各种设备上. 同样地,设备也应朝低成本发展,提高用户的接受程度.

2) 研究高噪声环境下的图像增强算法. 通过预处理操作,去除噪声、阴影以及其他干扰,获取到更加清晰的图像特征,为了后续的操作能够提取出更有效的特征. 图像增强效果的提高,同样有助于降低设备的精度,进而可以降低整体的成本.

3) 发展效率更高和更健壮的特征提取算法. 获取的手指红外图像由于是非接触成像,而且本身具有很多噪声,尽管经过图像增强这一过程,仍然会有很多噪声的影响,因此手指静脉特征提取算法必须有很高的鲁棒性. 同时,由于采集设备和手指本身尺寸的限制,获取的静脉图像尺寸很小,为了能够有效地进行后续的比对,需要提取出尽可能连续和准确的静脉模式.

4) 发展准确度更高的匹配算法. 有效的匹配算法能够降低非匹配个体的分值,提高匹配个体的分值,并且能够消除偏移、倾斜等情况对样本的影响. 选用有效的比较方法,能够准确地表达手指静脉样式的信息,并给出更准确的识别率. 并且,当输入手指模式与数据库中存储的模式进行比较时,高效率的比较算法就能在同样的时间内,完成更多的样式比较,从而降低整体的识别时间,这对于提高用户体验具有重要意义.

5) 多种生物识别方式的融合提高识别效率. 目前对各种生物识别技术的研究都已很深入,有研究者综合多种生物识别技术来提高整体识别效果,如王等^[51,68]综合手掌静脉与掌纹来提高识别率. Hao等^[69]综合了指纹、掌纹、手掌形态和手掌静脉的方式. 也有研究者已经开始研究综合指纹和手指静脉的方式. 这将提高识别效率并进一步防止外部侵入.

6) 为广泛应用而进行各项研究工作. 手指静脉身份识别在各个领域的应用需要进行核心软件、软件平台和公共测试标准库建设等方面的研究. 通过这些工作,使得这一技术能够推广到实际应用中.

5 结束语

基于手指静脉的身份识别是一种新兴的生物身份识别技术,对该项技术的研究目前还处于上升阶段. 尽管已经有部分成果已经应用到日常生活中,但是还远未达到成熟的程度. 本文对手指静脉身份识别的关键技术进行了详尽的总结,并对现有的典型方法进行了充分的评价,发现了存在的问题,指明了

下一步的发展方向. 相信作为一种新兴的生物特征身份识别技术, 手指静脉身份识别技术将在理论研究和商业应用方面都将获得大力的发展, 具有远大的前景.

参考文献:

- [1] DAVIS D, HIGGINS P, KORMARINSKI P, MARGUES J, ORLANS N, WAYMAN J. State of the art biometrics excellence roadmap[EB/OL]. [2008-09-15]. <http://www.biometriccoe.gov/SABER/index.htm>.
- [2] JAIN A K, FLYNN P, ARUN A R. Handbook of biometrics[M]. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag, 2007: 15-21.
- [3] LUO F X, YU H, PAN J S, CHU S C, TSAI P W. A survey of vein recognition techniques[J]. Inform Technol J, 2010(9): 1142-1149.
- [4] WEAVER A C. Biometric authentication[J]. Computer, 2006, 39(2): 96-97.
- [5] GOLDSTEIN A J, HARMON L D, LESK A B. Identification of human faces[J]. Proceedings of the IEEE, 1971, 59(5): 748-760.
- [6] LEE H C, GAENSSLEN R E. Advances in fingerprint technology[M]. 2nd ed. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press LLC, 2001: 10-15.
- [7] WILLIAMS G O. Iris recognition technology, in security technology[C]//30th Annual 1996 International Carnahan Conference. [S. l.], 1996: 46-59.
- [8] SHIMIZU K. Optical trans-body imaging feasibility of optical CT and functional imaging of living body[J]. Medicina Philosophica, 1992, 11: 620-629.
- [9] CROSS J M, SMITH C L. Thermographic imaging of the subcutaneous vascular network of the back of the hand for biometric identification[C]//IEEE International Carnahan Conference on Security Technology. Sanderstead, UK, 1995: 20-35.
- [10] KONO M, UEKI H, UMEMURA S. A new method for the identification of individuals by using of vein pattern matching of a finger[C]//Proceedings of the Fifth Symposium on Pattern Measurement. Yamaguchi, Japan, 2000: 9-12.
- [11] DAI Yanggang, HUANG Beining, LI Wenxin, XU Zhuoqun. A method for capturing the finger-vein image using nonuniform intensity infrared light[C]//Proceedings of the 2008 Congress on Image and Signal Processing. Washington, DC, USA, 2008, 4: 501-505.
- [12] MIURA N, NAGASAKA A, MIYATAKE T. Feature extraction of finger vein patterns based on iterative line tracking and its application to personal identification[J]. Systems and Computers in Japan, 2004, 35(7): 61-71.
- [13] WU Jianda, YE Siouhuan. Driver identification using finger-vein patterns with radon transform and neural network[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 5793-5799.
- [14] ZHAO Shi, WANG Yiding, WANG Yunhong. Extracting hand vein patterns from low-quality images: a new biometric technique using low-cost devices[C]//Fourth International Conference on Image and Graphics. Chengdu, China, 2007: 667-671.
- [15] CORP H. Finger vein authentication technology. [EB/OL]. [2009-11-21]. <http://www.hitachi.co.jp/products/it/veinid/global/index.html>.
- [16] Sony Corp. "mofiria" finger vein authentication technology [EB/OL]. [2009-12-13]. http://www.sony.net/Sony-Info/technology/technology/theme/mofiria_01.html.
- [17] HASHIMOTO J. Finger vein authentication technology and its future[C]//VLSI Circuits. Honolulu, USA, 2006: 5-8.
- [18] IBG. Biometrics market and industry report 2009-2014 [EB/OL]. [2009-1-23]. http://www.biometricgroup.com/reports/public/market_report.php.
- [19] YANAGAWA T, AOKI S, OHYAMA T. Human finger vein images are diverse and its patterns are useful for personal identification[R]. MHF Preprint Series, Faculty of Mathematics, 2007.
- [20] YU Chengbo, QING Huafeng, ZHANG Lian. A research on extracting low quality human finger vein pattern characteristics[C]//The 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Shanghai, China, 2008: 1876-1879.
- [21] CNN. Biometric atm gives cash via 'finger vein' scan. [EB/OL]. [2010-01-23]. <http://edition.cnn.com/2010/WORLD/europe/07/05/first.biometric.atm.europe/index.html>.
- [22] MULYONO D, JINN H S. A study of finger vein biometric for personal identification[C]//International Symposium on Biometrics and Security Technologies. Islamabad, Pakistan, 2008: 1-8.
- [23] MEHNERT A J, CROSS J M, SMITH C L. Thermographic imaging: segmentation of the subcutaneous vascular network of the back of the hand[R]. Perth, Australia: Edith Cowan University, Australian Institute of Security and Applied Technology, 1993.
- [24] LIN C L, FAN K C. Biometric verification using thermal images of palm-dorsa vein patterns[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(2): 199-213.
- [25] GODIK E E, GULYAEV Y V. Functional imaging of the human body[J]. Engineering in Medicine and Biology Magazine, 1991, 10(4): 21-29.
- [26] KONO M, UEKI H, UMEMURA S I. Near-infrared finger vein patterns for personal identification[J]. Appl Opt, 2002, 41(35): 7429-7436.
- [27] LEE J S. Digital image enhancement and noise filtering by

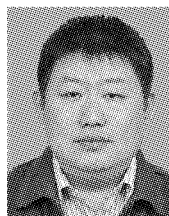
- use of local statistics[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, 2(2): 165-168.
- [28] MUNTEANU C, ROSA A. Towards automatic image enhancement using genetic algorithms[C]//*Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation 2000*. La Jolla, California, USA, 2000: 1542.
- [29] YU Chengbo, QIN Huafeng, CUI Yanzhe, HU Xiaoqian. Finger-vein image recognition combining modified Hausdorff distance with minutiae feature matching[J]. *Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences*, 2009(1): 280-289.
- [30] HIGHNAM R, BRADY M. Model-based image enhancement of far infrared images[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(4): 410-415.
- [31] GILBOA G, SOCHEN N, ZEEVI Y Y. Image enhancement and denoising by complex diffusion processes[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(8): 1020-1036.
- [32] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital image processing* [M]. Boston, M, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co, Inc, 2001: 12-35.
- [33] KO S J, LEE Y H. Center weighted median filters and their applications to image enhancement[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1991, 38(9): 984-993.
- [34] HAMID M S, HARVEY N R, MARSHALL S. Genetic algorithm optimization of multidimensional grayscale soft morphological filters with applications in film archive restoration[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(5): 406-416.
- [35] HARVEY N R, MARSHALL S. The use of genetic algorithms in morphological filter design[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 1996, 8(17): 55-71.
- [36] QUINTANA M I, POLI R, CLARIDGE E. On two approaches to image processing algorithm design for binary images using GP[J]//*Lecture Notes in Computer Science*, 2003, 2(1): 422-431.
- [37] QUINTANA M I, POLI R, CLARIDGE E. Morphological algorithm design for binary images using genetic programming[J]. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 2006, 7(1): 81-102.
- [38] YODA I, YAMAMOTO K, YAMADA H. Automatic acquisition of hierarchical mathematical morphology procedures by genetic algorithms[J]. *Image Vision Comput*, 1999, 17(10): 749-760.
- [39] BHANU B, LEE S, MING J. Adaptive image segmentation using a genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1995, 25(12): 1543-1567.
- [40] WANG Jun, TAN Ying. A novel genetic programming based morphological image analysis algorithm[C]//*Proceedings of the 12th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. New York, NY, USA, 2010: 979-980.
- [41] WANG Jun, TAN Ying. Morphological image enhancement procedure design by using genetic programming[C]//*Proceedings of the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO 2011)*. Dublin, Ireland ACM, 2011: 1435-1442.
- [42] IM S K, PARK H M, KIM S W, CHUNG C K, CHOI H S. Improved vein pattern extracting algorithm and its implementation[C]//*International Conference on Consumer Electronics*. Los Angeles, USA, 2000: 2-3.
- [43] IM S K, PARK H M, KIM Y W, HAN S C, KIM S W, KANG C H. A biometric identification system by extracting hand vein patterns[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2001, 38: 268-272.
- [44] DING Yuhang, ZHUANG Dayan, WANG Kejun. A study of hand vein recognition method[C]//*2005 IEEE International Conference Mechatronics and Automation*. Ontario, Canada, 2005, 4: 2106-2110.
- [45] WANG Lingyu, LEEDHAM G. Gray-scale skeletonization of thermal vein patterns using the watershed algorithm in vein pattern biometrics[C]//*2006 International Conference on Computational Intelligence and Security*. Guangzhou, China, 2006, 2: 1597-1602.
- [46] SOILLE P. *Morphological image analysis: principles and applications* [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 2003: 63-97.
- [47] WANG Kejun, XIONG Xinyan, REN Zhen, FU Bin. Gray-scale skeletonization of near-infrared vein patterns using the improved watershed algorithm in vein pattern biometrics[C]//*4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Xi'an, China, 2009: 241-245.
- [48] MIURA N, NAGASAKA A, MIYATAKE T. Extraction of finger-vein patterns using maximum curvature points in image profiles[J]. *IEICE Transactions*, 2005, 90-D(8): 1185-1194.
- [49] WANG Yunxin, LIU Tiegen, JIANG Junfeng. A multi-resolution wavelet algorithm for hand vein pattern recognition[J]. *Chin Opt Lett*, 2008, 6(9): 657-660.
- [50] JAIN A K, DUIN R P W, MAO Jianchang. Statistical pattern recognition: a review[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(1): 4-37.
- [51] WANG Lingyu, LEEDHAM Graham, CHO D S Y. Minutiae feature analysis for infrared hand vein pattern biometrics[J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(3): 920-929.
- [52] WATANABE M, AUTHENTICATION P V. *Advances in Biometrics*[M]. London Springer, 2008: 75-88.
- [53] LIN Xirong, ZHUANG Bo, SU Xiaosheng, ZHOU Yunlong, BAO Guiqiu. Measurement and matching of human vein pattern characteristics[J]. *Journal of Tsinghua University*

- versity: Science and Technology, 2003, 43: 164-167.
- [54] HUTTENLOCHER D P, KLANDERMAN G A, RUCKLIDGE W J. Comparing images using the Hausdorff distance[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(9): 850-863.
- [55] HUTTENLOCHER D P, KEDEM K, KLEINBERG J M. On dynamic Voronoi diagrams and the minimum Hausdorff distance for point sets under Euclidean motion in the plane [C]//Proceedings of the Eighth Annual Symposium on Computational Geometry. New York, NY, USA, 1992: 110-119.
- [56] HUTTENLOCHER D P, KEDEM K, SHARIR M. The upper envelope of Voronoi surfaces and its applications[C]//Proceedings of the Seventh Annual Symposium on Computational Geometry. New York, NY, USA, 1991: 194-203.
- [57] SIM D G, KWON O K, PARK R H. Object matching algorithms using robust Hausdorff distance measures [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8: 425-429.
- [58] GAO Yongsheng, LEUNG M K H. Line segment Hausdorff distance on face matching[J]. Pattern Recognition, 2002, 35(2): 361-371.
- [59] DUBUISSON M P, JAIN A K. A modified Hausdorff distance for object matching [C]//12th International Conference on Pattern Recognition. Jerusalem, Israel, 1994, 1: 566-568.
- [60] LEE E C, PARK K R. Restoration method of skin scattering blurred vein image for finger vein recognition[J]. Electronics Letters, 2009, 45(21): 1074-1076.
- [61] LIU Zhi, YIN Yilong, WANG Hongjun, SONG Shangling, LI Qingli. Finger vein recognition with manifold learning [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2010, 33(3): 275-282.
- [62] SHIMOOKA T, SHIMIZU K. Artificial immune system for personal identification with finger vein pattern[J]//Lecture Notes in Computer Science, 2004, 3214: 511-518.
- [63] IBG. Comparative biometric testing round 6 - public report [EB/OL]. [2006-05-18]. http://www.biometric-group.com/reports/public/reports/CBT6_report.htm.
- [64] TANG Darun, HUANG Beining, LI Rongfeng, LI Wenxin. A person retrieval solution using finger vein patterns [C]//2010 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). Istanbul, Turkey, 2010: 1306-1309.
- [65] PKU-AI-Lab. Recognition algorithm test engine [2011-05-12]. [EB/OL]. <http://rate.pku.edu.cn/>.
- [66] HUANG Beining, DAI Yanggang, LI Rongfeng, TANG Darun, LI Wenxin. Finger-vein authentication based on wide line detector and pattern normalization [C]//2010 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). Istanbul, Turkey, 2010: 1269-1272.
- [67] ZHANG Zhongbo, MA Siliang, HAN Xiao. Multiscale feature extraction of finger-vein patterns based on curvelets and local interconnection structure neural network [C]//Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. Hong Kong, China, 2006, 4: 145-148.
- [68] WANG Jiangang, YAU Weiyun, SUWANDY A, SUNG E. Fusion of palmprint and palm vein images for person recognition based on 'laplacianpalm' feature [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, USA, 2007: 135-141.
- [69] HAO Ying, SUN Zhenan, TAN Tieniu. Comparative studies on multispectral palm image fusion for biometrics [C]//Proceedings of the 8th Asian Conference on Computer vision. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 12-21.

作者简介:



谭莹,男,1964年生,教授,博士生导师,博士,IEEE Senior Member. International Journal of Artificial Intelligence 编辑、IJSSIR、IES Journal B、Intelligent Devices and Systems、Journal of Computer Science and Systems Biology 副编辑, International Journal of KES、Applied Mathematical and Computational Sciences 编委、ICSI2010、2011、2012 大会主席, ISA-CI2012 和 ISNN2008 程序委员会主席. IEEE 计算智能协会 ETTC 委员. 主要研究方向为计算智能、群体智能、机器学习方法、智能信息处理、数据挖掘与模式识别等. 主持国家“863”计划、国家自然科学基金、国际合作交流项目等科研项目30余项. 获得2009年度国家自然科学基金二等奖. 发表学术论文200余篇,获国家发明专利授权3项.



王军,男,1974年生,博士研究生,主要研究方向为图像处理、计算机视觉、遗传规划和生物识别.