

手指静脉结构的 B 样条描述方法*

刘 通, 谢剑斌, 华宏虎, 闫 玮, 卢焕章
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对现有手指静脉结构描述方法无法充分描述手指静脉结构中具有显著性和稳健性的线结构的问题,提出一种基于 B 样条的手指静脉结构描述方法。对于细化后的手指静脉纹路,采用线段扫描方式获取各静脉分支上目标点的坐标集合,用 B 样条曲线拟合各条静脉分支,求取各 B 样条曲线的控制点坐标,用其描述手指静脉的线结构。结果表明,采用本文方法描述手指静脉结构误差小、存储空间占用小,可以有效描述手指静脉线结构,并提高手指静脉的识别率。

关键词:手指静脉识别;身份认证;生物特征;B 样条

中图分类号:TP391.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)05-093-05

Finger-vein structure description method with B-spline

LIU Tong, XIE Jianbin, HUA Honghu, YAN Wei, LU Huanzhang

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The conventional methods for finger-vein structure description could not fully describe the distinct and steady line-structures of finger-vein. Therefore, a finger-vein structure description method based on B-spline was proposed. The new method obtained the coordinate set of all target points on every finger-vein branch by using line scanning operation on thinned finger-vein images. A B-spline function was used to fit the curves of finger-vein branches. The control-point coordinates of every B-spline curve were gained, and they were used to describe the line-structures of finger-vein. Experiments show that the new method can availably describe line-structures of finger-vein with little description error and small storage space requirements. Furthermore, this method can improve the recognition rates of finger-vein.

Key words: finger-vein recognition; personal identification; biometric features; B-spline

手指静脉识别是当前生物特征识别领域的研究热点,其主要优势在于:静脉藏匿在身体内部,不易被复制、窃取或干扰。可以广泛应用于银行、办公室、商场等场所的门禁和考勤领域,理论意义和市场应用价值巨大^[1]。不同个体的手指静脉的结构差异是手指静脉用于身份鉴别的依据,手指静脉识别是通过提取手指静脉结构中的显著性和稳健性特征并进行特征比对来判别两静脉是否相似的。因此,手指静脉结构描述是手指静脉识别的前提和基础。

手指静脉结构描述应当具备如下特点:

- 1) 能够描述不同手指静脉之间的差异;
- 2) 能够描述手指静脉的稳健性特征;
- 3) 不描述对识别无益的特征;
- 4) 用于静脉结构描述的数据应当便于识别处理。

基于上述特点,本文首先分析手指静脉的结

构差异,以及现有手指静脉结构描述方法;在此基础上,提出一种基于 B 样条的手指静脉结构描述方法,定量、充分地描述手指静脉的显著性和稳健性结构;最后通过仿真实验与分析,定性和定量评价本文方法对于手指静脉结构描述的有效性。

1 手指静脉结构分析

对于手指静脉识别而言,并非所有手指静脉的结构都具有显著性和稳健性。因此,需要对手指静脉结构进行分析,抽取具有显著性和稳健性的结构进行描述,而尽可能不描述那些对识别无益的结构。基于上述目标,本节首先从手指静脉解剖学知识和成像特性两个方面分析手指静脉结构差异;然后讨论现有手指静脉结构描述方法的问题。图 1 所示为手指静脉解剖结构示意图^[2],可以看出,不同手指的静脉结构存在差异,同一手指的指背和指掌两侧静脉结构也存在差异,这些

* 收稿日期:2014-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61303188)

作者简介:刘通(1982—),男,河南南阳人,讲师,博士研究生,E-mail:liutong1129@126.com

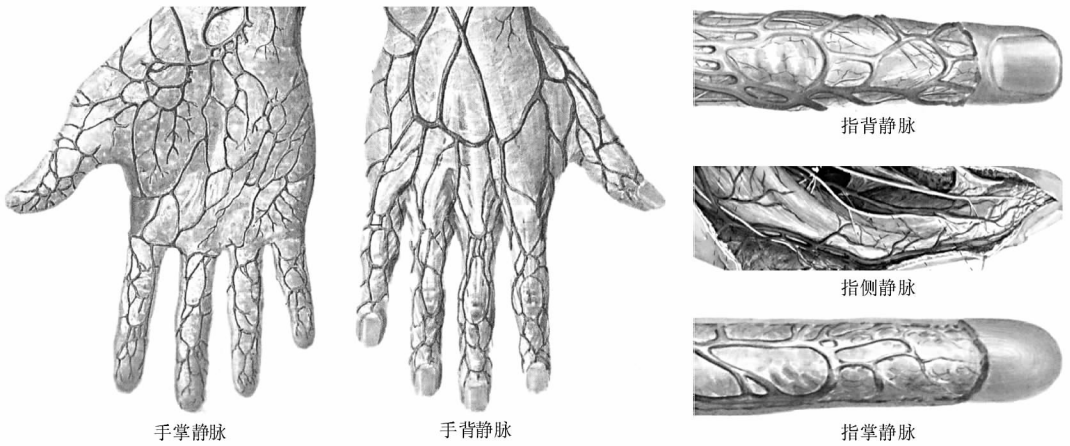


图 1 手部静脉解剖示意图

Fig.1 Anatomic images of veins in hand

差异表现在以下几个方面。

① 管径(静脉血管的直径)差异:由于不同个体的手指粗细不同,手指静脉的管径也存在差异;静脉由小到大逐级汇合,管径会逐渐加粗;静脉管径存在变异,同一条静脉的各段也存在管径差异。

② 点结构差异:不同手指的各条静脉的交汇位置不同,导致静脉纹路中的交叉点、端点等关键点的位置和个数都存在差异。

③ 环结构差异:静脉结构中不存在环结构,不同手指的静脉结构中环的结构、位置和个数都存在差异。

④ 线结构差异:静脉结构中各条静脉分支的空间分布可以看作空间曲线,不同手指的静脉分支曲线的数量和相互连接关系存在差异;各分支曲线的曲率和长度等存在差异。

然而,手指静脉成像过程中受肌肉、骨骼组织的干扰导致获取的手指静脉图像质量低,手指静脉纹路提取时难以避免分割误差,间接影响了上述差异的显著性和稳健性,具体表现在以下几个方面。

第一,目前手指静脉识别主要选用指掌中指节(也即第二指节)的静脉特征,解剖学发现此处静脉管径一般为 $0.3 \sim 0.5\text{mm}$ ^[2],而目前采集的静脉图像分辨率一般为 $0.2 \sim 0.4\text{mm}/\text{pixel}$,如经典文献[3]中静脉图像分辨率为 $0.3\text{mm}/\text{pixel}$,此时静脉管径特征的个体差异并不显著;另外,静脉管径受压力、温度以及静脉纹路分割效果的影响很大,特征的稳健性很差。

第二,尽管点结构的差异非常显著,但是与指纹相比,手指静脉可以提取的关键点较少,点结构的差异不足以表达静脉整体结构的差异。另外,分割误差对关键点的提取影响很大,降低了点结

构差异的稳健性。

第三,手指静脉成像时,不同深度的静脉在同一平面成像,且由于受肌肉、骨骼等组织的遮挡,静脉的环结构经常遭到破坏或者无法完整提取,致使环结构差异的稳健性很差;另外,由于手指静脉识别选用的手指区域只有一个指节,环结构较少,特征的显著性差。

综上所述,手指静脉图像中,管径差异、点结构差异和环结构差异的显著性和稳健性都不充分。尽管线结构也会受到分割误差等影响,但由于手指静脉中线结构丰富且占据手指静脉纹路的主体区域,因此线结构是手指静脉结构中具有显著性和稳健性的结构,是手指静脉结构描述的主要对象。

然而,目前的手指静脉结构描述方法中,二值模板^[3]、Sparse^[4]、PCA (Principal Component Analysis)^[5]、Hu 矩不变量^[6]等方法尽管可以用来描述手指静脉整幅图像(灰度图像或二值图像)中静脉纹路与背景区域的相对分布情况,但无法描述静脉结构中最显著的局部细节差异,如静脉图像中各目标点的位置差异;基于关键点的位置、角度和相对距离等特征的点模式方法^[7]尽管可以描述手指静脉的点结构差异,但丢失了许多显著的线结构,对静脉结构描述而言不够充分。因此,本文重点研究如何充分描述。

2 手指静脉结构描述

B 样条可用于拟合任意形状的曲线,是描述线结构的有效手段^[8]。基于这一思路,本文提出一种基于 B 样条的手指静脉结构描述方法,用于充分描述手指静脉的线结构。首先,结合上一节的分析以及结构描述的特点,需剔除不具有显著性和稳健性

的静脉结构。对于点结构和环结构,由于点是线的端点,环是由多条线组成的,故这2类结构包含在线结构之中,不需剔除。对于管径结构,采用图像细化的方法剔除。而对于细化后的静脉纹路,需要通过图像修复操作,修复断裂纹路和剔除冗余毛刺,得到线结构组成的手指静脉纹路图像,实现流

程见图2,其中,图像分割采用MRLT方法^[1],图像滤波采用数学形态学的开运算^[9],图像细化采用数学形态学的击中与击中不中变换^[9],图像修复采用简单的固定阈值法,将长度小于15的曲线段剔除,具体步骤这里不再赘述,下面重点阐述如何采用B样条描述手指静脉纹路。

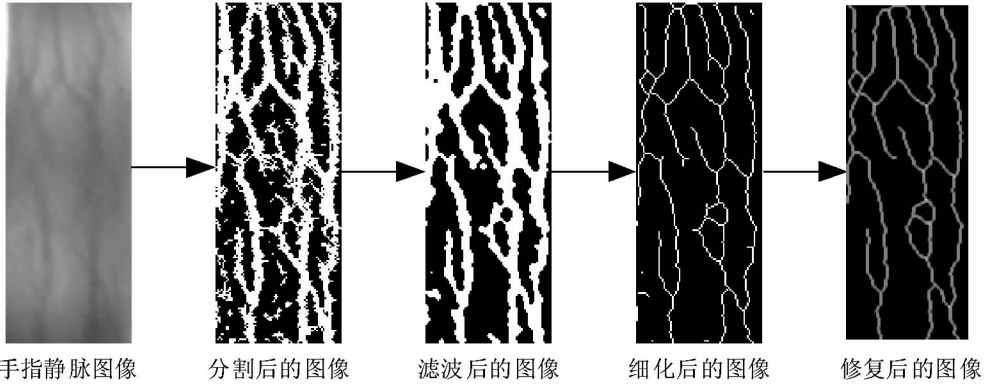


图2 手指静脉纹路提取流程

Fig. 2 Process of extracting finger-vein patterns

对于由线结构组成的手指静脉纹路,本文通过线段扫描和参数求解两个阶段,得到静脉结构的B样条描述。

2.1 线段扫描

首先,定位静脉纹路的关键点,即端点和交叉点;然后,按照从左到右、从下到上的扫描顺序,记录每一条线段(即2个关键点之间的静脉纹路)上所有目标点的坐标,用集合 $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_m\}$ 表示, m 为该线段上目标点的个数。

2.2 参数求解

对于每一条线段的目标点集 Q ,采用最小二乘B样条拟合方法^[8],求取控制点集 $C = [C_1 \dots C_k]^T$,公式如下:

$$\begin{cases} [C_2 \dots C_{k-1}]^T = (N^T N)^{-1} N^T [R_2 \dots R_{m-1}]^T \\ C_1 = Q_1 \\ C_k = Q_m \end{cases} \quad (1)$$

其中, $R_i = Q_i - C_1 N_1 - C_k N_k, i = 2, \dots, m-1$ 。

$$N = \begin{bmatrix} N_{2,p}(u_2) & \dots & N_{k-1,p}(u_2) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ N_{2,p}(u_{m-1}) & \dots & N_{k-1,p}(u_{m-1}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

p 为B样条次数; k 为控制点个数,且 $p < k < m$; N 为 p 次规范B样条基函数:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (4)$$

$U = \{\underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1}\}$ 为非均匀递增的节点向量,构造如下:

$$u_{p+t} = (1 - \alpha) \bar{u}_{s-1} + \alpha \bar{u}_s, t = 1, 2, \dots, k-p \quad (5)$$

$$\bar{u}_j = \bar{u}_{j-1} + \frac{|Q_j - Q_{j-1}|}{\sum_{j=1}^m |Q_j - Q_{j-1}|}, j = 2, 3, \dots, m-1 \quad (6)$$

$$s = \text{Int}(t \frac{m+1}{k-p+1}) \quad (7)$$

$$\alpha = t \frac{m+1}{k-p+1} - s \quad (8)$$

其中, $\text{Int}(\cdot)$ 为取整函数; $\bar{u}_1 = 0, \bar{u}_m = 1$ 。

这样,手指静脉结构中每一条静脉分支,都可以用B样条的一个控制点集 C 描述,而由所有静脉分支对应的点集 C 组成的集合,便可以充分描述手指静脉中具有显著性和稳健性的线结构。

3 仿真实验与分析

下面从静脉表示误差、存储空间占用和静脉识别性能3个方面进行仿真实验,验证采用B样条描述手指静脉结构的有效性。

3.1 误差分析

采用B样条曲线拟合手指静脉的线结构是存在误差的,误差大小与参数 p 和 k 的取值有关,一般地,二者取值越大,曲线拟合误差越小,但计

算复杂度和存储空间占用越大。考虑到目标点的位置差异是静脉识别的主要依据,这里采用平均距离误差($Mean_D$)和最大距离误差(Max_D)来定量分析曲线拟合误差^[10]。假设静脉纹路某条分支 L_1 拟合后的 B 样条曲线为 L_2 , L_1 上各目标点到曲线 L_2 的最小距离为 d_i ($i=1, \dots, m, m$)为目标点总数,则:

$$Mean_D = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_i \quad (9)$$

$$Max_D = \max_{1 \leq i \leq m} \{d_i\} \quad (10)$$

表 1 列举了具有代表性的 8 种参数组合下,图 2 中修复后的静脉纹路的第一条分支的拟合误差。考虑到静脉目标位置是以像素为单位,这样如果将误差控制在亚像素(也即 0.5 像素)范围内,那么四舍五入后静脉目标位置不变,即描述误差不会影响用于识别的静脉结构。因此,在保证误差低于 0.5 像素的情况下,为了尽可能降低算法

复杂度和存储空间占用,取 $p=3, k=8$,此时误差 $Mean_D=0.1768, Max_D=0.4480$ 。限于篇幅,图 3 仅列举 3 幅静脉结构的 B 样条描述结果。其中,图 3(a1, a2, a3)为采用图 2 流程提取的静脉纹路,也即静脉线结构,图 3(b1, b2, b3)为 B 样条描述的静脉纹路曲线, B 样条参数为 $p=3, k=8$ 。主观上评价, B 样条拟合的各条静脉曲线与静脉纹路的各个分支基本一致。客观上评价, 3 幅静脉纹路图像的拟合误差($Mean_D, Max_D$)分别为(0.2017, 0.4482)、(0.2113, 0.4740)和(0.1877, 0.4664),误差都低于 0.5 像素。事实上,现有的手指静脉识别方法都容许手指存在一定程度上的平移和旋转变换,如文献[3]容许水平和垂直方向各 10 个像素的位置偏差。因此,本文提出的手指静脉结构描述方法在充分描述静脉结构中具有显著性和稳健性的线结构的前提下,产生的误差对于手指静脉识别而言基本没有影响。

表 1 不同参数下 B 样条曲线拟合误差

Tab. 1 Fitting errors of B-spline curve with different parameters

变量	取值							
p	3				5			
k	4	6	8	10	6	8	10	12
$Mean_D$	0.4056	0.2441	0.1768	0.1087	0.2785	0.2196	0.1145	0.1120
Max_D	1.1988	0.6957	0.4480	0.3260	0.5531	0.4687	0.3542	0.2836

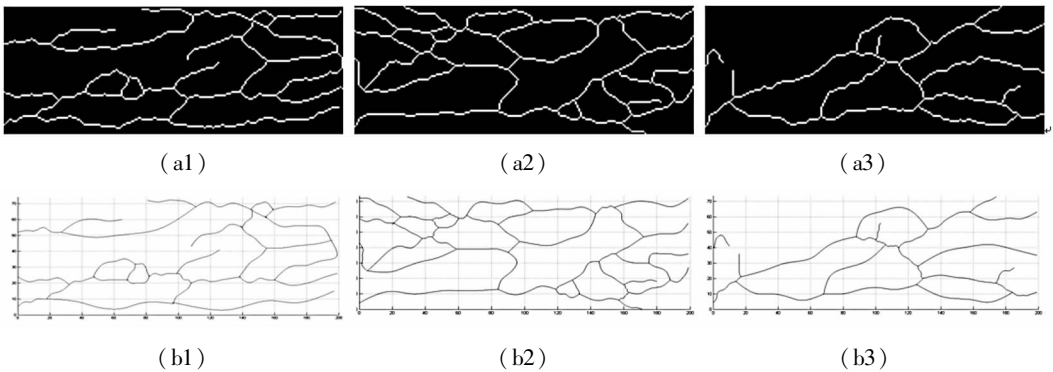


图 3 采用 B 样条描述的手指静脉结构

Fig. 3 Finger-vein structures with B-spline description

3.2 存储空间占用分析

存储空间占用是评价静脉结构描述方法的主要指标之一。采用 B 样条描述手指静脉结构,需要存储每条线段对应的控制点集 C 中各个控制点的纵横坐标,占用的存储空间可以记为 $n \times (2 \times k) \times b$ 字节,其中, n 为静脉分支总数, b 用来表示记录一个坐标所需要的字节数,其取值与静脉图像尺寸有关,当图像宽高都小于 255 时, $b=1$ 。针对图 3(a1, a2, a3)中 3 幅图像,图像尺寸为 200

$\times 74$,采用本文方法占用存储空间分别为 688、784 和 416 字节,而采用 Sparse 方法^[4](参与训练的样本数为最小值 1,不考虑降维提取特征)占用存储空间为 1600 字节,采用二值模板方法^[3],即连续 8 个像素的二值数据(0 或 1)压缩为 1 个字节表示,占用存储空间为 1850 字节。可见,本文方法在存储空间占用方面优于 Sparse 和二值模板方法,而且图像尺寸越大,这一优势越明显。

3.3 识别性能对比

手指静脉注册时,采用B样条描述手指静脉结构,并存入数据库,记为 $C^D = \{C^j | j = 1, 2, \dots, n\}$, n 为静脉分支总数。认证时,对于待认证的手指静脉,首先按照图2所示的步骤提取手指静脉纹路,然后依据如下步骤进行特征匹配:

Step1:由 C^D 重构各静脉分支曲线。

Step2:对于待认证手指静脉纹路的第 l 条分支,统计其上各像素点到数据库中第 j 条静脉分支的最小距离,并记所有点的最小距离的均值为 $dm_{l,j}$,此即为第 l 条分支到数据库中第 j 条分支的距离。记第 l 条分支到数据库的距离为 dm_l ,则:

$$dm_l = \min_{1 \leq j \leq n} (dm_{l,j})$$

同理,计算待认证手指静脉纹路中各分支到数据库的距离。

记 dm 为待认证手指静脉纹路 with 数据库中手指静脉纹路的平均距离,则:

$$dm = \frac{1}{b} \sum_{l=1}^b dm_l$$

其中, b 为待认证手指静脉纹路中分支总数。

Step3:如果 dm 小于阈值 T ,则判定两静脉相匹配;否则,对待认证静脉纹路做平移变换,即水平方向平移 W_x ,垂直方向平移 W_y ,然后重复Step2。其中, $0 \leq W_x \leq 10$, $0 \leq W_y \leq 10$ 。如果直到 $W_x = W_y = 10$, dm 始终不小于阈值 T ,则判定两静脉不匹配;否则,判断两静脉相匹配。

在自建数据库(共120枚手指,每枚手指采集9幅图像)下,计算该方法的最小的等错误率(Equal Error Rate, EER)为1.19%,此时对应的阈值 T 为8.33。表2给出了不同表示方法下手指静脉识别性能的对比。其中,认证时间是指手指静脉纹路提取和上述特征匹配过程所耗费的

表2 手指静脉识别性能对比

Tab.2 Comparison of finger-vein recognition performance

方法	EER (%)	平均认证时间(ms)
文献[3]	1.56	326
文献[4]	1.97	263
文献[5]	1.71	193
文献[7]	11.33	97
本文方法	1.19	367

时间之和,实验用计算机性能为:(处理器: Intel CeleronTM D CPU 3.33 GHz;内存:2.0 GB;软件平台: Visual C++ 6.0)。由表2可见,本文方法得到的EER最小,说明基于B样条的手指静脉结构描述方法有助于提高手指静脉识别的识别率。但是,本文方法的平均认证时间较高,后续还需要深入优化。

4 结论

本文提出一种基于B样条的手指静脉结构描述方法,可以充分描述手指静脉中具有显著性和稳健性的线结构,也可用于描述手掌静脉、手背静脉、指纹等类似的线结构。

参考文献(References)

- [1] Liu T, Xie J B, Yan W, et al. An algorithm for finger-vein segmentation based on modified repeated line tracking [J]. *Imaging Science Journal*, 2013, 61(6): 491-502.
- [2] 高士谦. 实用解剖图谱(上肢分册)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004: 217-263.
GAO Shilian. Atlas of practical anatomy-upper limb [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing, 2004: 217-263. (in Chinese)
- [3] Miura N, Nagasaka A, Miyatake T. Feature extraction of finger-vein patterns based on repeated line tracking and its application to personal identification [J]. *Machine Vision and Applications*, 2004, 15(4): 194-203.
- [4] Xin Y, Liu Z, Zhang H, et al. Finger-vein verification system based on sparse presentation [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6252-6258.
- [5] Yang G P, Xi X M, Yin Y L. Finger-vein recognition based on (2D)2 PCA and metric learning [J]. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2012: 1-9.
- [6] Qian X H, Guo S X, Li X Y, et al. Finger-vein recognition based on the score level moment invariants fusion [C]// *Proceedings of IEEE CISE*, 2009: 1-4.
- [7] 王科俊, 刘靖宇. 基于相对距离和角度的手指静脉识别方法 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(5): 96-99.
WANG Kejun, LIU Jingyu. Finger vein recognition method based relative distance and angle [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2011, 39(5): 96-99. (in Chinese)
- [8] Deng H, Ben-Zvi A, Wiskel J B, et al. B-spline approximation methods for digital image reconstruction in strain measurement [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(4): 593-602.
- [9] William K P. *Digital image processing* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001: 404-433.
- [10] Park H. An error-bounded approximate method for representing planar curves in B-splines [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2004, 21(5): 479-497.