

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2020.07.001

引用格式:高毅,穆治亚,张群兴,等.基于人工智能的足迹识别与特征提取[J].电讯技术,2020,60(7):739-745.[GAO Yi,MU Zhiya,ZHANG Qunxing, et al. Footprint recognition and features extraction based on artificial intelligence[J].Telecommunication Engineering,2020,60(7):739-745.]

## 基于人工智能的足迹识别与特征提取\*

高毅<sup>1</sup>,穆治亚<sup>2,3</sup>,张群兴<sup>4</sup>,仲元昌<sup>\*\*5,6</sup>

- (1. 中国刑事警察学院 刑事科学技术学院,沈阳 110035;2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033;  
3. 刑事检验四川高校重点实验室,四川 泸州 646000;4. 装备发展部驻重庆第七军事代表室,重庆 400060;  
5. 重庆大学 电气工程学院,重庆 400044;6. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

**摘要:**针对战场感知及侦破现场中传统人工主观经验检验与识别模式误差较大的问题,提出了一种基于人工智能的足迹识别与特征提取方法。采用三维形貌重构系统进行足迹图像采集,并将数字图像处理算法与传统足迹检验法结合,提取足迹的区域关系特征和形状长度特征,进而采用支持向量机的模式识别方法对提取的特征进行立体足迹身份鉴别对比实验。实验结果表明,所提方法准确率超过人工鉴别准确率,达到 99.1%,可应用于战场感知及侦破现场足迹准确检测与识别,也可推广应用于人体身份鉴别的相关领域。

**关键词:**足迹识别;人工智能;模式识别;三维形貌重构;数字图像处理

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号:TN911.73;TP391.4 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2020)07-0739-07

## Footprint Recognition and Features Extraction Based on Artificial Intelligence

GAO Yi<sup>1</sup>, MU Zhiya<sup>2,3</sup>, ZHANG Qunxing<sup>4</sup>, ZHONG Yuanchang<sup>5,6</sup>

- (1. College of Criminal Science and Technology, Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110035, China;  
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
3. Key Laboratory of Sichuan Higher Education Criminal Inspection, Luzhou 646000, China;  
4. The 7th Military Representative Office of Equipment Development Department in Chongqing Region, Chongqing 400060, China;  
5. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
6. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** For the problem that the traditional way of recognition based on experiences has a big deviation between recognition patterns in battleground awareness and crime scene investigation, a footprint recognition and feature extraction method based on artificial intelligence is proposed. It uses a three-dimensional(3D) reconstruction system to collect footprint images, then combines digital image processing algorithms with traditional footprint inspection methods to extract regional relationship features and shape-length features of collected footprints. Further, it carries out a 3D footprint identification comparison experiment on the extracted features by using the pattern recognition method based on support vector machine. The results indicate that the accuracy rate of the proposed method reaches 99.1%, which exceeds the accuracy rate of traditional way of recognition. This method can be applied not only in battlefield awareness and accurate detection and identification of footprints on crime scene, but also in human body identification in related fields.

**Key words:** footprint recognition; artificial intelligence; pattern recognition; 3D reconstruction; digital image processing

\* 收稿日期:2020-03-22;修回日期:2020-05-06

基金项目:辽宁省自然科学基金引导计划项目(20180550153);中央高校基本科研业务费(2019CDCGTX302,2020CDCGTX055);证据科学教育部重点实验室2019年开放基金项目(2019KFKH02);刑事检验四川高校重点实验室开放课题(2018YB03)

\*\* 通信作者:zye@cqu.edu.cn

## 0 引言

足迹承载着人体生理和行为两种重要特征,足迹身份鉴别在刑事技术等领域发挥着重要作用,足迹生物特征识别与分析具有特定的应用优势,开展足迹生物特征识别的研究也具有重要意义。传统立体足迹检验是技术人员通过对石膏模型进行分析,但这种分析方式主要依靠鉴定人员的主观经验,并且在制作石膏模型时,由于操作人员的技术水平,很可能导致现场立体足迹的痕迹特征在石膏制模时被破坏,从而导致鉴定人员在分析时出现偏差<sup>[1]</sup>。Robbins<sup>[2-3]</sup>研究了脚印与身高和体重的关系,指出从人类学的观点来看,每个人的足迹都是独一无二的。Jasuja 等人<sup>[4]</sup>研究了人体行走时步幅大小与身高的关系。Kennedy 等人<sup>[5-6]</sup>收集了志愿者的油墨足迹,通过赤足足迹的形状特征提取各种特征参数,然后经过统计分析,证实了赤足足迹的形状特征能够区分个体,但对其某些形状特征的提取仍需人工标定和测量。Jung 等人<sup>[7]</sup>用人体正常行走过程中足部压力参数进行人身识别研究。Bertani<sup>[8]</sup>研究了不同年龄、性别、脚支撑的老人的足弓类型对脚底压力分布的影响,发现足弓越高脚底峰值压力越大,非支撑脚比支撑脚的足弓高,随着年龄的增大,足弓变低,女性的更低,这可能与脚底肌肉僵硬有关。田越<sup>[9]</sup>提出了基于曲线形状分析的三维表面识别方法,应用该技术,与河南省周口市公安局开发了“基于重压面形状分析的立体足迹造型与识别系统”。目前国内外学者在足迹生物特征识别领域已取得了一系列研究成果,但普遍存在识别过程繁杂、可靠性不高的问题。

综上所述,在战场感知及侦破现场,足迹准确检测与识别至关重要。针对传统人工主观经验检验与识别模式偏差较大的问题,本文提出了一种基于人工智能的足迹识别与特征提取方法,采用三维形貌重构系统进行足迹图像采集,并将数字图像处理算法与传统足迹检验法结合,提取足迹的区域关系特征和形状长度特征,进而采用支持向量机的模式识别方法对提取的特征进行立体足迹身份鉴别对比实验。

## 1 足迹坐标轴建模

由于每个人的足骨骼形状和肌肉比例不同,所以形成的足迹大小也不尽相同。为了比较不同人的

足迹,需要建立统一的足迹坐标系将立体足迹数据进行归一性处理。

建立统一的足迹坐标系首先确定足迹掌区和跟区的内、外缘最凸点,然后确定内、外缘的公切线,两公切线交足后跟外一点形成夹角 $\alpha$ ,然后根据两个公切线形成的夹角 $\alpha$ 作出角平分线作为 $X$ 轴。该角平分线分别交足跟后缘和足趾前缘 $A$ 、 $B$ 两点。找出线段 $A$ 、 $B$ 两点之间的中心 $O$ 点,然后作出垂直于角平分线的直线作为 $Y$ 轴。确定坐标系的步骤如下:

**Step 1** 依据传统足迹检验鉴定的理论基础在立体足迹灰度图像的掌区和跟区内缘选最凸点 $U_1$ 、 $U_2$ ,在掌区和跟区外缘选最凸点 $U_3$ 、 $U_4$ ,并确定这四个点的位置坐标。

**Step 2** 根据两点确定一条直线,分别求出 $U_1U_2$ 、 $U_3U_4$ 的直线方程与足迹内外缘相切。直线方程式为

$$y=kx+b \quad (1)$$

根据 $U_1$ 、 $U_2$ 两点坐标可以求出来足迹内缘切线 $U_1U_2$ 的 $k_1$ 和 $b_1$ 的值,根据 $U_3$ 、 $U_4$ 两点坐标求出足迹外缘切线 $U_3U_4$ 的 $k_2$ 和 $b_2$ 的值;然后在足迹灰度图像中根据切线方程绘制出足迹内外缘切线,如图1(a)所示。

**Step 3**  $U_1U_2$ 和 $U_3U_4$ 的两条切线交足跟后一点,根据两条足迹切线方程可以求出该交点坐标 $U_0$ ;然后根据 $U_0$ 、 $U_1$ 、 $U_3$ 三个坐标点围成的三角形,两点之间距离根据勾股定理计算出,再利用余弦公式计算出 $U_1U_2$ 和 $U_3U_4$ 的两条切线的夹角 $\alpha$ 。

**Step 4** 为了方便理解,将足迹内外缘切线 $U_1U_2$ 和 $U_3U_4$ 简化为图1(b), $L_1$ 、 $L_2$ 条直线,直线 $L_3$ 为两直线夹角的角平分线,两切线交点 $U_0$ 简化为 $O$ , $\alpha$ 为两条切线的夹角,根据足迹内缘切线 $L_1$ 的斜率 $k_1$ 可以求得 $L_1$ 与 $X$ 轴的夹角 $\beta$ , $L_1$ 与 $L_3$ 的夹角为 $\frac{\alpha}{2}$ ,因此可以求出角平分线 $L_3$ 与 $X$ 轴的夹角 $\frac{\alpha}{2}-\beta$ ,进而求出角平分线 $L_3$ 的斜率。根据 $O$ 坐标,最后求出角平分线 $L_3$ 的线性方程作为新建立足迹坐标系的 $X$ 轴。操作结果如图1(c)所示。

**Step 5** 沿着角平分线的方向找出足迹的足跟后缘坐标 $A$ 与足趾前缘坐标 $B$ ,计算出 $AB$ 之间距离,并找出 $AB$ 中点 $C$ 点坐标,根据角平分线的线性方程的斜率和 $C$ 点坐标,可作出与角平分线垂直的 $Y$ 轴。坐标轴如图1(d)所示。

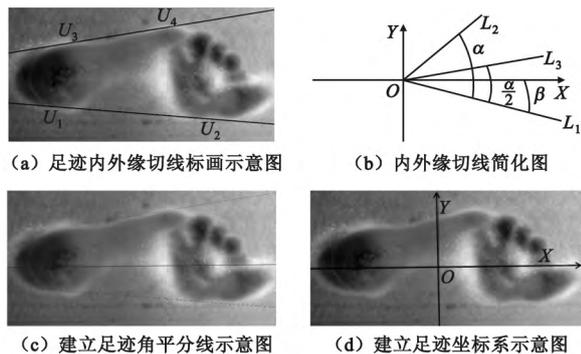


图 1 足迹及坐标建模图

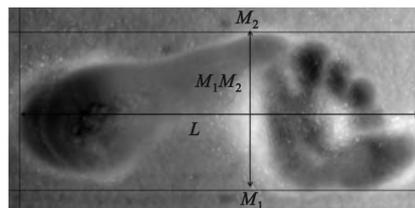


图 2 足迹长和跖宽示意图

表 1 基于形态长度特征的赤足足迹特征参数

编号	特征参数	字母表示	计算方法	属性
1	赤足足长	$L$	跟后缘突点至趾前缘突点平行线之间的距离	距离
2	跖区斜宽	$M_1M_2$	跖区内外缘突点的连线	距离

## 2 特征提取

根据足迹学相关,立体赤足足迹中区域关系特征、重压面特征在一定程度上体现足部骨骼结构、分布关系和行走运动习惯特征,且在目前的足迹检验鉴定中经常采用<sup>[10]</sup>。由于区域形态特征和重压面的识别和选取具有较强的针对性和专业性,需结合熟练的经验知识和耐心细致的观察能力对特征进行识别和提取,所以赤足足迹鉴定意见在法庭质证环节不断受到法官、律师等的质疑。因此,本文结合足部骨骼分布结构、运动习惯特点、赤足足迹特征等知识理论,将赤足足迹生物特征分为区域关系特征和形状长度特征两类。

### 2.1 形状长度特征

人赤足运动过程中,受地面条件、行走姿态以及足骨骼表面附着软组织等的影响,所形成的赤足足迹会发生一定程度的改变,这种改变十分微小,在定性分析的足迹检验中,并没有引起足够的重视。但是一旦将足迹人身识别思想引入计算机模式识别中,这些微小的变化足以导致不同的结果发生。因此,对特征点的选取必须严格依据足迹学中特征的分类标准和计算机模式识别的技术要求。在足迹坐标系的基础上,具体操作步骤如下:

**Step 1** 选取赤足足迹轮廓的最左点和最右点,作过这两点的平行线,使得这两条平行线与  $x$  轴方向垂直,则这两条平行线之间的垂直距离,即为赤足足迹的足长(定义为  $L$ )。

**Step 2** 分别选取跖区内缘最突点(定义为  $M_1$ )和外缘最突点(定义为  $M_2$ ),作过这两点的平行线,使得这两条平行线与  $y$  轴方向垂直,则这两条平行线之间的垂直距离即为跖宽(定义为线段  $M_1M_2$ )。

根据两组平行线可以组成一个矩形框,矩形框的长就是足迹的足长  $L$ ,宽是足迹跖宽  $M_1M_2$ ,如图 2 所示。表 1 为基于形态长度特征的赤足足迹特征参数。

### 2.2 区域关系特征

赤足足迹图像的区域是指足迹重压面的所构成的区域<sup>[11]</sup>。区域关系特征用重压面中跟区质心、跖区质心与坐标轴原点之间的距离和角度表示。在赤足足迹检验中,常用直线将所发现的特征几何中心点连接起来,使其构成几何图形,然后测量、比较现场赤足足迹和嫌疑人赤足足迹样本各构成图形的形状、各个边的长度以及相互关系是否相符,从而实现赤足足迹的鉴定工作<sup>[12]</sup>。本文将传统足迹检验方法和数字图像处理中区域表示知识相结合,提出了区域关系特征这一概念,利用立体足迹跟区质心与跖区质心、拇指质心之间的距离和各质心到坐标轴原点距离特征以及各质心之间夹角特征等赤足特征参数描述方式,实现赤足足迹的人身识别目的。

支撑骨痕迹在不同客体上的表现形式多样,但位置、形状是恒定的,并且和年龄、体态没有直接关系,支撑骨各骨点间的距离和角度是定量化检验的基础<sup>[13-14]</sup>。在 Matlab 中可根据各重压面计算出质心坐标和坐标轴原点坐标,再根据两个点坐标计算出各质心与坐标原点及三个质心间的距离,三个质心可连接成三角形,每两个质心和坐标原点也可以连接成一个三角形,根据围成的三角形可以求出质心之间的夹角以及质心与坐标原点的夹角。具体思路如下:

#### (1) 距离

根据重压面可以求得质心(重压点)的坐标,依据在坐标系中两点坐标确定一条直线,并求得两点之间的距离

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2)$$

式中： $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 为两点坐标。分别计算出跟质心到第一跖质心、跟质心到拇指质心、第一跖质心到拇指质心、跟质心到坐标原点、第一跖质心到坐标原点和拇指到坐标原点距离，分别定义为  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ 、 $D_5$ 、 $D_6$ ，如图 3 和图 4 所示。

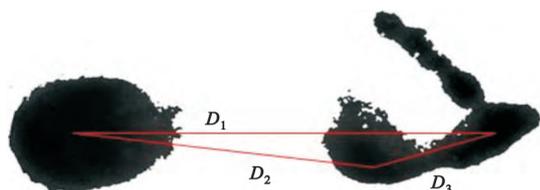


图 3 支撑骨质心间距离示意图

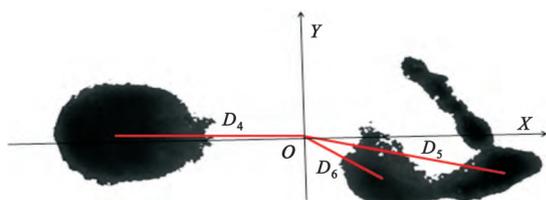


图 4 支撑骨到坐标原点距离示意图

(2) 角度

不在同一直线上的三点确定一个平面，三个支撑骨质心坐标可以围成的一个三角形。根据余弦定理，已知三角形三条边的长度可以求出三个角的大小：

$$\cos \alpha = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \quad (3)$$

式中： $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为三角形三条边长， $\alpha$ 为三角形  $a$  边长所对应的角。三角形中已知两个角，第三角可由  $180^\circ$  减去两角角度求得。分别由  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  即三条边长求出  $D_1$ 、 $D_2$  之间的夹角  $\alpha_1$  和  $D_2$ 、 $D_3$  之间的夹角  $\alpha_2$ ，根据  $D_4$ 、 $D_5$  两条边求出角  $\alpha_3$ ，由  $D_5$ 、 $D_6$  求出角  $\alpha_4$ ，如图 5 和图 6 所示。最终的基于区域关系特征的赤足足迹特征参数如表 2 所示。

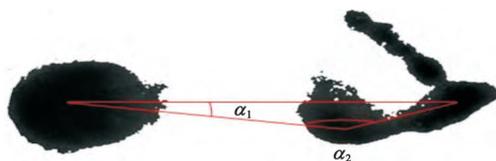


图 5 支撑骨质心间角度示意图

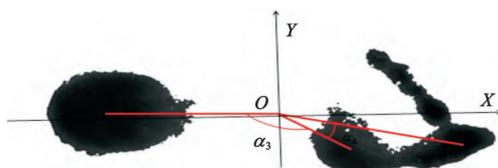


图 6 支撑骨到坐标原点角度示意图

表 2 基于区域关系特征的赤足足迹特征参数

特征参数	字母表示	计算方法	单位
跟质心到第一跖质心	$D_1$	距离公式	像素
跟质心到拇指质心	$D_2$	距离公式	像素
第一跖质心到拇指质心	$D_3$	距离公式	像素
跟质心到坐标原点	$D_4$	距离公式	像素
第一跖质心到坐标原点	$D_5$	距离公式	像素
拇指到坐标原点距离	$D_6$	距离公式	像素
$D_1$ 、 $D_2$ 夹角	$\alpha_1$	角度公式	度
$D_3$ 、 $D_4$ 夹角	$\alpha_2$	角度公式	度
$D_3$ 、 $D_4$ 夹角	$\alpha_3$	角度公式	度
$D_5$ 、 $D_6$ 夹角	$\alpha_4$	角度公式	度

3 特征提取与足迹识别实验

由于在战场感知及作案现场，对嫌疑对象已经有了初步判断，很大程度上缩小了样本范围。因此，为了提高识别效率，结合项目任务要求并兼顾样本多样性，实验选用 30 人作为样本。采集 30 名实验对象的样本数据作为训练集建立足迹判别模型，从 30 名实验对象中随机抽取几名实验对象重新采集立体足迹，将重新采集的立体足迹作为测试集，以测试该足迹判别模型的准确性<sup>[15-16]</sup>。

3.1 参数选择

首先将 30 名实验对象的特征提取之后记录在 Excel 表格中，将数据保存成 CSV 格式；然后通过 WEKA 软件将 CSV 格式数据打开，利用 WEKA 软件中的支持向量机算法将 30 人数据建立足迹判别模型。在选用分类函数和惩罚因子时，需要通过不断寻优试验，选择合适的核函数和惩罚因子，直到建立的立体足迹判别模型的正确率能够满足足迹检验。现将 30 名实验对象特征数据进行训练建立数学模型，由于足迹特征数据和人身不存在线性关系，因此需要选用核函数将低维空间分类映射到高维空间，寻找一个最优超平面，将两者间距最大化分开。选择的函数和惩罚因子  $C$  如表 3 所示。

表 3 不同惩罚因子时具有核函数的足迹判别模型准确率

核函数类别	准确率/%				
	$C=1$	$C=5$	$C=10$	$C=15$	$C=20$
正则化多项式 ( $\gamma=0.1, r=0$ )	55.32	68.09	70.21	72.34	78.73
线性	25.54	36.17	42.55	48.94	57.45
径向基核函数 ( $\gamma=0.1$ )	78.72	87.16	92.57	95.76	96.23





根据上述模拟实验结果可以得出以下结论:

(1)利用同一类(组)样本的赤足立体足迹生物特征参数集组成的训练样本所建立的足迹判别模型可以识别出该类(组)样本的赤足立体足迹生物特征参数集组成的测试样本,而不同类(组)样本的赤足立体足迹利用上述特征参数集组合建立的足迹判别模型则能识别出各自不同类(组)样本对应的测试样本,这就说明了同一类(组)样本的赤足足迹生物特征参数集或组合具有相对稳定性,而不同类(组)样本的赤足足迹生物特征参数集或组合具有明显的差异。即同一个体立体赤足足迹生物特征集或组合既具有特定性又同时具备相对稳定性,故可以利用立体赤足足迹生物特征集或组合的异同来认定和排除嫌疑人。

(2)利用赤足立体足迹生物特征或特征组合进行人身个体识别实验,识别正确率较高,能够满足实验需求,基本达到公安一线筛选嫌疑人需要。同时,本文也说明了在传统的人工描绘和测量的足迹鉴别中,在获得准确的特征参数数据的基础上直接利用赤足立体足迹的几何特征进行足迹检验或人身认定具有一定的可靠性和科学性。

#### 4 结束语

在战场感知及侦破现场,足迹准确检测与识别至关重要。针对传统人工主观经验检验与识别模式偏差较大的问题,本文提出了一种基于人工智能的足迹识别与特征提取方法。从识别比对实验结果可看出,本文所提方法能够客观、准确地进行人体身份鉴别,相较于人工鉴别方法,本文方法的准确率达99.1%,可应用于战场感知及侦破现场足迹准确检测与识别,也可推广应用于人体身份鉴别的相关领域。

本文尝试采用人工智能的方法进行足迹识别与特征提取,人工智能识别方法有多种,不同种类还应横向对比,这是团队后续的研究工作。

#### 参考文献:

- [1] 王慧玉. 基于形状与压力分布特征的脚步识别算法研究[D]. 大连:大连海事大学,2017.
- [2] ROBBINS L M. The individuality of human footprints[J]. Journal of Forensic Science, 1978, 23(3):85-778.
- [3] ROBBINS L M. Estimating height and weight from size of footprints[J]. Journal of Forensic Sciences, 1986, 31(1):143-152.
- [4] JASUJA O P, HARBHAJAN S, ANUPAMA K. Estimation of stature from stride length while walking fast[J].

Forensic Science International,1997,86(3):181-186.

- [5] KENNEDY R B, CHEN S P, PRESSMAN I S, et al. A large-scale statistical analysis of barefoot impressions[J]. Journal of Forensic Science, 2015, 50(5):1071-1080.
- [6] KENNEDY R B. Uniqueness of bare feet and its use as a possible means of identification[J]. Forensic Science International, 1996,82(1):81-87.
- [7] JUNG J W, TOMOMASA S, ZEUNGNAM B. Dynamic footprint-based person recognition method using a hidden Markov model and a neural network[J]. International Journal Intelligent System, 2004,19(11):1127-1141.
- [8] 杨琳. 足迹识别技术进展研究综述[J]. 辽宁警察学院学报,2017,19(3):93-97.
- [9] 田越,平西建. 基于曲线形状分析的三维表面识别[J]. 中国图象图形学报,1999(8):71-74.
- [10] RAFAEL C, GONZALE Z, RICHARD E. Digital image processing using MATLAB[M]. 2nd ed. 北京:电子工业出版社,2005.
- [11] POTTMANN H, WALLNER J, HUANG Q X. Integral invariants for robust geometry processing[J]. Computer-Aided Geometric Design,2009,26(1):37-60.
- [12] KRINIDIS S, CHATZIS V. A robust fuzzy local information C-means clustering algorithm for bias field estimation and segmentation of MRI data[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2010,21(3):193-199.
- [13] AHMED M, YAMANY S, MOHAMED N. A modified fuzzy C-means algorithm for bias field estimation and segmentation of MRI data[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2002, 21(3):193-199.
- [14] SMITH M B. The forensic analysis of footwear impression evidence[J]. Forensic Science Communications, 2009, 11(3):1-11.
- [15] 唐继勇,仲元昌,张校臣,等. 融合梯度和色度信息的分块均值漂移目标跟踪[J]. 电讯技术,2015,55(9):1019-1024.
- [16] 唐继勇,仲元昌,张校臣,等. 基于自适应阈值 Kirsch-LBP纹理特征的均值漂移目标跟踪算法[J]. 计算机科学,2015,42(8):314-318.

#### 作者简介:



高毅 男,1978年生于吉林省吉林市,硕士,副教授,主要研究方向为足迹生物特征识别和痕迹检验。

穆治亚 男,1985年生于山西晋中,博士,副研究员,主要研究方向为数字图像处理、生物特征提取与识别。

张群兴 男,1975年生于江西东乡,硕士,主要从事侦察装备质量监督工作。

仲元昌 男,1965年生于四川南充,博士,教授,主要研究方向为通信与测控、模式识别与信息融合。