

应用于血迹检测的高光谱成像技术研究综述

孙威¹, 陈蕊丽^{1*}, 骆建新²

¹ 中国人民公安大学侦查学院, 北京 100038;

² 郑州市公安局刑事科学技术研究所, 河南 郑州 450016

摘要 血迹作为暴力案件现场出现率较高的生物检材,其检验鉴定工作可为案件的快速侦破提供大量信息。高光谱成像技术可对案发现场的血迹检材进行无损、快速成像,相比于检测血迹的化学试剂法和传统的光谱分析方法,高光谱成像技术具有图谱合一的显著优势。在简要分析高光谱成像特点、数据表达方式和数据处理方法的基础上,介绍了高光谱成像技术在国防、生态、食品等领域的应用,重点研究了高光谱成像技术作为血迹检测的一种技术手段在潜在血迹显现、血迹组分分析、血迹分类识别和血迹陈旧度预测中的应用现状,并对其在应用过程中遇到的挑战和后期重点研究方向及发展前景进行了总结和展望。

关键词 光谱学; 高光谱成像技术; 潜在血迹; 血迹组分; 血迹识别; 血迹陈旧度

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0600007

Review of Research on Hyperspectral Imaging Technology Applied to Bloodstain Detection Applications

Sun Wei¹, Chen Ruili^{1*}, Luo Jianxin²

¹ College of Investigation, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China;

² Institute of Criminal Science and Technology, Public Security Bureau of Zhengzhou, Zhengzhou, Henan 450016, China

Abstract Bloodstain is a biological examination material with high occurrence rate in the scene of violent cases. Inspection and identification work can provide a lot of information for the rapid detection of these cases. Hyperspectral imaging technology can be used for nondestructive and rapid imaging of bloodstains in crime scenes. Compared with the chemical reagent method and traditional spectral analysis method for bloodstain detection, the characteristic of image-spectrum merging is a significant advantage of hyperspectral imaging technology. Based on the brief analysis of the characteristics of hyperspectral imaging, data expression, and data processing methods, this paper introduces the applications of hyperspectral imaging technology in the fields such as national defense, ecology, and food. This paper focuses on the application status of hyperspectral imaging technology as a technical means of bloodstain detection in potential bloodstain appearance, bloodstain component analysis, bloodstain classification and identification, and bloodstain age prediction. The paper summarizes the challenges encountered in the application process and the later key research directions and development prospects.

Key words spectroscopy; hyperspectral imaging technology; latent bloodstains; bloodstain components; bloodstain recognition; bloodstain age

OCIS codes 300.6550; 170.1470; 010.0280

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-08-08; 录用日期: 2020-08-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0822001)、中国人民公安大学基本科研业务项目资助(2020GKF102)

* E-mail: 568806842@qq.com

1 引 言

研究人员对光谱成像技术在我国法庭科学领域的应用研究起步于 2004 年^[1], 计算机技术的发展和跨学科研究的不断深化, 使得光谱成像技术的应用日趋成熟。案发现场血迹检材的检测分析中多使用紫外可见反射光谱^[2]、可见-近红外多光谱^[3]、拉曼光谱^[4]等进行光谱数据分析。但是, 常规的光谱分析技术因其无法记录检材物体的图像信息, 应用上不断受到限制。同时, 随着案件现场痕迹物证愈发复杂, 法医人员的检验鉴定要求也不断提高, 所以充分了解现场检材的化学组成和检材上的空间信息是十分重要的。高光谱成像技术能同时分析物体的图像信息和光谱数据, 其无损、非接触的特点弥补了传统的光谱分析技术的不足, 现已在军事侦察与识别伪装、精准农业、海洋遥感、植被研究、生态环保、自然灾害监测等领域发挥着重要作用。

在血迹的检测中, 高光谱成像技术主要应用于

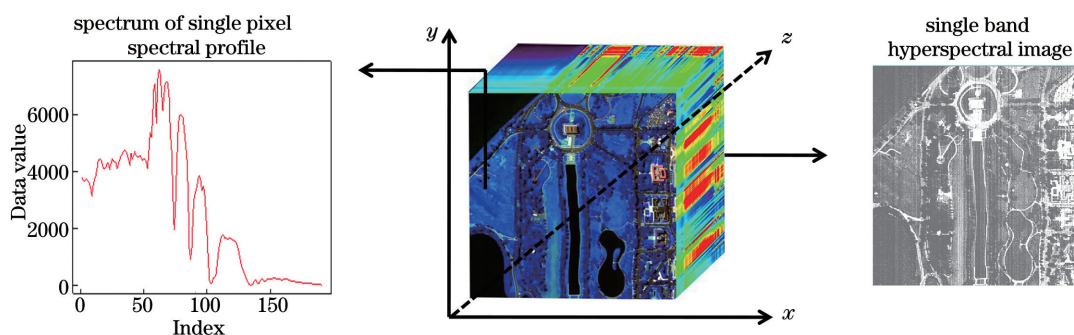


图 1 高光谱数据立方体示意图

Fig. 1 Diagrams of hyperspectral data cube

高光谱成像技术可同时记录血迹检材的图像信息和光谱信息, 定义空间方向维(x, y)和光谱波段维(z), 其构成的坐标系如图 2 所示。一方面空间方向维能够表征血迹在现场的空间分布, xOy 平面

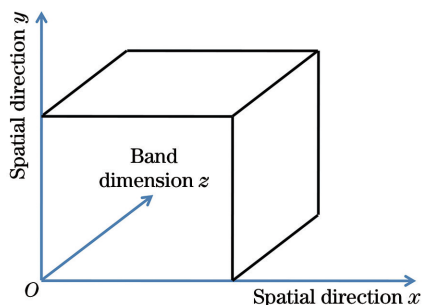


图 2 高光谱数据立方体构成坐标系

Fig. 2 Coordinate system formed by hyperspectral data cube

无损显现案发现场遗留的潜在血迹、分析血迹组分动态变化、分类识别血迹种属以及精确预测血迹陈旧度等方面。本文介绍了高光谱成像的优势特点和主要应用方向, 分析了国内外运用高光谱成像技术在血迹检测领域的研究现状、发展趋势, 并总结了应用中面临的挑战和不足, 以吸引更多学者进行深入研究、推动高光谱成像技术更广泛地应用在法庭科学领域, 并更好地解决公安实战问题。

2 高光谱成像技术特点

高光谱成像技术是交叉学科发展的产物, 是指在紫外到红外范围内利用数百上千个较短的电磁波波段(一般小于 10 nm)从感兴趣的目标物体中获取有价值的信息的技术, 其多波段的特点使得图像维的每一个像素元均可在光谱维得到近乎连续的光谱曲线, 如图 1 所示。被测组分的光谱曲线是反射率随波长的变化规律的集中反映, 只取决于组分的性质, 其特异性和稳定性是利用光谱成像技术检测血迹的基础。

的图像富含现场血迹的色彩背景、外部结构、存在状态等关键点信息; 另一方面光谱波段维可用于研究分析血迹内部的成分、含量等理化特征。

高光谱图像波段较窄、波长范围较宽、光谱分辨率较高, 虽然能够为检测血迹提供大量的数据信息, 但是随着波段数的增加, 相邻波段信息的相关度也随之提高, 这必然导致大量冗余数据的产生。大数据量带来了高冗余度, 会严重影响数据的应用精度。因此, 降低血迹高光谱数据的维数是提高识别效率和分类精度的关键。

3 高光谱图像数据分析

血迹高光谱图像数据的预处理常包含去噪、校正、拼接等操作, 以消除干扰信息的影响。如图 3 所示, 数据降维、光谱特征参量化、数据的混合像元分解

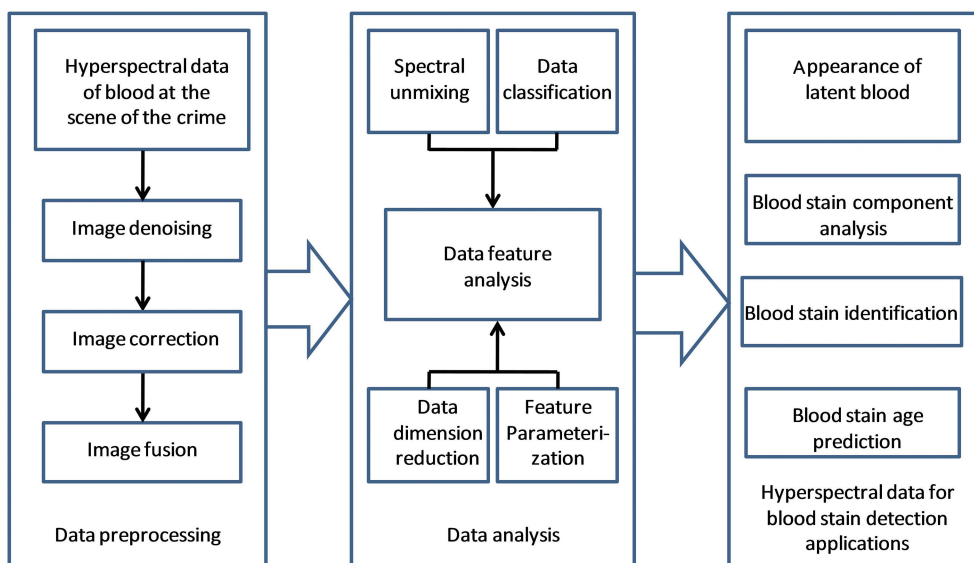


图 3 基于高光谱成像的血迹检测流程及应用

Fig. 3 Process and application of bloodstain detection based on hyperspectral imaging

以及高光谱数据分类是数据分析阶段的主要内容^[5]。

3.1 高光谱数据降维

降低高光谱数据的维数是提高分类识别精度的

关键,也是高光谱成像技术应用于血迹检测分析的前提。表 1 归纳了高光谱数据降维的常用方法,其中特征选择和特征提取是数据降维方法研究的两个

表 1 高光谱数据降维方法

Table 1 Hyperspectral data dimension reduction method

Process	Category	Commonly used method
Feature selection	Optimal algorithm	Feature selection algorithm using information entropy, feature selection based on band correlation, feature selection based on dispersion degree, selection of optimal band index based on fractal dimension, et al.
	Suboptimal algorithm	Sequential forward selection (SFS), sequential backward selection (SBS), genetic algorithm (GA), rough set (RS), ant colony optimization (ACO), et al.
Feature extraction	Linear feature extraction	Principal component analysis (PCA), wavelet transform (WT), minimum noise fraction (MNF), locality preserving projection (LPP), projection pursuit (PP), canonical analysis (CA), maximum margin criterion (MMC), Fourier transform (FT), linear discriminant analysis (LDA), et al.
	Nonlinear feature extraction	Locally linear embedding (LLE), multidimensional scaling (MDS), Laplacian Eigenmap (LE), multilinear principal component analysis (MPCA), linear discriminant analysis (LDA), et al.

方向^[6]。如图 4 所示,特征选择即从原始波段中按照既定的搜索准则或策略选择一定数量包含被测物体主要信息的波段组合,这些波段应满足信息量大、相关性小以及光谱曲线差异大的要求,并能够很好地将被测物质与其他物质区分开,其中 a_{ij} 代表第 i 个样本的第 j 个波段特征, $a_{i2} \sim a_{ij}$ 作为特征选择后的新的波段组合大大缩小了原始波段特征空间,为后续高光谱数据的分类减少了计算量,也避免出现休斯现象(Hughes)。特征提取是指针对原始的高光谱数据集,依据既定的数量关系将原始的高维数据变换到低维空间,并得到新的能够反映被测物质某一性状的特征属性或者是能最大程度地将其与其他被测物质区分开的特征属性。如图 5 所示,假设在原始的高光谱数据集中的第 i 个样本可表示为 $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im})$,特征提取就是要寻找新的光谱特征参量 $w = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_d) \in \mathbf{R}^{m \times d}$,使得

$$b_i = w^T a_i \in \mathbf{R}^{d \times m}, \quad (1)$$

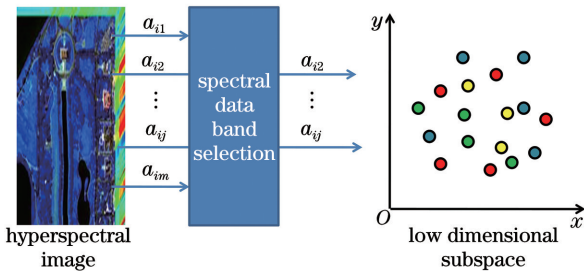


图 4 波段选择过程

Fig. 4 Band selection process

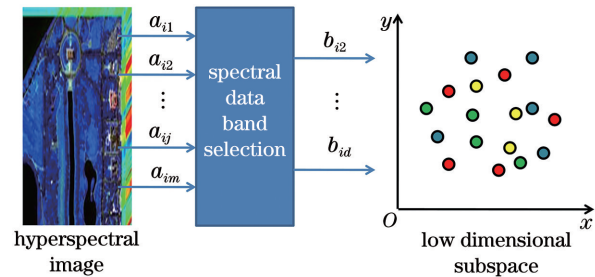


图 5 特征提取过程

Fig. 5 Feature extraction process

式中: b_i 表示原始高光谱 a_i 的低维的子空间的子向量,且 $d \ll m$ ^[6]。例如 3 维小波变换(3D-SPIHT)、基于稀疏表示(SR)的压缩算法、主成分分析(PCA)与反向传播(BP)神经网络相结合的压缩算法均能成功剔除高光谱图像的海量冗余信息^[7-9]。

3.2 高光谱数据分类

参量化光谱特征^[5]即数值化光谱反射率随波长的变化规律,参量化后的光谱特征是后续匹配、分类以及识别的基础。同时,高光谱影像中含有较多的

混合像元,会严重影响基于高光谱影像对特定目标物体的识别和分类精度。例如:在应用高光谱成像技术定位识别案件现场潜在血迹的过程中,由于待测组分复杂,目标对象存在与否未知,大多数情况下其光谱特征是检材特征和干扰物质特征的混合,故对高光谱数据的混合像元进行分解是数据分类的关键。

混合像元的分解本质上将被测物质的原始图像分解为多种单一的物质及其相对应的丰度。基于稀疏表示的混合像元分解是目前较好的高光谱影像像元解混方法,其基本理论为

$$\min \|x\|_0, \text{ s. t. } y = Mx, \quad (2)$$

式中: y 为 $L \times 1$ 的列向量,即 $y \in \mathbf{R}^{L \times 1}$,用于表示输入信号; M 为 $L \times N$ 的矩阵,是一个行数远小于列数的字典,即 $L \ll N$; x 为 $N \times 1$ 的列向量,用于表示丰度系数; $\|x\|_0$ 是 x 的 l_0 范数,也叫稀疏度,且 $\|x\|_0 \ll N$ 。

在血迹的高光谱影像中,由于绝大多数数据都是含有干扰物质信息的冗余数据,若以稀疏表示的方法能够提取数据内可用来处理和表征所有血迹特征的核心节点,这将显著提高高光谱影像中目标血迹检材的分类识别和预测精度。稀疏解混模型可以表示为

$$\min_x \|x\|_0, \text{ s. t. } \|y - Ax\|_2^2 \leq \delta, \\ |x| \geq 0, \mathbf{1}^T x = 1, \quad (3)$$

式中: A 为包含 N 个光谱信号的光谱库。

高光谱数据的分类以不同组分在图像信息中所表现的不同特征为依据,一般有两种分类思路:一是利用统计学方法并基于图像数据来建立分类模型;二是利用地物物理性质并基于光谱曲线进行分类。常用的分类方法有作为统计机器学习的监督分类,如二进制编码法、最小距离法、光谱角填图法、平行六面体法、决策树分类法等。无监督法又称聚类分析,其特点是边学习边分类,在学习的过程中找到相同的类别,据此与不同类别进行区分,如 K-均值聚类、ISODATA 法。血迹检测的应用中常常将综合分类识别正确率作为评价指标,以选取更理想的分类方法。赵明富等^[10]通过比较反向传播(BP)神经网络、支持向量机(SVM)和谱面积法针对鸡、兔、人三种血迹样本建立的综合分类识别模型的识别效果后发现,SVM 的平均正确识别率高达 99.82%且识别时间仅为 0.2092 s,明显优于其他两种方法。

4 高光谱成像技术应用概述

高光谱成像技术以其独特的优势拓展了传统光

谱成像技术的功能并拓宽了其应用范围,现已成为植被监测、生态环保、食品安全、法庭科学等领域的前沿技术。

在植被监测领域,高光谱成像技术主要用于监测植被长势、病虫害防治和农作物估产。高光谱类卫星可获得农作物整个生命周期的生长状况,例如出芽率、长势、密度、抽穗率、饱满度等。卫星成像仪记录的农作物各阶段的高光谱图像可用于决定何时施肥和喷洒农药,以此来最大程度地提高作物产量,扩大经济效益。姚志风等^[11]在降维处理小麦叶片的光谱信息后,采用最小二乘-支持向量机(LS-SVM)和极限学习机(ELM)建立了小麦白粉病、条锈病和健康叶片的判别模型,成功地区分了不同类型的小麦病害。徐静等^[12]则采用 SVM 建立玉米弯孢叶斑病的检测模型,经实验证明,在接种病菌后的第 1 d,线性核函数、径向基核函数和多项式核函数的准确率可达 79% 以上,其中线性核函数在接种第 3 d 的准确率可达 88.75%。实验方法为玉米病害的早期检测提供参考。

在生态环保领域,高光谱成像技术主要用于环境质量监测和垃圾分类识别。例如,在水环境的监测中,水中悬浮物的含量是一个重要的监测指标。徐京萍等^[13]以长春市石头口门水库的水质采样数据和高光谱实测数据为基础,提出基于一阶微分法的悬浮物估测模型,实验验证了该方法用于水中悬浮物含量估测的可行性。另外,垃圾分类是近几年的社会热点话题,高光谱成像技术在这方面也有很好的应用。赵冬娥等^[14]以不同类别垃圾的不同物质属性对不同波长的光的吸收特性的差异为依据,基于高光谱成像技术建立垃圾分类识别模型,实现了对常见的纸质、塑料、木质垃圾样本的分离。

在食品安全领域,高光谱成像技术作为一种新兴的技术手段,具有非接触、快速、高效、无损检验食品检材的特点,满足食品质量检验中对种类复杂、大检材量进行高时效、高准确率检测的技术要求,相对于传统的食品安全检验鉴别方法具有明显的优势。目前,高光谱成像技术主要应用在肉质类食品掺假鉴别、果蔬类食品农药残留测定与各类食品新鲜度的评估检测中。Zhao 等^[15]基于侵入剔除优化(IWO)和 LS-SVM 算法建立对新鲜牛肉中掺杂的变质牛肉的检测方法,其准确率可达 95%。随后,朱亚东等^[16]提出利用连续投影(SPA)算法与多元线性回归(MLR)算法相结合的掺假牛肉的检测模型,该方法不仅能够判断牛肉中是否掺假,同时还实

现了对掺假牛肉的定量检测。

在法庭科学领域,高光谱成像技术多应用在前期的现场勘验检查和后期实验室物证的检验鉴定中,随着成像部件趋向于小型化、便携式、高精度、低成本,该技术已经逐渐成为痕迹检验、文件检验、生物物证检验的关键技术手段。在前期的现场勘查阶段,侦查人员可运用高光谱成像系统在不破坏潜在痕迹物证的前提下快速、高效、完整地扫描现场,综合分析现场信息有助于刑侦人员获取侦查线索,确定侦查方向和范围。后期的司法鉴定人员可依据高光谱成像光谱仪分析、检验各类文件、痕迹、生物检材外部的形态特征和内部的理化性质,进而检验其作为证据的客观性、关联性和合法性^[17]。在痕迹检验中,该技术最初应用于显现和提取潜在印迹,Cantu^[18]基于高光谱成像技术并通过区分印迹折射率的差异和色调颜色微妙的变化来显现纸张表面未经处理的打印痕迹。另外,在刑事案件现场勘查过程中,虽然生物检材较为常见,比如常出现在强奸案件现场的精液(斑)、毛发、血液(痕)等,但是,多数案例中生物检材的量却十分有限。高光谱成像技术作为一种无损检测的手段,可以很好地满足生物物证的检验鉴定要求。

5 高光谱成像技术在血迹检验中的应用

血迹作为暴力案件现场较常见的生物物证,对血迹的检测分析可为侦查人员侦破案件提供嫌疑人和被害人的线索信息,并为审判提供证据。如图 3 所示,法庭科学领域基于高光谱成像技术对案发现场血迹的检验工作主要集中在 4 个方面。高光谱成像技术具有图谱合一的特点和无损检测的优势,将其与模式识别中各类算法相结合构建的血迹检测模型在以上 4 个阶段的检验工作中均已取得理想的检验鉴定效果。

5.1 高光谱成像技术在潜在血迹显现中的应用

目前潜在血迹的显现主要依靠化学、物理学、光学等方法。其中化学试剂法是当前较传统的显现方法,在显现过程中,通过向检材中加入化学试剂,使潜在血迹产生肉眼可见的化学发光反应,从而实现潜在血迹的显现。Barni 等^[19]论述了鲁米诺显现潜在血迹的化学反应机理,并探讨了鲁米诺反应对血迹血清和后续 DNA (deoxyribonucleic acid)检测的影响。但是,显然该方法对血迹的检测为有损检测,化学试剂会破坏血迹中的某些组分,同时消耗

可能本就不多的血迹检材,这不利于后续的法医学检验。

相对于试剂法,光谱法可对潜在血迹检材进行非接触性的无损检测。如图 6 所示,高光谱成像技术依据各波段下血迹形态特征清晰度的差异,在不同波段下对血迹检材进行连续成像,后经光谱特征提取、图像融合处理可获得各波段下血迹的清晰图

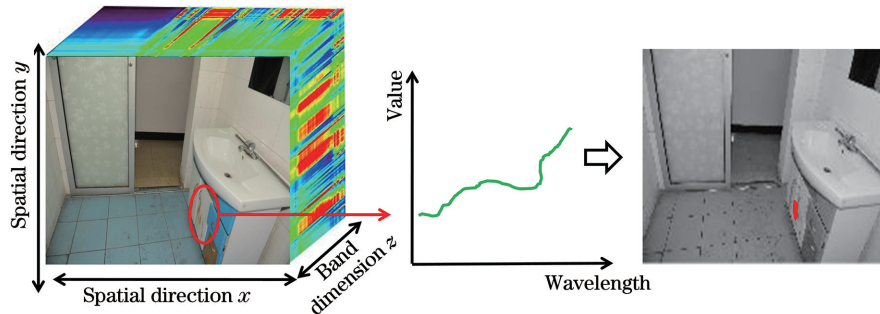


图 6 高光谱成像技术检测某杀人现场血迹示意图

Fig. 6 Hyperspectral imaging technique for detecting bloodstains at a murder scene

Cadd 等^[21]基于可见光波长高光谱反射成像(HSI)对白色瓷砖上以血液为中介物质的潜在血手印进行非接触性无损检测和阳性鉴别,将高光谱成像技术成功地应用于潜在血迹的显现。同时,Cadd 团队再次利用 HSI 技术在不同颜色和孔隙率的基底上,经第三次滤除浅色基底背景后成功地显现了血手印的脊细节,采用更高分辨率的血指纹图谱后,又顺利检测到以黑色瓷砖为代表的深色基底上的脊细节^[22]。朱鲁文等^[23]运用高光谱成像技术,成功剔除了复杂背景对观察血手印的视觉干扰,并分割提取了不同介质、不同颜色背景基底上的血指纹图像,实现了复杂背景下血潜手印的显现。

DNA 提取和扩增方面的研究进展使得刑事技术人员可以在极少数的生物检材中获取广泛的 DNA 图谱,但是生物物证如果没有被明确定位,高灵敏度的 DNA 技术将无法使用。Malegori 等^[24]针对性地研究一种基于高光谱成像技术,并采用归一化差分(NDI)图像作为筛选过程的方法,用以定位不同介质上的潜在生物痕迹。潜在生物痕迹的显现有助于后续 DNA 检验。所以未来 DNA 技术将依托先进的高光谱成像系统检测、分析犯罪现场可能存在的任何潜在生物物证。DNA 技术与高光谱成像技术的有机结合将是刑侦部门破获命案积案的有力工具。

5.2 高光谱成像技术在血迹组分分析中的应用

对血迹组分的分析是利用高光谱成像技术检测血迹的基础。血液中不同物质的化学组成和物理特

征对于特定波长光源的反射率和吸光度的影响各不相同,表现为高光谱数据立方体的光谱维的特征峰存在差异。陈祖林等^[25]通过研究全血以及红细胞、血浆、血清对光的吸收特征后发现,在 240~800 nm 波段范围内血液中不同组分对光的特征吸收峰存在明显不同,并且血液组分的含量也会影响血液的光学特性,例如红细胞的数目。实验结论为区分不同人的血迹提供了科学依据。另外,基于血液光谱独特的反射和吸收特征,高光谱成像技术可以用于分析犯罪现场不同颜色背景上的血迹,但是非血液物质往往会误导检测。Yang 等^[26]在 350~2500 nm 波段范围内通过比较血液和 9 种非血液样本的光谱差异,成功地在 10 种混合样本中提取到血迹图像。

通过比较血液组分在给定波段范围内对光的吸收、散射规律可以反过来表征血液的外部状态和内部的物质构成。Xu 等^[27]通过分析血液的吸收光谱,针对性地选取最佳波长激光以激活血液中相应的细胞和生物分子,从而达到应用激光疗法治愈疾病的目的。Kuula 等^[28]利用高光谱相机和傅里叶变换近红外光谱仪对白色棉织物上 4 个人的血迹进行分离实验。实验依据血液中红细胞的数量对血液光学特性的影响,成功地将不同人的血样区分开。结果还表明,高光谱成像技术可以检测出血液组分中的异常物质和现象,可作为早期疾病预防和治愈疾病的方法。

近几年,医学研究领域,高光谱成像技术常应用于对血液组分的分析,比如血液中白细胞的分类

一直是重大疾病的诊断和控制研究中的重点课题。Huang 等^[29]提出一种基于高光谱成像技术的白细胞分类新方法,利用 Gabor 小波和深度卷积神经网络(CNN)建立细胞分类模型。实验结果表明,该方法相对于传统的依靠医务人员观察血清涂片、凭专业知识和经验来区分细胞更加准确、高效。Marotz 等^[30]利用虚拟高光谱成像(VHI)来定量分析血液中血红蛋白(HGB)的含量,依托高光谱成像技术改造的新型设备的突出特点是便携、成本低,且能够在家庭、学校、工作地等有限资源环境下使用。

在法庭科学领域,高光谱成像技术用于检测分析血迹组分时,可以为刑事技术人员侦破案件提供侦查线索。同时,在医学领域,基于高光谱成像技术的研究还可以作为疾病预防和诊断的一种技术手段,未来有哪些疾病可利用高光谱成像技术去辅助治疗,则是下一步研究的重点。

5.3 高光谱成像技术在血迹分类识别中的应用

如何在犯罪现场以不破坏检材为前提,快速、高效地检测和识别现场血迹,一直以来都是刑侦人员亟需解决的公安实战问题。利用高光谱成像技术在案发现场的原始背景下检验痕迹物证,将有助于侦查人员迅速获取侦查线索并相应调整侦查方向。Bremmer 等^[31]通过分析并拟合白色棉花上的 40 个血迹和 30 个非血迹样本的反射光谱后发现,血液成分和样品反射率之间的拟合优度使远程光谱用于检测血迹成为可能。随后,Edelman 等^[32]则在论证应用高光谱成像技术在分类、识别案件现场血迹方面的可行性的基础上,采用非线性最小二乘多组分拟合高光谱成像仪在模拟犯罪现场获取的血迹光谱数据,成功地将血液与番茄酱、红酒和口红等视觉上类似于血迹的物质区分开。此外,Li 等^[33]依据 HGB 在 400~500 nm 之间独特的吸收光谱特性,应用 HSI 在 9 种红色物质中成功检测到血迹图像,且在盲测过程中,该方法又顺利地检测并识别了案发现场红色 T 恤上的 9 处血迹。Lee 等^[34]提出以调整均值的对比度作为预校正步骤的改进的背景校正算法(BCA),并以在 385 nm、415 nm、458 nm 波长下记录的血迹图像为基础,测试了其提出的基于平均自适应(MABCA)的血迹图像处理方法,该方法克服了原 BCA 要求所有血迹图像都有相似亮度的限制,并显著提高了不同背景上血迹分类识别的准确率。

因多数案例中的现场血迹往往被污染或者被故意破坏,准确区分不同物种的血迹对快速破获案件

具有十分重要的意义。国内学者万雄等^[35]通过测量犬、猫、鸡三种全血样本在近红外谱段的透射光谱数据,发现不同物种个体全血的透射光谱存在明显差异,相同物种个体全血的透射光谱分布相似,只是整体透射率有差别。李成成等^[36]在此基础上利用 400~950 nm 的全波长光谱和选取的特征波长,结合 SVM 和 BP 神经网络建立人、鸡、兔三种血迹分类识别模型,综合对比后发现特征波段结合 SVM 算法的识别方法的识别时间仅为 0.2 s,识别准确率可达 98%。

虽然,高光谱成像技术的应用使得快速分类识别现场血迹的研究有了技术上的创新,但是分类识别准确率对于该技术的检测结果能否被法庭采信至关重要。所以在高光谱成像技术完全融入到刑事案件现场勘查流程之前,降低识别错误率仍是相关研究的主要方向。

5.4 高光谱成像技术在血迹陈旧度预测中的应用

血迹作为刑事案件中出现率较高的生物检材,精确预测血迹陈旧度对于推断案发时间、解析案情、重建现场,以至于验证证据关联性、侦破案件等都具有重要意义。然而,现有精确预测血迹形成时间的方法并不多,光谱技术的发展使得光谱法较多地应用在血迹陈旧度的预测上。最初,Patterson^[37]应用传统的光谱技术在可见光光谱范围内探究时间推移过程中血迹颜色和血迹反射光谱之间的变化规律,以此估算血迹在离体环境中的暴露时间。但是,该方法的预测结果易受外部环境因素的影响,预测精度并不高。

目前,国内外应用高光谱成像技术对血迹陈旧度的研究取得了较大进展。2006 年,Randberg 等^[38]基于高光谱成像技术探究体内环境下鉴别和量化存在于瘀伤皮肤组织内的色团,从而帮助确定皮肤损伤的时间,该研究后来多应用于虐童案件案发时间的推断上。Li 等^[39]则利用便携式高光谱仪,预测离体环境下 30 d 内血迹的陈旧度,并首次分析遗留时间不足 24 h 的血迹,基于线性判别分类算法建立血迹陈旧度的预测模型,该模型对不足 1 d 的血迹样本的预测误差为 ± 0.09 h,对前 7 d 的血迹样本进行预测的平均误差为 ± 0.27 d,对 30 d 内血迹样本进行预测的总体平均误差为 ± 1.17 d。同时,Edelman 等^[40]通过高光谱成像系统分析基底表面和基底上血迹的可见反射光谱,并分别研究遗留时间为 0.1, 2, 15, 40, 200 d 的血迹,以此估算 0~200 d 血迹的陈旧度。实验结果表明,随着遗留时

间的延长,血迹陈旧度预测的绝对误差也随之增大。Cadd 等^[22]则通过将 HSI 和反射光谱相结合对血手印的形成时间进行了研究,在 400~680 nm 之间的血红蛋白(Hb)光谱中,将 415 nm 处的 Soret 波段用于血液鉴定,将 525 nm 和 550 nm 的光谱用于陈旧度预测,并确定了血手印中各组分在 24 h 内会发生很大变化,24 h 后相对稳定。虽然该方法只局限于理论研究,并未应用在实际的案件侦破中,但这项技术在估算血迹年龄方面显示了巨大的潜力。2017 年 Bergmann 等^[41]记录棉花、聚酯、玻璃三种不同基底上的干燥血迹在 400~640 nm 之间的吸收光谱,经数据降维处理后,使用 k 最近邻算法(k-NN)预测了 2 h 至 3 周内血迹的陈旧度,其平均相对误差在 5%~50%之间。

国内学者冯颖等^[42]分析了白瓷砖、白纸、白布三种介质上遗留时间各不相同的血迹的高光谱图像,针对选取的 550~800 nm 范围的特征波段,利用人工神经网络模型建立预测方法,该方法对血迹陈旧度预测的中位相对误差平均值为 8.05%,基本实现对较短遗留时间(30 h)内血迹陈旧度的有效预测。戎念慈等^[3]运用可见光-近红外多光谱记录 11 个人体血液样本在 400~940 nm 之间的血迹图像,经标准正态变换(SNV)的预处理后,采用 K-NN、SVM、随机森林(RF)三种算法的融合模型对 0~2 d 和 2~20 d 的血液样本进行预测,得到的平均误差分别为 0.053 d 和 0.442 d,实验得到的针对血迹陈旧度的预测精度有明显提高。

血迹陈旧度的预测是高光谱成像技术应用于血迹检验的重点,尽管许多研究都表明该技术对血迹陈旧度的预测具有广阔的应用前景。但是,现有的工作都集中于对实验室条件下血迹检材的分析,为了获得一种可以在犯罪现场环境下使用的快速、可靠的方法,研究的重点必须从理论研究转变为对依据这些算法建立的预测模型的全面测试,并充分考虑不同个体、不同遗留介质、不同环境条件的影响,并对该方法的实际适用性进行深入研究。

6 总结与展望

介绍了高光谱成像的特点、数据表达方式及技术优势,总结了高光谱成像技术在血迹检测中的应用方向,并比较了高光谱数据处理过程中基于各类算法构建的血迹检测模型的优劣。作为从 20 世纪 80 年代发展起来的多学科交叉综合性技术,高光谱成像技术在各个领域的应用上均能满足检验要求,

尤其在法庭科学领域,该技术在对血迹的识别检测上表现出了独特的优势,但是其在应用过程中也存在着不足。首先,由于血迹的检验鉴定工作对检测灵敏度、分类识别速度以及形成时间的预测精度的要求不断提高,结合高光谱数据本身维数高、数据量大的特点,在前期的数据预处理阶段,应结合机器学习、模式识别的理论和方法,寻求在血迹检测过程中更具针对性的高光谱数据降维方法,以减少数据计算量并提高算法模型的泛化能力。其次,在数据分析过程中,对于不同介质、不同颜色背景上的血迹,多数案发现场的检材污染严重,使其光谱混合较为复杂,血迹高光谱图像中的像元混合了多种干扰物质,表现为光谱特征是多种物质光谱特征的混合谱。所以后续的研究重点是血迹高光谱图像解混方法,这对提高检测模型的灵敏度和准确度是十分必要的。最后,在法庭科学领域,高光谱成像技术多应用在血迹的检测上,关于该技术对于唾液、尿液、精液等其他生物物证检测的研究较少。今后应探索构建完备的高光谱数据库,以支撑对各种生物物证的检验鉴定工作。

参 考 文 献

- [1] Wang G Q. Forensic spectral imaging [J]. Forensic Science and Technology, 2004(1): 7-12.
王桂强. 光谱成像检验技术 [J]. 刑事技术, 2004(1): 7-12.
- [2] Gao Q Y, Gao S M. Authentication of age of bloodstains using UV visible reflection spectrum [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(8): 2221-2224.
高茜钰, 高士明. 利用紫外可见反射光谱鉴定血迹陈旧度 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(8): 2221-2224.
- [3] Rong N C, Huang M Z. Age estimation of bloodstains based on visible-near infrared multi-spectrum combined ensembling model [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(1): 168-173.
戎念慈, 黄梅珍. 可见-近红外多光谱和多种算法模型融合的血迹年龄预测 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(1): 168-173.
- [4] Li K K. Analysis of blood components by Raman spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(S1): 235-236.
李开开. 利用拉曼光谱分析血液成分的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(S1): 235-236.
- [5] Hou M L, Pan N, Ma Q L, et al. Review of

- hyperspectral imaging technology in analyzing painted artifacts [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(6): 1852-1860.
- 侯妙乐, 潘宁, 马清林, 等. 高光谱成像技术在彩绘文物分析中的研究综述 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(6): 1852-1860.
- [6] Gao Y. Research on dimensionality reduction algorithm for hyperspectral data [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- 高阳. 高光谱数据降维算法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [7] Tang X L, Pearlman W A. Three-dimensional wavelet-based compression of hyperspectral images [M]. Heidelberg: Springer, 2006: 273-308.
- [8] Wu Q, Zhang R, Xu D W. Hyperspectral data compression based on sparse representation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(1): 78-84.
- 吴倩, 张荣, 徐大卫. 基于稀疏表示的高光谱数据压缩算法 [J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(1): 78-84.
- [9] Chen S X, Zhang Y Q. Hyperspectral image compression based on adaptive band clustering principal component analysis and back propagation neural network [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(10): 2478-2483.
- 陈善学, 张燕琪. 基于自适应波段聚类主成分分析和反向传播神经网络的高光谱图像压缩 [J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(10): 2478-2483.
- [10] Zhao M F, Li C C, Tang B, et al. Research on the detection of trace blood based on hyperspectral imaging technology [J]. *Laser Journal*, 2017, 38(5): 45-49.
- 赵明富, 李成成, 汤斌, 等. 基于高光谱成像技术的微量血迹检测研究 [J]. *激光杂志*, 2017, 38(5): 45-49.
- [11] Yao Z F, Lei Y, He D J. Identification of powdery mildew and stripe rust in wheat using hyperspectral imaging [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(3): 969-976.
- [12] Xu J, Miao T, Zhou Y C, et al. Early detection of *curvularia lunata* based on hyperspectral imaging [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2020, 51(2): 225-230.
- 徐静, 苗腾, 周云成, 等. 基于高光谱成像技术的玉米弯孢叶斑病的早期检测 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2020, 51(2): 225-230.
- [13] Xu J P, Zhang B, Lin Y, et al. Estimating total suspended sediments concentrations and transparency with hyper-spectral reflectance in Shitoukoumen Reservoir, Jilin Prvince [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(3): 269-274.
- 徐京萍, 张柏, 蔺钰, 等. 结合高光谱数据反演吉林石头口门水库悬浮物含量和透明度 [J]. *湖泊科学*, 2007, 19(3): 269-274.
- [14] Zhao D E, Wu R, Zhao B G, et al. Research on garbage classification and recognition based on hyperspectral imaging technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(3): 921-926.
- 赵冬娥, 吴瑞, 赵宝国, 等. 高光谱成像的垃圾分类识别研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(3): 921-926.
- [15] Zhao H T, Feng Y Z, Chen W, et al. Application of invasive weed optimization and least square support vector machine for prediction of beef adulteration with spoiled beef based on visible near-infrared (Vis-NIR) hyperspectral imaging [J]. *Meat Science*, 2019, 151: 75-81.
- [16] Zhu Y D, He H J, Wang W, et al. Quick detection of beef adulteration using hyperspectral imaging technology combined with linear regression algorithm [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(4): 184-189.
- 朱亚东, 何鸿举, 王魏, 等. 高光谱成像技术结合线性回归算法快速预测鸡肉掺假牛肉 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(4): 184-189.
- [17] Fan X Y, Yang T. Research of forensic application from criminal procedure perspective [J]. *Evidence Science*, 2012, 20(1): 60-67.
- 樊学勇, 杨涛. 刑事诉讼视野下的法医学证应用研究 [J]. *证据科学*, 2012, 20(1): 60-67.
- [18] Cantu A A. Advances in the physical, optical, and chemical visualization of latent prints [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6741: 67410D.
- [19] Barni F, Lewis S W, Berti A, et al. Forensic application of the luminol reaction as a presumptive test for latent blood detection [J]. *Talanta*, 2007, 72(3): 896-913.
- [20] Janchaysang S, Sumriddetchkajorn S, Buranasiri P. Tunable filter-based multispectral imaging for detection of blood stains on construction material substrates: part 1: developing blood stain discrimination criteria [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(29): 6984.
- [21] Cadd S, Li B, Beveridge P, et al. The non-contact detection and identification of blood stained fingerprints using visible wavelength reflectance hyperspectral imaging: Part 1 [J]. *Science & Justice*, 2016, 56(3): 181-190.
- [22] Cadd S, Li B, Beveridge P, et al. The non-contact detection and identification of blood stained fingerprints using visible wavelength hyperspectral imaging: part II effectiveness on a range of substrates

- [J]. *Science & Justice*, 2016, 56(3): 191-200.
- [23] Zhu L W, Cai J. Hyperspectral imaging to segment the blood fingerprint image with complicate background [J]. *Forensic Science and Technology*, 2017, 42(6): 441-445.
朱鲁文, 蔡竞. 基于高光谱成像技术的复杂背景下血指纹图像分割方法研究 [J]. *刑事技术*, 2017, 42(6): 441-445.
- [24] Malegori C, Alladio E, Oliveri P, et al. Identification of invisible biological traces in forensic evidences by hyperspectral NIR imaging combined with chemometrics [J]. *Talanta*, 2020, 215: 120911.
- [25] Chen Z L, Xu Z R, Nie H F, et al. Experimental study on absorption laws of the blood components to light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1994, 21(1): 77-80.
陈祖林, 续正瑞, 聂慧芳, 等. 血液成分对光吸收规律的实验研究 [J]. *中国激光*, 1994, 21(1): 77-80.
- [26] Yang J, Mathew J J, Dube R R, et al. Spectral feature characterization methods for blood stain detection in crime scene backgrounds [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9840: 98400E.
- [27] Xu S F, Lin S Z, Chen R. Absorption spectrum of blood components in human and rabbit [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3344: 212-220.
- [28] Kuula J, Puupponen H H, Rinta H, et al. The challenges of analysing blood stains with hyperspectral imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9112: 91120W.
- [29] Huang Q, Li W, Zhang B C, et al. Blood cell classification based on hyperspectral imaging with modulated Gabor and CNN [J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2020, 24(1): 160-170.
- [30] Marotz J, Schulz T, Seider S, et al. 3D-perfusion analysis of burn wounds using hyperspectral imaging [J]. *Burns*, 2021, 47(1): 157-170.
- [31] Bremmer R H, Edelman G, Vegter T D, et al. Remote spectroscopic identification of bloodstains [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2011, 56(6): 1471-1475.
- [32] Edelman G J, van Leeuwen T G, Aalders M C G. Hyperspectral imaging of the crime scene for detection and identification of blood stains [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8743: 87430A.
- [33] Li B, Beveridge P, O' Hare W T, et al. The application of visible wavelength reflectance hyperspectral imaging for the detection and identification of blood stains [J]. *Science & Justice*, 2014, 54(6): 432-438.
- [34] Lee W C, Khoo B E, Abdullah A F L. A robust background correction algorithm for forensic bloodstain imaging using mean-based contrast adjustment [J]. *Science & Justice*, 2016, 56(3): 201-209.
- [35] Wan X, Wang J, Liu P X, et al. Identification of animal whole blood based on near infrared transmission spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(1): 80-83.
万雄, 王建, 刘鹏希, 等. 近红外透射光谱的动物全血鉴别 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(1): 80-83.
- [36] Li C C, Zhao M F, Tang B, et al. Application of hyperspectral technology in classification and recognition of bloodstains [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(3): 489-494.
李成成, 赵明富, 汤斌, 等. 高光谱成像技术在血迹分类识别中的应用 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019, 17(3): 489-494.
- [37] Patterson D. Use of reflectance measurements in assessing the colour changes of ageing bloodstains [J]. *Nature*, 1960, 187: 688-689.
- [38] Randeberg L L, Baarstad I, Løke T, et al. Hyperspectral imaging of bruised skin [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6078: 60780O.
- [39] Li B, Beveridge P, O' Hare W T, et al. The age estimation of blood stains up to 30 days old using visible wavelength hyperspectral image analysis and linear discriminant analysis [J]. *Science & Justice*, 2013, 53(3): 270-277.
- [40] Edelman G, van Leeuwen T G, Aalders M C G. Hyperspectral imaging for the age estimation of blood stains at the crime scene [J]. *Forensic Science International*, 2012, 223(1/2/3): 72-77.
- [41] Bergmann T, Heinke F, Labudde D. Towards substrate-independent age estimation of blood stains based on dimensionality reduction and k-nearest neighbor classification of absorbance spectroscopic data [J]. *Forensic Science International*, 2017, 278: 1-8.
- [42] Feng Y, Cai J. Age estimation of the bloodstains on different substrates based on the hyperspectral imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 053004.
冯颖, 蔡竞. 基于高光谱成像技术的不同介质血迹陈旧度研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 053004.