

光谱成像技术在法庭科学中的应用研究

刘康康^{1,2*}, 罗亚平^{1**}¹中国人民公安大学侦查学院, 北京 100038;²安徽省公安教育研究院公安科学技术系, 安徽 合肥 230031

摘要 光谱成像技术是一种集合光谱技术和成像技术的方法,能获取被检物体的空间信息和光谱信息,形成三维的光谱影像集。作为一种快速、无损的光学检验方法,光谱成像技术能满足法庭科学对物证检验的要求,尤其在痕迹物证的显现、识别、分类方面具有十分重要的作用。对光谱成像技术的基本原理和流程进行介绍,概述了其在法庭科学文件检验、血迹检验、指纹检验等领域的前沿应用,并分析了法庭科学领域光谱成像技术发展存在的困境和未来趋势,以促进该技术进一步发展,使其更好地服务于法庭科学工作。

关键词 光谱成像; 法庭科学; 物证检验; 成像检验

中图分类号 O439;D918.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230800

Application of Spectral Imaging Technology in Field of Forensic Science

Liu Kangkang^{1,2*}, Luo Yaping^{1**}¹School of Investigation, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China;²Department of Public Security Science and Technology, Anhui Public Security Education Research Institute, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract Spectral imaging is a method that integrates spectral and imaging techniques to extract spatial information and spectral information of an object to form a three-dimensional hypercube. As a fast and nondestructive optical inspection method, spectral imaging can meet the requirements of forensic science for examining physical evidence. Specifically, it plays a crucial role in the appearance, identification, and classification of trace evidence. In this study, the principle and workflow of spectral imaging are introduced, followed by cutting-edge applications in forensic science, such as examinations of document, blood stain, and fingerprint. Furthermore, the dilemma and future trend of spectral imaging are analyzed to promote further technological development that can serve forensic science.

Key words spectral imaging; forensic science; physical evidence examination; imaging inspection

1 引言

光谱成像技术最早在 20 世纪 80 年代提出^[1],用于遥感光谱成像,成功对不同土壤形态和植物叶片类型等进行区分。随着光谱、成像和计算机技术的更新迭代,光谱成像技术已成为农业、工业、医疗等领域中^[2]的重要技术方法。近年来,随着机器学习、模式识别等方法深入应用,及材料科学的快速发展,光谱成像系统性能不断提升,在食品检验、医疗诊断、国土安全、文物鉴定等方面发挥了巨大作用,尤其在法庭科学^[3]领域,为痕迹物证的原位检验、无损提取提供了新的思路

和方法。

本文对光谱成像技术的基本原理和 workflow 进行介绍,并着重对其在法庭科学各领域的前沿应用进行概述,分析了现阶段光谱成像技术在法庭科学应用中存在的困境和发展趋势,希望吸引更多研究人员利用光谱成像技术在法庭科学领域开展更深入和全面的研究,以服务于公安工作。

2 光谱成像技术简介

光谱成像技术相较于传统成像技术有巨大的性能优势,传统成像只能在特定颜色上收集数据,采用单通

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-05-07; 录用日期: 2023-06-01; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 安徽省教育厅科学研究重点项目(KJ2021A1545)

通信作者: *liukangk01@163.com; **yaping_luo@126.com

道滤波器收集 RGB 三通道上的数据,因此,对某些复杂背景或场景下的显现效果不佳。光谱成像技术是一种既能获取样品的空间分辨率,又能获取样品的光谱分辨率的技术。空间分辨率反映了图像像素点之间的空间关系,而光谱分辨率反映了图像各像素与波长之

间的函数关系。光谱成像结果以“光谱数据集”的形式呈现,包括两个空间维度(S_x 和 S_y)和一个光谱维度(S_λ),数据集中每一个波长上有一张完整的图像,而每个像素在光谱域上都有一个连续的光谱图像,如图 1 所示。

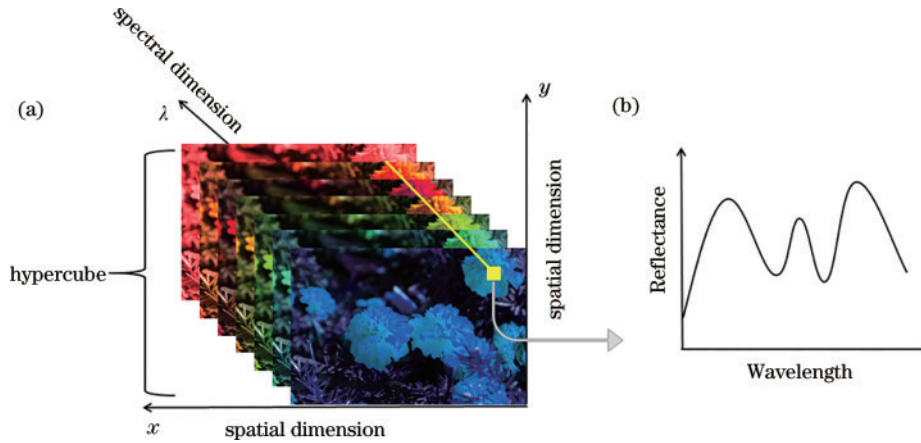


图 1 光谱成像原理示意图。(a)光谱影像集;(b)方框像素点处的光谱曲线图

Fig. 1 Diagram of spectral imaging principle. (a) Hypercube; (b) spectrogram at square pixel point

为了更加符合人眼的视觉特性,传统图像多数采用 RGB 形式呈现,每个图像像素点在可见光谱范围内都由 R、G、B 三个波长测量值混合而成。相比之下,光谱成像获取的信息更加丰富。根据光谱分辨率和光谱波段数量,可将光谱成像分为多光谱成像、高光谱成像和超光谱成像,如表 1 所示。多光谱成像可以获取三个波段以上的光谱信息,不仅包括人眼在自然光下观察到的图像,还能获取红外、紫外等电磁波谱下图像的细节信息,但是多光谱图像有光谱分辨率不高的缺点,因此无法解析场景中存在的更精细的光谱特征。高光谱成像(HSI)中单个像素的光谱可以比普通图像提供更多关于材料表面的信息。高光谱传感器比多光谱传感器具有更高的光谱分辨率,因此能够区分场景中更细微的差异,也能获取更多的波段数,能达到几十甚至几百个光谱波段。相比多光谱图像和 RGB 图像,高光谱图像的光谱信息更加丰富。高光谱成像技术的光谱分辨率更高、光谱波段范围更广、数据信息也更加丰富,对一些高度着色的如被血迹覆盖的手印和足迹、背景干扰严重的如深色背景和复杂背景上的指纹,传统光学成像难以清晰显现痕迹,高光谱成像能完成这一任务。超光谱成像有着更高的光谱分辨率和光谱通道,但是数据冗余大,适合一些需要高精度测量的场

景。本文所介绍的光谱成像主要以高光谱成像为主。

3 光谱成像技术工作原理及流程

3.1 工作原理

高光谱成像系统主要由光源、样品台、光谱成像仪和计算机组成,其结构如图 2 所示。光源多采用卤素灯;样品台上放置被拍摄物体,可根据拍摄需要变换样品位置;光谱成像仪是整个系统的核心构成,内置液晶可调谐滤波器(LCTF)和 CCD 照相机;与其他的滤波器相比,LCTF 的优点是它能够通过计算机得到控制,人为选择合适波长的单色光;CCD 相机用于成像,它与 LCTF 耦合,记录待检物品各个波段上的光谱数据,形成光谱影像集;计算机用于控制 CCD 成像,配备专业分析软件,用于光谱数据集的采集和处理,并需要进行定性或定量分析。

表 1 光谱成像系统的分类

Table 1 Classification of spectral imaging systems

System type	Spectral resolution	Spectral band order of magnitude
Multispectral imaging	0.1	10^1
Hyperspectral imaging	0.01	10^2
Ultraspectral imaging	0.001	10^3

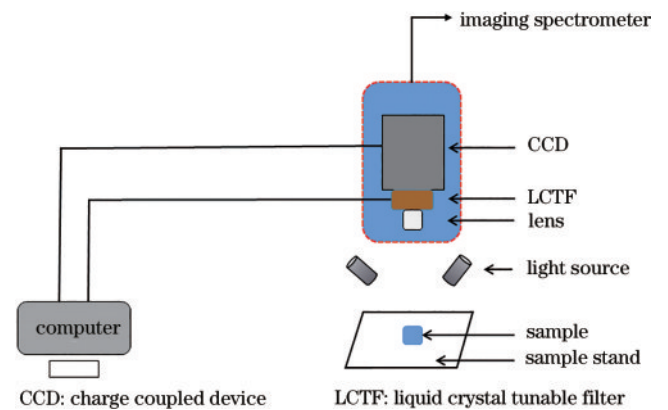


图 2 高光谱成像系统示意图

Fig. 2 Schematic of the hyperspectral imaging system

3.2 工作流程

高光谱成像工作流程包括数据采集和数据处理两部分。数据采集环节,为提高图像采集质量,避免环境光线干扰,一般在暗室中进行操作。同时,在采集前需要对仪器进行黑白校正,消除电噪声及光谱通道未知偏移,校正公式为

$$I = \frac{I_{\text{raw}} - I_{\text{black}}}{I_{\text{white}} - I_{\text{black}}}, \quad (1)$$

式中: I 代表经过校正后的高光谱数据; I_{raw} 代表原始高光谱数据; I_{white} 代表利用标准白板采集的白板数据; I_{black} 代表将相机镜头盖上后获取的黑板数据。

数据处理环节的目的在于对获取的光谱和图像数据进行处理,从而挖掘有价值的信息,可分为预处理、数据降维和回归模型构建3部分。在数据处理前,要选择感兴趣区域(ROI),ROI选择能大大降低计算复杂度,提高数据处理和模型运行的效率。除了人工标定ROI外,也有通过软件自动选取的,如袁旭林^[4]提出一种基于随机姿态的高光谱图像ROI区域选择方法。高光谱成像工作流程如图3所示。

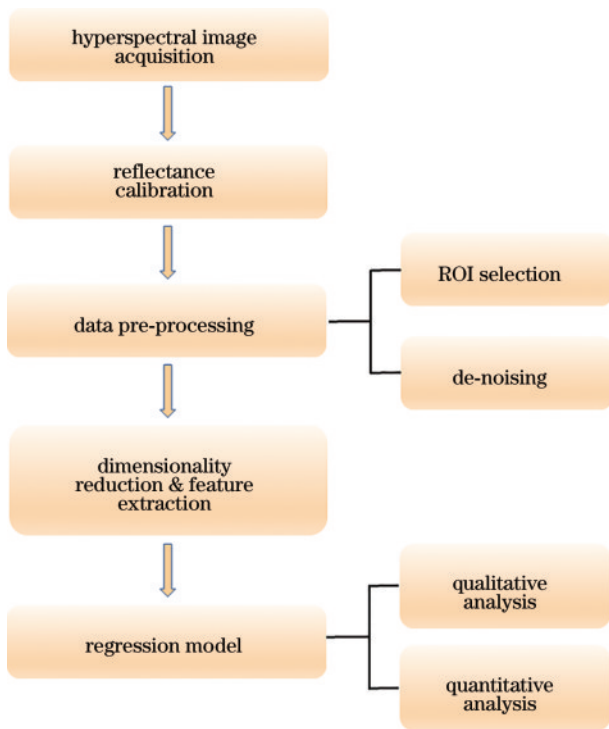


图3 高光谱成像工作流程

Fig. 3 Workflow of hyperspectral imaging

预处理能有效减少环境噪声、系统噪声等影响,提高系统灵敏度、分辨率和信噪比,常用方法有 Savitzky-Golay 平滑^[5]、多元散射校正^[6]、标准正态变量^[7]、导数光谱法^[8]、连续小波变换^[9]、规范化处理(标准化^[10]、中心化^[11]、归一化处理^[12])等。数据降维帮助研究人员从庞大的数据中过滤出有价值的信息,大致分为交替光谱变换技术和多元(高光谱)图像分类技术^[13]。交替光谱变换包括对样品和背景光谱进行比值的不同方法,

以及在光谱域中对数据进行数学变换的方法。多元(高光谱)图像分类技术利用多变量统计技术,根据相似性对高光谱图像中的光谱和像素进行分类。常用的数据降维方法有主成分分析、独立成分分析、线性判别分析、因子分析、卷积自编码器、t-分布式随机邻域嵌入^[14]、非负矩阵分解^[15]、连续投影算法、迭代保留信息变量算法、奇异值分解等。在光谱图像数据经过降维处理后,根据目标需求设计合适的回归模型,通过定性、定量回归模型,对待检样品进行分类识别。在光谱数据分析中主要进行光谱匹配,即对待检光谱同参考光谱进行匹配,确定未知光谱类别,进而确定样品类型或样品中某类物质含量,主要采用偏最小二乘回归^[16]、反向传播神经网络、竞争性自适应重加权采样法^[17]、支持向量机等方法。

4 光谱成像技术在法庭科学中的应用

4.1 文件检验

文件检验是法庭科学物证检验中常见的一种工作,例如书写笔迹鉴定、印章真伪检验、朱墨时序检验、污损文件检验、书画真假鉴定等。近年来,国内外学者利用光谱成像技术在文件检验领域开展了大量研究,尤其在机器学习等方法的帮助下,对光谱数据信息进行深度挖掘分析。Khan等^[2,18]构建了一种无损的文件自动伪造检测系统,成功地从公开的UWA书写墨水高光谱图像(WIHSI)数据库中提取不同数量和不同混合比例的视觉相似的墨水,使用模糊C均值聚类(FCM)算法来区分多光谱文档中两种不同混合比例的油墨,并结合基于深度学习技术的卷积神经网络(CNN)用于高光谱文档图像的伪造检测,取得较好效果。Wang等^[15]构建反向传播神经网络(BPNN)和一维卷积神经网络(1D-CNN),对法庭科学中印章油墨高光谱图像数据进行分类识别,证明两种方法的实用性,结果表明在印油物证检验中,1D-CNN比BPNN具有更高的稳定性和效率。Melit Devassy等^[14]将t-分布式随机邻域嵌入(t-SNE)算法引入到法庭科学油墨物证分析,对墨水数据进行降维和可视化,采用轮廓系数(SI)、归一化互信息(NMI)、均一性指数(HI)、完整性指数(CI)评估聚类性能,并与主成分分析(PCA)算法比较,t-SNE算法表现出较好的降维效果和聚类质量。隐性字迹显现和分类是法庭科学领域文件检验研究中的难点工作,犯罪嫌疑人常使用隐性字迹进行票据或文件造假,李云鹏等^[19]利用高光谱成像技术,将擦除、密写和掩盖3类常见的隐性字迹成功显现,并结合支持向量机(SVM)算法对不同笔迹成分进行分类,分类精度达99.28%,如图4所示,所设计的方法对可擦笔擦除字迹、荧光密写笔字迹、柠檬汁字迹3种不可见字迹进行显现和分类,取得较好效果。

在文件检验领域,研究人员已经利用光谱成像系统开展了大量研究,未来需要进一步建立更加丰富完

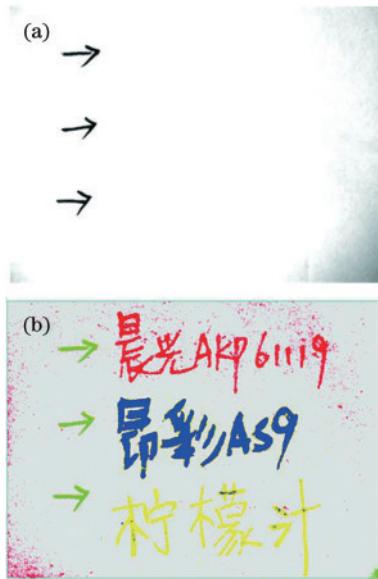


图 4 隐形字迹显现^[19]。(a)晨光可擦笔擦除字迹、昂彩密写笔字迹、柠檬汁字迹;(b)基于高光谱成像的分类结果
Fig. 4 Reappearing of invisible writing^[19]. (a) Chenguang erasable pen erasing handwriting, Angcai steganography pen handwriting, lemon juice handwriting; (b) classification result based on hyperspectral imaging

备的文件、墨水等相关待检物的光谱数据库,开发更加便携的检验系统,结合人工智能、机器学习等开展自动化识别比对,做到现场文件物证快速提取、临场检测,使光谱成像在法庭科学文件检验领域得到更加深入广泛的应用。

4.2 血迹检验

犯罪现场尤其是命案现场的血迹分析是现场勘查人员的重点工作之一,在对血迹物证进行分析前,首先要辨识现场遗留的污渍是人的血迹还是其他无关的干扰物质,例如红色墨水、酱油、动物血迹等。传统的血迹显现方法经常使用四甲基联苯胺(TMB)、鲁米诺、酚酞等化学试剂将血迹显现出来,这些试剂有较强的灵敏度,对血迹显现具有非常好的效果,但有时会产生假阳性的结果。但是,以上化学试剂会对后续法医DNA物证提取分析造成不可挽回的破坏,因此,犯罪现场的血迹快速无损鉴别具有十分重要的意义。光谱成像技术已成功应用于血迹的无损快速识别,可见区域血斑的反射光谱主要由血液中血红蛋白的光谱决定,415 nm是血红蛋白(氧血红蛋白、去氧血红蛋白和高铁血红蛋白)的最大吸收峰(称soret峰或 γ 带),在500 nm和600 nm之间的两个较弱和较宽的吸收带称为 β 和 α 带。可见光谱范围内的蓝光被大量吸收后,在soret波段内血迹呈现红色。Zhao等^[20]提出一种新模型,即blood band inequality model(BBIM),用于血迹分类识别,利用反射率之差建立不等式模型,成功从8种类似血迹痕迹中识别出血迹,如图5所示。在白色T恤上遗留的8种污渍经过高光谱成像后,获取各类

污渍的光谱数据,利用BBIM有效将血迹从其他污渍中识别出来。Li等^[21]利用可见光反射高光谱成像系统成功区分血迹和9种类似血迹污渍,并将49种类似血迹物质光谱数据列入非血渍库。Zulfiqar等^[22]针对3种基质上的血迹,使用支持向量机(SVM)、K最近邻(KNN)、人工神经网络(ANN)、决策树(DT)和随机森林(RF)等机器学习模型进行分类,对3天内的血迹样本的识别率达100%。

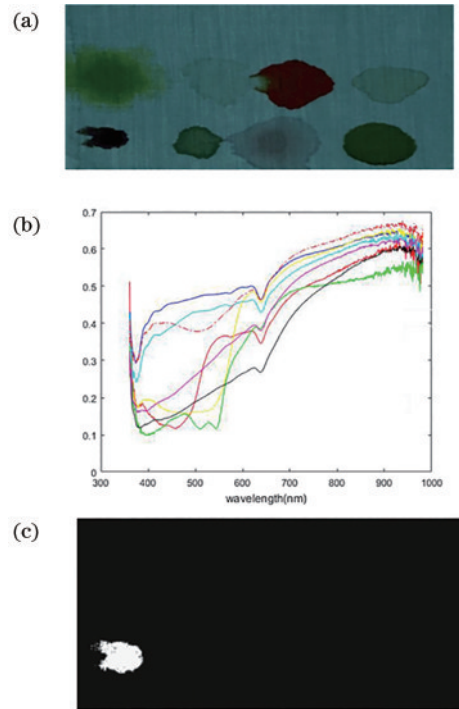


图 5 基于BBIM的血迹分类识别^[20]。(a)白色T恤上血迹及其他污渍;(b)污渍对应的光谱数据;(c)BBIM的血迹提取结果

Fig. 5 Detection and extraction of bloodstains by BBIM^[20]. (a) Blood and other stains on white T-shirt; (b) corresponding spectra of stains; (c) blood extraction result using BBIM

法庭科学血迹检验对现场重建具有十分重要的意义,研究也已经证明光谱成像技术能成功显现、识别现场血迹。未来,为解决深色(如黑色)基底上的血迹显现,需要开发更强的光源和更灵敏的系统,解决其他干扰物(如植物或动物蛋白)等造成的假阳性问题。同时,光谱成像技术和传统化学增强显现方法的结合使用、更加科学和合理的操作流程的制定,能进一步增强显现效果,完善法庭科学血迹检验方法。

4.3 指纹检验

指纹是犯罪现场最常见的痕迹之一,通过指纹自动识别能直接锁定嫌疑人身份,通过手指分泌物成分分析能判断嫌疑人是否有吸毒、酗酒等行为,但某些情况下,指纹是“隐藏”起来的,不能被直接观察到,对这些潜在指纹进行显现、识别是侦查人员开展指纹鉴定前需要完成的工作,高光谱成像技术在指纹识别检验

中发挥了重要作用。Cadd 等^[23]利用 HSI 显现白色瓷砖上的潜指纹,并利用伪彩色图像表示指纹形成时间长短,对遗留时间为 0~30 天的血指纹进行成像,为现场血指纹遗留时间的判断提供了新的思路。庄园等^[24]以人血、鸡血和蛇血为研究对象,利用高光谱成像技术成功对不同血迹类型血指纹样本进行了可视化和无损提取,并完成 3 种血迹样本的种属认定。重叠指纹分离一直是法庭科学指纹检验中的难点问题, Akiba 等^[25]利用指纹荧光光谱的差异对两层重叠指纹进行分离,并通过主成分分析(PCA)和多元曲线分辨-交替最小二乘(MCR-ALS)方法确定获得高对比度单个指纹图像的最佳方法。如图 6 所示,原始图像中指纹#1 和

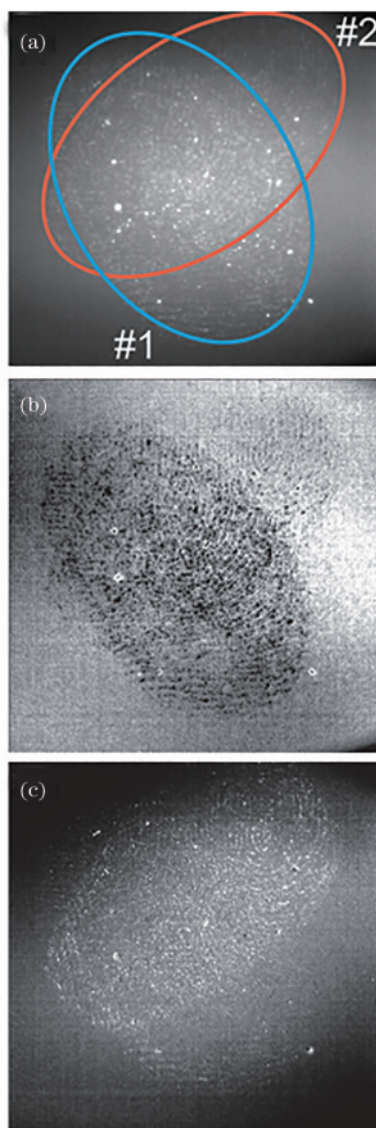


图 6 基于 PCA 和 MCR-ALS 的重叠指纹分离^[25]。(a) 2 枚重叠指纹原始图像; (b) PCA 分离指纹#1; (c) MCR-ALS 分离指纹#2

Fig. 6 Separation of overlapping fingerprints based on PCA and MCR-ALS^[25]. (a) Original image of two overlapping fingerprints; (b) fingerprint #1 separated by PCA; (c) fingerprint #2 separated by MCR-ALS

指纹#2 相互重叠影响,无法分辨,通过 PCA 和 MCR-ALS 能分别将 2 枚指纹分离开,虽然分离效果并不是特别理想,但对于重叠指纹分离这一难题提供了一种新的思路和方法。陈壮^[26]利用可见光谱成像技术成功消除复印纸、牛皮纸等 5 种材质上的书写字迹干扰,获取字迹上使用印油印泥按捺的指纹纹线,光波波长短步进越小,指纹纹线提取质量越高。

即使在 DNA 和视频侦查技术发展迅速的今天,指纹仍然在犯罪案件侦查中发挥着巨大的作用,并在个体识别、现场勘查、社会管理等方面的应用越来越广泛。基于光谱成像的指纹识别仍是未来研究的重要方向,由于指纹脊线较小,需要进一步提升系统分辨率,同时兼顾扫描速率,使光谱成像技术能在较大场景下完成对指纹的快速定位、识别工作。利用光谱成像技术开展指纹遗留物质成分分析仍鲜有报道,也是未来光谱成像指纹检验研究热点之一。

4.4 其他物证检验

除了在上述法庭科学领域有丰富的应用,还有一些学者利用光谱成像技术开展微量物证、枪弹痕迹检验等方向的研究,取得了丰硕成果。Zapata 等^[27]利用多光谱成像技术对射击残留物进行显现,通过光谱图像对射击残留物进行定量分析,构建出射击残留物粒子像素数与射击距离之间的函数关系。Uysal 等^[28]利用光谱成像技术设计了一种无损检验方法,用于显现枪支聚酰胺 6(PA 6)材质上被抹除的身份标识,利用紫外和红外光谱成像对经过表层加热、深层刮削、表层锤击后的数字符号进行识别显现,达到较好的效果,为法庭科学枪支痕迹鉴定提供了新的思路。Melit Devassy 等^[29]为了检测犯罪现场常见饮料种类并判断其遗留时间,利用高光谱成像技术和支持向量机分类模型,结合基于体积梯度的波段选择(VGBS)算法,检测采集到的 HSI 数据中的显著波段,评估了饮料在 3 天内发生的光谱变化,证明了 HSI 技术对饮料污渍的快速、非接触和非侵入性分析的有效性。El-sharkawy 等^[30]利用光谱成像对 TNT、RDX、HMX 等常见爆炸物进行了远程识别,使用高光谱相机采集每种爆炸物的反射光和发射光的立方图像,利用反射能量随波长变化的函数关系,生成每种炸药的特征谱,实现对各种爆炸物的远程识别。Huang 等^[31]建立了基于反向传播神经网络(BPNN)和 1D-CNN 的高光谱数据分析模型,并与 KNN、SVM、RF 和偏最小二乘判别分析(PLS-DA) 4 种传统机器学习分类模型进行比较,证明 1D-CNN 与 HSI 技术结合在纺织纤维物证分类识别中具有优势。

对光谱成像在法庭科学中的应用进行总结,结果如表 2 所示。可见,由于高分辨率和成像速度,高光谱成像技术在法庭科学中的应用广泛,且随着机器学习算法的优化,深度学习已在法庭科学光谱成像数据分析中发挥重要作用,极大提高了研究人员对海量高光谱数据分析的效率。

表 2 光谱成像技术在法庭科学中的应用汇总

Table 2 Summary of applications of spectral imaging technology in forensic science

Application	Reference	System type	Spectral range /nm	Spectral sampling interval /nm	Sample	Algorithm
Document examination	[18]	Multispectral	400–720	10	Writing inks	FCM
	[15]	Hyperspectral	450–950	5	Stamp-pad inks	BPNN/1D-CNN
	[14]	Hyperspectral	400–1000	3.18	Gel ink, ballpoint, and liquid ink	t-SNE
	[19]	Hyperspectral	400–720	5	Invisible writing	SVM
Blood stain examination	[20]	Hyperspectral	400–1000	1.2	Blood stain and seven other blood-suspect substances	BBIM
	[21]	Hyperspectral	400–500	5	Blood stain and nine other blood-suspect substances	
	[22]	Hyperspectral	397–1003	2.7	Blood stain and eight other blood-suspect substances	SVM/KNN/ANN/DT/RF
Fingerprint examination	[23]	Hyperspectral	400–680	5	Horse blood-stained fingerprints	
	[24]	Hyperspectral	450–950	5	Human, chicken, and snake blood-stained fingerprints	
	[25]	Hyperspectral	400–600	1	Overlapping fingerprints	PCA/MCR-ALS
	[26]	Multispectral	450–720	5/10/20/30/40/50	Ink and inepad fingerprints	
Other physical evidence	[27]	Multispectral	400–1000	Unfixed	Gunshot residues	PCA
	[28]	Hyperspectral	312–800	Unfixed	Non-serial number information of PA 6 of firearms	
	[29]	Hyperspectral	400–1000	3.18	Beverage stains	SVM/CAE/VGBS
	[30]	Hyperspectral	200–1100	Unfixed	Explosive materials	
	[31]	Hyperspectral	450–950	5	Textile fibres	1D-CNN

5 总结与展望

光谱成像技术是一种结合光谱和成像技术特点的光学检验方法,能获取被检物体的光谱信息和图像信息,基于这一特性,光谱成像在法庭科学领域展现出巨大的应用价值,并在现场重建、痕迹显现、物证鉴定等方面有了广泛的应用。但该技术发展时仍然存在一些困境:由于光谱信息和图像信息数据量大,冗余数据对信息获取造成困扰;各类物品的光谱数据库建立不完善,无法对待检样品进行入库比对;目前,很多检验在实验室环境下才能取得较好效果,有利于公安实战应用的便携式、高灵敏度的光谱成像系统开发不足等。结合公安工作实际和研究热点,本课题组认为未来光谱成像技术在法庭科学领域有以下发展趋势。

1) 开发更加便携高效的实战化应用设备。光谱成像系统在无自然光影响的暗室或暗箱环境中获得较好效果,但进行法庭科学现场勘查时,现场环境复杂,难以达到实验室条件。有时在临场快检的需求下,现场取样再返回实验室进行检验难以满足时效。为满足现场物证快显、快采、快检的原则,更小型化、便捷化、快速化和高灵敏度的光谱成像系统需要被开发,同时,需要提高系统的分辨率和光谱波段范围^[32]以满足现场

对微小痕迹的显现提取要求。同时,将光谱成像技术与显微成像技术结合^[33],未来有望在法庭科学微量物证分析和法医学检验领域中开拓相关应用。

2) 利用人工智能辅助光谱成像在法庭科学中的应用。在法庭科学实战应用中,光谱成像需要不断提升图像分辨率和光谱分辨率,发现潜在、微量痕迹物证,但分辨率的提升必定带来冗余数据,例如超光谱成像技术虽然能获取大量的数据信息,但受制于数据处理过程繁杂,难以满足高效率,在法庭科学领域应用仍不广泛。人工智能辅助光谱成像是未来发展的一个重要方向,面对海量的数据,以机器学习尤其是深度学习模型为代表的人工智能算法在大数据处理和分析中具有巨大的优势,成为了光谱数据降维、分类、识别新的助力点。因此,不断优化算法模型,深入挖掘人工智能潜力,有助于光谱成像在法庭科学领域开展更加广泛而深入的应用。

3) 建立光谱数据库。现场物证溯源是现场勘查的主要任务,通过光谱数据分析对现场痕迹物证进行种属认定具有可行性,因此建立各类物质的光谱数据库具有十分重要的意义。但由于现场环境复杂,受温度、湿度等各类因素影响,准确可靠的光谱数据库建立仍然是一项较为困难的工作,仍是未来工作的重点。

4) 现场三维光谱重建。物证的光谱成像多集中在二维空间,不能反映出物证与现场之间的空间关系。根据现场重建需求,黄威等^[34]利用 HF-Net 架构的基于卷积神经网络的深度学习的图像目标位姿估计方法,成功将光谱信息映射到三维空间模型,实现对立体物证的三维空间信息和光谱特征的精细定位。三维光谱成像技术为法庭科学现场重建提供了新的研究方向,值得深入研究和发

展。本文对光谱成像技术的工作原理及流程进行了介绍,重点对光谱成像技术在法庭科学领域中的前沿应用进行概述,并分析了光谱成像技术在法庭科学领域发展的趋势。相信随着光谱、图像和计算机技术不断发展,光谱成像技术一定会突破各种技术瓶颈,在法庭科学领域有更加广泛而深入的应用。

参 考 文 献

- [1] LaBaw C. Airborne imaging spectrometer: an advanced concept instrument[J]. Proceedings of SPIE, 1984, 0430: 68-74.
- [2] Khan M J, Khan H S, Yousaf A, et al. Modern trends in hyperspectral image analysis: a review[J]. IEEE Access, 2018, 6: 14118-14129.
- [3] 王桂强. 光谱成像检验技术[J]. 刑事技术, 2004(1): 7-12. Wang G Q. Forensic spectral imaging[J]. Forensic Science and Technology, 2004(1): 7-12.
- [4] 袁旭林. 基于高光谱成像技术的苹果糖度无损检测系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2021: 25-32. Yuan X L. Research on nondestructive detection system of apple sugar content based on hyperspectral imaging technology[D]. Jinan: Shandong University, 2021: 25-32.
- [5] Ruffin C, King R L, Younan N H. A combined derivative spectroscopy and Savitzky-Golay filtering method for the analysis of hyperspectral data[J]. GIScience & Remote Sensing, 2008, 45(1): 1-15.
- [6] 王展, 王可, 王伟超. 提高光谱匹配精度的散射噪声消除方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 022401. Wang Z, Wang K, Wang W C. Scattering noise elimination method for improving spectral matching accuracy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 022401.
- [7] 徐博, 许童羽, 于丰华, 等. 东北寒地水稻茎秆纤维素含量近红外光谱反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(6): 1775-1781. Xu B, Xu T Y, Yu F H, et al. Inversion method for cellulose content of rice stem in northeast cold region based on near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(6): 1775-1781.
- [8] 高雯婷, 廖秀芬, 黄权龙, 等. 一阶导数光谱法同时测定水样中的罗丹明 B 和活性艳红 X-3B[J]. 分析试验室, 2021, 40(5): 523-528. Gao W T, Liao X F, Huang Q L, et al. Simultaneous determination of Rhodamine B and reactive brilliant red X-3B in water by first derivative spectrometry[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2021, 40(5): 523-528.
- [9] 陈昊宇, 杨光, 韩雪莹, 等. 基于连续小波变换的土壤有机质含量高光谱反演[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(5): 132-142. Chen H Y, Yang G, Han X Y, et al. Hyperspectral inversion of soil organic matter content based on continuous wavelet transform[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(5): 132-142.
- [10] 章钊颖, 鲁奕岑, 祝善友. 标准化变换对高光谱影像波段选择影响[J]. 遥感信息, 2017, 32(2): 99-106. Zhang Z Y, Lu Y C, Zhu S Y. Effect of standardized transformation on band selection of hyperspectral remote sensing imagery[J]. Remote Sensing Information, 2017, 32(2): 99-106.
- [11] 王智宏, 刘杰, 王婧茹, 等. 数据预处理方法对油页岩含油率近红外光谱分析的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(4): 1017-1022. Wang Z H, Liu J, Wang J R, et al. Influence of data preprocessing on NIRS analysis for oil yield of oil shale[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(4): 1017-1022.
- [12] 胡玉霞, 赵南京, 甘婷婷, 等. 水体细菌微生物多波长透射光谱定量分析归一化方法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0430001. Hu Y X, Zhao N J, Gan T T, et al. Normalization of quantitative analysis for bacteria multi-wavelength transmission spectroscopy in water[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0430001.
- [13] Tahtouh M, Kalman J R, Roux C, et al. The detection and enhancement of latent fingerprints using infrared chemical imaging[J]. Journal of Forensic Sciences, 2005, 50(1): 64-72.
- [14] Melit Devassy B, George S. Dimensionality reduction and visualisation of hyperspectral ink data using t-SNE[J]. Forensic Science International, 2020, 311: 110194.
- [15] Wang S Y, He H Y, Lv R L, et al. Classification modeling method for hyperspectral stamp-pad ink data based on one-dimensional convolutional neural network[J]. Journal of Forensic Sciences, 2022, 67(2): 550-561.
- [16] Wang H H, Wang K L, Zhu X Y, et al. Integration of partial least squares regression and hyperspectral data processing for the nondestructive detection of the scaling rate of carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Foods, 2020, 9(4): 500.
- [17] Tang N Q, Sun J, Yao K S, et al. Identification of *Lycium barbarum* varieties based on hyperspectral imaging technique and competitive adaptive reweighted sampling-whale optimization algorithm-support vector machine[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(1): e13603.
- [18] Khan M J, Yousaf A, Khurshid K, et al. Automated forgery detection in multispectral document images using fuzzy clustering[C]//2018 13th IAPR International Workshop on Document Analysis Systems (DAS), April 24-27, 2018, Vienna, Austria. New York: IEEE Press, 2018: 393-398.
- [19] 李云鹏, 代雪晶, 王猛, 等. 隐性字迹的快速光谱显现与高光谱分类技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(11): 3524-3531.

- Li Y P, Dai X J, Wang M, et al. Study on rapid spectral reappearing and hyperspectral classification of invisible writing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(11): 3524-3531.
- [20] Zhao Y F, Hu N N, Wang Y N, et al. The application of near-infrared reflectance hyperspectral imaging for the detection and extraction of bloodstains[J]. *Cluster Computing*, 2019, 22(4): 8453-8461.
- [21] 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.
- [22] Zulfiqar M, Ahmad M, Sohaib A, et al. Hyperspectral imaging for bloodstain identification[J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 3045.
- [23] Cadd S, Li B, Beveridge P, et al. Age determination of blood-stained fingerprints using visible wavelength reflectance hyperspectral imaging[J]. *Journal of Imaging*, 2018, 4(12): 141-152.
- [24] 庄园, 高树辉, 黄威, 等. 基于高光谱成像技术的血迹检测及血指印可视化研究[J]. *中国人民公安大学学报(自然科学版)*, 2021, 27(1): 1-9.
Zhuang Y, Gao S H, Huang W, et al. Search on blood stain detection and blood fingerprints visualization based on hyper-spectral imaging technology[J]. *Journal of People's Public Security University of China (Science and Technology)*, 2021, 27(1): 1-9.
- [25] Akiba N, Nakamura A, Sota T, et al. Separation of overlapping fingerprints by principal component analysis and multivariate curve resolution-alternating least squares analysis of hyperspectral imaging data[J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2022, 67(3): 1208-1214.
- [26] 陈壮. 可见光谱成像技术提取签字笔背景捺印指纹的实验研究[D]. 北京: 中国人民公安大学, 2020.
Chen Z. Experimental study on extracting fingerprint of signature pen background by visible spectrum imaging technology[D]. Beijing: Chinese People's Public Security University, 2020.
- [27] Zapata F, López-López M, Amigo J M, et al. Multi-spectral imaging for the estimation of shooting distances[J]. *Forensic Science International*, 2018, 282: 80-85.
- [28] Uysal S, Armutcu C, Mercan M, et al. A spectroscopic approach for rapid and simple serial number restoration on polyamide 6 parts of firearms: the use of video spectral comparator 8000[J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2021, 66(6): 2381-2386.
- [29] Melit Devassy B, George S. Forensic analysis of beverage stains using hyperspectral imaging[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 6512.
- [30] El-Sharkawy Y H, Elbasuney S. Hyperspectral imaging: a new prospective for remote recognition of explosive materials[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2019, 13: 31-38.
- [31] Huang J D, He H Y, Lv R L, et al. Non-destructive detection and classification of textile fibres based on hyperspectral imaging and 1D-CNN[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2022, 1224: 340238.
- [32] 马健, 张军强, 吴从均, 等. 全波段高光谱成像仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2022, 42(23): 2322001.
Ma J, Zhang J Q, Wu C J, et al. Optical system design of full-spectrum hyperspectral imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(23): 2322001.
- [33] 齐美捷, 刘立新, 李艳茹, 等. 推扫式高光谱显微成像系统设计及实验[J]. *中国激光*, 2022, 49(20): 2007105.
Qi M J, Liu L X, Li Y R, et al. Design and experiment of push-broom hyperspectral microscopic imaging system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(20): 2007105.
- [34] 黄威, 李志刚, 侯欣雨, 等. 基于 HF-Net 光谱特征重定位的三维光谱成像技术研究[J]. *刑事技术*, 2022, 47(5): 483-489.
Huang W, Li Z G, Hou X Y, et al. Research on three-dimensional spectral imaging technology based on HF-Net spectral feature relocation[J]. *Forensic Science and Technology*, 2022, 47(5): 483-489.