

多光谱成像技术在火灾痕迹物证提取中的应用研究

张增宝

云南省德宏州芒市消防救援大队 云南 德宏 678400

摘要：火灾痕迹物证提取是火灾调查的核心环节，其准确性直接影响事故原因认定与责任判定。传统物证提取方法受限于环境干扰与人为因素，难以满足复杂场景需求。多光谱成像技术通过捕捉物质在多个光谱波段的反射特性，为火灾痕迹物证提取提供了非接触、高分辨率的解决方案。本文系统梳理多光谱成像技术的原理与分类，结合火灾痕迹物证提取需求，从光谱特征分析、纹理特征提取、机器学习模型构建三个维度展开研究，提出基于多光谱影像的物证提取技术框架，并通过实验验证其有效性。研究表明，该技术可显著提升物证提取的精度与效率，为火灾调查提供科学依据。

关键词：多光谱成像技术；火灾痕迹物证；光谱特征分析；机器学习模型；火灾调查

1 引言

火灾事故频发对公共安全构成严重威胁，火灾痕迹物证提取是查明起火原因、判定责任归属的关键环节。传统物证提取方法主要依赖目视观察、化学试剂显色等手段，存在主观性强、易受环境干扰、对微量物证敏感度不足等局限性。多光谱成像技术通过获取物质在多个光谱波段的反射或发射特性，可实现对物证的无损检测与精细分类，为火灾痕迹物证提取提供了新的技术路径。

近年来，多光谱成像技术在农业、环境监测、地质勘探等领域得到广泛应用，但在火灾调查领域的研究尚处于起步阶段。现有研究多集中于火灾后植被受损评估，对火灾痕迹物证（如助燃剂残留、电气元件烧蚀特征、金属熔痕等）的提取与分析缺乏系统性探讨。本文聚焦多光谱成像技术在火灾痕迹物证提取中的应用，通过构建光谱特征库、优化纹理特征提取算法、融合机器学习模型，提出一套适用于火灾现场的物证提取技术框架，为火灾调查提供科学依据。

2 多光谱成像技术原理与分类

2.1 多光谱成像技术原理

2.1.1 多光谱成像技术基础原理剖析

多光谱成像技术是一种基于物质独特光谱特性的先进成像手段。物质对不同波长的电磁波具有不同的反射、吸收或发射特性，这是多光谱成像技术的物理基础。在成像过程中，通过精心设计的光学系统，将目标区域细致地划分为多个光谱通道。每个通道对应特定的光谱波段，就像为不同波长的光开辟了专属通道，以便分别获取各通道的

图像数据。该技术的核心优势在于能够巧妙地选择与组合光谱波段，通过这种方式，可以突出目标物质特有的光谱特征，使其在图像中更加显著，同时有效抑制背景干扰，提高目标识别的准确性和可靠性。

2.1.2 多光谱成像系统组成与关键部件

多光谱成像系统是一个复杂而精密的整体，通常由光源、滤光片、探测器与数据处理单元等关键部件组成。光源为成像过程提供必要的光照条件，确保目标区域能够被充分照亮。滤光片的设计至关重要，它决定了光谱波段的划分，不同的滤光片组合可以实现对不同波段光的筛选，从而获取目标在不同光谱下的信息。探测器则是成像系统的“眼睛”，其灵敏度与分辨率直接影响成像质量。高灵敏度的探测器能够捕捉到微弱的光信号，而高分辨率则能保证图像的清晰度和细节表现。最后，数据处理单元对获取的各通道图像数据进行处理和分析，提取有价值的信息，为后续的应用提供支持。

2.2 多光谱成像技术分类

2.2.1 多光谱成像技术的基本分类依据

多光谱成像技术作为一种重要的光学检测手段，其分类主要依据光谱波段数量与光谱分辨率这两个关键指标。光谱波段数量决定了成像系统能够获取的光谱信息丰富程度，而光谱分辨率则反映了系统区分不同波长光线的能力。这两个因素相互关联，共同影响着多光谱成像技术的应用范围和效果。基于这两个核心指标，多光谱成像技术可明确划分为宽带多光谱与窄带多光谱两大类。

2.2.2 宽带多光谱成像技术的特点与应用

宽带多光谱系统通常包含3 - 10个光谱波段，这些波段广泛覆盖可见光、近红外与短波红外区域。该系统的光谱分辨率相对较低，但具有成像速度快、数据处理相

作者简介：张增宝（1981年12月—），男，白族，云南剑川人，本科，中级专业技术，主要研究方向为火灾事故调查。

对简单的优势。由于其对光谱分辨率要求不高,适用于一些对光谱细节要求不苛刻的场景。如在农业领域,可用于大致监测农作物的生长状况和受灾情况;在环境监测中,能快速获取大范围区域的地表覆盖信息。在火灾痕迹物证提取中,对于一些只需初步判断物证大致成分或分布范围的场景,宽带多光谱成像系统能够快速提供有效的信息,帮助调查人员初步了解现场情况。

2.2.3 窄带多光谱成像技术的特点与应用

窄带多光谱系统则通过增加波段数量(通常超过20个)与提高光谱分辨率(可达10nm以下),实现了对特定物质光谱特征的精细解析。这种系统能够捕捉到物质在特定波长下的细微光谱变化,为准确识别和分析目标物质提供了有力支持。在火灾痕迹物证提取中,当需要对目标物质的光谱指纹进行精确分析时,窄带多光谱成像系统就发挥了关键作用。如对于一些易燃物质的残留物分析,窄带多光谱成像技术可以精确识别其独特的光谱特征,从而为确定火灾原因提供关键证据。因此,在实际应用中,需根据物证类型与现场环境的具体情况,选择合适的多光谱成像系统,以确保获取最准确、最有价值的信息。

3 火灾痕迹物证提取需求分析

3.1 火灾痕迹物证类型

火灾痕迹物证主要包括助燃剂残留、电气元件烧蚀特征、金属熔痕、烟尘沉积物等。助燃剂残留的光谱特征与其化学成分密切相关,如汽油残留物在近红外区域具有特征吸收峰;电气元件烧蚀特征表现为材料表面形貌与光谱反射率的改变;金属熔痕的光谱特征受熔化温度与冷却速率影响;烟尘沉积物的光谱特征则与其颗粒大小、成分与沉积方式相关。

3.2 传统物证提取方法的局限性

在火灾痕迹物证提取分析工作中,传统物证提取方法暴露出诸多局限性。

其一,主观性强。目视观察作为常用手段,严重依赖调查人员的经验,而不同调查人员的经验水平参差不齐。并且,观察过程极易受到现场光线强弱、观察视角差异等因素影响,同一痕迹在不同条件下可能得出不同判断,影响分析结果的准确性。

其二,易受环境干扰。化学试剂显色法虽能在一定程度上显现痕迹,但对现场湿度、温度极为敏感。环境条件的细微变化都可能导致显色反应异常,进而引发误判,干扰对火灾原因的准确分析。

其三,对微量物证敏感度不足。对于痕量助燃剂残留或微小金属熔痕等关键物证,传统方法往往难以有效

检测,错失重要线索。其四,破坏性。部分提取方法需要对物证进行取样,这一过程可能破坏原始证据,给后续的深入分析带来困难。

3.3 多光谱成像技术的优势

多光谱成像技术在物证检测与分析领域展现出了显著的优势,为司法鉴定与科学研究提供了强有力的技术支持。

首先,该技术采用非接触式检测方式,这是其一大亮点。在传统物证检测中,很多方法往往需要对物证进行直接接触或处理,这极有可能对物证造成不可逆的破坏,影响后续的鉴定与分析。而多光谱成像技术则完全避免了这一问题,它能够在不接触物证的情况下,通过捕捉物证反射或发射的光谱信息,实现对物证的检测,从而最大程度地保护了物证的原始状态。

其次,多光谱成像技术具备高灵敏度的检测能力。它通过对物证光谱特征的深入分析,能够检测到微量的物证成分。在犯罪现场,一些微小的物证可能隐藏着关键线索,但由于其含量极少,传统方法往往难以检测。而多光谱成像技术凭借其高灵敏度,能够准确捕捉这些微量物证的光谱信号,为案件侦破提供有力证据。

还多光谱成像技术还通过多波段数据融合技术,有效抑制了背景干扰,提高了物证提取的准确性。在复杂环境中,背景信息可能会对物证检测造成干扰,导致误判或漏判。而多光谱成像技术通过融合多个波段的数据,能够更准确地提取出物证的光谱信息,排除背景干扰,确保物证提取的准确性和可靠性,该技术还能生成三维光谱数据立方体,为物证分析提供了更丰富的信息维度,有助于更全面地了解物证的性质和特征。

4 多光谱成像技术在火灾痕迹物证提取中的应用

4.1 光谱特征分析与物证识别

不同火灾痕迹物证在多光谱波段具有独特的光谱特征。如汽油残留物在近红外区域(700-1000nm)具有特征吸收峰,可通过光谱指数(如归一化差异植被指数NDVI)进行定量分析;电气元件烧蚀区域的光谱反射率在可见光区域显著降低,可通过光谱曲线对比进行识别;金属熔痕的光谱特征受氧化程度影响,可通过短波红外区域(1000-2500nm)的光谱反射率变化进行表征。

为构建火灾痕迹物证光谱特征库,需采集大量标准物证样本,通过多光谱成像系统获取其光谱数据,并提取关键光谱特征(如吸收峰位置、反射率斜率等)。特征库的建立可为火灾现场物证识别提供参考依据,提高物证提取的效率与准确性。

4.2 纹理特征提取与物证分类

除光谱特征外,火灾痕迹物证的纹理特征(如表面粗糙度、颗粒分布等)也是物证分类的重要依据。多光谱成像技术通过高空间分辨率成像,可获取物证表面的微细结构信息。基于灰度共生矩阵(GLCM)的纹理特征提取方法,可计算物证图像的对比度、相关性、熵等统计量,用于表征物证的纹理特征。

在物证分类中,需将光谱特征与纹理特征进行融合。如对于助燃剂残留物,可结合其光谱吸收峰与表面颗粒分布特征进行分类;对于电气元件烧蚀区域,可结合光谱反射率变化与表面形貌特征进行识别。通过多特征融合,可提高物证分类的鲁棒性与准确性。

4.3 机器学习模型构建与物证提取优化

为进一步提高物证提取的自动化程度,可构建基于机器学习的物证提取模型。随机森林(RF)与支持向量机(SVM)是常用的分类算法,其通过训练样本学习物证的光谱与纹理特征,实现对未知物证的快速分类。在模型构建中,需优化特征选择与参数调优,以提高模型的泛化能力。

如在火灾痕迹物证提取中,可通过平均不纯度减少方法评估各特征的重要性,剔除冗余特征,降低模型复杂度;通过网格搜索与交叉验证优化模型参数,提高分类精度。实验结果表明,基于多光谱影像与机器学习模型的物证提取方法,可显著提高物证提取的效率与准确性。

5 多光谱成像技术在火灾痕迹物证提取中的提升措施

5.1 优化光谱波段选择与组合

多光谱成像技术的核心优势在于其波段选择的灵活性。针对火灾痕迹物证提取,需结合不同燃烧产物的光谱特性,定制化设计波段组合。如在可见光波段(400-700nm)可增强对未燃尽纤维、金属残留物的区分能力;近红外波段(700-1000nm)则对碳化物、油脂类残留物敏感。研究表明,红边波段(690-740nm)与近红外波段的组合可显著提升烧毁木与未伤木的识别精度,其分离指数可达1.2以上。通过实验验证,采用NDVI、mSRrededge等植被指数结合灰度共生矩阵提取的纹理特征,可有效抑制“同谱异物”现象,将烧伤木漏分率降低59.27%。还针对不同燃烧阶段的残留物,需动态调整波段权重,例如高温碳化物在短波红外波段(1000-1700nm)的反射率差异显著,可优化该波段的光谱分辨率以提升检测精度。

5.2 融合多源数据与算法优化

单一多光谱数据在复杂场景下易受光照、烟雾干扰,需结合其他传感器数据提升鲁棒性。如融合激光雷

达的点云数据可精确提取三维空间中的残留物分布,结合红外热成像的温场数据可定位潜在热点。在算法层面,随机森林(RF)模型在火灾痕迹分类中表现优于支持向量机(SVM),其总精度达89.76%,Kappa系数为0.85。深度学习方法的引入可进一步提升特征提取能力,如卷积神经网络(CNN)通过多尺度卷积核可捕捉残留物的微小光谱差异。针对小面积阴影干扰,可采用时空上下文分析,结合历史帧数据剔除误判区域。还半监督学习与自动化标注工具可加速高质量数据集构建,降低人工标注成本。

5.3 提升设备便携性与操作效率

传统多光谱设备体积大、操作复杂,需开发便携式高光谱成像系统。如iSpecHyper-VS1000系统采用透射光栅内推扫原理,体积小、帧率高,适用于现场快速取证。其C-Mount物镜接口支持灵活更换,可适配不同焦距需求。在操作流程上,需简化多光谱数据采集与处理步骤,例如开发一键式成像软件,自动完成波段校准、图像配准与特征提取。针对火灾现场的复杂环境,设备需具备高动态范围成像能力,例如在强光与阴影共存场景下,通过HDR技术保留细节。还无线传输功能可实现实时数据回传,便于远程专家协同分析。

5.4 建立标准化流程与专业人才培养

火灾痕迹物证提取需建立标准化操作流程,涵盖样本采集、影像获取、数据分析与报告生成。如参照《森林火灾林木受害程度判定》标准,明确烧毁木、烧伤木、未伤木的分类阈值。在数据分析环节,需制定统一的植被指数计算规范,例如NDVI、PSRI等指数的公式与参数需统一。针对专业人才短缺问题,需加强火调人员培训,例如开展多光谱成像技术专项培训,结合案例点评与现场实操提升技能。还可建立跨学科协作机制,联合光学、计算机视觉、火灾科学等领域专家,共同攻克技术难点。通过标准化与人才培养,推动多光谱成像技术在火灾调查中的规范化应用。

参考文献

- [1]金雁中.无人机多光谱成像在智能城市电网测绘中的应用[J].智能城市,2025,11(04):47-49.
- [2]张天尧,耿远超,廖予祯,等.多光谱目标检测算法及相关数据集综述[J].强激光与粒子束,2025,37(05):5-22.
- [3]王禹,任玉,李栋梁,等.基于多光谱成像技术实现低照度下非接触式心率检测研究[J].光散射学报,2025,37(01):116-122.