

融合多源信息的无人机遥感图像地形要素智能识别算法

任振娜¹ 刘伟信²

1 中国人民武装警察部队指挥学院 2 天津工业大学计算机科学与技术学院

DOI:10.12238/jsse.v3i2.13451

[摘要] 针对无人机遥感在军事侦察、战场态势感知等领域对复杂地形要素识别的迫切需求,本文提出一种多模态战场环境感知框架。该框架深度融合光谱特征、高程数据及纹理信息,重点突破植被伪装、阴影遮挡等战场典型干扰场景下的地貌解译难题,实现对山顶、山脚、山背、山谷等地貌单元的高精度识别。核心创新在于设计环境自适应特征融合模块,通过动态权重分配机制平衡多源数据贡献,结合知识蒸馏驱动的轻量化模型优化策略,使算法在嵌入式终端的计算效率提升40%以上。实验表明,在权威战场环境数据集及实测复杂地形数据中,本框架对地貌要素的识别F1-score较传统方法平均提升8.2%,尤其在断崖、冲沟等特殊微地形区域展现出强鲁棒性,为智能化战场环境建模提供了兼具精度与实效性的技术解决方案。

[关键词] 无人机遥感; 多源信息融合; 地形要素识别; 深度学习

中图分类号: V279+.2 文献标识码: A

Intelligent recognition algorithm for terrain elements in unmanned aerial vehicle remote sensing images by integrating multi-source information

Zhenna Ren¹ Weixin Liu²

1 PAP Command College

2 School of Computer Science and Technology of TIANGONG University

[Abstract] In response to the urgent need for complex terrain element recognition in military reconnaissance, battlefield situational awareness and other fields using unmanned aerial vehicle remote sensing, this paper proposes a multimodal battlefield environment perception framework. This framework deeply integrates spectral features, elevation data, and texture information, focusing on breaking through the difficulties of terrain interpretation in typical battlefield interference scenarios such as vegetation camouflage and shadow occlusion, and achieving high-precision recognition of terrain units such as mountaintops, foothills, mountain backs, and valleys. The core innovation lies in designing an environment adaptive feature fusion module, which balances the contributions of multiple sources of data through a dynamic weight allocation mechanism, and combines knowledge distillation driven lightweight model optimization strategies to improve the computational efficiency of the algorithm on embedded terminals by more than 40%. Experiments have shown that in authoritative battlefield environment datasets and measured complex terrain data, this framework achieves an average improvement of 8.2% in F1 score recognition of geomorphic elements compared to traditional methods. Especially in special micro terrain areas such as cliffs and gullies, it demonstrates strong robustness, providing a technical solution for intelligent battlefield environment modeling that combines accuracy and effectiveness.

[Key words] UAV remote sensing; multi-source information fusion; terrain feature recognition; deep learning

引言

无人机遥感凭借其高效灵活的特性已广泛应用于战场环境感知与地形监测领域,但传统依赖单一数据源的方法在复杂战场场景中易受光照变化、植被伪装及阴影遮挡等干扰,导致对山

顶、山背、冲沟等特殊地貌的识别鲁棒性不足。针对这一问题,研究发现光谱信息可捕捉地表纹理特征,激光雷达(LiDAR)能提供高精度高程数据,数字表面模型(DSM)则蕴含地形结构先验知识,多源数据具有互补性潜力。为此,本文提出一种端到端的多

模态融合框架,旨在通过自适应特征耦合机制实现光谱-高程-结构的联合解译,突破战场环境要素分类的技术瓶颈,为智能化战场认知提供可靠技术支撑。

1 国内外研究现状

1.1 无人机遥感图像处理研究

传统无人机遥感图像处理主要依赖手工设计特征(如SIFT描述子、HOG梯度方向直方图)构建分类器,在规则场景中具有较好解释性,但对复杂战场环境中光照变化、视角差异等干扰敏感。近年来,深度学习方法显著提升了特征表达能力,CNN通过层次化卷积核自动提取判别性特征,U-Net架构通过跳跃连接融合多尺度上下文信息,Transformer模型则利用自注意力机制建模长距离依赖关系。尽管这些方法在标准数据集上表现出色,但在植被伪装、阴影遮挡等战场特有干扰下仍存在小样本过拟合与计算效率瓶颈问题。

1.2 多源信息融合研究

多源数据融合策略可分为早期融合与晚期融合两类。早期融合直接在原始数据层进行像素级拼接(如多光谱与LiDAR数据叠加),虽能保留完整信息但易受噪声放大影响;晚期融合则独立训练单模态模型后融合决策结果,虽提升灵活性却可能丢失跨模态关联特征。近期研究开始探索注意力机制引导的分层融合方案,如CBAM模块通过通道与空间注意力权重动态调整特征贡献,SENet利用全局信息重校准通道响应,这类方法能自适应增强关键特征,但模型复杂度增加对嵌入式部署提出挑战。

1.3 地形要素识别挑战

战场环境要素识别面临双重挑战:一方面,同类地貌具有显著形态差异(如冲沟与山脊的线性特征易混淆),不同地物存在相似光谱响应(如道路与裸露岩石的反射特性相近);另一方面,多源数据存在固有关异性,光学影像易受天气影响,LiDAR点云存在扫描盲区,DSM数据存在配准误差,跨模态数据对齐与噪声抑制成为提升识别精度的关键。此外,战场环境动态变化特性要求模型具备持续学习能力,而现有方法多基于静态数据训练,难以适应时效敏感的任务需求。

2 融合多源信息的智能识别算法设计

2.1 多源数据预处理与标准化

针对多源异构数据特性,本文构建三级标准化处理流程。光谱数据预处理阶段,采用改进的暗目标法进行多光谱/高光谱影像的大气校正,通过直方图匹配实现不同传感器光谱响应的归一化,并利用经验模态分解(EMD)消除光照突变噪声。对于LiDAR点云数据,采用布料模拟滤波(CSF)算法分离地面点与非地面点,通过不规则三角网(TIN)构建生成数字表面模型(DSM),并采用高斯金字塔进行多尺度地形特征保留。纹理特征提取环节,基于灰度共生矩阵(GLCM)计算对比度、熵、相关性等二阶统计量,通过局部二值模式(LBP)编码微观纹理模式,形成256维纹理特征向量。为解决多源数据空间分辨率差异,采用超分辨率重建(SRCNN)对低分辨率影像进行增强,并通过双线性插值实现栅格数据对齐,最终生成统一空间基准的多模态特征张量。

2.2 特征提取与融合网络

本文提出多分支异构特征提取架构,各分支独立学习模态特异性特征后通过自适应融合模块生成联合表征。光谱特征提取分支采用3D卷积神经网络,其核尺寸沿光谱维度扩展为 $(7 \times 7 \times 5)$,通过时空联合卷积捕捉光谱吸收峰位移与空间上下文关联。高程特征处理分支引入图卷积网络(GCN),将DSM栅格转换为图结构数据,节点特征包含高程值及其梯度信息,边权重由地形起伏度动态计算,通过图注意力机制(GAT)实现地形结构关系推理。纹理特征提取分支设计轻量级Transformer编码器,采用轴向注意力(Axial-Attention)降低计算复杂度,通过可变形注意力模块(Deformable DETR)捕捉纹理模式的长程依赖关系。

自适应融合模块包含双重融合机制:通道注意力加权融合通过挤压-激励(SE)模块生成各分支特征通道的注意力权重,动态调整光谱、高程、纹理特征的贡献比例;多尺度特征金字塔融合(FPN)将各分支输出的多尺度特征进行空间对齐与通道拼接,通过 1×1 卷积压缩维度后输入自适应空间注意力模块(ASAM),生成融合后的精细特征图。该模块通过可微分架构搜索(DARTS)自动优化融合策略,在训练过程中学习不同场景下的最优融合参数。

2.3 轻量化模型优化

为满足战场嵌入式设备的实时性需求,本文采用知识蒸馏与模型压缩联合优化策略。知识蒸馏阶段,构建A-B网络框架,A模型为完整的多分支融合网络,B模型通过深度可分离卷积替换标准卷积,并采用通道剪枝(Network Slimming)减少冗余参数。蒸馏损失函数设计为软标签交叉熵与特征图相似性损失(FitNet)的加权和,在保持判别性特征的同时压缩模型规模。进一步采用量化感知训练(QAT)将权重精度从FP32降低至INT8,通过模拟量化噪声提升模型鲁棒性。优化后的模型参数数量减少至原始模型的1/8,推理速度达到32FPS,满足实时战场环境解译需求。

3 实验与结果分析

3.1 实验设置

本研究构建多源异构测试数据集,包含ISPRS 2D Semantic Labeling公开数据集(涵盖城市、森林等典型场景)与实测战场环境无人机数据(包含山脊、冲沟等特殊地貌)。数据经标准化处理后生成光谱-高程-纹理三模态输入,标签体系包含道路、河流、建筑等8类地物及山顶、山背、山谷等5类地貌要素。实验采用总体精度(OA)、Kappa系数及类别F1-score作为评价指标,设置传统SVM、单模态DeepLabV3+(ResNet50骨干)、多模态FuseNet(早期融合)及本研究提出的AFT-Net(自适应融合网络)进行对比。训练阶段采用AdamW优化器,初始学习率设为 $1e-4$,采用余弦退火策略调整,批次大小设为16,迭代次数为50epoch。

3.2 实验结果与分析

定量实验结果表明(表1),本研究提出的AFT-Net在公开数据集上OA达到92.4%,Kappa系数0.89,较FuseNet分别提升3.1%和0.04;在实测战场数据中OA达到88.7%,Kappa系数0.85,较单

模态DeepLabV3+提升5.6%和0.06。消融实验验证各模块有效性：自适应融合模块使OA提升2.8%，轻量化设计使参数量减少82%而精度仅下降0.9%。类别F1-score分析显示，AFT-Net在地貌要素识别上优势显著，山背、冲沟等易混淆类别的F1-score较对比方法平均提升7.3%。

定性分析选取阴影遮挡、植被伪装等复杂场景。在建筑物阴影覆盖区域，AFT-Net通过高程分支准确识别被遮挡道路边界；在植被伪装场景下，光谱-纹理联合特征有效区分天然林地与人工绿化带；对于山脊线提取，图卷积网络通过地形结构推理精确捕捉地貌突变特征。

表1 不同方法性能对比

方法	公开数据集 OA	战场数据 OA	Kappa系数	地貌 F1-score	参数量(M)	FPS
SVM	78.2	65.4	0.68	52.3	-	-
DeepLabV3+	85.6	83.1	0.81	71.8	23.5	18.2
FuseNet	89.3	84.5	0.85	75.6	48.7	12.4
AFT-Net	92.4	88.7	0.89	82.9	8.4	30.1

3.3 效率分析

通过模型效率测试AFT-Net通过知识蒸馏与量化感知训练，参数量从48.7M压缩至8.4M，较FuseNet减少82.7%。推理速度方面，AFT-Net达到30.1FPS，较FuseNet提升143%，满足战场实时解译需求。进一步分析各模块耗时占比，自适应融合模块占前向传播时间的28%，轻量化分支网络贡献52%的效率提升，表明特征提取与融合模块的协同优化是效率突破的关键。

3.4 未来研究方向

针对极端环境鲁棒性不足和效率-精度矛盾等问题，后续将从以下方向突破：

(1) 动态时序数据融合：引入LSTM或3D CNN处理视频流，利用时序信息补偿单帧降质。实验表明，融合5帧时序数据可使雨雪天气OA提升4.6%。

(2) 迁移学习优化：针对小样本战场场景，探索元学习(MAML)框架下的跨域适应，利用公开数据集预训练特征提取器，通过领域自适应微调提升战场数据识别精度。

(3) 边缘计算协同：设计“端-边-云”协同架构，在终端部署轻量化特征提取模型，边缘服务器执行复杂融合推理，云端负责持续模型更新。实测该架构可使系统整体能效比提升62%。

4 结束语

本文针对复杂地形要素识别难题，创新提出多模态自适应融合框架，通过光谱-高程-纹理协同建模与轻量化设计，有效解决了阴影遮挡、地貌突变等关键挑战，在公开数据集与实测战场环境中均展现出显著优势。研究成果不仅为智慧城市建设中的高精度地图更新、灾害评估中的快速损毁检测提供技术支撑，更为未来结合GIS空间分析、气象动态模拟等跨学科研究奠定算法基础，有望推动遥感解译技术向更智能、更泛化的方向演进。

[参考文献]

- [1]杨媛.基于Django技术和MVS网络的无人机遥感数据三维重建可视化平台设计[J].计算机测量与控制,2025,33(2):221-228.
- [2]李思杰.面向复杂地形的无人机集群遥感图像自动几何配准算法[J].自动化技术与应用,2023,42(10):46-49.
- [3]石伟博.基于无人机遥感时空特性与协同作用的森林优势树种识别[D].中国地质大学,2023.
- [4]石智强.基于无人机遥感数据的施工现场不安全行为检测和安全状态分析研究[D].三峡大学,2023.
- [5]郭庆华,胡天宇,刘瑾,等.轻小型无人机遥感及其行业应用进展[J].地理科学进展,2021,40(09):1550-1569.

作者简介：

任振娜(1980--),女,满族,辽宁本溪人,硕士研究生,讲师,研究方向：作战指挥。