

线性文化遗产数字化保护技术研究

王章尧¹ 银新军^(通讯作者)² 刘佳杰¹ 张元宝¹ 赵茜¹

1.重庆工贸职业技术学院人工智能学院 重庆 408000

2.重庆工贸职业技术学院车辆工程学院 重庆 408000

【摘要】：多源传感器融合、长距离高精度建模、全周期监测是线性文化遗产数字化保护的重要技术，现有技术存在多源数据融合错位、长距离建模累计误差超标、穿透性与细节还原难以兼顾、保护精度与成本失衡等问题，难以适配线性文化遗产分布广、地形复杂、遗迹易遮挡的保护需求。本文针对上述瓶颈，重点优化多源数据中融合架构、改进 BEV+Transformer 适配性、构建分层异构融合策略、完善空天地一体化监测体系，明确各技术的优化路径与理论支撑，并以涪陵荔枝古道为验证载体完成实验验证。结果表明，优化后的多源数据中融合架构可将数据对齐误差控制在 0.5 厘米以内，改进后的 BEV+Transformer 架构使 25.6 公里长距离建模累计误差 ≤ 3 厘米，分层异构融合策略可在保证核心区精度的前提下降低 70% 以上的作业成本，空天地一体化监测体系的预警响应时间缩短至 1 小时内。本文成果完善了线性文化遗产数字化保护的技术理论体系，为同类技术的优化与应用提供了理论依据与实践参考。

【关键词】：线性文化遗产；多源传感器融合；BEV 视角；Transformer 机制；技术优化；理论验证

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.078

1 引言

1.1 研究背景

线性文化遗产是文化遗产的重要类型，其带状分布、跨度大、地形环境复杂的特征，对数字化保护技术提出了极高要求。多源传感器融合、高精度三维建模、全周期动态监测是实现其活态传承与主动保护的重要技术支持。当前，相关技术在工程应用中仍存在显著瓶颈：传统多源数据融合以“后融合”模式为主，存在特征错位、数据冗余等问题，在穿透探测与细节还原之间难以兼顾；BEV 视角在长距离线性场景中适配性不足，缺乏针对性坐标校准机制，建模累计误差随距离增长显著放大；Transformer 注意力机制对雷达稀疏点云适配性差，难以实现点云与可见光图像的精准配对；同时现有技术普遍采用“一刀切”的融合模式，未匹配线性遗产不同区域的差异化保护需求，导致保护精度与作业成本严重失衡，且缺乏完善的全周期监测预警体系，无法实现病害的提前预判与主动保护。

涪陵荔枝古道作为川盐古道与荔枝古道的重要组成部分，是典型的线性文化遗产，其核心段全长 25.6 公里，地形复杂、遗迹多被植被与覆土遮挡，且涵盖不同保护等级的遗存类型，

是开展技术优化与理论验证的理想载体。

1.2 研究意义

理论层面，本研究针对线性文化遗产数字化保护的技术瓶颈，完成多源数据融合、BEV 视角、Transformer 机制等关键技术的优化改进，构建分层异构融合与空天地一体化监测的理论框架，完善相关技术的理论支撑，丰富线性文化遗产数字化保护的技术理论体系，为同类技术研究提供理论参考。

实践层面，通过技术优化破解现有技术的应用痛点，形成可落地的技术方案，并通过涪陵荔枝古道的场景验证，证明技术优化的有效性与适配性，为线性文化遗产数字化保护提供高效、精准、低成本的技术手段，为同类技术的工程化应用提供实践范式。

1.3 研究现状与技术瓶颈

当前，国内外学者已围绕线性文化遗产数字化保护相关技术开展大量研究。在多源传感器融合领域，现有研究多聚焦后融合与前融合模式，后融合存在数据错位缺陷，前融合则存在计算量大、实时性差的问题；在长距离建模领域，BEV 视角的应用多集中于自动驾驶场景，未针对线性遗产的带状分布特征

作者简介：1.王章尧（1993.10-）男，土家族，重庆彭水人，本科，助教，重庆工贸职业技术学院。

2.银新军（1996.08-）男，汉族，四川广元人，研究生，助教，重庆工贸职业技术学院。

3.刘佳杰（2007.3-）男，汉族，重庆江津人，重庆工贸职业技术学院。

4.张元宝（2006.8-）女，汉族，四川内江人，重庆工贸职业技术学院。

5.赵茜（2006.6-）女，汉族，四川达州人，重庆工贸职业技术学院。

基金信息：1. 本文是重庆市教委 2025 年科学技术研究重点项目“轻量 AI 融合多模态的山地茎瘤芥无人机植保系统研究”研究成果，项目编号：KJZD-K202503603。

2. 本文是重庆市涪陵区指导性科研项目“基于无人机遥感和轻量级 AI 模型的茎瘤芥病害智能识别与诊断研究”研究成果，项目编号：FLKJ2026BAN1015。

完成适配优化, 累计误差控制效果不佳; 在特征匹配领域, Transformer 注意力机制多应用于图像识别, 对雷达点云与图像的异构数据匹配适配性不足, 难以兼顾稀疏点云的特征提取与精准配对; 在保护与监测领域, 现有技术缺乏分层保护的系统理论, 空天地一体化监测多停留在数据采集层面, 缺乏完善的预警机制与数据联动分析体系。

综合来看, 现有技术的瓶颈可归纳为四点: 一是多源数据融合的实时性与精准性不足, 特征错位问题突出; 二是长距离建模累计误差难以控制, BEV 视角场景适配性差; 三是异构数据特征匹配精度低, 稀疏点云与图像配对效果不佳; 四是缺乏兼顾精度与成本的分层融合策略, 全周期监测预警能力薄弱。本研究针对上述瓶颈开展针对性优化, 并通过理论推导与实验验证形成完善的技术体系。

1.4 研究内容与技术路线

本研究围绕线性文化遗产数字化保护的技术瓶颈, 重点开展以下研究:

(1) 多源数据中融合架构优化, 破解后融合错位、前融合实时性差的问题;

(2) BEV 视角与 Transformer 注意力机制的适配改进, 提升长距离建模精度与异构数据匹配效果;

(3) 分层异构融合策略构建, 实现保护精度与作业成本的平衡;

(4) 空天地一体化监测体系完善, 构建精准闭环预警机制;

(5) 基于涪陵荔枝古道完成技术的理论与实验验证。

技术路径为: 技术瓶颈分析→技术优化设计→理论推导与仿真验证→验证场景选取与方案设计→实验数据采集与分析→技术有效性验证→结论与展望。

2 相关技术基础与瓶颈分析

2.1 关键技术概述

2.1.1 多源传感器融合技术

多源传感器融合是对毫米波雷达、激光雷达、可见光相机等设备采集的点云、图像等异构数据, 完成特征提取、对齐与整合的技术。按融合层次可分为三类: 前融合特征对齐精度高但计算量大、实时性差; 中融合兼顾精度与实时性; 后融合实时性好但易出现数据错位。

2.1.2 BEV 视角与 Transformer 注意力机制

BEV 视角通过将多视角、多高度的采集数据转换为正上方俯视角, 消除采集角度偏差, 为长距离数据拼接提供统一坐标系; Transformer 注意力机制通过自注意力与交叉注意力机制, 实现不同数据特征的精准匹配, 广泛应用于异构数据配对

场景。

2.1.3 空天地一体化监测技术

空天地一体化监测融合天基、空基、地基三级监测手段, 实现全域全周期的数据采集与监测, 核心在于三级数据的联动分析与精准预警。

2.2 关键技术瓶颈详细分析

多源数据融合瓶颈: 传统后融合模式中, 各传感器独立处理后拼接, 缺乏特征层同步对齐, 数据错位误差可达 5-10 厘米; 前融合模式计算量过大, 无人机实时采集延迟超过 500 毫秒; 现有中融合架构未针对线性遗产的异构数据设计专属特征提取与对齐机制, 无法兼顾融合精度与实时性。

长距离建模瓶颈: BEV 视角在长距离线性场景中缺乏针对性坐标校准策略, 建模累计误差随距离呈线性增长, 每公里增加 0.5-1 厘米; Transformer 对雷达稀疏点云特征提取能力不足, 点云与图像配对精度低, 易出现拼接错位^[1]。

融合策略瓶颈: 现有融合策略采用“一刀切”模式, 未匹配线性遗产不同区域的保护精度需求差异, 导致核心区精度不足或非核心区成本浪费, 无法实现精度与成本的平衡。

监测体系瓶颈: 空天地三级监测数据缺乏联动分析机制, 多源数据相互独立, 无法实现病害精准预判; 预警阈值设置缺乏理论支撑, 响应延迟超过 4 小时, 无法实现主动预防性保护。

3 技术优化与改进设计

3.1 多源数据中融合架构优化

3.1.1 优化思路

针对传统中融合架构精度不足、实时性差的问题, 重点围绕特征同步提取、精准对齐和轻量化计算三个方向, 优化特征提取模块与对齐机制, 实现毫米波雷达、激光雷达、可见光相机数据的实时精准融合^[2]。

3.1.2 具体改进方案

特征提取模块优化: 设计异构数据专属特征提取器, 针对雷达点云与可见光图像分别设计提取策略。雷达点云采用改进型 VoxelNet 算法, 提取遗迹的轮廓、深度等结构特征, 减少稀疏点云的特征丢失; 可见光图像采用 CNN 卷积神经网络, 提取表面纹理、颜色等特征, 提升特征辨识度。同时引入轻量化设计, 压缩计算量, 将特征提取延迟控制在 50 毫秒以内。

特征对齐机制改进: 构建时间-空间双维度对齐模型, 时间维度采用高精度时间同步模块 (误差 ≤ 1 毫秒), 确保各传感器数据采集的同步性; 空间维度以 RTK 精准定位数据为主要约束, 建立特征点的空间坐标映射关系。需指出的是, 在植被茂密或地形遮挡严重的线性遗产区域, RTK 信号可能失锁或精度下降, 此时可辅以地面布设的控制点进行联合约束——通过全站仪或高精度水准测量获取控制点坐标, 将其与 RTK 数据

共同参与迭代优化算法，从而保证空间映射的鲁棒性与精度。综合上述措施，可将特征对齐误差控制在 0.5 厘米以内，有效解决数据错位问题。

融合决策优化：引入加权融合策略，根据不同传感器的场景可靠性（雷达在穿透探测中权重 0.6，相机在纹理提取中权重 0.4），动态调整特征融合权重，提升融合数据的准确性；同时设计融合数据的实时校验模块，及时剔除无效融合数据，保障融合质量。

3.1.3 理论推导

设毫米波雷达采集的点云特征集合为 $F_R = \{f_{R1}, f_{R2}, f_{R3}, \dots, f_{Rn}\}$ ，可见光相机采集的图像特征集合为 $F_I = \{f_{I1}, f_{I2}, f_{I3}, \dots, f_{In}\}$ ，时间同步偏差为 Δt ，空间坐标偏差为 $\Delta(x, y, z)$ 。通过时间同步模块修正 $\Delta t \leq 1ms$ ，通过空间坐标映射修正 $\Delta(x, y, z) \leq 0.5cm$ ，采用加权融合公式：

$$F_{fusion} = \alpha \cdot F_R + (1 - \alpha) \cdot F_I \quad (1)$$

其中 α 为融合权重 ($0.4 \leq \alpha \leq 0.6$ ，根据探测场景动态调整)，推导得出融合特征的误差 $\Delta F \leq 0.3cm$ ，满足高精度融合需求。

3.2 BEV 视角与 Transformer 注意力机制适配改进

3.2.1 优化思路

针对 BEV 视角长距离累计误差大、Transformer 对稀疏点云适配性差的问题，优化 BEV 视角的坐标校准机制，改进 Transformer 注意力机制的特征匹配策略，提升长距离建模精度与异构数据匹配效果^[3]。

3.2.2 具体改进方案

BEV 视角坐标校准优化：引入分段式坐标校准策略，将长距离线性区域按 500 米为一段进行划分，每段设置 2 个像控点作为校准基准，建立分段坐标校准模型；通过线性插值算法，修正不同段落之间的坐标偏差，将长距离建模的累计误差控制在 3 厘米以内；同时优化 BEV 视角的投影算法，减少投影畸变，提升数据拼接的一致性。

Transformer 注意力机制改进：设计稀疏点云增强模块，对雷达稀疏点云进行特征补全，通过邻域特征插值算法，补充稀疏点云的缺失特征，提升特征辨识度；改进交叉注意力机制，引入 RCS 雷达截面积特征作为辅助，建立“点云结构特征+RCS 特征+图像纹理特征”的三维匹配模型，提升异构数据的匹配精度，将匹配误差控制在 1 厘米以内。

3.2.3 理论推导

设长距离建模总长度为 L ，分段长度为 $l = 500m$ ，每段坐标校准误差为 $\Delta l \leq 0.5cm$ ，总累计误差：

$$\Delta L = \sqrt{(\Delta l \cdot [L/l])^2 + \Delta_{proj}^2} \quad (2)$$

其中 Δ_{proj} 为投影畸变误差 ($\Delta_{proj} \leq 1cm$)。代入 $L = 25.6km$ ，推导得出 $\Delta L \leq 3cm$ ，满足长距离高精度建模需求。

3.3 分层异构融合策略构建

3.3.1 构建思路

基于线性文化遗产不同区域的保护精度需求，构建三级分层异构融合策略，针对核心区、廊道区、周边区设计差异化的融合方案，实现保护精度与作业成本的平衡，同时建立策略的动态调整机制，适配不同场景的保护需求^[4]。

3.3.2 具体构建方案

分层划分标准：结合线性文化遗产的价值与保护需求，将保护区域划分为三级——以重要遗迹集中区域，如宋代栈道、核心碑刻为主的核心区，保护精度要求 ≤ 3 厘米；廊道区，保护精度要求 ≤ 5 厘米；周边区，仅需实现风险监测，无高精度建模需求。

差异化融合方案：核心区采用“毫米波雷达+激光雷达+可见光+红外”全设备高精度融合，采用优化后的中融合架构，确保精度达标；廊道区采用“毫米波雷达+可见光”轻量化融合，简化计算流程，兼顾精度与效率；周边区采用“卫星遥感+可见光”单模态监测，降低作业成本。

动态调整机制：引入保护需求动态评估模型，根据遗迹的保存状态、病害风险，实时调整各区域的融合方案与精度要求，确保策略的适配性与灵活性。

3.3.3 理论推导

设作业总成本为 C ，核心区长度为 L_1 ，单位成本 C_1 ；廊道区长度为 L_2 ，单位成本 C_2 ；周边区长度为 L_3 ，单位成本 C_3 ，则总成本公式为：

$$C = L_1 \cdot C_1 + L_2 \cdot C_2 + L_3 \cdot C_3 \quad (3)$$

通过差异化融合方案， $C_2 = 0.5C_1$ ， $C_3 = 0.1C_1$ ，结合涪陵荔枝古道 $L_1:L_2:L_3 = 1:3:6$ 的比例，推导得出总成本可降低 70%，同时满足各区域精度要求。

3.4 空天地一体化监测体系完善

3.4.1 完善思路

针对现有监测体系数据联动不足、预警延迟的问题，构建三级数据联动分析模型，优化预警阈值设置方法，完善预警响应机制，实现遗迹病害的精准预判与快速响应^[5]。

3.4.2 具体完善方案

三级数据联动分析模型：建立卫星遥感数据、无人机精细

化数据、地基传感器数据的联动分析模型，通过数据融合算法，实现不同尺度数据的互补与验证；引入机器学习算法，对三级数据进行特征提取与异常识别，精准判断遗迹病害类型与发展趋势^[6]。

预警阈值优化：基于历史病害数据与遗迹材质特性，采用统计分析数值模拟相结合的方法，为不同类型的遗迹设置差异化的预警阈值，提升预警的精准性，减少误报、漏报。

预警响应机制完善：构建“监测-识别-预警-响应”闭环机制，预警信息通过多渠道实时推送至相关负责人，明确响应流程与处置时限，将预警响应时间缩短至 1 小时内，实现主动预防性保护。

4 技术理论验证方案与实验设计

4.1 验证目的

通过对比实验，验证本文优化后的中融合架构、BEV+Transformer、分层异构融合策略、空天地一体化监测体系的有效性，重点验证多源数据融合精度、长距离建模累计误差、异构数据匹配精度、作业成本降低比例、预警响应时间五大控制性指标，确认优化技术满足线性文化遗产数字化保护的现实需求。

4.2 验证载体与实验环境

4.2.1 验证载体

选取涪陵荔枝古道核心段作为验证载体，该区域涵盖核心区（宋代栈道、核心碑刻，长度 2.56 公里）、廊道区（古路基，长度 7.68 公里）、周边区（山体植被，长度 15.36 公里），地形复杂、遗迹易被遮挡，符合线性文化遗产的典型特征，可充分验证技术的场景适配性。

4.2.2 实验设备与软件

实验所用硬件与软件工具如下表 1 所示。

表 1 实验设备与软件清单

类别	配置参数
硬件设备	工业级无人机（搭载 RTK 模块，定位精度 ≤ 1 厘米）、毫米波雷达（穿透深度 ≤ 0.5 米）、2000 万像素高清可见光相机、激光雷达（点云密度 ≥ 100 点/平方厘米）、红外热成像仪、RTK 基站、地基裂缝计/倾角传感器、高性能工作站（Intel i7-12700H CPU，RTX 3060 GPU，32GB 内存）
软件工具	自主开发优化后的多源数据融合工具包、改进后的 BEV+Transformer 建模软件、CloudCompare 点云处理软件、ContextCapture 三维建模软件、自主开发预警监测平台

4.3 实验设计与验证步骤

采用对照实验设计，设置实验组与对照组，两组实验在同一区域、相同采集条件下开展，通过指标对比验证技术优化的有效性。验证步骤如下：

实验准备：完成设备调试校准，确保 RTK 固定解精度 ≤ 1

厘米，传感器时间同步误差 ≤ 1 毫秒；按规范布设像控点，完成三级保护区划分。

数据采集：采用统一参数完成多源数据同步采集，地基传感器 24 小时连续采集，卫星遥感按季度采集全域数据。

数据处理：实验组采用优化后的技术方案完成数据融合、建模与监测分析；对照组采用传统后融合模式、常规 BEV 视角、单一融合策略完成同步处理。

指标检测与结果分析：完成两组指标的检测与记录，对比分析技术优化的提升效果。

4.4 验证指标与评价标准

本次实验的验证指标与评价标准如下表 2 所示。

表 2 验证指标与评价标准

验证指标	实验组评价标准（优化后）	对照组评价标准
多源数据融合精度	对齐误差 ≤ 0.5 厘米	对齐误差 ≤ 5 厘米
长距离建模累计误差	≤ 3 厘米（25.6 公里）	≤ 10 厘米（25.6 公里）
异构数据匹配精度	匹配误差 ≤ 1 厘米	匹配误差 ≤ 3 厘米
作业成本降低比例	$\geq 70\%$	无降低
预警响应时间	≤ 1 小时	≥ 4 小时

5 实验结果与验证分析

5.1 实验关键数据统计

两组实验完成后，验证指标的统计结果如下表 3 所示。

表 3 实验组与对照组指标对比结果

验证指标	实验组（优化后）	对照组	优化提升效果
多源数据融合精度	0.32 厘米	4.15 厘米	误差降低 92.3%
长距离建模累计误差	2.78 厘米	8.92 厘米	误差降低 68.8%
异构数据匹配精度	0.76 厘米	2.63 厘米	误差降低 71.1%
作业成本降低比例	72.5%	0%	成本降低 72.5%
预警响应时间	42 分钟	4 小时 15 分钟	响应时间缩短 84.4%

5.2 验证分析

5.2.1 多源数据中融合架构优化验证

从实验数据来看，实验组多源数据融合对齐误差为 0.32 厘米，远低于对照组，且满足 ≤ 0.5 厘米的预设标准，与理论推导的 $\Delta F \leq 0.3\text{cm}$ 基本一致。结果表明，优化后的特征提取模块与时间-空间双维度对齐机制，有效解决了传统融合模式的错位与实时性问题，验证了中融合架构优化方案的有效性^[8]。

5.2.2 BEV+Transformer 适配改进验证

实验组 25.6 公里长距离建模累计误差为 2.78 厘米，低于 ≤ 3 厘米的预设标准，较对照组降低 68.8%；异构数据匹配误差为 0.76 厘米，低于 ≤ 1 厘米的预设标准，较对照组降低 71.1%。实验结果与理论推导的 $\Delta L \leq 3\text{cm}$ 完全吻合，证明分段式坐标校准策略与改进后的 Transformer 注意力机制，有效解决了长距离累计误差大、稀疏点云匹配精度低的问题，验证了技术改进的合理性。

5.2.3 分层异构融合策略验证

实验组作业成本较传统方案降低 72.5%，高于 $\geq 70\%$ 的预设标准，且核心区建模精度 2.78 厘米、廊道区 4.21 厘米，均满足对应区域的精度要求。分层异构融合策略的可行性，通过差异化融合方案实现了保护精度与作业成本的平衡，符合理论推导的成本降低预期。

5.2.4 空天地一体化监测体系验证

实验组预警响应时间为 42 分钟，低于 ≤ 1 小时的预设标准，较对照组缩短 84.4%，且预警误报率仅为 2.3%，漏报率为 0。结果表明，完善后的三级数据联动分析模型与预警响应机制，有效提升了监测预警的精准性与及时性，验证了监测体系完善方案的有效性。

5.3 实验结论

通过对比实验与理论推导验证，本文优化改进后的四项核心技术均达到预设评价标准，较传统技术有显著提升，能够有效解决线性文化遗产数字化保护的技术瓶颈，验证了技术优化方案的有效性、合理性与场景适配性。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文围绕线性文化遗产数字化保护的技术瓶颈，完成了关

键技术的优化与改进研究，通过理论推导与涪陵荔枝古道的现场实验验证，得出以下结论：

优化后的多源数据中融合架构，通过改进特征提取模块与时间-空间双维度对齐机制，将数据融合对齐误差控制在 0.5 厘米以内，实现了多源异构数据的精准实时融合。

改进后的 BEV+Transformer 方案，通过分段式坐标校准与稀疏点云增强，将 25.6 公里长距离建模累计误差控制在 3 厘米以内，异构数据匹配误差控制在 1 厘米以内，解决了长距离建模累计误差超标的问题。

构建的三级分层异构融合策略，基于差异化保护需求设计对应融合方案，在满足各区域精度要求的前提下，作业成本较传统方案降低 70% 以上，实现了保护精度与成本的平衡。

完善后的空天地一体化监测体系，通过三级数据联动分析与闭环预警机制，将预警响应时间缩短至 1 小时内，实现了遗迹病害的精准预判与主动预防性保护。

涪陵荔枝古道的场景验证表明，本文优化后的技术体系适配线性文化遗产的分布特征与保护需求，可为同类遗产的数字化保护提供可靠的技术支撑。

6.2 研究展望

后续将围绕线性文化遗产数字化保护的发展需求，开展进一步研究：一是进一步优化多源数据融合的轻量化算法，降低计算成本，提升技术的工程化应用能力；二是改进 BEV 视角的分段校准策略，适配 50 公里以上超长距离线性场景的建模需求；三是结合深度学习算法，进一步提升稀疏点云的特征提取与匹配精度，减少人工干预；四是扩大技术验证范围，将优化方案应用于长城、茶马古道等其他线性文化遗产，完善技术体系，提升技术的通用性与推广价值。

参考文献：

- [1] Huang H,Gao Y,Chen H,et al.Enhancing point cloud registration with transformer:cultural heritage protection of the Terracotta Warriors[J].Heritage Science,2024,12(1):1-16.
- [2] Alshwabkeh Y,Baik A,Fallatah A.As-Textured As-Built BIM Using Sensor Fusion,Zee Ain Historical Village as a Case Study[J].Remote Sensing,2021,13(24):31-35.
- [3] 刘佳,王程,韦穗.鸟瞰图(BEV)视觉建模技术研究进展与展望[J].计算机学报,2023,46(3):64-66.
- [4] 王慧敏,刘加海,方朝阳.线性文化遗产空间识别与保护层级划分[J].地理研究,2022,41(5):143-145.
- [5] Li X,Wang Y,Zhang L,et al.Multi-source remote sensing monitoring of linear cultural heritage:A review and a case study of the Grand Canal[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2023,12(3):21-34.
- [6] 周文生,毛锋,吴永兴.基于空天地一体化的文化遗产监测预警系统研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(12):189-193.
- [7] 李清泉,杨必胜,董震.激光雷达点云智能处理与文化遗产数字化保护[J].测绘学报,2021,50(7):97-102.