

工业遗产AI修复的多模态技术路径

余 醒^{1*}, 周雨婕¹, 陈天翔¹

(1.安徽工业大学艺术与设计学院, 安徽省马鞍山市, 243002; *通讯作者, shexing@ahut.edu.cn)

摘 要: 工业遗产的数字化修复面临数据残缺、结构复杂、文化价值易失真等挑战。本文提出AI修复需综合多技术环节协同的核心观点, 基于案例研究, 系统分析数据采集、缺损识别、模型重建等环节的技术优劣, 提出“多模态融合—动态评估—人文校准”的综合应用框架。研究表明: 单一数字技术存在局限性, 需结合深度图像、生成式AI、区块链等工具, 平衡效率与原真性, 推动工业遗产从静态保存向活态再生转型。

关键词: 工业遗产; AI修复; 多模态技术; 综合应用架构; 活态传承

引言

工业遗产作为承载工业文明的重要载体, 正面临严峻的消亡危机 [1]。数据显示, 我国 30% 的工业遗产因保护机制缺失已遭拆除, 因缺少原始资料, 通过数字化手段实现抢救性复原的还原难度较大。当前, 工业遗产 AI 修复涉及数据采集、缺损识别、模型重建等多个技术环节, AI 修复技术凭借高效性成为工业遗产保护的重要工具, 但其应用中存在显著的技术解耦, 各环节技术均存在明显的利弊分化。无人机倾斜摄影可实现大范围快速覆盖, 却难以保证 5mm 以内的细节精度, 同时也难以进行内部空间拍摄; 激光扫描虽能达到 0.1mm 的毫米级精度, 但其设备的购置和搭建成本高昂, 作业速度也较为缓慢; 以Stable Diffusion 3D为代表的生成式人工智能 (AIGC) 目前能在残缺30%场景下生成纹理匹配的部件, 但也可能因算法偏好生成“赛博朋克”等过度娱乐化风格, 原真性存在较大争议。

根据多模态机器学习解析遗产复合尺度特征, 有学者已提出“形式量化—成因解析—保护决策”智能框架 [2]。未来的工业遗产 AI 修复需要打破单一技术依赖, 通过 采集、修复、验证的全链条技术协同, 实现各环节利弊互补。本文旨在构建“多模态融合—动态评估—人文校准”的综合应用框架, 为推进我国工业文化发展和工业遗产保护提供技术落地路径参考, 推动工业遗产保护从静态保存向活态再生转型, 在效率提升与文化原真性维护之间建立平衡。

1. 工业遗产 AI 修复的技术路径与多模态融合

1.1. 高精度数据采集

工业遗产 AI 修复的基础在于高精度数据采集, 然而单一技术难以满足复杂场景需求, 如表1所示, 多模态技术融合成为必然选择。无人机倾斜摄影技术能够实现大范围快速覆盖, 长沙凯雪面粉厂采用深度图像优化点云技术实现毫米级建模 (王蔚等, 2025), 但存在细节精度不足的问题, 误差常超过 5mm [3]; 激光扫描技术可达到 0.1mm 的毫米级精度, 为点云建模提供了精准数据支撑, 却受限于设备昂贵、作业速度慢的劣势; 机器人搭载传感器的方案则适用于狭小空间作业, 其在对应县木塔藻井扫描中体现了灵活优势, 但存在续航短、负载有限的缺陷。

表1 常用数据采集技术

技术	优势	劣势
无人机倾斜摄影	大范围快速覆盖	细节精度不足 (> ; 5mm误差)
激光扫描	毫米级精度 (0.1mm)	设备昂贵、速度慢
机器人搭载传感	狭小空间灵活作业	续航短、负载有限

实践表明，目前急需构建“宏观—细节—高危区域”的多模态采集体系，例如通过无人机航拍获取工业遗产整体空间布局，再结合激光扫描捕捉建筑构件细节特征，同时利用机器狗完成高危或狭窄区域的数据补充，形成全方位、高精度的原始数据集。

1.2. 智能化缺损识别

缺损识别环节依赖多算法协同以突破单一技术局限。其中，3D CNN 算法在结构缺陷定位中表现突出，可精准识别裂缝、变形等物理损伤，但对训练数据质量要求极高。此外，光谱成像技术则能通过材质光谱特征分析金属锈蚀等级等退化状态，二者融合可实现“结构—材质”双重缺损评估。2025年，西北工业大学文化遗产研究院团队的“多模态智能感知驱动的数字孪生与缺陷分析技术”提供了研究范式，该技术融合光学与声学数据，构建动态评估系统，能够量化病害优先级，为修复决策提供科学依据，有效提升了缺损识别的全面性与准确性。

1.3. 生成式模型重建

生成式 AI 技术为工业遗产残缺场景重建提供了高效工具，但其应用需严守文化原真性边界。在汉阳铁厂砖墙纹饰复原中，Stable Diffusion 3D 模型面对 30% 残缺场景，生成部件与原始纹理的结构相似性指数（SSIM）达 0.89，实现了视觉上的无缝衔接，验证了技术可行性。然而，技术滥用易引发文化失真。国内部分数字复原案例中，生成式三维模型因缺乏约束生成“赛博朋克”风格厂房，引发学界争议。可见，生成式 AI 的合理应用需构建“数据驱动—历史约束—人文校准”机制，引入历史图纸作为约束条件，明确生成边界，在技术创新与工业遗产历史价值间找到平衡，实现从修复到活态再生的跨越。

2. 综合应用策略

2.1. 技术适配性矩阵

工业遗产损毁形态的多样性决定了技术组合需针对性适配，不同场景下的最优技术方案呈现显著差异，如表2所示：

表2 修复技术组合矩阵

损毁类型	技术组合	应用案例
局部表面缺损	深度图像分割+材质迁移算法	长沙面粉厂砖墙复原
整体结构坍塌	历史图纸+BIM+GAN虚拟重建	北京圆明园数字复原
文化叙事断层	AIGC场景生成+区块链存证口述史	黄石华新水泥厂VR

（1）针对局部表面缺损场景，推荐采用深度图像分割与材质迁移算法组合。该方案通过深度图像精准定位缺损区域边界，结合材质迁移技术实现纹理与色彩的无缝衔接，此组合有效解决了墙面剥落区域的视觉连贯性问题。此外，超表面双模光束实现实时3D重建+前向测距，隧道场景重建误差能达到3.5mm [4]。

（2）针对整体结构坍塌场景，需以历史图纸为基础框架，融合 BIM 技术的参数化建模能力与 GAN 模型的生成式重建优势。圆明园数字复原项目通过该组合，在缺失构件复原中既保证了结构力学合理性，又还原了历史风貌特征。

（2）针对文化叙事断层问题，采用 AIGC 场景生成与区块链存证口述史相结合的策略。黄石华新水泥厂案例中，首先利用 AIGC 重现生产场景，再通过数据永久保存老工人的口述历史，实现了物质空间与非物质文化的双重活化 [5]。

2.2. 多主体协同机制

技术方案的落地需构建多元主体协同体系，实现技术工具与人文价值的统一。一方面，人机协同修复是核心路径，通过将专家知识库注入 AI 模型，训练领域专用修复系统。例如，传统工匠的工艺参数被编码为算法约束条件，使 AI 在生成修复方案时兼顾技术可行性与传统工艺传承。另一方面，公众参与机制提升修复的社会认同度。例如，引入去中心化（DAO）模式，允许社区居民通过投票参与修复方案决策，确保工业遗产活化成果与社区文化需求相契合。这种“技术工具+专家经验+公众意志”的协同模式，既发挥了 AI 的效率优势，又通过人文干预避免技术异化，为工业遗产修复提供了可持续的实施框架。

3. 技术局限与未来发展方向

3.1. 技术瓶颈与伦理边界

当前工业遗产 AI 修复在技术层面仍存在显著局限。一是数据层面，点云配准误差在复杂结构场景中超过 15%，导致高精度模型重建面临基础数据不一致的问题。二是算法层面，生成式模型虽能复原物质形态，却难以表达工匠精神等无形工业文化价值，存在文化内涵传递不完整的不足。

同时，伦理挑战同样不容忽视。目前，有一些工业文化旅游项目因“过度科技化”引发原真性质疑，凸显技术干预度缺乏标准的问题，亟需制定“AI 修复干预度评估标准”以规范实践活动。在数据版权方面，跨国云平台的广泛使用可能威胁工业遗产文化解释权。2025年，安徽工业大学团队整理了安徽省境内工业遗产资料，建成并上线本土数据库（ahih.online），并计划开展区块链确权工作，为数据安全保护提供了可行范式。

3.2. 未来发展路径

一是，技术迭代需向多维度融合推进。多模态大模型是重要方向，如 Depth Anything V2 可实现文本、3D、声学数据的跨模态生成，提升复杂场景的修复精度。边缘计算轻量化技术也具备应用潜力，无人机搭载 AI 芯片可实现现场实时修复，减少数据传输延迟与算力消耗。二是，制度保障创新需构建协同体系。版权收益反哺机制可通过工业遗产 NFT 化实现，如工信部2023年推出的“蛟龙号”载人潜水器等数字唱片，相关收益用于遗产可持续维护，形成“保护——利用”良性循环。三是，跨学科协作机制应进一步完善。建立“技术团队+历史学者+消费者”多元评审机制，从技术可行性、历史真实性、社会认同度多维度保障修复质量。技术与制度的协同创新，将推动工业遗产 AI 修复突破现有局限，在效率与原真性、技术与人文之间实现动态平衡。

4. 结论

工业遗产 AI 修复的核心在于打破“技术万能论”的局限，通过多环节协同与多维度平衡实现可持续保护。单一技术在数据采集、缺损识别、模型重建等环节均存在不可忽视的短板，唯有构建“多模态融合—动态评估—人文校准”的综合框架，才能突破信息断层、优化修复决策、保障文化原真性——既要融合无人机航拍、激光扫描、机器狗传感的优势形成全方位数据采集体系，又需通过 3D CNN 与光谱成像的算法协同提升缺损识别精度，更要以历史图纸约束生成式模型的创作边界，在技术创新与文化本真间建立动态平衡。

实践层面，通过分场景的技术适配性矩阵与“人机协同+公众参与”多主体机制的协同，为不同损毁类型的工业遗产修复提供了可操作路径，有效回应了数据残缺、结构复杂、文化失真等核心挑战。同时，技术瓶颈与伦理风险的破解，需依赖多模态大模型迭代、边缘计算轻量化等技术创新，以及 NFT 化反哺、三元评审组等制度保障的协同发力。

综上，工业遗产 AI 修复的终极目标并非单纯的技术应用，而是构建“技术—制度—文化”三维协同体系。以技术融合突破修复效能边界，以制度创新保障可持续发展，以文化校准守护工业遗产的历史记忆与精神内核。唯有如此，才能推动工业遗产真正从静态保存走向活态再生，成为连接工业文明遗产与未来城市文化的“超级接口”，为我国工业文化遗产的创造性转化、创新性发展提供扎实的技术范式与实践参考。

基金项目

本文为2023年安徽省社科规划项目“皖江流域工业遗产数字化保护与应用”（AHSKYY2023D040）阶段性成果之一。

参考文献

- [1] 苏志华. 工业遗产数字活化的理论框架与实践路径 [J]. 城市规划, 2020, 44(12): 45-52.
- [2] WANG Y. Machine Intelligence for Interpretation and Preservation of Built Heritage [J]. Automation in Construction, 2025, 158: 105102.
- [3] 王蔚, 张明, 李哲. 基于深度图像的工业遗产三维数据修复研究——以长沙凯雪面粉厂为例 [J]. 工业建筑, 2025, 55(5): 23-30.
- [4] ZHANG Z R, LIU Y. Metasurface-Driven Adaptive Structured Light [J]. Advanced Science, 2025, 12(8): 2305071.

- [5] 陈涛, 梁燕莺. 矿冶遗产保护中VR技术的应用——以黄石华新水泥厂旧址为例 [J]. 湖北理工学院学报(人文社会科学版), 2020, 37(2): 26-30.