

BIM 与机器学习在施工进度管理中的应用综述

王资国, 刘慧萍, 张玉燕, 南子杨

(西安工业大学建筑工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要 本研究以中英文文献为样本, 构建“任务—数据—方法—评价”框架, 比较视觉与点云两条监测路径的对齐机制与完成度量化, 综合计划一体化、软逻辑再排产、Transformer 对齐与概率预警等进展, 并提出最小数据契约与多源融合、域自适应建议, 以期支撑监测—预测—控制的落地提供有益参考。研究结果显示: 点云在几何真实性与可解释性上占优, 视觉在部署与覆盖上更具弹性; 闭环效果取决于 4D/WBS 的可写回与接口一致性。

关键词 BIM; 施工进度管理; 机器学习; 点云 (Scan-vs-BIM); 4D/WBS 计划闭环

中图分类号: TP24; TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.008

0 引言

本文聚焦建筑信息模型 (BIM) 与机器学习 (ML) 在施工进度管理中的应用, 将“施工进度管理”限定为: 以 BIM/4D-WBS 语义为锚点, 利用视觉影像与点云等现场数据完成感知—对齐—量化的 as-built 表达, 并与 as-planned 计划开展预测—预警—再排产/控制的闭环。相较于依赖人工记录与节点验收的传统做法, 这一闭环取决于三层关键: 其一, 数据层——多源现场数据 (图像/视频、激光扫描/点云、移动测绘/SLAM 等) 的可获取性与时空覆盖; 其二, 语义层——BIM/IFC 与 WBS/4D 的几何—语义映射及“稳定回写” (指量化结果可按字段一致地写回 4D/WBS); 其三, 决策层——将完成度百分比进一步转化为延误概率与工期回归, 并在“软逻辑”和计划对齐的框架下形成可执行的控制策略。

1 研究方法

1.1 文献检索

检索范围设置为 2012-2025 年, 数据库选用 Web of Science (核心合集)、Scopus、Google Scholar 与 CNKI, 并对 Automation in Construction、Advanced Engineering Informatics、Sustainability 等期刊进行定向检索。主题限定在施工“进度链条”, 即感知、对齐、量化、预测/预警与再排产及其与 4D/WBS 的联动, 安全、质量与成本仅在与进度判定或预测具有直接耦合时纳入。关键词以中英双语组织, 核心组合包括: “施工进度/进度监测/进度预测/再排产”与“BIM/4D/IFC”, 并与“点云/激光扫描/Scan-vs-BIM/计算机视觉/

分割/检测/SLAM/Transformer/软逻辑/贝叶斯”等交叉匹配。

1.2 文献筛选

筛选遵循“题名—摘要—全文”的逐层收敛路径。题名阶段首先剔除与进度无关或与 BIM/ML 关联度不足的条目; 摘要阶段保留明确涉及进度感知、几何/语义对齐、完成度或偏差量化、延误或产能预测、再排产与计划对齐等任务的研究; 全文阶段依据纳入/排除标准进行一致性判定并去重。为便于学术复用, 纳排标准以问题—方法—数据—结果—质量五个维度, 如表 1 所示。

1.3 文献分析

分析以定性综合为主, 围绕“任务—数据—方法—评价”的四维框架展开, 力求在同一评价语境下比较不同技术路线。任务维度涵盖进度感知与完成度估计、变更检测、延误/产能预测以及再排产与计划对齐; 数据维度覆盖 4D BIM/IFC 语义模型、图像/视频、点云与移动测绘数据、日志与报表信息; 方法维度区分计算机视觉与深度学习、配准与对应、传统机器学习与贝叶斯网络、优化与软逻辑、面向计划语义的序列或语言模型; 评价维度则统一采用视觉类指标 (如 IoU、mAP、F1)、几何类指标 (如点—面距离、RMSD、覆盖率或密度阈值)、预测类指标 (如 MAE、RMSE、MAPE、F1/AUC) 以及业务类指标 (如 SPI、SV、滞后概率与关键路径风险)。为提高横向可比性, 优先在同一场景与相近数据条件下进行对照, 在必要时给出容差与阈值的量纲说明, 避免仅以相对提升作为依据。

作者简介: 王资国 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 施工进度管理数字化技术研究。

表1 纳入/排除标准

维度	纳入要点	排除要点
研究对象	构件、作业、工序、工段或线性工程的进度问题	仅安全/质量/成本且与进度无直接耦合
方法关联	存在BIM/IFC/4D与现场数据的几何或语义对齐, 或与计划体系(CPM/LPS/软逻辑)显式联动	纯概念或方法描述不足, 缺乏可验证流程
数据基础	图像/视频、点云/激光、SLAM/MMS、进度报表/日志等可获取数据	全文不可得或关键数据缺失
产出形态	完成度/偏差/变更的量化, 或延误预测、再排产、计划对齐与接口证据	无可用于进度决策的量化或系统证据
质量要求	指标与流程清晰, 实验设置可定位; 工程案例或可复现实验优先	指标严重缺失或明显选择性报告

为减轻不同论文在口径上的不可比性, 评价与讨论环节尽可能回到可度量的共同要素: 一是“识别到量化”的映射是否公开且可复核, 例如由分割/检测输出到完成度百分比的计算规则; 二是“几何到结论”的阈值是否透明且与场景匹配, 如点一面距离阈值与覆盖率要求在装配式与室内场景的取值差异; 三是“预测到控制”的接口是否明确, 如与4D/WBS的回写字段以及与CPM/Last Planner的衔接方式。通过上述约束, 力求在保持阅读流畅的同时, 提供可被复用与审查的分析基线。

2 监测与对齐

2.1 视觉路线: 由识别到完成度的语义落脚点

视觉路线的核心并非“识别本身”, 而是识别—BIM语义—WBS条目的双重对齐。早期外观分类结合4D的研究已表明, 只有把影像中的状态绑定到计划条目, 进度量化才具有可操作的语义载体。后续工作将流程固化为“检测/分割→构件映射→完成度计算”, 并建议在同一口径下报告模型指标与业务指标, 从而可跨数据集比较。在地基与土方等场景, 实例分割(如以SOLOv2实现)能够稳定识别模板、钢筋、混凝土等要素, 并以可视化方式呈现阶段性完成度。然而, 视觉方法对光照、反光与遮挡敏感, 跨项目迁移门槛较高。为此, 基于BIM的合成图像可在材质与光照上进行可控扰动, 配合域适配以降低标注成本与域偏移^[1]。总体而言, 视觉路线的可落地前提是明确从mAP/IoU/F1到“构件状态(完工/在建/未开工)”的映射规则, 并在规则中设置置信度与遮挡容差; 当存在多视角或时间序列时, 可通过时序投票与渲染—实拍对齐抑制漂移与偶发误检。在适用性上, 视觉路线更适合外观可判别、遮挡相对可控的阶段(如装饰、模板/钢筋外露、土方作业), 其工程代价主要来自数据治理与跨项目泛化。

2.2 点云/Scan-vs-BIM: 以几何为核心的进度量化

点云路线的关键在几何对齐到覆盖与距离的量化。经典工作以“平面基准+ICP”解决了扫描与模型的初配与精配问题, 为后续量化建立坐标基础。进而, 室内变更检测将不确定性传播纳入, 给出由密度与遮挡引起的判断置信度, 从“检测结果”过渡到“可用结论”的证据链更完整。近期研究通过构造高维点云特征张量来提升BIM—施工对应的区分度, 在构件密集与局部遮挡条件下保持较好稳定性^[2]。在量化层面, 结构阶段的实证表明, 以覆盖率×点一面距离阈值作为最小判据可得到稳定的构件级完成度; 阈值与密度口径必须在报告中透明披露, 否则难以复现与横向比较。在装配式场景, 几何偏差与质控阈值天然耦合, 进度判定的工程语义更直接。当监测需求从“节点验收”转向“连续跟踪”时, 多工位高频扫描提供了可行路径, 配合语义约束可减少邻近构件的相互干扰, 并输出随时间演化的完成度曲线。总体上, 点云路线在几何精度与可解释性方面具有优势, 更适合结构、装配式与室内复杂环境^[3]; 其工程代价集中在采集设备与配准链路, 以及对阈值/密度的现场调校。

两条路径在“把识别转成可管理的完成度/偏差”上形成互补(见表2): 视觉方法在表观可辨与场景开放时成本较低、部署灵活, 但需要明确“模型指标→业务指标”的映射并通过合成数据、时序多视角与渲染对齐缓解域偏移; 点云方法在几何真实性与容差管理方面更强, 适于结构与装配式, 但对采集频度、密度与配准链路更敏感, 工程化成本较高。在项目落地层面, 较为稳妥的做法是视觉与点云的分场景协同: 以点云提供几何锚点与容差口径, 视觉补足高频覆盖与作业语义; 二者的输出统一回写至4D/WBS, 以支持后续预测、预警与再排产的闭环处理。

表 2 视觉与点云路线的精炼对比

维度	视觉路线	点云路线
数据与采集	相机 / 视频, 部署便捷, 需多视角与时序	激光 / 移动测绘, 采集组织成本较高
核心机制	检测 / 分割 → BIM/WBS 映射 → 完成度	配准 / 对应 → 覆盖率 × 点一面距离 → 完成度
典型指标	IoU/mAP/F1 → 规则化完成度与置信度	RMSD、点一面距离、覆盖率 / 密度阈值
主要误差源	遮挡、材质相似、视角漂移	稀疏 / 遮挡导致的欠采样、误配准
适用场景与代价	外观可判别、遮挡较可控; 成本低、易扩展	结构 / 装配式 / 室内复杂环境; 精度高、代价高

3 预测与控制：从量化进度到计划闭环

进度预测的管理价值取决于是否能稳定写回计划并触发控制。集成式框架以 BIM/IFC 为数据骨架, 将 as-built 量化与 as-planned 在统一数据契约下循环耦合, 形成“感知—生成 / 更新—执行—再感知”的闭环^[4]。主计划与滚动计划粒度不一致会放大误差; 以 Transformer 自动对齐可显著降低人工比对, 并保证写回粒度一致。由此可见, 若预测缺少 WBS 定位与前后置逻辑, 难以沉淀为可执行更改单。

将可放宽的先后关系建模为软逻辑并纳入优化, 比单纯压低预测误差更能提升可执行性^[5]。评估除 MAE/RMSE 外, 应关注关键路径缩短 (ΔCP) 与滞后概率下降 (ΔP)。模型选型取决于数据粒度、稳定性与不确定性表达: RF/XGB 对异构特征稳健, 结合 SHAP 可解释驱动因素, 适合周一月滚动; LSTM/TCN/Temporal Transformer 适合高频量化但需域适配; 贝叶斯网络及其与元启发式的结合擅长不确定性传播与情景推演。工程案例表明, 装配式梁桥能将 BIM 语义与现场量化联用, 实现动态工期预测并写回; 地铁项目以改进 BP 做滞后分类与偏差识别, 给出数据规模有限下的可行下限。据此, 可解释性与可写回性应与误差指标并列为选型准则。

不确定性的概率化表达提升预警可用度, 以滞后概率、区间工期与计划可靠性构成的面板, 优于单点估计; “时间弹性”提示正确工期受组织与资源配置影响, 可靠性宜作为约束或目标纳入; 在既定风险水平下给出置信度, 有助于将预测转化为可执行管控策略。此外, 供应链时滞常是隐性关键路径; BIM+GIS 可将材料—运输—安装的链路可视化, 并把到货事件编码为特征, 用于瓶颈识别与再排产。

接口与字段一致性是闭环成败的技术基础, 规则推理的自动编排实现“BIM 语义 → 计划条目”的可计算映射; 行业 IFC 扩展支撑特殊对象交换; 项目管理系统实践强调权限流与表结构约束。“好模型”至少应

在 WBS 粒度可定位、在不确定性上可表达、在计划系统中可写回, 否则难以转化为可执行的进度控制。

4 结束语

BIM×ML 的施工进度管理已形成“监测—量化—预测—计划闭环”的基本范式: 以 BIM/IFC-WBS 为语义锚, 将 as-built 稳定映射到 4D 并写回计划。在监测侧, 视觉方法部署灵活、成本低, 适用于外观可判别且遮挡可控的阶段, 但对域迁移与“模型指标完成度 %”映射依赖较强; 点云 / Scan-vs-BIM 在几何真实性与容差管理上更具优势, 可用“覆盖率 × 点一面距离阈值”形成可复验的构件级判据, 适合结构、装配式与室内复杂环境, 但对采集密度与配准链路更敏感。由量化走向控制, 关键是计划语义的可写回与粒度一致性。集成式计划将感知—计划—执行闭环化, 主 / 短期计划的 Transformer 对齐可降低人为比对误差; 软逻辑优化把可并行 / 可调序约束显式建模, 评价不应止于 MAE/RMSE, 还需关注 ΔCP 与滞后概率下降等“控制成效”。

参考文献:

- [1] 华泉英, 拉斐尔·萨克斯, 阿米尔·德加尼. 基于 BIM 和计算机图形学的建筑场景综合图像数据生成 [J]. 建筑自动化, 2023(154):105016.
- [2] 贾寿君, 吴航斌, 郭志坚, 等. 利用高维点云特征张量实现 BIM 与施工的精确对应 [J]. 建筑自动化, 2024(162): 105407.
- [3] 张帆, 孙楚津, 覃思中, 等. 基于 BIM 和深度学习点云分割的施工检查方法模拟研究 [J]. 工程力学, 2024, 41(02):194-201.
- [4] 马坦·塔玛里, 沙布泰·艾萨克. 全面集成的施工规划 [J]. 建筑自动化, 2023(154):105027.
- [5] 魏建英, 刘玉明, 卢晓春, 等. 考虑软逻辑的隧道施工进度优化 [J]. 应用科学, 2024, 14(06):2580.