

面向建筑施工场景的进度智能化识别方法综述*

魏伟¹, 卢昱杰^{1,2,3}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学上海智能科学与技术研究院, 上海 200092)

[摘要] 科学的施工进度管理对于保障项目如期交付具有重要意义。传统的进度管理多依赖耗时低效的人工记录方式。为提升施工进度管理效率, 现有研究致力于探索智能化技术在进度识别任务中的应用潜力。本研究面向建筑施工场景, 建立“智能化技术-建筑施工场景-进度识别流程”研究框架, 从“数据感知-特征解析-进度识别-信息建模”视角深入剖析智能化技术在多源场景进度智能化识别中的核心工作机制与关键实现路径。同时, 从多源数据融合、垂域大模型构建、生成式人工智能等方面凝练未来研究方向, 为施工进度智能化管控与无人化监管提供理论与实践参考。

[关键词] 人工智能; 进度识别; 数据融合; 图像解析; 大语言模型

[中图分类号] TU723.3; TP18

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)01-0004-09

Review of Intelligent Progress Recognition Methods for Building Construction

WEI Wei¹, LU Yujie^{1,2,3}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Shanghai Research Institute of Intelligent Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Scientific construction schedule management is of great significance to ensure the timely delivery of the project. Traditional schedule management relies on time-consuming and inefficient manual recording methods. To improve the efficiency of construction schedule management, the current research is devoted to exploring the application potential of intelligent technology in schedule identification tasks. This study aims at the construction scene, establishes the research framework of intelligent technology-construction scene-schedule identification process, and deeply analyzes the core working mechanism and key implementation path of intelligent technology in the intelligent identification of multi-source scene schedule from the perspective of data perception-feature analysis-schedule identification-information modeling. Meanwhile, the future research directions are summarized from the aspects of multi-source data fusion, vertical domain large model construction, and generative artificial intelligence, which provide theoretical and practical reference for intelligent control and unmanned supervision of construction progress.

Keywords: artificial intelligence; progress identification; data fusion; image analysis; large language models

* 国家重点研发计划; 工程建造云边缘数据协同机制与一体化建模关键技术(2022YFC3801700); 中国工程院咨询项目: 智能建造发展战略研究(2024-XZ-37); 中央高校基本科研业务费专项资金资助: 基于视觉-语言模型的施工安全隐患感知、评估与预控方法(2024-1-ZD-02); 上海市科技创新行动计划; 大型公共建筑超低能耗智慧运维技术研究(22dz1207100); 中国高校产学研创新基金: 基于图像生成式技术的建筑室内装饰智能化设计方法研究(2024SE027)

[作者简介] 魏伟, 博士研究生, E-mail: weiw@tongji.edu.cn

[通信作者] 卢昱杰, 教授, 博士生导师, E-mail: lu6@tongji.edu.cn

[收稿日期] 2025-06-26

0 引言

施工进度是工程项目管理的核心环节,其成效直接影响项目的工期控制与成本。传统的施工进度管理多依赖人工记录、现场巡视和经验判断,不仅耗时费力,还容易因人为疏忽或信息滞后导致数据失真。随着人工智能技术的飞速发展,工程建设逐步迈向数字化与智能化时代,对施工进度识别的精度、实时性与自动化水平提出了更高要求。

近年来,物联网(Internet of Things, IoT)、增强现实(Augmented Reality, AR)、点云处理、图像解析等新兴技术在建筑施工领域得到广泛应用,为施工进度识别提供了数字化的高效解决方案。随着人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术的进一步突破,大语言模型(Large Language Models, LLMs)正逐步渗透建筑施工领域,展现出对多源异构数据理解与复杂任务自动化建模的强大潜力。视觉大语言模型具备跨模态信息融合、语义理解和推理能力,可应用于施工进度视觉识别、进度报告生成等进度管理任务。

本研究聚焦于建筑施工场景,系统梳理了智能化施工进度识别方法的研究现状与发展趋势,建立了“智能化技术-建筑施工场景-进度识别流程”的研究框架,剖析多类智能化技术在多源施工场景进度识别中的核心实现原理。首先,深入分析多类智能化技术的工作原理、场景适用性与优缺点;其次,系统梳理建筑施工典型场景的施工表观特性、场域特征与工序工法特点。以场景为导向,总结适用性进度识别算法,分析进度识别精度。此外,从“感知-解析-识别-建模”角度,总结凝练智能化进度识别的核心工作机制与关键实现路径。最后,从多源数据融合、垂域大模型微调以及生成式 AI 角度提出了施工进度未来研究方向,为施工进度智能化管控与无人化监管提供理论支撑与实践参考。

1 智能化进度识别研究框架

本研究提出“智能化技术-建筑施工场景-进度识别流程”研究框架(见图1),深入剖析智能化技术在典型建筑施工场景中的进度识别关键流程,探究智能化进度识别方法的核心工作机制与关键实现路径。

1.1 智能化技术

随着人工智能技术的发展,物联网、增强现实、点云处理、图像处理、大语言模型等智能化技术已逐步深入应用于施工进度智能化识别研究,显著提升进度管控效能。物联网技术多基于射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)、全球定位系

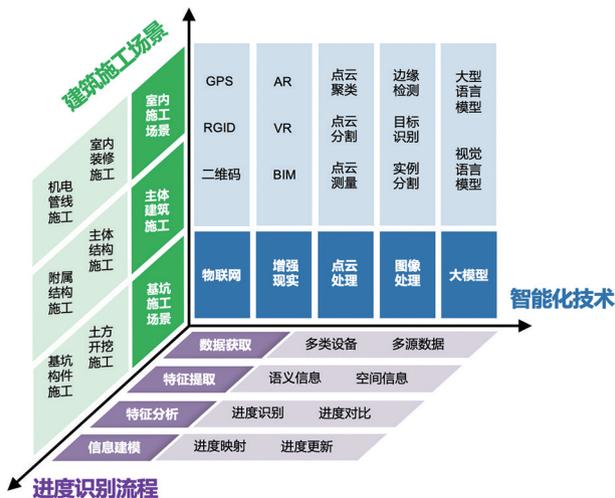


图1 研究框架

Fig. 1 Research framework

统(Global Positioning System, GPS)与二维码技术在施工构件材料表面设置标签,通过信号接收与扫描设备实现构件的定位追踪。增强现实(AR)方法多通过AR技术将现实场景与虚拟BIM模型进行叠加以识别进度差异或安装偏差。点云处理技术^[1]则可通过点云聚类分割与点云量测识别构件的语义信息与三维空间信息。图像处理技术可通过边缘检测、目标识别与实例分割方法识别施工图像中构件材料的纹理、材质、类别等语义信息^[2]。大语言模型具有卓越的文本理解与推理能力,而视觉语言模型则进行图像理解与多模态信息处理。

1.2 建筑施工场景

上述智能化方法可依据场景表观特征与施工工法特征应用于多类建筑施工典型场景,按照建筑施工顺序,可划分为基坑施工、主体结构施工、附属结构施工、室内装修施工与室内机电施工等。各类场景的施工环境、作业内容与进度识别挑战具有显著差异。在基坑施工阶段场地开放性、作业环境复杂,涉及土方开挖、支护体系搭建等任务,构件多为临时性与隐蔽性结构。主体结构施工为建筑施工的核心阶段,建设周期长、构件标准化程度高,主要包括钢筋绑扎、模板支设、混凝土浇筑等。附属结构施工阶段构件种类多样、安装位置分散,包括楼梯、栏杆、外墙装饰构件等。室内施工阶段涉及封闭连续型空间,难以实现全面性施工监控。其中装修施工阶段则涉及内墙施工、墙面粉刷、地面铺设等工序。机电施工阶段涵盖给排水、电气、暖通等多类专业系统的安装,具有构件分布复杂、管线路径复杂、施工节奏紧凑等特征。

1.3 进度识别内容

本研究将智能化技术在多源场景进度识别任

务的工作机理凝练为“数据获取-特征提取-进度分析-信息建模”4个核心流程。首先,数据获取通过摄像头、激光扫描仪、传感器等设备采集施工现场的图像、点云与构件定位信息,构建多模态数据基础。其次,特征提取阶段利用图像识别与点云分析技术提取构件的类别、位置、尺寸等语义与几何信息,辅助判断施工状态。此外,在进度分析阶段,结合多类施工场景的工序工法特点进行施工阶段判定、工程量评估与进度差异识别。最后,信息建模将分析结果集成至 BIM 模型,实现形象进度的三维可视化呈现与动态更新。该流程贯通感知、识别、分析、建模环节,为施工进度智能化管理建立明晰的实现路径。

2 施工进度识别智能化技术

随着人工智能技术的发展,传感器、增强现实、点云处理、图像解析等众多数字化技术已逐步应用于施工自动化管控领域并取得初步成效,提升施工进度追踪效率。本节旨在对多类智能化技术进行系统综述(见图 2)。

2.1 基于物联网的施工进度信息追踪方法

基于物联网的施工要素信息追踪是自动化进度监测中常用的方法之一。应用 RFID、GPS、二维码等多种方式在各类组件设置传感标签,能够获取施工要素的位置、数量、状态等关键信息,可实现施工进度、物料使用情况以及设备运行状态的精准监控与全生命周期管理。

物联网技术能够提供实时精准的物料监控数据,但在场景适用性方面仍存在局限性。GPS 技术在室内环境中,信号容易受到建筑物结构的遮挡,

导致定位失效或精度大幅下降^[3]。RFID 技术依赖信号接收设备的正常运行,需要定期对接收设备进行安装、扫描和维护^[4]。二维码技术多适用于预制构件的标识和管理,但在运输和安装过程中,二维码标签易受到碰撞、摩擦等外力作用出现损坏或丢失的情况,导致数据跟踪链中断^[5]。

2.2 基于增强现实的施工进度对比方法

增强现实技术是一种将虚拟信息与现实世界相结合的技术,通过将 BIM 模型与实际施工现场叠加,能够在同一视野中实现虚拟模型与现实环境的融合与互动^[6]。增强现实技术通过在用户观察视角中叠加虚拟对象或信息,不仅增强了现实环境的感知,还为用户提供虚拟与现实信息的实时交互方式,实现直观的进度可视化和偏差识别。

增强现实技术通过视觉交互方式使用户快速识别施工偏差与进度滞后问题,适用于室内连续空间施工进度巡检。然而,现有方法尚未充分提取现实场景语义信息,进度识别往往依赖于人工判断和测量,检查结果准确性多受巡检人员经验与技术水平影响。

2.3 基于点云处理的进度识别方法

基于点云处理的进度识别方法包括点云对比分析及点云测量等。施工点云对比可用于施工进度差异识别,具体而言,将建筑点云与计划 BIM 模型,或将不同时段的点云模型进行配准与对齐,可通过提取三维模型差异实现施工进度对比。点云测量方法多用于尺寸、组件数量及体积等^[7]场景几何参数量化。例如,通过测量管道点云长度与直径^[8],计算钢筋点云尺寸、间距和数量^[9]等方式,实



图 2 施工进度识别智能化技术

Fig. 2 Intelligent technologies for progress recognition

现物料清算与进度定量评估。

点云处理技术在进度可视化与场景变化检测中具有不可替代的功能,适用于广域施工与室内施工场景的精确尺寸测量。然而,点云数据采集过程多依赖昂贵的扫描设备和专业技术配置^[10],数据处理过程耗时费力,对算力要求较高。此外,针对弱光、遮挡、镜面反光条件的数据精度较低,场景适用性有限。诸多因素使其在经济性与高效性方面具有一定局限。

2.4 基于图像解析的进度识别方法

图像解析技术可通过以下3种方式实现进度定性判断与定量计算:①表观特征提取方法,基于目标检测、图像分类算法识别施工构件、材料等关键要素,提取纹理^[11]、颜色^[12]、材质^[13-14]、轮廓^[15]等静态表观特征,结合施工进度判定规则判定构件施工状态;②要素活动状态识别方法,通过施工构件、工作设备等的活动状态识别^[5],推断施工阶段并判断进度完成情况;③面域计算与数量统计法,基于实例分割、边缘检测等算法提取施工区域边界,计算构件目标数量或像素面积^[16],以定量评估施工面积与工程量^[17]。

图像解析方法灵活性高、设备成本低,可采用无人机、塔式起重机摄像头、室内巡检相机等多种数据采集设备应用于多类型的施工场景,适用于高效、经济、便捷的工程建造全过程的施工进度自动化监控。然而,多样化的复杂施工场景往往伴随不同的工程识别难点,施工场景的特征异质性和复杂性将会影响施工语义解析与进度识别精度。

2.5 基于大语言模型的进度识别方法

近年来,大型语言模型已成为自然语言处理领域的重要研究方向。诸如 GPT 系列^[18-21]、BERT^[22]和 DeepSeek^[23]等大型语言模型通过大规模语料库预训练^[24],具备了百科全书式的知识储备和自然语言生成能力等^[25]。语言处理能力进步,亦推动了 CLIP^[26]、GPT-4V^[27]等大型视觉语言模型(Large Vision-Language Models, LVLMS)的快速发展,该类模型可通过大量的视觉数据训练,实现图像识别、视觉问答、文档分析等视觉元素和结构的识别和理解。

基于大模型的文本推理与视觉解析能力,现有研究已初步将其应用于施工进度识别、进度延误分析等任务。例如,GPT-4V 可应用于施工机械、建筑材料及施工地形等关键要素的识别,进而判定施工阶段的判定任务^[28]。大语言模型还可对施工报告进行信息抽取与延误原因分析^[29]。通过与计算机

视觉技术相结合,可梳理视觉解析结果生成进度图文报告^[30]。

大语言模型在建筑施工图像的语义解析与进度识别任务初具应用潜力。然而,当前模型针对垂直领域的视觉解析精度仍有待提升,仍需针对建筑领域数据进行预训练与模型微调。此外,当前方法多局限于进度的定性分析,尚不具备工程量等关键指标的定量计算能力,在施工进度精细化管理中存在一定的局限性。

3 建筑施工进度识别典型场景

上述智能化技术依据施工表观特征、场域分布特点及工序工法特性,可适用于建筑施工多类场景的进度自动化识别(见图3),按照施工顺序可分为基坑工程、主体结构、附属结构、室内装修与机电工程施工。

3.1 基坑工程施工进度识别

基坑工程施工面域广阔,建造场域呈现横向扩展的分布特点。现有研究多应用无人机定期采集俯瞰图像,基于倾斜摄影对施工场地进行点云建模,应用点云分割与测量方法实现场景理解与进度分析。例如,摄影测量算法可通过点云体积测量,计算施工土方量^[31]。

基坑航拍图像亦用于关键施工构件分析与施工阶段判定。基于图像分割等计算机视觉算法提取施工土、施工角撑、基坑底板、基坑模板等关键要素,依据关键要素与施工工序的对应关系,可将基坑施工划分为基坑开挖、角撑施工、底板施工与地下室施工阶段。值得关注的是,俯拍视角的基坑图像存在构件视线遮挡的识别难点,如角撑构件遮挡下方施工地板。相关研究针对遮挡问题^[32],引入滑动窗口特征提取策略,强化对未被遮挡可见特征的关注力度,提升构件识别精度,同时探讨了遮挡程度对基坑构件识别精度的影响。总体而言,现有进度识别方法针对基坑施工可通过施工构件识别实现工序级进度判定,亦可针对施工区域进行工作量评估,实现片区级进度识别。建筑施工进度识别典型场景如图3所示。

3.2 主体结构施工进度识别

随着基坑施工完成,主体结构施工随之启动。该阶段建设周期较长,为建筑施工的核心部分。主体结构施工多以标准层为单位呈现竖向生长的场域分布特点。每个标准层的施工过程多分布于固定的施工作业面,依次完成墙体、梁板、钢筋绑扎、混凝土浇筑等多项施工工序。

现有基于视觉解析的进度识别方法多通过塔

	识别数据	关键识别要素	关键施工工序	适用方法	识别精度
基坑工程	 无人机航拍图 倾斜摄影点云	表层土/角撑/基坑 底板/模板等	基坑开挖-角撑施工- 底板施工-地下室施工等	点云处理 图像识别	构件级进度识别 工序级进度识别 片区级进度识别
主体结构	 塔式起重机摄像头图 摄影/扫描点云 传感器设备	墙/墙模板/梁/ 板/钢筋/混凝土等	墙体施工-梁板施工- 钢筋绑扎-混凝土浇筑等	物联网 视觉大模型 图像/点云处理	构件级进度识别 工序级进度识别 施工层进度识别
附属结构	 立面拍摄图像 倾斜摄影点云 激光扫描点云	建筑立面/窗户/ 幕墙/门/扶手栏杆等	支架安装-幕墙安装- 窗户安装等	图像/点云处理	构件级进度识别 工序级进度识别
室内装修	 手持设备图像/视频 (深度/双目相机) 激光扫描点云	内墙/抹灰腻子/瓷砖等	墙面抹灰-腻子施工- 地墙面瓷砖铺贴等	虚拟现实 图像/点云处理 同步定位建图	构件级进度识别 工序级进度识别
室内机电	 手持设备图像/视频 (深度/全景相机) 激光扫描点云	消防栓管道/风管/排烟管/ 配电箱/水管/支架等	各类机电管线安装	虚拟现实 图像/点云处理 同步定位建图	构件级进度识别

图 3 建筑施工进度识别典型场景

Fig. 3 Typical scenarios of building construction

式起重机摄像头收集作业面施工图像或视频。通过 Mask R-CNN、PointRend 等算法对墙体、模板、梁、板、钢筋、混凝土等关键构件进行识别确定施工楼层及施工工序。通过掩码面积比较方法可计算施工工序完成度,如混凝土浇筑完成度、预制钢筋绑扎完成率等^[33]。结合 DeepSORT 目标追踪算法,还可用于判定预制墙体的安装状态、安装位置及安装时间,实现对预制构件吊装过程的持续追踪^[5]。另有相关研究^[28]应用 GPT-4V 视觉大语言模型识别图像中的机械、建材、建筑类型等要素来辅助判断主体结构施工阶段,如混凝土浇筑。点云处理技术亦可对不同时期的建筑主体点云模型进行差异检测^[13,34],识别结构模型的几何变化以确定施工进度增量。RFID 技术等物联网技术则可通过安装设置无线电子标签,跟踪记录预制构件等建筑组件的位置和施工活动^[2]。总体而言,针对主体结构施工场景,图像解析、大模型、点云处理、物联网等多种技术可通过构件识别、物料定位、工序判断以及差异比较,依据进度管理精度要求实现构件级、工序级、施工层级的进度识别。

3.3 附属结构施工进度识别

附属结构施工监控多关注外立面、幕墙、窗户、门等构件的安装过程。现有方法可通过手机拍摄或无人机拍摄方式收集建筑立面图像,通过图像解析、倾斜摄像等方式识别建筑立面要素,用于施工进度估计、外立面图纸生成等任务。例如,采用视频检测与基于卷积核的追踪方法,从建筑立面施工视频中检测并计算立面砖块数量,结合目标追踪避免砖块重复计数,用于外立面施工进度评估^[35]。边

缘检测算法也可应用于建筑立面要素检测,将 Canny 算子与实例分割算法结合,可实现建筑立面轮廓提取与建筑幕墙与窗户识别。通过建筑立面与幕墙掩码像素计算可实现附属结构进度工程量计算^[36]。倾斜摄影方法可基于建筑立面多视角图像生成点云模型,结合边缘检测算法提取建筑立面与附属结构构件轮廓,实现建筑立面图纸自动化生成^[37]。然而,基于点云的方法多受建筑立面幕墙反光的影响,语义解析精度存在一定的局限性。现有方法较多基于图像处理算法实现构件级施工进度识别。

3.4 室内施工场景进度识别

与主体结构、附属结构施工等室外开阔空间不同,室内施工场景通常由多个密闭空间组成,受内墙与天花板等空间边界限制,难以一次性获取施工场景整体进度信息。因此,现有方法针对室内施工进度追踪任务,多采用手持或头戴式设备以移动巡检方式收集进度分析监控数据。

室内施工进度识别研究多聚焦于室内装修与机电工程施工两类场景。现有方法多通过虚拟现实、点云处理、图像处理、同时定位与建图(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)等技术实现施工差异对比、进度状态判定与室内巡检定位。虚拟现实技术多通过虚拟 BIM 模型与室内施工场景相叠加^[38],在虚拟环境中对构件进行手动标注和测量,并与计划模型进行对比^[39-40],实现室内装修与机电安装进度偏差实时评估。点云处理技术多用于施工构件点云分割^[41],如管道构件,用于判断施工要素的完成情况。图像处理技术可基于

可见光与红外图像^[42]的颜色、形状和纹理等表现特征^[43],对室内内墙^[13]、抹灰^[44]、瓷砖铺贴^[16,45]、电气组件、消防组件等各类管道构件进行目标检测和实例分割^[46-47],识别构件施工状态并定量计算工程量。SLAM 算法则用于室内巡检移动定位,可对室内墙壁、立柱等结构构件进行空间定位^[48],以快速发现施工进度滞后问题。总体而言,针对室内施工场景,多种智能化技术的综合应用可实现构件级要素识别以及工序级进度识别与工程量计算。

4 施工进度识别关键流程

本节从“数据感知-特征解析-进度识别-信息建模”角度剖析了智能化技术在建筑施工现场进度识别研究中的工作机理与实现路径,如图 4 所示。

4.1 多源施工数据获取

依据施工场域分布特点与施工工序特性,现有进度识别方法多采用传感器、双目相机、全景相机、激光扫描仪和 AR 设备等多类硬件感知设备,收集图像、深度、点云、轨迹等多模态数据,为施工关键特征提取奠定数据基础。

传感器,如 RFID, 惯性测量单元等,可对构件、物料、施工设备的位置、速度、数量、环境参数等信息进行全过程监测^[2,49],用于施工实体在生产、运输、安装、检查、维护过程中的进度追踪^[50]。双目相机由 2 台间距固定的摄像头构成,可同步采集左右图像通过立体视差计算获取深度图,适用于室内连续空间的轨迹追踪与空间移动定位。全景相机可通过多个超广角镜头拼接输出 360°全景图像或视频,覆盖施工现场

全视角。全景数据多与图像识别技术结合,适用于广域空间的连续构件识别与施工状态监控。激光扫描仪用于采集施工场景高精度三维点云数据,多用于室内外施工场景空间定位、几何测量、BIM 模型对比与进度偏差检测。AR 设备对 RGB 相机、深度传感器等进行功能集成,具备环境建模与虚实叠加功能,适用于施工现场 BIM 模型对照、构件状态可视化与交互式进度展示等任务。上述多源感知设备通过协同采集和多模态数据融合,为关键施工特征的提取与分析提供数据支撑。

4.2 施工进度特征提取

基于传感器、全景图像、深度图像、点云和三维模型等多模态数据,结合语义解析算法可提取施工语义类别、物理空间位置等关键特征信息,为施工进度识别与分析奠定坚实基础。

基于目标检测、图像分类等深度学习方法,可从图像和点云中提取施工语义信息,包括施工实体类型、物料材质、表现纹理等多维属性特征。例如,YOLO 算法和支持向量机被广泛应用于施工材料识别^[51-52]和材质分类^[11],支持物料清点与施工状态判断。近年来,GPT-4V 等视觉大语言模型^[28]展现出强大的多模态理解能力,能够识别施工图像中的机械设备、结构类型以及施工地形等进度管理要素。

此外,传感器、点云与三维模型数据还可用于提取施工场景的空间几何信息,如构件尺寸、空间位置、施工体量等。例如,传感器技术可实现施工物料构件位置定位^[2,49];点云测量方法则常用于管



图 4 施工进度识别关键流程

Fig. 4 Key processes of construction progress recognition

道、钢筋等构件的长度、直径、尺寸、间距、高度测量^[8-9,53]及施工体积计算^[54],为施工进度量化分析与动态追踪提供关键支撑。

4.3 施工进度分析识别

在提取施工要素语义信息与空间信息的基础上,结合施工工序判定方法与工程量计算原则进一步对施工特征进行分析,实现施工进度定性评估与定量计算。

进度定性评估多通过识别构件、物料的施工完成状态来判断工程项目所处的施工阶段。例如,通过推断预制墙体的安装状态、吊装时间推断主体结构施工阶段,判断墙体施工工期^[5]。另有研究通过判断施工机械的工作状态,基于施工设备的工作类型属性推测项目当前施工阶段与工作周期^[55]。

进度定量计算则侧重于施工实体数量、施工面积、施工体量量化评估。例如,通过对施工材料、施工砖块进行识别、分类与数量统计^[17],实现楼面施工、砌筑施工等多类场景工程量自动计算^[16,56]。相关研究通过比较混凝土和模板等大体积构件在建筑区域内的像素比例,计算主体结构施工进度百分比^[57]。另有研究通过对结构工程点云进行高度测量^[53]、对道路点云进行体积计算^[54],评估垂直与水平施工进度。

4.4 施工进度信息建模

基于特征提取与分析获取的施工进度语义形式多样,缺乏统一的进度表征形式。现有方法进一步探究了施工进度信息建模方法,将多源数据提取的施工进度集成至建筑信息模型 BIM,同时对比分析进度偏差实现进度状态预警与形象进度可视化。

施工进度映射旨在将传感器、图像、点云等多模态数据中提取的进度信息关联至 BIM 模型,实现形象进度可视化与信息集成。物联网方法可将物料构件的定位信息与 BIM 结合,用于检查维护与信息管理工作^[50],帮助管理人员直观掌控施工进度并做出合理决策^[58-60]。从图像中获取的进度信息可依据施工场域分布特点采取多类进度映射方法。针对平面空间分布场域,多采用平面网格映射策略通过平面坐标转换建立基坑构件^[32]、作业面施工构件^[33]与 BIM 元素的映射关系。针对室内连续空间施工场景,可通过双目视觉定位或 SLAM 空间定位方法实现内墙、机电^[44]施工进度的 BIM 模型映射。

此外,现有研究在获取实际施工进度的基础上对其深度分析,包括进度计划与实际进度偏差^[29]、施工安装误差及某施工时段的进度增量^[32],并将分析结果集成至 BIM 模型,实现进度增量更新与进度

状态预警。例如,通过将激光扫描数据与三维 BIM 模型进行对齐^[39-40,61]与模型配准^[62-63],应用点云空间占用^[13]和体素变化检测^[34,64]方法,进一步检测不同时间段点云模型之间的几何变化,识别实际计划施工进度偏差。

5 未来研究方向

结合上述智能化进度识别方法的特点,本文从多源数据融合、垂直领域大模型微调以及生成式人工智能 3 个方面,探讨施工进度智能管控的未来研究方向。

5.1 基于多源数据融合的施工进度精细化管理

结合图像、点云与物联网等多模态数据,能够更精确地定位施工物料、构件、识别施工现场的进度与工程量。图像数据通过语义分割算法快速识别施工现场的关键元素(如建筑物、机械、材料等),物联网传感器数据可对施工物料构件进行精准定位,而点云数据则提供了高精度的深度信息,能够准确计算施工体积与空间布局。基于模态数据融合能够实现更为精准的施工进度识别,不仅能够提高进度预测的准确度,还能为工程量计算提供更加可靠的依据,从而助力施工管理的精细化与高效化。

5.2 大语言模型在建筑垂直领域的适应性微调

通用大语言模型在特定领域,如土木工程领域,其进度数据语义解析精度仍存在一定的局限性。未来研究可以通过微调通用大语言模型,结合建筑领域特定的施工数据,提升其在施工现场任务的语义解析能力。通过利用大语言模型进行建筑施工图像和文本数据的联合训练,能够增强模型对施工图纸、现场照片、进度报告等多种数据的理解与推理能力。这种定制化的微调方法可以有效提高施工要素识别与施工进度分析的准确性。

5.3 基于生成式 AI 的施工进度智能建模

未来研究可探索将生成式人工智能与建筑施工数据深度融合,构建具备自动理解、分析与预测能力的智能化进度建模框架。通过输入施工图纸、图像、视频及进度计划等多源数据,生成式模型可自动生成进度计划、识别施工活动、预测关键路径,并实时生成进度偏差分析与施工报告。该方法不仅提升了进度建模的自动化程度,还可为施工现场管理人员提供高质量、可解释的辅助决策支持,推动从“数据感知”。

参考文献:

- [1] 梁阳泽,蔡伟浪,杨超杰,等.点云技术在建筑施工管理领域研究进展与展望[J].施工技术(中英文),2023,52(14):1-8. LIANG Y Z, CAI W L, YANG C J, et al. Research progress and prospect of point cloud technology in the field of construction

- management[J]. *Construction technology*, 2023, 52(14):1-8.
- [2] 吴杭姿,韩立芳,杨燕,等. 基于数字图像处理技术的建筑预埋件无人化识别技术[J]. *施工技术(中英文)*, 2024, 53(6):117-121.
WU H Z, HAN L F, YANG Y, et al. Unsupervised identification technology of building embedded parts based on digital image processing technology [J]. *Construction technology*, 2024, 53(6):117-121.
- [3] IBRAHIM A, SABET A, GOLPARVAR-FARD M. BIM-driven mission planning and navigation for automatic indoor construction progress detection using robotic ground platform[C]//Krkow: Proceedings of the EC3 Conference 2019, 2019.
- [4] EKANAYAKE B, WONG J K, FINI A A F, et al. Computer vision-based interior construction progress monitoring; a literature review and future research directions [J]. *Automation in construction*, 2021, 127:103705.
- [5] WANG Z C, ZHANG Q L, YANG B, et al. Vision-based framework for automatic progress monitoring of precast walls by using surveillance videos during the construction phase [J]. *Journal of computing in civil engineering*, 2021, 35:04020056.
- [6] MILGRAM P, KISHINO F. A taxonomy of mixed reality visual displays [J]. *IEICE transactions on information and systems*, 2015, 77:1321-1329.
- [7] 陈奕才,蔡庆军,蔡文浩,等. BIM+三维扫描技术在大型机场施工监测中的应用[J]. *施工技术(中英文)*, 2022, 51(17):45-47.
CHEN Y C, CAI Q J, CAI W H, et al. Application of BIM+3D scanning technology in monitoring and analysis of large airports [J]. *Construction technology*, 2022, 51(17):45-47.
- [8] MAALEK R, LICHTI D D, MAALEK S. Towards automatic digital documentation and progress reporting of mechanical construction pipes using smartphones [J]. *Automation in construction*, 2021, 127:103735.
- [9] QURESHI A H, ALALOUL W S, MURTIYOSO A, et al. Smart rebar progress monitoring using 3D point cloud model[J]. *Expert systems with applications*, 2024, 249:123562.
- [10] SHAHI A, CARDONA J M, HAAS C T, et al. Activity-based data fusion for automated progress tracking of construction projects [C]//West Lafayette: Construction Research Congress 2012; Construction Challenges in a Flat World, 2012.
- [11] HAN K K, GOLPARVAR-FARD M. Appearance-based material classification for monitoring of operation-level construction progress using 4D BIM and site photologs [J]. *Automation in construction*, 2015, 53:44-57.
- [12] GREESHMA A S, EDAYADIYIL J B. Automated progress monitoring of construction projects using machine learning and image processing approach [J]. *Materials today: proceedings*, 2022, 65:554-563.
- [13] HUANG R, XU Y S, HOEGNER L, et al. Semantics-aided 3D change detection on construction sites using UAV-based photogrammetric point clouds [J]. *Automation in construction*, 2022, 134:104057.
- [14] XUE J G, HOU X L. High-rise building construction progress measurement from top view based on component detection [J]. *Buildings*, 2022, 12(2):106.
- [15] WU Y H, KIM H, KIM C, et al. Object recognition in construction-site images using 3D CAD-based filtering [J]. *Journal of computing in civil engineering*, 2010, 24(1):56-64.
- [16] DENG H, HONG H, LUO D H, et al. Automatic indoor construction process monitoring for tiles based on BIM and computer vision [J]. *Journal of construction engineering and management*, 2020, 146:04019095.
- [17] WONG J K W, BAMERI F, AHMADIAN FARD FINI A, et al. Tracking indoor construction progress by deep-learning-based analysis of site surveillance video [J]. *Construction innovation*, 2025, 25(2):461-489.
- [18] RADFORD A, NARASIMHAN K, SALIMANS T, et al. Improving language understanding by generative pre-training [R]. San Francisco: OpenAI, 2018.
- [19] RADFORD A, WU J, CHILD R, et al. Language models are unsupervised multitask learners [EB/OL]. (2019-02-14) [2025-06-10]. https://cdn.openai.com/better-language-models/language_models_are_unsupervised_multitask_learners.pdf.
- [20] BROWN T, MANN B, RYDER N, et al. Language models are few-shot learners [J]. *Advances in neural information processing systems*, 2020, 33:1877-1901.
- [21] ACHIAM J, ADLER S, AGARWAL S, et al. Gpt-4 technical report [EB/OL]. (2023-03-27) [2025-06-10]. <https://arxiv.org/abs/2303.08774>.
- [22] DEVLIN J, CHANG M W, LEE K, et al. Bert: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding [C]// Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, 2019.
- [23] LIU A, FENG B, XUE B, et al. Deepseek-v3 technical report [EB/OL]. arXiv:2412.19437, 2024 [2025-06-10]. <https://arxiv.org/abs/2412.19437>.
- [24] ZHAO W X, ZHOU K, LI J, et al. A survey of large language models [EB/OL]. arXiv:2303.18223, 2023 [2025-06-10]. <https://arxiv.org/abs/2303.18223>.
- [25] YU X, CHEN Z, LING Y, et al. Temporal data meets LLM—explainable financial time series forecasting [EB/OL]. arXiv:2306.11025, 2023 [2025-06-10]. <https://arxiv.org/abs/2306.11025>.
- [26] SHEN S, LI L H, TAN H, et al. How much can clip benefit vision-and-language tasks? [EB/OL]. arXiv:2107.06383, 2021 [2025-06-10]. <https://arxiv.org/abs/2107.06383>.
- [27] YANG Z, LI L, LIN K, et al. The dawn of llms: Preliminary explorations with gpt-4v (ision) [EB/OL]. arXiv:2309.17421, 2023 [2025-06-10]. <https://arxiv.org/abs/2309.17421>.
- [28] ERSOZ A B. Demystifying the potential of ChatGPT-4 vision for construction progress monitoring [EB/OL]. arXiv:2412.16108, 2024 [2025-06-10]. <https://arxiv.org/abs/2412.16108>.
- [29] DANIEL MURGUIA, CAROL C MIDDLETON. Automatic inference of construction delays through analysis of weekly progress reports using LLMs [C]//ASCE Construction Research

- Congress 2024,2024.
- [30] XIAO B, WANG Y F, ZHANG Y P, et al. Automated daily report generation from construction videos using ChatGPT and computer vision[J]. *Automation in construction*, 2024, 168:105874.
- [31] BÜGLER M, BORRMANN A, OGUNMAKIN G, et al. Fusion of photogrammetry and video analysis for productivity assessment of earthwork processes[J]. *Computer-aided civil and infrastructure engineering*, 2017, 32(2):107-123.
- [32] WEI W, LU Y J, LIN Y J, et al. Augmenting progress monitoring in soil-foundation construction utilizing SOLOv2-based instance segmentation and visual BIM representation[J]. *Automation in construction*, 2023, 155:105048.
- [33] WEI W, LU Y J, ZHANG X L, et al. Fine-grained progress tracking of prefabricated construction based on component segmentation [J]. *Automation in construction*, 2024, 160:105329.
- [34] MEYER T, BRUNN A, STILLA U. Change detection for indoor construction progress monitoring based on BIM, point clouds and uncertainties [J]. *Automation in construction*, 2022, 141:104442.
- [35] HUI L D, PARK M, BRILAKIS I. Automated in-placed brick counting for façade construction progress estimation [C]// *Computing in Civil and Building Engineering*, 2014.
- [36] LU Y J, WEI W, LI P X, et al. A deep learning method for building façade parsing utilizing improved SOLOv2 instance segmentation[J]. *Energy and buildings*, 2023, 295:113275.
- [37] WANG M K, WANG J Y, WEI W, et al. Building facade sketch drawing based on computer vision[C]//*Proceedings of the 28th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate*, 2024.
- [38] WANG S K, CHEN H M. A construction progress on-site monitoring and presentation system based on the integration of augmented reality and BIM[C]//*Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2020.
- [39] KHAIRADEEN ALI A, LEE O J, LEE D, et al. Remote indoor construction progress monitoring using extended reality [J]. *Sustainability*, 2021, 13(4):2290.
- [40] DUDHEE V, VUKOVIC V. Building information model visualisation in augmented reality[J]. *Smart and sustainable built environment*, 2023, 12(4):919-934.
- [41] WANG B Y, CHEN Z Y, LI M K, et al. Omni-Scan2BIM: a ready-to-use Scan2BIM approach based on vision foundation models for MEP scenes[J]. *Automation in construction*, 2024, 162:105384.
- [42] HUANG H, LO Y, ZHU J L, et al. Semantic enhanced As-built BIM updating based on vSLAM and image processing [C]// *Construction Research Congress 2020*, 2020.
- [43] KROPP C, KOCH C, KÖNIG M. Drywall state detection in image data for automatic indoor progress monitoring[C]//*Computing in Civil and Building Engineering*, 2014.
- [44] WEI W, LU Y J, ZHONG T, et al. Integrated vision-based automated progress monitoring of indoor construction using mask region-based convolutional neural networks and BIM [J]. *Automation in construction*, 2022, 140:104327.
- [45] 卢昱杰, 仲涛, 魏伟, 等. 基于图像分割与轨迹追踪的室内饰面施工进度智能评估方法[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(1):163-172.
- LU Y J, ZHONG T, WEI W, et al. Intelligent evaluation method of indoor finishing construction progress based on image segmentation and positional tracking [J]. *Journal of civil and environmental engineering*, 2024, 46(1):163-172.
- [46] HAMLEDARI H, MCCABE B, DAVARI S. Automated computer vision-based detection of components of under-construction indoor partitions[J]. *Automation in construction*, 2017, 74:78-94.
- [47] PAN Y D, BRAUN A, BRILAKIS I, et al. Enriching geometric digital twins of buildings with small objects by fusing laser scanning and AI-based image recognition [J]. *Automation in construction*, 2022, 140:104375.
- [48] VASSENA G P M, PERFETTI L, COMAI S, et al. Construction progress monitoring through the integration of 4D BIM and SLAM-based mapping devices[J]. *Buildings*, 2023, 13(10):2488.
- [49] CALDAS C H, TORRENT D G, HAAS C T. Using global positioning system to improve materials-locating processes on industrial projects [J]. *Journal of construction engineering and management*, 2006, 132(7):741-749.
- [50] LORENZO T M, BENEDETTA B, MANUELE C, et al. BIM and QR-code a synergic application in construction site management [J]. *Procedia engineering*, 2014, 85:520-528.
- [51] MAHAMI H, GHASSEMI N, DARBANDY M T, et al. Material recognition for automated progress monitoring using deep learning methods [EB/OL]. arXiv:2006.16344, 2020 [2025-01-01]. <https://arxiv.org/abs/2006.16344>.
- [52] DIMITROV A, GOLPARVAR-FARD M. Vision-based material recognition for automated monitoring of construction progress and generating building information modeling from unordered site image collections [J]. *Advanced engineering informatics*, 2014, 28(1):37-49.
- [53] MASOOD M K, AIKALA A, SEPPÄNEN O, et al. Multi-building extraction and alignment for As-built point clouds: a case study with crane cameras [J]. *Frontiers in built environment*, 2020, 6:581295.
- [54] LO Y, ZHANG C, YE Z H, et al. Monitoring road base course construction progress by photogrammetry-based 3D reconstruction [J]. *International journal of construction management*, 2023, 23(12):2087-2101.
- [55] WU R J, FUJITA Y, SOGA K. Integrating domain knowledge with deep learning models: an interpretable AI system for automatic work progress identification of NATM tunnels[J]. *Tunnelling and underground space technology*, 2020, 105:103558.
- [56] HUI L D, PARK M W, BRILAKIS I. Automated brick counting for façade construction progress estimation [J]. *Journal of computing in civil engineering*, 2015, 29(6):04014091.
- [57] YANG B, GAO B L, HAN Y L, et al. Semantic segmentation-based framework for concrete pouring progress monitoring by using multiple surveillance cameras [J]. *Developments in the built environment*, 2023, 16:100283.

- geotechnical engineering, 2005, 27(8):897-902.
- [9] 朱伟, 钟小春, 加瑞. 盾构隧道垂直土压力松动效应的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5):750-754.
ZHU W, ZHONG X C, JIA R. Simulation on relaxation effect of vertical earth pressure for shield tunnels by particle flow code [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2008, 30(5):750-754.
- [10] 黄正荣, 朱伟, 梁精华, 等. 盾构法隧道开挖面极限支护压力研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10):112-116.
HUANG Z R, ZHU W, LIANG J H, et al. A study on the limit support pressure at excavation face of shield tunneling[J]. China civil engineering journal, 2006, 39(10):112-116.
- [11] 秦建设. 盾构施工开挖面变形与破坏机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
QIN J S. Study on face deformation and collapse of earth pressure shield tunnel[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [12] 张孟喜, 张梓升, 王维, 等. 正交下穿盾构开挖面失稳的离散元分析[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(12):1594-1602.
ZHANG M X, ZHANG Z S, WANG W, et al. Discrete element analysis for instability of undercrossing shield tunnel face[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(12):1594-1602.
- [13] 何祥凡. 盾构隧道穿越上软下硬地层扰动机理及应对措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
HE X F. Research on the disturbance mechanism and counter measures of shield tunnel crossing upper-soft lower-hard stratum [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [14] 王秋实, 丁文其, 乔亚飞, 等. 复合地层盾构穿越构筑物群扰动规律及桩基隔断效应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(8):1240-1250.
WANG Q S, DING W Q, QIAO Y F, et al. Analysis on disturbance law and pile barrier effect of shield crossing underground structures in composite strata[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2023, 51(8):1240-1250.
- [15] 连昌伟, 王兆远, 杜传军, 等. ABAQUS 后处理二次开发在塑性成形模拟中的应用[J]. 锻压技术, 2006, 31(4):111-114.
LIAN C W, WANG Z Y, DU C J, et al. Application of second-developed ABAQUS post-process on numerical simulation of plastic forming [J]. Forging & stamping technology, 2006, 31(4):111-114.
- [16] 常康康, 周储伟, 杨宇, 等. 基于 ABAQUS 的金属结构损伤导波监测参数化建模的二次开发[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(5):163-166.
CHANG K K, ZHOU C W, YANG Y, et al. Secondary development of parametric modeling for metal structure damage guided wave monitoring based on ABAQUS[J]. Machine building & automation, 2024, 53(5):163-166.
- [17] 王永岩, 侯顺正. 基于 ABAQUS 的白砂岩损伤的本构模型的二次开发[J]. 计算机与数字工程, 2024, 52(9):2837-2841.
WANG Y Y, HOU S Z. Secondary development of a constitutive model of white sandstone damage based on ABAQUS [J]. Computer & digital engineering, 2024, 52(9):2837-2841.
- [18] 钟同圣, 卫丰, 王鸞, 等. Python 语言和 ABAQUS 前处理二次开发[J]. 郑州大学学报(理学版), 2006, 38(1):60-64.
ZHONG T S, WEI F, WANG Z, et al. Second development for fore treatment of ABAQUS using Python language [J]. Journal of Zhengzhou University (natural science edition), 2006, 38(1):60-64.
- [19] 苏景鹤, 江丙云. ABAQUS Python 二次开发攻略[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
SU J H, JIANG B Y. ABAQUS Python secondary development strategy[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016.
- [20] 朱星宇. 单洞四车道隧道施工变形特性及预警标准探讨[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
ZHU X Y. Discussion on deformation characteristics and early ategy [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [21] MURAYAMA S, ENDO M, HASHIBA T, et al. Geotechnical aspects for the excavating performance of the shield machines [C]//The 21st Annual Lecture in Meeting of Japan Society of Civil Engineers, 1966.
- [22] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6):1081-1106.
SUN J. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2007, 26(6):1081-1106.

(上接第12页)

- [58] SONG K, POLLALIS S N, PENA-MORA F. Project dashboard: concurrent visual representation method of project metrics on 3D building models[C]//Computing in Civil Engineering, 2005.
- [59] ERGEN E, AKINCI B, EAST B, et al. Tracking components and maintenance history within a facility utilizing radio frequency identification technology [J]. Journal of computing in civil engineering, 2007, 21(1):11-20.
- [60] KIM C, KIM H, RYU J, et al. Ubiquitous sensor network for construction material monitoring [J]. Journal of construction engineering and management, 2011, 137(2):158-165.
- [61] KAVALIAUSKAS P, FERNANDEZ J B, MCGUINNESS K, et al. Automation of construction progress monitoring by integrating 3D point cloud data with an IFC-based BIM model[J]. Buildings, 2022, 12(10):1754.
- [62] OMAR H, MAHDJOUBI L, KHEDER G. Towards an automated photogrammetry-based approach for monitoring and controlling construction site activities[J]. Computers in industry, 2018, 98:172-182.
- [63] SON H, KIM C, KWON CHO Y. Automated schedule updates using As-built data and a 4D building information model[J]. Journal of management in engineering, 2017, 33(4):04017012.
- [64] BRAUN A, TUTTAS S, BORRMANN A, et al. Improving progress monitoring by fusing point clouds, semantic data and computer vision[J]. Automation in construction, 2020, 116:103210.