

数字化技术在建筑工程施工中的应用与前瞻

王璞瑾, 肖建庄, 肖绪文, 朱合华

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 近年来快速发展的数字化感知、分析与决策服务技术, 可使建筑施工行业向技术密集型产业转型升级, 为建筑工程施工的发展带来新的机遇。以搭载最新数字化技术的软硬件载体应用为主线, 从施工信息的数字流视角, 按照数字信息采集与处理-施工组织数字化重建与推演-工程要素管控与执行的流程, 介绍了建筑工程施工中最新的数字化技术, 涵盖了施工中人员、设备、物料与工程进度相关的信息采集、处理、分析与决策服务的主要方面。指出了随着工程进度变换的建筑时空信息数字模型是施工的数字基础设施, 未来的数字化建筑工程施工也将具备智能化、平台化、产业化的基本特征。

关键词: 建筑工程施工; 数字化; 人工智能; 应用

中图分类号: TU17 ; TU765

文献标志码: A

Application and Prospect of Digital Technology in Building Construction

WANG Pujin, XIAO Jianzhuang, XIAO Xuwen, ZHU Hehua

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The rapid development of digital perception, analysis, and decision service technologies in recent years can transform the building construction into a technology-intensive industry and bring new development opportunities. In this paper, the latest digital construction technologies are introduced from the information flow perspective, which covers the main aspects of the digital information perception and processing, the reconstruction and deduction of digitalized construction organization, and the engineering factor management related to personnel, equipment, materials and progress in construction. The digital model of building spatiotemporal information, which changes with the

progress of the project, is the digital infrastructure for construction. The future digital building construction will have the characteristics of intelligence, platformization and industrialization.

Keywords: building construction; digitization; artificial intelligence; application

近十数年来, 随着计算机算力的增长、算法的发展和数据的增加, 以大数据、云计算、人工智能、物联网等为代表的数字技术得到快速发展, 迅速扩展到第一、第二和第三产业, 开启了新一轮的技术变革^[1-2]。建筑业作为我国支柱产业之一, 长久以来面临生产方式落后、生产效率低和环境不友好等难题。自 2012 年以来, 尽管我国建筑业增加值占国内生产总值的比例始终保持在 6.85% 以上, 但建筑从业人数近三年连续下降, 行业产值利润率近五年连续下降^[3]。2022 年 1 月, 由住房和城乡建设部发布的《“十四五”建筑业发展规划》阐明了“十四五”时期建筑业发展的战略方向, 明确了加快智能建造与新型建筑工业化协同发展的主要任务, 提出了建筑工业化、数字化、智能化水平大幅提升的发展目标。我国正在推动建筑行业的数字化转型升级, 是智慧城市、新型城镇化建设任务的重要保障, 是建筑产业绿色发展的必然趋势^[4]。

尽管对于建筑业数字化的含义目前尚未形成统一的表述, 但自从 20 世纪 80 年代计算机辅助设计 (CAD) 在建筑行业中应用以来, 以数字化建筑模型为主线的建筑行业数字化的产业更新一直稳步前进, 数十年中各国政府行政部门、行业从业者和学者从不同角度开展了大量有益探索与实践, 包括策划、设计、技术、管理、产品与服务等, 形成了包含多个维

收稿日期: 2022-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(52078358), 中国工程院战略研究与咨询项目(2022-XY-80, 2022-XZ-21)

第一作者: 王璞瑾, 工学博士, 博士后, 主要研究方向为智能建造。E-mail: wangpujin@tongji.edu.cn

通信作者: 肖建庄, 教授, 工学博士, 主要研究方向为再生混凝土结构与绿色建造。E-mail: jzx@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

度、覆盖建筑生命周期的建筑数字化产品开发体系^[5]。在这些建筑数字化探索中,逐渐形成了一条以建筑信息模型(building information model, BIM)应用为主线,包含设计、施工、运维和拆除/循环利用的建筑生命周期主要节点的数字孪生模型的应用技术路线^[6]。在此基础上,将建筑在设计、构件制造、施工、运维、再生等过程中所产生的协同、监控、成本和管理等次生数据与其所对应的建筑信息模型进行搭接,形成包含时空信息的全周期、全条线的整体建筑数字化模型^[7]。

建筑工程施工是人类所能够从事的最复杂的生产活动之一,施工现场环境纷繁复杂,突发状况频发;而工期、质量、成本、安全等多目标的要求也极易顾此失彼。长久以来,具有丰富的经验一直是成为施工现场中高级管理人员的必备条件。我国建筑行业长久以来因其劳动密集型产业导致的高能耗、低产出而饱受诟病,其问题也在施工过程中凸显。近年来在施工中快速发展和应用数字化技术,包括新兴的数字化感知、分析与决策服务技术,其所具有的数字化、模块化、标准化、智能化等特点提供了建筑行业向技术密集型产业转型升级的可能^[8]。这些数字化技术的推广能够对现有施工现场的各生产要素的管理模式进行革新,摒弃施工现场严重依赖经验的传统工作方式,大大提升工程建造的整体管理能力^[9]。而由于以智能软硬件为代表的数字化技术本身更迭速度极快,且建筑工程施工的设备、工法与产品研发与应用周期普遍长于数字化技术本身,故而数字化施工的内涵在学界与工业界尚无统一标准^[10]。

为筛选出更加灵活应用并可适应建筑工程施工的数字化技术,本文将最新数字化技术在建筑工程施工中的应用为主线,通过阐述并介绍近年来国内外建筑业对数字化技术应用的最新进展,对其未来发展趋势进行探讨与展望。

1 数字化技术在建筑工程施工中的应用的发展脉络与现状

国外对于数字化技术在施工中的应用研究较早,在2000年以前已经在数字化设计与虚拟现实(virtual reality, VR)^[11]、施工组织数字化管理^[12]中有所研究与应用,而我国的相关研究在2006年以后开始逐渐增多。2010年来,我国对于数字化技术在施工中应用的研究呈现井喷式增长,图1为通过知网

中以“数字化”、“施工”、“虚拟施工”、“计算机模拟”、“人工智能”、“计算机视觉”等为主题词搜索到的从2010年至今的4919条文献,对其进行关键词相关性网络分析所得到的结果,其关键词的位置和大小代表了其重要性。由图1可知:以数字化为核心,围绕着信息化、工程测量、物联网、智慧工地、施工管理等次级关键词;其外围的关键词包括施工中的各流程与技术,如测量、施工质量、施工安全等;更次一级的是各项具体数字化技术与应用服务场景,如数字建造、施工模拟、参数化、数值模拟等。图2为对以上文献通过关键词聚类分析并按重要程度排序所得结果,可以看出其中应用、虚拟施工、人工智能和虚拟仿真等类别在聚类分析中排名靠前,得到了重点关注。由图1、图2可以得知,现阶段数字化技术的实际应用已经得到了学界和业界的广泛关注,也反映了现阶段我国乃至世界范围内,建筑业数字化转型研究聚焦于如何将纷繁复杂的数字化技术应用于建筑生产活动中并创造价值^[13]。



图1 关键词相关性网络

Fig. 1 Keyword relevance network

基于国内外几十年来的积累与实践,且因数字化技术本身的算法与软硬件技术更新迭代速度极快,尤其是在近年来人工智能的快速发展背景下,原本难以纳入数字化体系的建筑施工生产活动,如施工现场三维快速重建^[14]、设备状态监控与预测^[15]等已得到数字化实现。同时,在相对独立的设计、施

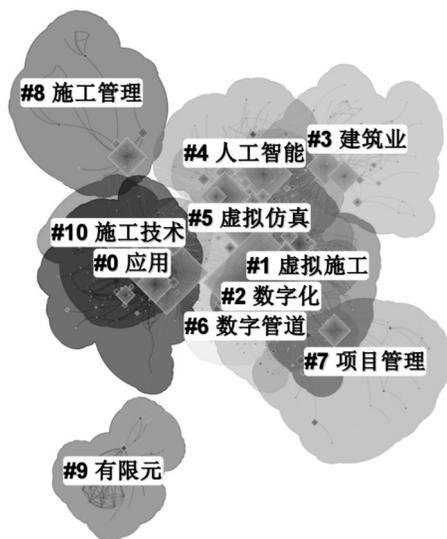


图 2 关键词聚类分析

Fig. 2 Key word clusters

工、运营与维护阶段的建筑数字化,国内外已经积累了大量的研究和应用实例^[9, 13]。近年来,中建集团推行的智慧工地技术系统,在新建项目中得到大量应用并取得了较好效果,为数字化技术应用于施工提

供了数据积累和技术支持。智慧工地系统通过可进行信息采集的终端层、可协调资源分配的应用层和可汇总和分析数据的平台层的协同工作,对施工现场的人员、机械设备、材料、工艺和工程进行综合管理,打造了控制-管理-运维的一体化平台。在基础设施数字化、建养一体化等研究基础上,可进行生命周期的数据采集、处理、表达、分析和服务的智慧服务系统(infrastructure smart service system, iS3)已成功应用于交通、市政、人防、能源等领域,为川藏铁路隧道等的智能建造、城市智慧地下基础设施提供核心技术^[16]。目前应用于工程施工的数字化技术手段与种类较多,尤其是近年来新技术的集成、杂交,已经难以单独具体归类为某一种技术,如可以自行规划工程巡视路线的无人机平台,就是集成了人工智能算法、机器视觉、空间感知和建筑机器人的融合技术。本文依据目前主要的数字化手段与技术

表 1 数字化信息在建筑工程施工中的流转与应用

Tab. 1 Circulation and application of digital information in construction

数据流转阶段	技术与方法	原理与适用范围	在建筑工程施工中的应用
数字信息采集与处理	数字视觉信息	通过高清相机或红外热成像设备,快速识别静态和动态目标,如材料损伤、人员与设备的工作状态、起火点、渗水等	工程质量、人员、设备管理与安全监测
	数字三维信息	通过激光扫描仪或高清相机,依据三维点云数据或图像,建立三维模型	土方测量、变形监测、进度监测、工程拼装
	数字传感器信息	依据工程特点与需求,建立位移、倾斜、应力、渗水、有毒有害气体等多维度传感器网络	施工过程与安全监测
施工组织数字化重建与推演	优化算法	对工序、工期和成本,进行工期、组织、调度优化	施工组织设计
	模拟算法	对重大、复杂的工程关键技术点,进行施工工况模拟等计算	施工工艺优化
工程要素管控与执行	生产与建造机器人	预制构件厂的模具设置与钢筋绑扎机器人,建筑施工现场的安装、运输、增材制造机器人	材料、构件生产与现场施工
	巡检与数据采集机器人	可自动规划路径和自适应巡航的地面或空中巡检、清理机器人	施工现场的安全巡检、代替人工完成部分危险作业
	无人驾驶智能施工设备	具备工作姿态感知与调整、最优工作路径规划、多智能体设备协同等功能的智能施工设备	土方工程、浇筑工程、施工组织

2 数字信息采集与处理

在建筑工程施工中,对施工现场各要素的工作状态信息进行低成本、高频次的获取对于施工管理具有重要作用,通过感知当前工作进度与状态,发现不足与危险,对指导后续工艺具有重要意义。施工现场数字信息的采集与处理主要包括视觉信息、三

维信息和数字传感器获得的信息。施工现场各要素的状态最直接的感知技术为视觉感知,其数据获取成本低,信息价值高,可通过后续的计算机视觉技术进行大批量快速处理;对于从激光扫描、图像和视频

工中得到了大量应用。

2.1 可见光视觉感知技术

人类日常感知且处理的信息80%以上是通过视觉获取的^[17],将此过程通过计算机硬件和软件来实现,即计算机视觉技术,一直以来是重要的研究方向。近年来以深度学习为代表的人工智能技术的兴起,使得计算机视觉在分类、目标检测、语义分割中取得了前所未有的发展^[18]。在建筑工程施工领域,计算机视觉技术具备极其广阔的应用前景,已在混凝土裂缝识别、位移测量、施工人员和设备与场地管理等场景中应用^[19]。目前的热点研究为获取性强的可见光视觉感知,而能够反映物体表面温度差的红外热成像图感知技术,近年来在建筑工程施工中也逐渐获得重视,可应用于工程质量和安全管控。

可见光数据信息来源广泛,获取成本低廉,且由于其直观便捷,容易判断数据质量。在损伤检测中,Ni等^[20]提出了一种基于深度学习和泽尔尼克动量算子的方法,对裂缝宽度进行定量估计。在施工人员管理上,Chu等^[21]提出了一种基于单目视觉的框架,用于对施工场地工人的人体三维模型重建,并进行生物力学分析和人体工程学姿势评估,以识别工人的不安全姿势和动作。在施工场地异常检测中,Lin等^[22]通过对连续图像序列的分析,自动识别不规范操作并将其可视化,可用于检测工地上的工人和建筑设备,并使用SORT方法进行实时对象跟踪,可使现场管理人员有效地识别潜在的异常活动。Wei等^[23]开发了一种利用图像分割自动评估整个楼层的墙体施工进度深度学习的方法,并将其进度结合生成BIM模型,为无人监督进度跟踪和智能进度管理提供了参考。在工程材料损伤研究中,Xiao^[24]利用数字图像相关法观测模型再生骨料混凝土(MARC)在荷载下应力应变的发展形式,为材料损伤原位检测提供了可能性。可见光视觉感知技术具有门槛低、应用广的特点,任何可由人眼识别和处理的静态、动态信息,均可通过后续计算机视觉算法的开发进行自动化处理;同时高精度摄像机也可搭载在无人机飞行平台、机器人或机器狗平台,为后续计算机视觉技术与机器人技术的结合提供可能,进一步促进施工现场数据感知的数字化和自动化。

2.2 红外热成像仪视觉感知

由于红外热成像图的特殊性,在过去较长一段时间内被限制在依据专家经验判断的范围内,较少采用数字化手段进行分类与判断。近年来,学者们对红外热成像法在建筑工程施工中的应用进行了数

字化尝试。在建筑材料含水检测中,Garrido等^[25]提出了一种自动检测建筑材料表面的水分区域的方法,该方法通过将可见光图像处理技术应用于热成像图中,可协助进行进厂材料检验与施工验收。在地下管道渗水检测中,Sham等^[26]通过定制的管内红外热成像图检测系统(IPITS),对地下污水管道状损伤进行成像和诊断。红外热成像仪视觉感知的方法尽管对于工作时的环境状态具有特殊要求,但它与可见光图像具有很强的互补性,渗水、空鼓等破坏更易从红外热成像图中识别。借助计算机视觉技术,可将红外热成像图和可见光图像融合,识别目标表面和内部一定深度的损伤和破坏,具有良好应用前景。

2.3 三维数字信息感知技术

三维数字信息感知技术是指对现实中存在的三维物体,通过主动或被动的方法,建立其数字化模型以使其可在计算机环境下处理、操作和分析,此方法是在计算机中建立表达客观世界的虚拟现实的关键技术^[27]。三维数字信息感知方法主要分为主动视觉法和被动视觉法,主动视觉法包括结构光法和激光扫描法,被动视觉法根据目标物体的二维投影图像所蕴含的信息进行三维模型的生成。近年来随着深度学习理论与应用的发展,使用二维图像进行三维数字信息感知的成本低、效率高,可将此技术应用在工程测量、施工质量检查和施工进度跟踪中^[28]。

在工地场景三维信息采集上,Xu等^[29]通过点云数据,检测了工地现场的手脚手架体系,通过脚手架状态和布置估计工程进度和状态。在装配式结构的混凝土预制构件生产中,Xu等^[30]采用激光扫描进行预制构件三维数据采集,设计了一个更高效、更准确的质量评价流程,包括数据采集、数据处理、指标计算和质量评价。相比较于动辄几十万元一台的三维扫描仪,近年来开始利用无人机搭载的视觉摄像头进行三维数据采集,具有效率高、成本低、效果好的特点。在工地高程三维数据采集中,Jiang等^[31]提出了一种用于建筑工地快速高程确定的方法,该方法使用基于无人机的低-高正射影像自动准确的确定施工现场高程,只需要较少的图像即可覆盖建筑工地主要目标区域。在施工进度管理中,Xue等^[32]采用了一种不生成点云的方法来获取施工进度,该方法通过将目标检测结果同其所对应的建筑信息模型元素在同方向上投影进行配准的方法确定施工进度,实验结果表明其配准准确率达到95.13%。在施工关键构件安全监测中,Tang等^[33]提出了一种四目视

觉系统,用于在复杂测试条件下对大型钢管混凝土进行三维信息采集,该方法适用于以动态运动、机械振动和不断变化的外界环境为特征的复杂环境,可在施工过程中对关键构件进行监测。由以上介绍可知,施工现场的三维数据采集技术正在从以生成高精度但难以动态分析的三维点云数据为主的“三维数据测量”方式,向可灵活布置且可用于进度管理、安全评价、场地动态分析等多用途方向转变。

2.4 数字传感器与智能监测在建筑工程施工中的应用

面向特定监测目的的数字传感器系统,在施工中的位移与应力、水位与周边环境等监测中得到了大量应用并取得了良好效果^[34-36]。这些方法立足于工程自身特点和监测需求,通过设计与开发传感器布置点位、数字信息返回频率与信息处理系统,随着工程施工的推进,逐步扩充监测范围与监测内容,在建筑工程施工监测中具有不可替代的价值。在近年来的建筑工程施工中,Chen等^[37]利用移动无线网络和北斗定位系统,开发了碎石桩施工质量监测系统,实现了对碎石桩施工质量的综合过程控制,为施工提供了一种新的有效的过程控制方法。在施工现场监测中,Akbal等^[38]开发了一种利用声音的自动化活动识别和施工车辆分类模型,可通过对采集到的声音进行分类,获得了99.45%和99.17%的准确率,结果表明本方法在基于声音的自动化施工现场监测中是可行的。建筑工程施工数字传感器系统在当下机器学习应用场景下具有更加广阔的前景,原本需要耗费大量人力以进行的损伤监测、突发事件预警、工程进度和质量监控,均可以通过机器学习算法逐步实现自动化。

3 施工组织数字化重建与推演

在获得了数字化信息后,需对其进行即时处理与推演才能够发挥数据的真正价值。在对数字化信息的处理中,对施工现场进行施工组织数字化重建与推演极有价值。施工组织数字化重建与推演并不限于三维场景,更包括对施工组织管理中的人、机、料、法、环所产生的数据进行抽象整合与优化。数据、算法、应用共同构成了建筑工程施工数字化的核心部分,其中尤其以算法的更新迭代最为迅速,各种算法自身及其融合后的算法正在为建筑工程施工提供源源不断的施工组织数字化重建与智能推演计算支持。

3.1 优化算法

优化算法一般指在给定的条件与目标下寻找最优解的方法,对抽象出来的环境、工期、造价等结构化数据进行内部关联逻辑构建与推演,即通过算法所构建的施工组织数字化与信息流动逻辑,模拟实际生产过程并寻找可优化节点。为了将管理者和一线从业人员从复杂的事项和冗余的重复劳动中解放出来,学者和从业者进行了大量的面向建筑工程施工的优化算法开发与应用。

在施工方案优化中,Luong等^[39]提出了一种基于对立的多目标差分进化法来解决时间-成本-质量权衡(TCQT)问题,可帮助项目经理规划具有最佳时间-成本-质量权衡的施工方法。He等^[40]提出了一个考虑建筑能耗优化问题的高层建筑多目标优化模型,可以考虑项目经理在不同决策偏好下的时间-成本-能源消耗的最优解,帮助项目经理在实际工程管理中创建项目建设活动的最佳组合。在施工活动优化中,Moon等^[41]通过基于BIM的计算机系统,实现了一种可用于模拟施工进度并最大限度减少重叠工程的方法并将其可视化。在重型设备姿态识别与优化中,Slaton等^[42]提出了一种使用深度学习方法来预测重型建筑设备的活动框架,可以利用该研究成果开发可靠的自动化活动识别系统,以跟踪和监控设备性能,并测量所执行工作的生产力和效率。优化算法对于施工组织数字化的重建与推演具有灵活可控、计算资源消耗小的特点,可依据工程需求进行定制,同前文的数字传感器进行深度融合以解决如工期、造价、碳排放均衡的问题。

3.2 模拟算法

模拟算法是指将目标物体,如施工现场的构筑物、材料、人员与设备等实体要素通过合理的抽象与简化,使其对建筑工程的组织与特性映射在模拟算法所定义的数字空间中,能够对其进行观测、分析与预测。有限单元法即是经典的模拟算法之一,可以精确计算结构物在内外作用下的反应。对于采用三维重建技术所获得的场地信息,可利用模拟算法对其要素进行时空分析与预测,对于现场管理具有重要参考价值。

Xie等^[43]提出了一种基于随机场理论(RF)和BIM的地铁站开挖概率分析的BIM-RF集成技术,可以在基于BIM的地铁站开挖分析中实现综合工程计算,提高BIM技术的可扩展性。刘占省等^[44]提出了一种综合了物联网、BIM和有限元模型(包含了智能决策平台)、基于数字孪生的智能建造方法框架,

可使用实时监测数据与理论模型进行对比,并对实际发生的施工过程进行调整与修正。模拟算法对于由大量动态实体构成的施工现场具有重大使用价值,可通过高精度建模实现施工组织数字化数字孪生并进行动态推演,以所见即所得的方式进行施工项目管控。但目前其缺点在于建模严重依赖专家,其精度与实际需求的匹配难以把握,过高精度会提升建模和计算成本,过低精度则难以发掘价值节点,故其发展趋势在于通过三维计算机视觉和自主学习算法,进行高精度自动化建模。

4 工程要素管控与执行

随着劳动力短缺的问题凸显,建筑机器人可以在一线建筑生产活动中代替建筑工人,将人从危险、沉重、单调重复的建筑作业中解脱出来,只需少数管理人员监督即可。同时,建筑机器人所具有的可定制、可量化的工作方式,显著提高建筑生产效率,并实现人工无法实现的工艺目标^[45]。在建筑工程施工领域,建筑机器人分为:用于建筑数字工厂的预制生产的机器人和用于现场施工建造的机器人^[46],及场地监控与安全检查的场地巡检与数据采集机器人^[47],前者是建筑机器人研究的主体内容。

4.1 生产与建造机器人

在预制构件生产中,Chen等^[48]提出了一种基于自动引导车(AGV)的模块化预制制造系统的设施布局,用以使生产时间和工作站利用率达到最优,并通过一种启发式方法来指导储存区域中模块化预制产品的放置、重新排序和获取,实验测试显示了所提出的规划方法指导实践的潜力。在建筑3D打印中,Kontovourkis等^[49]使用集成了参数化算法进行工具端路径规划的3D打印工业机器人,能够使用小、中、大三种直径喷嘴进行工作,使其打印出非常规几何结构并且最大程度的减少打印时间。Xiao等^[50]同时进行了打印系统、工艺设计和打印材料及其相互协调方面的研究,开发了包括支撑子系统、控制子系统、进料子系统和挤压子系统在内的打印系统,对比研究了添加/不添加再生砂的打印砂浆的性能,并采用 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的3D混凝土打印机进行了现场打印(图3)。在施工现场,建筑机器人也应用在了如玻璃安装^[51]、钢筋绑扎^[52]等现场施工中。生产与建造机器人面向建筑工程施工的各种应用场景,具有广泛的开发与应用价值,目前其优点与缺点均在于机器人的深度定制,其研发与维护成本难以

平衡收益,故未来可通过开发多用途的轻量级机器人,面向多场景应用。

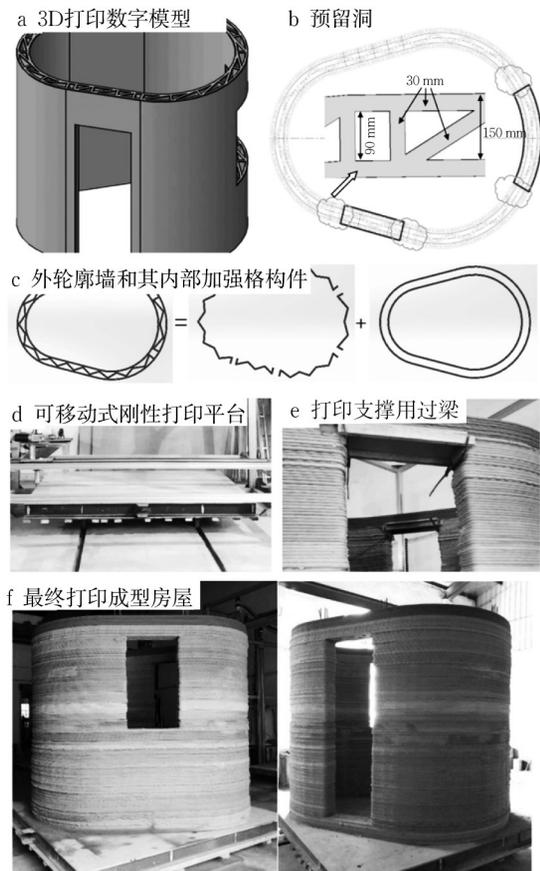


图3 数字模型与再生砂浆房间3D打印^[50]

Fig. 3 Digital model and 3D printing of recycled mortar room^[50]

4.2 巡检与数据采集机器人

巡检与数据采集机器人可替代人工,对场地、设备进行检查和维护,分为巡检无人机、室外巡检机器人和室内巡检机器人。建筑施工场地复杂,存在大量安全隐患和危险,利用巡检与数据采集机器人可以使场地更加规范安全。Wang等^[53]在建筑和拆除垃圾(CDW)回收中,采用即时定位与地图构建(SLAM)方法,开发了一个通过计算机视觉模型识别残余管道和电缆的CDW回收机器人,并使其能够应对复杂的现场情况。在建筑工地地面巡检中,Jeong等^[54]研发了一种用于稳定姿态(OOPS)的最优避障路径规划机器人,以有效地应用于不平坦、高坡度和非结构化户外环境中的应用。在利用无人机进行建筑工地巡检中,Tan等^[55]提出了一种语义辅助变化检测方法,使用基于无人机的摄影测量点云监测施工进度。巡检与数据采集机器人目前尚处于开发初期,由于施工现场条件复杂,需将空中巡检与

地面巡检协同联动,覆盖更广探测面积和更深探测深度。

4.3 无人驾驶智能施工设备

随着近年来无人驾驶和辅助驾驶技术的发展,其数据采集与算法也逐步渗透至建筑施工设备领域。无人驾驶智能施工设备指将生产与建造机器人、无人驾驶车辆的传感器、控制算法等技术安装应用于传统施工设备,如挖掘机、推土机、塔吊等所形成的新型智能装备,具有硬件成本低、管控价值高的特点,已得到广泛的关注。You等^[56]开发了一种可与各类无人土方机械(包括推土机、平地机、压路机)兼容的智能终端箱(T-box),可以实现高精度的轨迹控制和无人土方机械的自主控制。Tang等^[57]利用惯性测量单元(IMU)以监控建筑机械的不安全操作并进行姿态估计,开发了一种基于运动学的生成机器轨迹的有效方法,可以在施工现场不受环境限制地提供机器的全身姿态,并为可靠的运动相关分析提供最佳IMU安装策略的理论基础。目前受传感器和算法限制,无人驾驶智能施工设备尚处于探索阶段,在可预见的未来其发展趋势为专家遥控和部分功能自动化。

5 建筑施工数字化发展前瞻

通过数字信息采集与处理、施工组织数字化重建与推演、工程要素管控与执行,以视觉感知、三维重建、智能算法和建筑机器人的控制与应用技术为代表的数字化技术,已渗透至传统的建筑工程施工行业,正在对现有施工现场的人、机、料、法、环、测六大生产要素的管理模式进行革新(图4)。在建筑项目数字化程度的评价中,Sezer等^[58]通过对113个建筑施工项目的现场,从可视化图纸和三维模型、图纸模型和文档的更新频率、工作分配计划的创建和更新与时间资源的更新计划等4个主要方面对建筑施工数字化程度进行评价。通过此种工具的纵向评估,可以报告建筑行业的数字化趋势。而由于工地现场参与者对数字化的认知不同、建设项目生命周期不同阶段的数字化应用水平不同、施工参与公司之间的数字化水平不同等因素,建筑施工数字化总体的发展首先需要解决由这些差异所带来的信息流通不畅的问题。

同时,建筑施工数字化可以对传统的建造模式进行升级,实现由劳动密集产业向科技密集产业的转型升级,也是本行业对当今的能源、资源和环境所

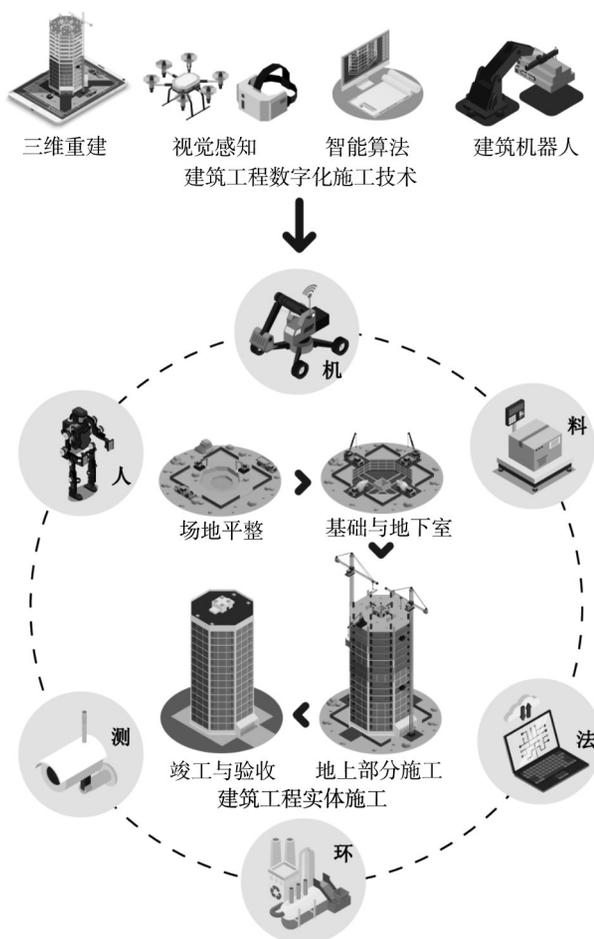


图4 数字化技术在建筑工程施工中的渗透

Fig. 4 Infiltration of digital technology in building construction engineering

面临的严峻挑战所做出的创新回应。Guo等^[59]基于协同理论,提取了利益相关者协同、产业协同、结构协同、施工技术升级、要素禀赋升级、创新服务升级、施工流程升级的内容。并通过双向驱动、资源供给、协同运营、信任保障4个维度,指出了建筑行业施工的数字化发展方向,促进建筑业的可持续发展。建立以建筑时空信息数字模型为基础,以建筑工程施工要素为子系统并集综合管理于一体的施工数字化平台,可以使建筑工程施工中的各环节可追溯、可预测,大幅提高劳动生产率和资源利用率,并最大程度减小对环境的不利影响。通过表2对建筑工程施工中的数字化技术的现状及其发展趋势进行总结可知,其未来的主要发展趋势有二,一是自身所使用技术进一步的智能化与自动化,如数字信息的更高精度采集与更高效分析处理;二是多种技术的更深层次的交叉融合,如数字视觉信息技术与建筑机器人、无人驾驶智能设备等的高度融合等。

表2 建筑工程施工数字化信息技术的发展现状与趋势
Tab 2 Current development status and trend of digital technology in building construction

数据流转阶段	技术与方法	现状与发展趋势
数字信息采集与处理	数字视觉信息	①目前在静态监控、无人机平台监控中应用较多,部分工程已采用人工智能算法进行安全帽、起火点检测; ②未来其监控范围、内容和精度可进一步提高,同时与巡检机器人相结合。
	数字三维信息	①目前以生成静态的三维点云数据并进行对比分析为主,侧重于工程测量; ②未来会向可灵活布置且可用于进度管理、安全评价、场地动态分析等多用途方向转变。
	数字传感器信息	①目前已在重要、复杂的工程场景中得到大量应用; ②其智能化和自动化程度可在机器学习算法的协助下进一步提高,协助进行损伤监测和突发事件预警。
施工组织数字化重建与推演	优化算法	①目前更多应用于预制构件场等便于进行数据结构化的场景; ②未来可依据工程需求进行定制,同数字传感器进行深度融合以解决如工期、造价、碳排放均衡的问题。
	模拟算法	①目前以BIM、有限元分析为主要应用,但建模精度难以把握; ②其发展趋势在于通过三维计算机视觉和自主学习算法,进行高精度自动化建模。
工程要素管控与执行	生产与建造机器人	①目前其优点与缺点均在于机器人的深度定制,其研发与维护成本难以平衡收益; ②未来可通过开发多用途的轻量级机器人,面向多场景应用。
	巡检与数据采集机器人	①目前主要应用尚处于无人机遥控巡视阶段; ②智能化、自动化和空地结合是其发展趋势。
	无人驾驶智能施工设备	①目前尚处于初期探索阶段; ②未来可通过多源传感器和遥控装置,实现专家遥控和部分功能自动化,满足工程质量和进度需求。

数字化单体技术的发展与数字化整体平台的发展密不可分。在数字化技术与产品在实际建筑施工应用中,尚存在以下问题:①数据格式与接口标准尚未统一,由不同主体所开发的新的数字化技术难以以模块化方式纳入已有系统;②数字化子系统过多,难以形成可共享的信息流,冗余重复工作多;③数字

化软硬件技术与设备成本高昂,其经济效益难以评价。为了充分释放数字化技术在建筑施工行业的潜能,建筑施工数字化未来的发展方向将通过借鉴工业智能制造,打造适合建筑行业的通用数字化软硬件并拓宽深化使用场景,其趋势是基于数字化的智能化、平台化和产业化(图5)。

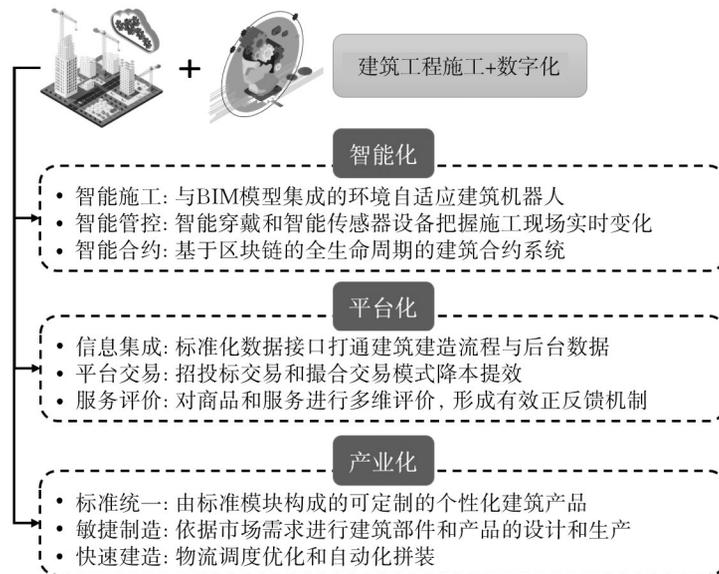


图5 数字化建筑工程施工趋势

Fig. 5 Tendencies in digital construction

数字化技术在施工中应用的趋势首先是更深层次的智能化。通过积累的大量数据,智能建造技术可以学习人类专家的建造方式,并通过基于自身如

强化学习算法进行环境-代理的多次学习迭代,代替部分或全部建造过程中所需要的人类脑力劳动。智能化技术可赋予工程实体信息处理与决策服务功

能,在收到即时信息后立即做出准确响应。

平台化是建筑工程施工数字化技术发展的主要趋势。建筑施工过程涉及到物料生产与运输、各工种协调与工序安排、质检与验收、文件签批与归档等基本建造流程,也是结构、建筑、环境、设备等建筑相关专业高频交叉的过程,同时也是业主、施工、设计、监理、供应商等不同单位协同工作的过程。建筑工程施工平台能够汇聚工程建造相关资源与服务,运行实时动态数据并进行监控和预测,将这些建造、交叉与协同过程通过统一平台进行管理,从根本上实现建筑工程施工数字化技术的可持续发展。

产业化是建筑工程施工数字化技术的下一个发展趋势。建筑工程施工数字化产业需要有数字化产业链的支撑,包括上游的材料与部品的数据库、设计、工艺和制造流程,中下游的工厂流水线化部件制造、现场拼装与检测等。充分发挥基于数字化的建筑施工产业链的资源整合和协同优势。同时,数字施工产业化发展也需要政府和行政部门发挥的组织和引导,制定相关政策法规,完善配套机制建设,推动智能建造与建筑工业化协同发展,使建筑业从建筑材料与部品的生产与研制、设计、施工与管理的模式产生数字化变革,实现我国建筑业的科技密集型转型发展。

本文结合国内外数字化技术在施工中的应用的现状与趋势研究,尝试对数字化施工内涵进行如下阐述:数字化施工是利用数字化技术提高建造效率的新型工程建造体系,通过对施工生产要素的数字化升级并对其功能履行的量化与预测,构建包含表达、分析、优化、管控的全过程施工数字化信息流,为面向工期、质量、成本、安全等多种目标的施工组织提供高效正确的指引。

6 结语

本文从数字流与数字化技术角度,介绍了现阶段应用于建筑工程施工的最新的数字化技术,涵盖了现有建筑施工中人员、设备、物料与工程整体的信息采集、处理、分析与决策服务的重点方面,并提出了未来的数字化建筑工程施工的发展趋势是具备智能化、平台化、产业化的特点,界定了数字化施工的内涵。主要结论与建议如下:

(1)目前建筑工程施工中,各主要数字化技术均需搭建对应的数字化模型,包括但不限于三维模型、环境模型和智能模型,以作为实际生产要素在虚拟空间的映射。

(2)依托目前最新智能算法技术和智能硬件技

术,数字化在施工场地要素、施工组织等部分点状或线状管理区间已经得到应用并取得了较好效果。

(3)建筑施工数字化未来的发展趋势是更深层次的智能化和无人化,协同施工相关要素的平台化和集成内外部资源的产业化。

(4)当今新一代的以数字化、智能化、平台化和产业化为特征的数字信息技术,正在为人类新一轮科技变革提供源源不断的动力,为人类从认知、感知、决策和实践等多个维度进行高效率、高精度与低成本的颠覆性改造。由新技术所催生出的新产业、新产品,将助力提升传统建筑产业并推动人类更快速发展,同时也为工程建造转型升级提供了新的发展方向和新机遇。能够将建筑工程施工重点生产要素串联并使其真正活跃在虚拟空间的建筑信息模型技术,是未来使建筑工程数字化施工能够更智能、更有效的解决方案之一。

作者贡献声明:

王璞瑾:论文撰写,调查与资料收集,图表可视化。

肖建庄:论文整体构思,研究方法,经费支持。

肖绪文:论文质量控制与修改,项目资助。

朱合华:论文质量控制与修改,项目资助。

参考文献:

- [1] 柳卸林,董彩婷,丁雪辰.数字创新时代:中国的机遇与挑战[J].科学与科学技术管理,2020,41(6):3.
LIU Xielin, DONG Caiting, DING Xuechen. Innovation in the digital world: The opportunities and challenges of China [J]. Science of Science and Management of S. & T., 2020, 41(6): 3.
- [2] BLOEM J, VAN D M, DUIVESTEN S, *et al.* The fourth industrial revolution: Things to tighten the link between IT and OT [M]. Groningen: Sogeti VINT, 2014.
- [3] 中国建筑业协会. 2021年建筑业发展统计分析[J]. 工程管理学报, 2022, 36(2): 1.
China Construction Industry Association. Statistics analysis of China's construction industry development in 2021 [J]. Journal of Engineering Management, 2022, 36(2): 1.
- [4] 丁烈云. 数字技术为工程建造转型升级提供新机遇[J]. 施工企业管理, 2022, (1): 82.
DING Lieyun. New transformation and upgrading opportunities for engineering construction by digital technology [J]. Construction Enterprise Management, 2022, (1): 82.
- [5] LIU Y, VAN NEDERVEEN S, HERTOOGH M. Understanding effects of BIM on collaborative design and construction: An empirical study in China [J]. International Journal of Project Management, 2017, 35(4): 686.
- [6] HOLLBERG A, GENOVA G, HABERT G. Evaluation of BIM-

- based LCA results for building design [J]. *Automation in Construction*, 2020, 109: 102972.
- [7] 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(5): 1.
BAO Yuequan, LI Hui. Artificial intelligence for civil engineering [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(5): 1.
- [8] 房震宸, 龚剑. 数字化施工到智能化施工的研究与探索[J]. *建筑施工*, 2021, 43(12): 2594.
FANG Tingchen, GONG Jian. Research and exploration from digital construction to intelligent construction [J]. *Building Construction*, 2021, 43(12): 2594.
- [9] 龚剑, 房震宸. 数字化施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
GONG Jian, FANG Tingchen. *Digitalized construction* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [10] ABIOYE S O, OYEDELE L O, AKANBI L, *et al.* Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44.
- [11] ARAI N, SAIKA K, OKABAYASHI T. Application of digital terrain model to road design [J]. *Journal of Civil Engineering Information Processing System*, 1998, 7153.
- [12] STUMPF A L, GANESHAN R, CHIN Sangyoon, *et al.* Object-oriented model for integrating construction product and process information [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1996, 10(3): 204.
- [13] 丁烈云. 数字建造导论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
DING Lieyun. *Digital construction introduction* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [14] JIANG W, ZHOU Y, DING L, *et al.* UAV-based 3D reconstruction for hoist site mapping and layout planning in petrochemical construction [J]. *Automation in Construction*, 2020, 113: 103137.
- [15] GUAN D, YANG N, LAI J, *et al.* Kinematic modeling and constraint analysis for robotic excavator operations in piling construction [J]. *Automation in Construction*, 2021, 126: 103666.
- [16] 朱合华, 李晓军, 林晓东. 基础设施智慧服务系统(iS3)及其应用[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(1): 1.
ZHU Hehua, LI Xiaojun, LIN Xiaodong. Infrastructure Smart Service System (iS3) and its application [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(1): 1.
- [17] DUDOVITZ R N, IZADPANAH N, CHUNG P J, *et al.* Parent, teacher, and student perspectives on how corrective lenses improve child wellbeing and school function [J]. *Maternal and Child Health Journal*, 2016, 20(5): 974.
- [18] ELSKEN T, METZEN J H, HUTTER F. Neural architecture search: A survey [J]. *The Journal of Machine Learning Research*, 2019, 20(1): 1997.
- [19] 房震宸, 左俊卿, 龚剑. 计算机视觉在建筑工程施工领域的研究与应用[J]. *建筑施工*, 2021, 43(11): 2376.
FANG Tingchen, ZUO Junqing, GONG Jian. Research and application of computer vision in building engineering construction field [J]. *Building Construction*, 2021, 43(11): 2376.
- [20] NI F T, ZHANG J, CHEN Z Q. Zernike-moment measurement of thin-crack width in images enabled by dual-scale deep learning [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2019, 34(5): 367.
- [21] CHU W J, HAN S, LUO X W, *et al.* Monocular vision-based framework for biomechanical analysis or ergonomic posture assessment in modular construction [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2020, 34(4): 04020018.
- [22] LIN Z H, CHEN A L Y, HSIEH S H. Temporal image analytics for abnormal construction activity identification [J]. *Automation in Construction*, 2021, 124: 103572.
- [23] 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.
- [24] XIAO J. *Recycled aggregate concrete structures* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2018.
- [25] GARRIDO I, LAGUELA S, SFARRA S, *et al.* Automatic detection of moistures in different construction materials from thermographic images [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 138(2): 1649.
- [26] SHAM J F C, LAI W W L, CHAN W, *et al.* Imaging and condition diagnosis of underground sewer liners via active and passive infrared thermography: A case study in Singapore [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019(84): 440.
- [27] 胡芳侨, 黄永, 李惠. 建筑三维重建方法综述[J]. *智能建筑与智慧城市*, 2020(5): 10.
HU Fangqiao, HUANG Yong, LI Hui. A review of 3D reconstruction methods applied in buildings [J]. *Intelligent Building & Smart City*, 2020(5): 10.
- [28] WANG Q, KIM M K. Applications of 3D point cloud data in the construction industry: A fifteen-year review from 2004 to 2018 [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019(39): 306.
- [29] XU Y, TUTTAS S, HOEGNER L, *et al.* Reconstruction of scaffolds from a photogrammetric point cloud of construction sites using a novel 3D local feature descriptor [J]. *Automation in Construction*, 2018(85): 76.
- [30] XU Z, KANG R, LU R D. 3D Reconstruction and measurement of surface defects in prefabricated elements using point clouds [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2020, 34(5): 04020033.
- [31] JIANG Y H, BAI Y. Low-High orthoimage pairs-based 3D reconstruction for elevation determination using drone [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2021, 147(9): 04021097.
- [32] XUE J G, HOU X L, ZENG Y. Rough registration of BIM element projection for construction progress tracking [J]. *Ieee Access*, 2022(10): 8305.
- [33] TANG Y C, CHEN M Y, LIN Y F, *et al.* Vision-based three-dimensional reconstruction and monitoring of large-scale steel tubular structures [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020(2020):

- 1.No,1236021.
- [34] 常乐,黄翔,赵有山,等. 跨度120 m三角锥体钢结构施工滑移监测方法研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43: 251.
CHANG Le, HUANG Xiang, ZHAO Youshan, *et al.* Research on construction slip monitoring method of spatial steel structure with triangular cone shape spanning 120 meters [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43: 251.
- [35] 徐前卫, 龚振宇, 孙梓粟, 等. 滇中引水工程超深圆形基坑施工变形和内力监测结果分析[J]. 土木工程学报, 2022, 55: 102.
XU Qianwei, GONG Zhenyu, SUN Zili, *et al.* Analysis on the monitoring results of construction deformation and internal force of ultra-deep circular foundation pit of Dianzhong water diversion project [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55: 102.
- [36] 王卫东, 丁文其, 杨秀仁, 等. 基坑工程与地下工程——高效节能、环境低影响及可持续发展新技术[J]. 土木工程学报, 2020, 53:78.
WANG Weidong, DING Wenqi, YANG Xiuren, *et al.* Deep excavation engineering and underground engineering—New techniques of high-efficiency and energy-saving, low environmental impact, and sustainable development [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53:78.
- [37] CHEN F C, JIAO H J, HAN L M, *et al.* Real-time monitoring of construction quality for gravel piles based on internet of things [J]. Automation in Construction, 2020, 116: 103228.
- [38] AKBAL E, TUNCER T. A learning model for automated construction site monitoring using ambient sounds [J]. Automation in Construction. 2022, 134:104094.
- [39] LUONG D L, TRAN D H, NGUYEN P T. Optimizing multi-mode time-cost-quality trade-off of construction project using opposition multiple objective difference evolution [J]. International Journal of Construction Management, 2021, 21(3): 271.
- [40] HE W, LI W J, XU S, *et al.* Time, cost, and energy consumption analysis on construction optimization in high-rise buildings [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021, 147(10):04021128.
- [41] MOON H, KIM H, KAMAT V R, *et al.* Bim-based construction scheduling method using optimization theory for reducing activity overlaps [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015, 29(3):04014048.
- [42] SLATON T, HERNANDEZ C, AKHAVIAN R. Construction activity recognition with convolutional recurrent networks [J]. Automation in Construction, 2020, 113: 103138.
- [43] XIE P, ZHANG R J, ZHENG J J, *et al.* Probabilistic analysis of subway station excavation based on BIM-RF integrated technology [J]. Automation in Construction, 2022, 135: 104114.
- [44] 刘占省, 刘子圣, 孙佳佳等. 基于数字孪生的智能建造方法及模型试验[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(6): 26.
LIU Zhansheng, LIU Zisheng, SUN Jiajia, *et al.* Intelligent construction methods and model experiments based on digital twins [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(6): 26.
- [45] 袁烽, 阿希姆·门格斯. 建筑机器人——技术、工艺与方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
YUAN P F, MENGES A. Building robotics: Technology, craft and methodology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [46] MELENBRINK N, WERFEL J, MENGES A. On-site autonomous construction robots: Towards unsupervised building [J]. Automation in Construction, 2020, 119: 103312.
- [47] LIANG C J, WANG X, KAMAT V R, *et al.* Human-robot collaboration in construction: Classification and research trends [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021, 147(10):03121006.
- [48] CHEN C, HUY D T, TIONG L K, *et al.* Optimal facility layout planning for AGV-based modular prefabricated manufacturing system [J]. Automation in Construction, 2019(98):310.
- [49] KONTOVOURKIS O, TRYFONOS G. Robotic 3D clay printing of prefabricated non-conventional wall components based on a parametric-integrated design [J]. Automation in Construction, 2020, 110: 103005.
- [50] XIAO J, ZOU S, YU Y, *et al.* 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101779.
- [51] Winlet. Glass installation robots [EB/OL]. [2020-10-25].<https://winlet.co.uk>.
- [52] Bernstein. Brayman construction and advanced robotics partner to combat worker shortage with TyBot [EB/OL]. [2018-08-01]. <https://www.acppubs.com/articles/7483-brayman-construction-and-advancedrobotics-partner-to-combat-worker-shortage-with-tybot>.
- [53] WANG Z L, LI H, YANG X T. Vision-based robotic system for on-site construction and demolition waste sorting and recycling [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101769.
- [54] JEONG I, JANG Y, PARK J, *et al.* Motion planning of mobile robots for autonomous navigation on uneven ground surfaces [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2021, 35(3): 04021001.
- [55] TAN Y, LI G, CAI R Y, *et al.* Mapping and modelling defect data from UAV captured images to BIM for building external wall inspection [J]. Automation in Construction, 2022, 139: 104284.
- [56] YOU K, PENG G, Ding LY, *et al.* Smart T-box of unmanned earthwork machinery for Internet of Vehicles [J]. Automation in Construction, 2022, 144: 104589.
- [57] TANG J Y, LUO H, CHEN W W, *et al.* IMU-based full-body pose estimation for construction machines using kinematics modeling [J]. Automation in Construction, 2022, 138: 104217.
- [58] SEZER A A, THUNBERG M, WERNICKE B. Digitalization index: developing a model for assessing the degree of digitalization of construction projects [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021, 147(10):04021119.
- [59] GUO Z X, LI L H. A conceptual framework for collaborative development of intelligent construction and building industrialization [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10:904518.