

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.121



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



建筑业人机协作研究综述

张宇婷¹, 崔晗², 陈嘉宇¹

(1. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:建筑业高度依赖人工操作,是典型的劳动密集型产业,但建筑业正面临着日益严重的安全管理压力和劳动力短缺问题。建筑机器人的使用能有效缓解这些问题,避免从业人员直接参与危险繁重的施工作业,提高施工现场的自动化与管理水平。然而,现阶段建筑机器人的自主化水平有限,自动化的建造方式难以覆盖建筑业生产活动的每一种工艺,这决定了未来的智能建造将长期高度依赖人机协作的生产模式。梳理建筑机器人技术基础和研究前沿,回顾新一代智能建筑机器人发展历程,结合施工场景特点,总结出4类典型人机协作模式:操作员控制模式强调人工主导的实时交互、指挥员执行模式通过远程指令实现高风险任务自动化、协作员互助模式结合机器高效性与人工灵活性、人体增强模式通过外骨骼机器人提升工人作业能力。指出当前建筑机器人仍面临环境适应性不足、通信稳定性差、跨平台协同困难等挑战,并对未来应重点关注的研究方向提出建议。

关键词:建筑机器人;人机协作;智能建造;施工自动化

中图分类号:TU741.3 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)05-0023-15

Autonomous robots and human-robot collaboration in construction: A review

ZHANG Yuting¹, CUI Han², CHEN Jiayu¹

(1. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: As a typical labor-intensive sector, the construction industry heavily relies on human workers. However, the current construction industry has to confront challenging issues of labor shortages and safety management. Using construction robots can effectively solve these problems and increase automation in project execution and management. Recent studies have reported that future intelligent construction methods will rely on long-term highly cooperative production models involving human-robot collaboration. This paper systematically reviews the foundational technologies and research frontiers of construction robotics, traces the developmental trajectory of next-generation intelligent construction robots, and identifies four typical human-robot collaboration modes through analysis of construction site characteristics: operator-controlled mode emphasizing human-led real-time interaction, commander-execution mode achieving automated execution of high-risk tasks through remote instructions, collaborative assistant mode combining machine efficiency with

收稿日期:2024-09-04

作者简介:张宇婷(1997-),女,主要从事施工自动化与安全管理研究,E-mail:yuting-z22@mails.tsinghua.edu.cn。

陈嘉宇(通信作者),男,副教授,博士生导师,E-mail:jiayuchen@tsinghua.edu.cn。

Received: 2024-09-04

Author brief: ZHANG Yuting (1997-), main research interests: automation and safety management in construction, E-mail: yuting-z22@mails.tsinghua.edu.cn.

CHEN Jiayu (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: jiayuchen@tsinghua.edu.cn.

human flexibility, and human augmentation mode enhancing worker capabilities through exoskeleton robotics. The study further highlights current technical challenges including insufficient environmental adaptability, communication instability, and cross-platform collaboration difficulties, while suggesting priority research directions for future development in this field.

Keywords: construction robots; human-robot collaboration; intelligent construction; automation

建筑业是中国国民经济的重要支柱产业。尽管近10年来建筑业的总产值保持持续增长,但截至2022年,其从业人数连续4年减少,行业产值利润率连续6年下降^[1],建筑施工中的生产安全事故频繁发生。加快行业转型升级,推进由过去的高速增长模式转向未来的高质量发展模式成为“十四五”时期建筑业发展的首要任务。在推动智能建造与建筑工业化协同发展的背景下,使用建筑机器人辅助或替代建筑工人完成“危、繁、脏、重”的施工作业,能够显著提高建筑业的自动化、智能化水平,推动集成化、数字化的项目管理,解决建筑业劳动力短缺、用工成本上升的问题,同时降低施工安全事故的发生率,提高建筑工人的职业健康水平^[2]。然而,建筑机器人研发复杂、使用成本较高,至今尚未实现规模化的市场应用^[3]。且目前建筑机器人环境感知及判断能力普遍远不如人类^[4-5],难以在建筑工地的非结构化环境和快速变化的施工条件下完全自主地胜任所有施工任务^[6-7]。同时,建筑施工工艺种类繁多、流程复杂,现有建筑机器人的类型和自动化程度均不足以完全取代施工人员的人工操作^[8]。因此,未来建筑业施工的自动化发展将长期高度依赖人机协作的作业模式。

笔者梳理了现阶段实现建筑机器人自主化所依赖的感知、规划、控制、通信等方面的关键技术基础,依照不同的自主化程度和工作特点总结了施工建造活动中典型的人机协作模式、对话机制和集成管理手段,讨论了智能建筑机器人及人机协作技术在建筑业的应用挑战,并对未来应重点关注的研究方向提出了建议。

1 建筑机器人关键技术基础

建筑施工作业具有流程复杂,精准度要求高、工作环境动态变化频繁等特点,这些特点给建筑机器人的推广和使用带来极大挑战。因此,建筑机器人的应用需要依赖环境感知、精准定位、运动规划、自主导航、控制驱动、信息处理与数据分析、人机交互和学习等多项技术。

1.1 环境感知和定位技术

环境感知和定位技术是指在没有人为干预的情况下机器人通过传感器感知周围环境、判断自身

所处位置的能力,是移动机器人实现运动规划和自主导航的基础。目前用于移动机器人定位与传感的主要技术有全球定位系统(global positioning system, GPS)、超宽带(ultra-wideband, UWB)、激光雷达、惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)和视觉传感器等。实时定位及绘图(simultaneous localization and mapping, SLAM)是一种可以同时实现移动机器人定位和环境地图构建的技术,其允许机器人在未知环境中通过提取传感器信息,构建环境地图,同时,不断地对自身位姿进行修正。随着非线性优化理论的应用和图像处理与机器视觉技术的发展,SLAM逐步发展为激光SLAM和视觉SLAM技术,并分化出多种优化算法,成为当前移动机器人定位的主要方法^[9]。然而,单一传感器的数据采集往往难以满足复杂环境下的定位精度和时长需求,为提高定位效率,多传感器融合的移动机器人定位算法已成为当下重要的研究方向。如使用里程计、IMU、激光雷达融合的移动机器人定位方法,可克服单一传感器定位精度低的问题,并矫正未知环境下定位的累计误差^[10]。类似多传感器融合定位方法如表1所示。

与一般制造行业相比,复杂的工地条件对建筑机器人的环境感知和定位带来更大挑战。一方面,建筑工地环境通常充满障碍物、不规则表面和人员设备的动态移动;另一方面,建筑工地环境中的灰尘、烟雾、光照变化等因素十分容易影响传感器的性能。这意味着建筑机器人更加需要依赖多传感器融合技术及先进算法,以实现在不利条件下仍保持高精度定位和导航的鲁棒性及适应性。同时,除静态环境布局外,建筑机器人还需具备检测环境中动态物体的能力,如人员、机械设备、材料障碍物等,以便在复杂环境中快速做出决策和反应。另外,SLAM算法依赖于环境特征的稳定性,而随着施工进程的推进,工地的布局和结构亦随时发生变化,如新增建筑材料、构建临时设施等。这就要求建筑机器人具备实时更新环境信息的能力,能够在环境变化时自动调整地图的权重和置信度,以应对不确定性信息带来的定位误差。此外,还可结合无源定位技术,通过捕捉环境中已经存在的信号,利用其传播特性,如时间差、相位差、到达角度等,以

表1 部分多传感器融合定位方法

Table 1 Partial multi-sensor fusion positioning method

数据来源	融合方案	场景	测试误差
UWB 视觉传感器 IMU	分别作为贝叶斯估计,并将关联概率分布合成为联合概率分布函数 ^[11]	室内	最大值≤0.1967 m,中位数≤0.0426 m
里程计 激光雷达 UWB	使用无迹卡尔曼滤波方法融合里程计和IMU数据,用蒙特卡罗算法进一步融合激光雷达测量数据 ^[12]	室外	位置≤0.05 m,角度≤2°
IMU GPS IMU	用容积卡尔曼滤波实现室外GPS/IMU及室内UWB/IMU融合方案,以实时定位精度阈值机制切换定位方案 ^[13]	室内、室外切换	最大误差为0.67614 m,平均误差为0.30503 m
里程计 激光雷达 UWB	对激光雷达、里程计和IMU数据做卡尔曼滤波,用主观贝叶斯网络计算信息增益,融合数据并评价结果 ^[14]	室内	最大定位误差为0.031 m,旋转角最大误差为1.19°
IMU 里程计 激光雷达	用扩展卡尔曼滤波算法融合UWB、里程计和IMU信息,用自适应蒙特卡罗算法融合激光雷达测量数据 ^[15]	室内	标准差精度:X方向为0.0717 m,Y方向为0.0995 m

确定目标机器人的位置^[16]。例如将建筑工地上 的Wi-Fi路由器和接入点作为固定信号源,机器人通过分析不同接入点收到的信号强度或到达角度,以估算其相对位置^[17]。亦可以将无线射频识别(radio frequency identification, RFID)安装在建筑工地上 的固定位置,如支撑柱、墙面或其他设备上,建筑机器人通过RFID阅读器读取标签的强度或时间差,以推算其相对位置^[18]。基于此,通过在建筑工地上安装多个相控阵基站,即可形成覆盖整个工地的定位网络。相控阵天线阵列通过动态调整波束方向,即可实现对不同方位的精确定位,即使是在复杂的建筑环境中,尤其是多路径传播、信号反射严重的环境下,依然能够可靠地工作。与此同时,基站可以同时跟踪多个建筑机器人的位置,并通过无线通信将位置数据共享给不同的机器人,以实现相互之间避障、任务分配和路径规划等协作。

1.2 运动规划技术

为满足施工需要,建筑机器人需具备运动规划能力,实现一定范围内的自主灵活运动,摆脱对人工调整位置或预先设置路线的依赖。运动规划分为路径规划和轨迹规划。路径规划旨在为移动机器人在环境地图中规划出从起点到终点的最优路径,其算法主要为全局路径规划和局部路径规划两类。全局路径规划算法主要包括A*算法、遗传算法、蚁群算法等,局部路径规划算法主要包括人工势场法、动态窗口法等。不同于路径规划,轨迹规划着眼于复杂工作环境中移动机器人碰撞或运动学约束,在路径规划的基础上,进一步确保机器人能够从起始位姿安全运动到目标位姿^[19]。动态多变的施工环境要求建筑机器人在工作中实时地对环

境变化做出反应。例如,Mugarza等^[20]基于改进的D*算法提出的机器人交通控制系统,综合考虑了整个环境中移动的人因等各项要素,能够在工作中实时规划最优路径并实现无碰撞轨迹导航。

建筑机器人的工作场景复杂且不稳定,常常伴随场地布局的较大改变和环境中难以预测的动态障碍。因此,建筑机器人需结合物体检测和语义分割等技术首先识别不同种类的障碍物,并基于障碍物类型制定不同的路径规划策略,以实现避免碰撞的最终目的。例如,为确保人机交互过程中的安全性,郭红领等^[21]基于速度和分离检测方法,提出以保护性分离距离和停止保护距离为双重临界的安全运行决策方法,通过对建筑机器人机械运动的动态调整降低人机交互系统的碰撞风险。近年来,研究者还提出使用建筑信息模型(building information modeling, BIM)提取施工环境中的几何信息,将其附加到建筑机器人所使用的SLAM系统,以实现未知环境下的自主导航^[22]。如Zhao等^[23]提出的基于BIM的建筑机器人初始化系统,使用基于卷积神经网络的目标检测技术,获取建筑工地的视觉特征,通过特征匹配算法将在线获取的上述特征信息与BIM检索到的几何和语义信息相关联,据此估计建筑机器人在BIM中的坐标位置。王凡等^[24]通过BIM建立导航地图,通过优化A*算法搜索点选取策略并删除冗余转折点,提高了全局路径规划算法效率,降低了机器人与墙体发生碰撞的可能性,同时,在全局路径关键点之间使用动态窗口法并引入新的刹车判定条件,提高了机器人运动的连续性。

建筑工地环境是高度动态的,人员、车辆、机械设备等不断移动。这些动态变化使得预先规划的

路径可能随时失效,意味着建筑机器人的运动规划系统必须具备高度的实时性和自适应性。同时,建筑工地的路面条件通常十分复杂,包括不规则的墙地面、障碍物、坑洼、坡道、台阶、脚手架等,这些复杂的地形增加了运动规划的难度。特定功能的建筑机器人需要能够在以上多样化的地形上稳定行走、避障和导航并策略性地集成和调整多种运动模式,如滚动、步行、爬行等。另外,由于建筑施工流程复杂、工艺较多,在同一时空的建筑工地上,很可能存在多个机器人同时工作。这些机器人需要在共享的施工空间中进行任务分配和运动规划,以避免互相干扰和碰撞,这也对机器人系统的协调和通信提出了较高的要求。

1.3 控制和机械系统

建筑机器人一般由控制、感知、驱动和机械系统构成^[2]。控制系统向驱动系统下发指令,收到指令的驱动系统继而为机械系统提供动力,以驱动其完成相应的施工操作。在该过程中,感知系统依靠部署的高级传感器,不断获取机器人内部和外部环境信息,将其反馈至控制系统。图1为建筑机器人的组成与工作流程。

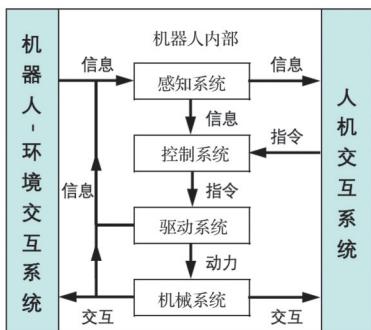


图1 建筑机器人系统组成与工作流程

Fig. 1 Construction robot system composition and workflow

机器人控制系统一般包括软件和硬件。其中,硬件控制器通常包括嵌入式计算平台、处理器、接口模块等硬件组件,用于实时处理和控制机器人的动作。软件控制器通常指运行在计算机上的控制系统,通过软件程序来控制机器人硬件的行为,负责运动规划、任务调度、感知数据处理等。现代机器人控制器通常结合软件和硬件共同实现灵活控制,并结合人工智能、机器学习或模糊控制等技术,使机器人具备自适应和学习能力,处理不确定和复杂的环境。建筑机器人的控制器功能和机械系统需基于施工任务而有所差异,为了降低任务难度和计算负担,应对其控制系统进行模块化设计,使不同机构单元中的控制器模块具有相对独立性,从而将复杂的工艺流程分解为易于执行的机器人动作,

将机器人控制系统划分为实现不同功能的模块。例如,一种基于力位混合控制方法的建筑外墙智能打磨机器人,由爬架、移动、打磨机器人、下位机控制、上位机控制等5个模块组成。通过采用智能爬架和机械臂复合设计方案,在墙体打磨过程中,机器人可实现运动规划与工位切换,自动检测墙面垂直度和平整度并据此自动调整打磨头角度^[25]。此外,模块化设计还为系统的升级和维护提供了便利。在建筑施工中,随着技术的发展和施工需求的变化,原有的模块可以被替换和升级,而并不需要对整个系统进行全部大规模的改动。例如,针对新的墙体打磨技术,打磨模块可以更新为更先进的版本,以适应新的施工要求,而其他模块则保持不变。这种设计不仅提升了系统的长远使用价值,还减少了维护成本和时间。通过这种模块化的设计,建筑机器人能够更加高效地应对复杂的施工任务,同时保持系统的灵活性和可扩展性。考虑到施工的流水特性需要兼具不同功能的建筑机器人共同参与作业,可采用分布式控制系统,将多个控制单元分布在不同的机器人部件上,通过通信和协调实现整体控制,以提升整体协作能力和系统的容错性。

为确保实现控制器的施工任务功能,建筑机器人的机械系统设计需要考虑到多种能力和约束,以确保机器人能够高效、安全地执行建筑任务。首先,建筑机器人通常需要进行高精度的操作,例如在装配、焊接、砌砖、测量等过程中保持准确性并重复执行相同任务,确保建筑工序的一致性。以上功能的实现需要同时依靠高精度的感知系统和精密的运动控制系统。另外,建筑机器人常常需要搬运重物,如建筑材料、工具、设备等,这就要求其机械系统需具备足够的负载能力和稳定性,以执行物料搬运、装配和施工等任务。对此,可采用高扭矩驱动系统、大功率电机和强结构的机械臂或移动平台,以确保机器人的承载能力。不仅如此,建筑现场任务通常非常多样化,现有建筑机器人大多配备多个自由度的机械臂以及高度可调的移动平台,使其能够在空间中灵活操作,完成打孔、焊接、喷涂、铺设地砖等任务,并应对复杂的工作环境,如狭小空间、楼层之间的高度差等。

1.4 通信技术

施工过程中良好的人机以及机器人之间的相互通信是确保实现智能化操作和交互的关键。在机器人对机器人的通信方面,可以采用集中式控制器或全局传感器系统,以统一协调所有机器人,确保其步调一致,避免本地传感器可能产生的噪声问题。但由于所有机器人依赖同一个中央控制器

或全局系统,这种方式容易导致“单点故障”,即如果中央控制器或传感器系统出现问题,整个系统就会失效。同时,所有机器人都需要不断地与中央系统进行通信,容易造成大量的通信开销和潜在的延迟^[26]。可以采用本地信息机器人直接协调的方式,每个机器人只依赖自身的本地传感器和信息来作决策。这种方法强调自主性,机器人根据自身感知的数据进行相互协调,可以有效减少对中央控制器的依赖,避免单点故障问题,提升系统的鲁棒性。但由于机器人只基于自己的本地信息进行决策,可能会受到噪声和误差的影响,导致协调不一致或效率低下^[27-28]。另外,机器人还可采用分布式通信方式向其他机器人广播发送信息^[29],或通过特定的协议、算法或信号进行更加简洁、高效的通信协调^[30]。然而,建筑工地往往通信环境较差,可能存在信号遮挡或干扰,这将导致机器人之间或机器人与中央控制系统之间通信不稳定。此时,可结合边缘计算技术,减轻对中央服务器的依赖,同时加强通信协议的鲁棒性和数据传输的可靠性。当前建筑机器人的常用通信协议主要包含串行通信协议如Modbus、实时多点通信协议如CAN(controller area network),基于以太网的通信协议如Ethernet、IP、EtherCAT,无线通信协议如Wi-Fi、5G,短距离无线通信协议如Bluetooth和BLE(blueooth low energy),基于发布/订阅模式的轻量级消息传输协议如MQTT(message queuing telemetry transport)以及低功耗、低速率无线通信协议如ZigBee等^[31-35],其典型适用场景及优缺点如表2所示。

表 2 建筑机器人通信协议类型及特征

Table 2 Communication protocols for construction robots.

协议	场景	优点	缺点
Modbus	工业控制	简单	速率低
	外部设备通信	易实现 抗干扰性强	实时性差
CAN	电机控制	高实时性	速率较低硬件要求
	传感数据交换	可靠性强	
Ethernet	高速数据传输	高速	成本高
IP		大带宽	
EtherCAT	协同工作	灵活拓扑	网络干扰
Wi-Fi	远程控制	高速	受环境影响大
5G		灵活	
	大数据交换	远程控制	安全性
Bluetooth		低功耗	距离短
BLE	短距离、低功耗设备通信	低成本	速率低
MQTT	远程监控	低带宽	实时性差
	云平台通信	适合物联网	安全性
ZigBee	短距离、低功耗设备通信	超低功耗 多设备通信	速率低 通信距离

对建筑机器人的管理还必须考虑到与之共同协作的建筑工人之间及时、安全、高效的信息共享与交互。传统的人机交互界面主要包括命令行界面、图形用户界面和触摸屏技术,以实现通信^[36-37]。近年来随着人机交互技术的发展,新的交互技术纳入了更多的感知渠道,例如语音、视觉、手势等^[38]。这种多模态的交互方式提升了交互的友好性,使得人机之间的交互过程更加自然,为机器人更好地理解人类意图提供了更加丰富的信息源^[39]。在一些特殊情况下,如工人无法或来不及使用双手控制机器人时,脑机接口(brain-computer interface, BCI)技术通过采集工人脑电波并进行解码和特征提取,将其解读为对机器人的指令,为人机之间的对话机制提供一种崭新的方案与视角^[40]。

2 建筑机器人的自动化及自主化

为了更好地理解建筑机器人的自动化及自主化现状,以“automation”和“construction robots”为关键词在Web of Science(WOS)数据库进行检索,分析近20年研究的发展趋势,共检索到1995—2024年间的740篇文献。图2所示的关键词共现图显示该研究分支众多,包括机器人学、自动控制、运动学、路径规划、多机器人系统、人机协作、人工智能、虚拟现实等多专业领域技术。如图3所示,关键词“construction”“automation”和“robots”的出现率逐年上升,表明当下建筑机器人领域的研究越来越重视其智能化程度,高自动化、自主化能力是未来建筑机器人的重要发展方向。

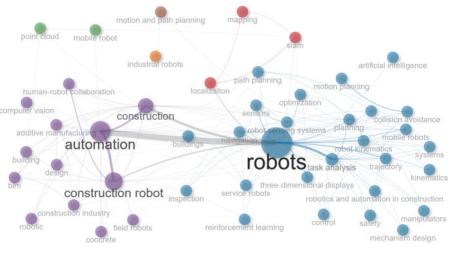


图2 建筑机器人文献关键词共现图

Fig. 2 Keywords co-occurrence map for construction robots

2.1 建筑机器人的自动化

早期的建筑机器人主要包括远程遥控和编程式机器人设备。前者一般通过对施工机械进行改造,实现远程控制的自动化操作,以替代建筑工人完成简单重复的施工任务^[41-44]。典型的如由建筑工人遥控操作的混凝土喷射机器人、混凝土铺面修磨机器人、钢筋铺设机器人和钢梁防火层喷涂机器人等。编程式建筑机器人借鉴制造业流水线作业模式,通过选定预先编程功能,可在工业化装配式建

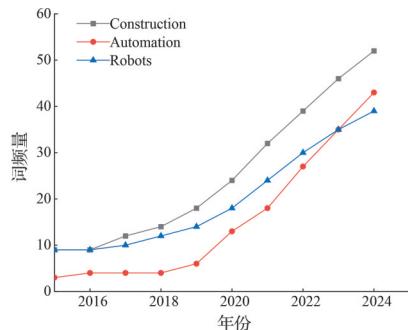


图3 建筑机器人文献关键词频量趋势

Fig. 3 Keyword frequency trends in construction robots

筑中用于预制构件的生产、存储和运输等环节,典型的如基于机械臂开发的多功能拆/布模机器人、射流切割机器人以及运用视觉感知配合路径规划技术的构件表面抹平机器人、起吊运输机器人等。然而,受限于施工技术的复杂性和精度要求、施工对象的体型与质量以及施工环境非结构特征,可用于现场施工的建筑机器人种类和数量十分匮乏。

机器人控制系统由硬件与软件组成,经算力与算法支持处理收集到的数据,向机器人发出指令,并通过各类控制器执行操作^[45]。鉴于不同的控制逻辑、算力、算法设计,按照不同的自动化程度,可分为:1)操作员实时伺服控制的远程遥控机器人;2)按固定程序自动操作的预编程机器人;3)可自主理解并执行任务的感知-执行机器人^[46]。人机协作的施工模式对建筑机器人的自动化程度提出了较高要求,不同于被动执行操作指令,建筑机器人需具备一定的自适应能力和泛化能力,在复杂动态的施工环境中构建“感知-决策-执行”协同作业机制^[47]。为此,建筑机器人需配备多种类型的传感器,如视觉摄像头、激光雷达、红外传感器、声音传感器和力传感器等。基于融合传感器获取的不同感知特性的数据样本,结合先验知识及计算机模型赋予的多模态信息提取能力,机器人可将作业方式由简单预置转为自主学习与决策执行^[48]。通过进一步结合多模态感知能力和数字建筑模型,可实现建筑机器人的集成轨迹规划和全身运动控制,在施工现场执行高精度的建筑任务^[49]。

2.2 建筑机器人的自主化

自主化水平是影响建筑机器人推广和使用效果的重要原因。Beer等^[50]结合人类与机器人的交互方式,将机器人的自主化水平(Levels of robot autonomy, LoRA)划分为不同的等级。以此为借鉴,依据不同的感知、决策、执行表现,不同自主化水平的建筑机器人具有不同的工作模式和能力,如表3所示。提高施工现场的自主化水平要求进一步升级建筑机器人的智能化水平,以降低其对人工操

作的依赖。目前,学者们已在智能建筑机器人领域开展了相关研究,在不同的建造活动上均取得一系列成果。例如,在主体工程施工阶段,由越障移动地盘、自动上砖装置、自动抹灰装置与砌墙机械臂组成的智能砌墙机器人,采用高精度定位与导航技术,内嵌智能控制算法,能够实现自主行走与定位、上砖、抹灰、摆砖的全自动砌筑^[41]。自带激光测量识别系统和实时控制系统的智能混凝土施工机器人能够自动化完成布料、整平、收面、抹光等工序,降低人工劳动强度,在节省工期的同时达到更高的施工精度^[42]。此外,还有依据建筑三维模型驱动打印建筑构件的3D建筑打印机^[43],抵抗风荷载的外墙自动喷漆机器人^[44],可全自动化实现数据采集、传输、运算、评价的建筑测量机器人^[51],能自动识别作业对象、自行规划并控制执行、可全程监控的智能挖掘机器人^[52]等,极大地提高了施工效率。在装饰、装修阶段,智能建筑机器人依靠其先进的传感系统、机械结构设计和运动控制,可在人机协作的模式下灵活自主地完成墙、地面打磨、室内和外墙喷涂及瓷砖铺贴等作业,相较传统的工人手工作业具有明显优势。除体力劳作外,智能建筑机器人还可用于施工现场的无人化信息采集,代替项目管理人员完成安全监测和巡检,提高项目管理的智能化水平。例如,付文俊^[53]采用模块化设计,将能在井壁上自主爬行和巡检的用于井筒施工建设时期的危险源识别和预警,实现远程井筒勘测,此举可有效保障作业人员的安全。

表3 建筑机器人的自主化等级分类

Table 3 Autonomy levels for construction robots

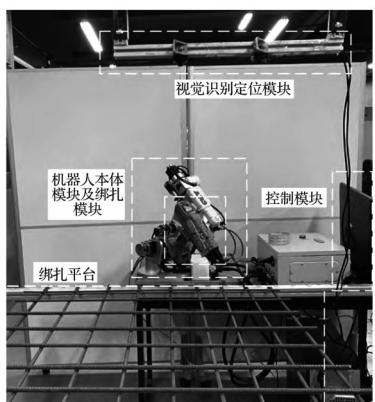
建筑机器人自主化水平	LoRA 特征 ^[49]					
	感知		决策		执行	
	低	高	机	人	机	人
根据遥控指令完成机械动作	✓				✓	✓
基于预设程序实现重复操作	✓			✓	✓	
依靠高级感知执行预设任务		✓	✓	✓	✓	
根据预设逻辑应对突发事件	✓	✓	✓	✓		
自主应对环境生成任务逻辑	✓	✓	✓	✓		
自主感知学习更新逻辑算法	✓	✓			✓	

图4为部分施工用建筑机器人实例。在建筑机器人的自主化发展历程中,涉及到建筑机器人多方面能力的塑造与提升,例如智能感知与环境理解、自主导航与路径规划、任务规划与执行、数据处理与决策、系统集成与兼容性、学习与适应能力等。未来的建筑机器人将需要与其它机器人系统及人类工人进行高效协作,其关键在于实现机器人之间及与建筑工地上其他设备的集成,包括实时数据共享和任务

协调。同时,还需要提升机器人与工人的交互体验,包括提供友好的用户界面和操作方式,以增强施工过程中的用户体验和操作便捷性,使机器人能够更好地理解和执行工人的指令。此外,自主建筑机器人的发展同样应关注能源使用的效率和可持续性。开发低能耗的机器人系统,利用可再生能源和节能技术,有助于减少施工过程中的环境影响。



(a) 混凝土自动喷涂机器人^[54]



(b) 钢筋自动绑扎机器人^[55]



(c) 墙板自动安装机器人^[56]



(d) 幕墙自动清洁机器人^[57]

图4 部分施工用建筑机器人实例

Fig. 4 Examples of construction robots

3 施工场景下的人机协作模式

不同于人机共存、人机交互、人机合作关系,人机协作更注重人和机器人通过接触共享和协调任务、资源与信息,实时交互并共同进行任务决策、控制、优化与执行^[58],如图5所示。在建筑业的人机协作环境中,施工人员和建筑机器人共享工作任务、空间、资源与信息,协同完成任务的决策、控制、调整与执行过程。在这种工作情景下,建筑工人进行更高层次的任务规划、决策与监督,机器人进行具体、准确、重复的物理操作^[59]。

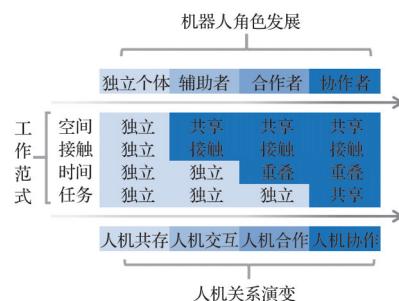


图5 建筑机器人自动化与人机协作关系演变

Fig. 5 Evolution of human-robot collaboration in construction

3.1 操作员与控制模式

研究表明,在建筑施工领域,大量人机协作系统仍在工人的领导下,“操作员”是工人的主导角色,承担了感知环境、监控和下达指令的任务,而建筑机器人则表现出较低的感知能力和自主程度,配合建筑工人完成操作^[41]。在该工作模式下,操作员通过各种人机交互界面(如工业遥控器、操作台、触觉和视觉设备等)进行参数设置、控制和工况检查^[60]。这些界面提供了直观的操作方式,帮助操作员实时调整和监控机器人的工作状态。如杜鹏等^[61]研发的大截面箱型钢柱机器人自动焊接施工技术,由操作员完成作业前的示教、架设工作,并在自动焊接过程中实时控制焊枪运动速度、焊接轨道精度等重要参数。Jung等^[62]设计了一种基于机器人起重机的钢结构自动化施工系统,操作员可通过该系统人机界面的触觉和视觉设备移动和控制机器人。在建筑机器人的帮助下,建筑工人的体力负荷显著降低。特别是一些重复性操作,可由建筑机器人代为执行。如Gonzalez de Santos等^[63]设计的机械手,可用于协助操作人员搬运和安装用于室内墙壁施工的预制石膏。图6所示为一名建筑工人操作一多用途安装机器人,协助完成幕墙安装。该方法可避免建筑工人在高空从事繁重的搬运作业,但仍需有经验的操作员对机器人进行有效控制以及另外的建筑工人协助完成安装的其他工序^[64]。



图6 人工操控多用途安装机器人完成幕墙施工^[64]
Fig. 6 Manually operated multi-functional robot for curtain wall installation

3.2 指挥员与执行模式

在许多特殊场景下,出于安全和成本考虑,人类不便于实地参加基础设施的建造与检测。针对此类特殊需求,人类指挥员可通过远程控制系统对建筑机器人发出任务指令,机器人在执行这些指令时则依赖于其内置的传感技术和智能算法进行自主操作。这种模式下,人类不直接参与现场作业,而是通过集成控制软件进行远程监控和指挥,机器人利用多模态传感技术实时调节其操作,以完成指定任务。该模式克服了人工参与周期长、风险高等问题,提升了施工的自动化和信息化水平。图7所示为一多功能“子母式”水下机器人系统,具有水下远端“巡、检、控、诊、用”的集成功能。人类指挥员通过线上的集成控制软件系统下发指令,以调动其多源系统完成需执行的任务^[65]。

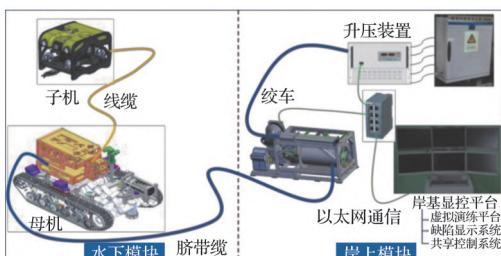


图7 “子母式”水下机器人系统指挥与执行结构^[70]
Fig. 7 Underwater inspection robot system for large diameter and long headrace tunnel

另一方面,传感技术和算法升级加快了施工的自动化和信息化发展^[66],同时,为机器人在与人类伙伴协作时可根据人类的行为和环境变化做出灵活的任务规划打下了基础^[67]。在执行指挥员的任务指令过程中,建筑机器人可基于多模态传感技术解读正在进行中的工作状态信息,以实现对控制与机械系统的实时自主调节^[68]。如Ilyas等^[69]研发了一个配备感知传感器和智能算法的建筑机器人系统,该系统允许用户选择需要检查的建筑组件,通过BIM生成导航地图,使机器人自主移动到目标组件,使用

探测器对其进行检测,并生成检测报告。随着移动机械臂技术的逐渐成熟,建筑机器人的操作灵活性亦有了大幅改善,具备了更高的智能化水平。如具备传感与监控系统、可实时规划路径的小型吸盘式高空幕墙清洁机器人^[70],可自主识别管道、检测管道泄漏并对外壁附着物进行清理的水下管道智能巡检清洁机器人^[71]等。

3.3 协作员与互助模式

在许多特殊场景下,出于安全和成本考虑,建筑机器人具有生产效率高且错误率低的显著优势,但相较于人工操作仍缺乏一定的灵活性。在施工现场保留与建筑机器人持续配合的协作员,以共同完成流水施工作业,可以更大限度地同时发挥机器与人工操作的各自优势。如在一抹灰机器人的机协作模式中,由抹灰机器人自主实现地图载入、位姿控制与运动规划,根据作业信息自动进行砂浆供料,一名协作员配合机器人完成抹灰工作,另一名协作员紧随其后对抹灰面进行修补,确保其工作覆盖至边角区域^[72]。另如在一砌砖机器人的工作流程中,由协作员首先将不同区域的砖块放置于传送带,输送至指定位置,然后由机械臂精准抓取砖块完成自动抹灰操作,再将其放至指定位置进行砌筑^[41]。为克服机器人难以有效完成焊接与接缝密封任务的局限性,如图8所示,Brosque等^[73]提出了一种结合机器人自主能力和人类干预的协作方法,机器人在这些任务中提供基本的自动化操作,而操作员则通过触觉设备提供的感官反馈,对机器人操作进行细节调整。

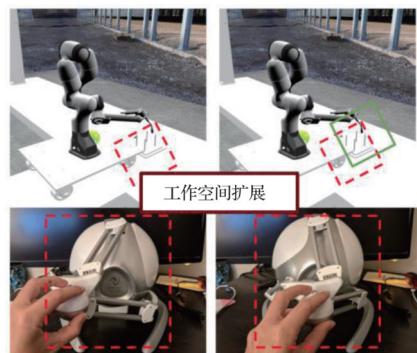


图8 具有触觉反馈的协作焊接机器人^[73]
Fig. 8 Collaborative welding robot with haptic feedback

协作员与机器人的互助模式下,通过有效地结合机器人和人工操作的优势,可以提高建筑施工的效率和质量。然而,该种分工可能会导致人机物理接触的界面大量增加,引入了安全隐患。同时,机器人与协作员之间的协调配合亦是成功执行对应的施工流程的关键。在协作员上岗前,需要确保其对整个操作流程熟练,且与机器人建立了良好的信

任合作关系,同时,对环境保持警惕和关注,以便应对突发状况。

3.4 人体增强模式

经典人体增强模式下的人机协作是工程外骨骼机器人的使用。外骨骼机器人是典型的可穿戴式人体力量增强机器人^[74],这些机器可以提高建筑工人的移速、承载能力和耐力。对增强型外骨骼机器人系统的研发与优化有助于提升单个工人的生产力,降低其职业健康风险。例如,Yu等^[75]开发了一种7自由度可穿戴外骨骼机器人,该机器人可通过力传感器检测人类运动,并随荷载产生各种三维运动,协助完成钢材的生产施工。其他部分施工用外骨骼系统如图9所示。施工用人体增强外骨骼机

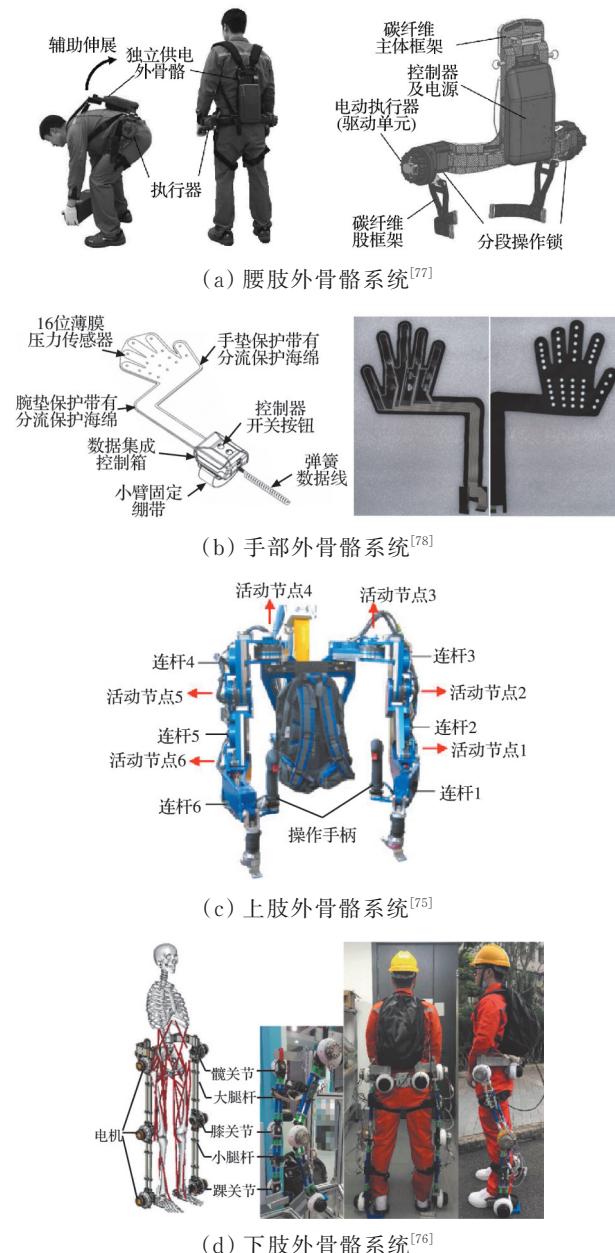


图9 各类施工用外骨骼系统示例

Fig. 9 Examples of construction exoskeleton systems

器人的开发需特别考虑其舒适性与安全性,以确保工人在长时间的使用过程中的良好佩戴体验,并具备防护机制和紧急停止功能,以应对意外状况。

建筑业是典型的劳动密集型产业,建筑工人工的高重复性使得增强外骨骼机器人的投入使用能够极大地减轻建筑工人的劳动负担。然而,建筑施工涉及到的流程工艺十分复杂,所对应的工人的位姿非常丰富,这促使机器人应具备高精度的运动控制和快速响应能力,以确保能够准确地增强工人的动作,并与工人的自然动作保持同步。对此,算法和传感器的选择对于控制精度和响应速度至关重要。如Ren等^[76]针对下肢外骨骼机械装置在建筑行业的应用,使用适合建筑任务的物理人机交互控制器,内嵌基于步态轨迹的肌肉骨骼模型和迭代控制算法,降低了人体下肢与机器人之间的轨迹跟踪误差,提高了响应的灵敏度,使其更加适用于建筑工地动态条件下的复杂活动。此外,在外骨骼机器人内集成健康监测功能,可以实时跟踪工人的生理状态,防止因过度使用或不良姿势导致的健康问题。

4 人机协作的智能化改进

4.1 人机对话与交互机制优化

在人与建筑机器人的协作任务中,通过建立对话与交互机制可以提高机器人的感知和判断能力^[79]。如Chen等^[80]提出了一种信任感知的部分可观测马尔可夫决策过程(POMDP)模型,可以推断人类对机器人的信任,并根据此信任水平调整机器人的行为,以优化团队长期表现。Wang等^[81]提出了一种基于虚拟现实技术的沉浸式数字孪生交互系统,以实现人机双向通信。在该系统的工作模式下,建筑工人负责高级的任务规划与工作监督,机器人则承担对工作空间的感知和监控、详细的机械运动规划和驱动执行物理操作。惠记庄等^[82]基于Unity3D虚拟引擎平台和HTC Vive外接式头戴设备,设计了一个沉浸式钢桥施工仿真系统,通过虚拟施工场景,使建筑工人以第一视角实现施工过程的人机交互操作。

另一方面,传感技术赋予了建筑机器人感知能力,建筑机器人可以通过各类传感器获取的数据,感知人类的生理状态并预测其运动,以了解人类合作伙伴的意图,并对其运动做出提前响应。如在建筑机器人的设备舱内配备视觉传感器,使用混合运动和视觉的数据融合办法,提高施工设备的活动识别能力^[83]。另如基于语音代理物联网平台和内置自然语言处理的语音助手,实现和机器人之间有效的

语音交互^[84]。此外,通过为工人配备带传感器的智能可穿戴设备,对其心率、呼吸速率等生理指标进行检测,有助于进一步对建筑工人工作时的疲劳程度、压力、人体工程学、安全等进行分析,以制定更有效的施工计划和纠偏措施^[74]。如Liu等^[40]基于脑机接口,在建筑工人和机器人之间建立了一种非肌肉交流通道,该系统通过可穿戴设备连续收集建筑工人的脑电信号,并将其翻译为机器人指令,以实现对机器人的远程控制。同样,脑电信号亦可用于增强机器人对人类合作者身心状态的捕捉和理解,以实时调整其在施工任务中的表现^[85]。

考虑技术限制和实用性,当前对建筑机器人在使用过程中的人机交互机制优化可重点关注通过自然语言处理(natural language processing,NLP)提升机器人对自然语言指令的理解能力^[86],使其能够准确识别和执行工人的口头指令,并集成视觉识别和触觉反馈系统,使机器人能够通过图像识别和触觉传感器来理解工人的动作、情绪、意图和其他心理状态^[87],并实时反馈操作结果。对工人而言,需要通过实时的操作反馈和系统状态更新来了解机器人的工作进展和问题。而机器人则可通过分析设备数据和工人的操作模式,预测潜在的故障或维护需求,提醒工人进行必要的调整。最后,建立集成的协作平台,实现机器人与工人、其他设备及系统的信息共享和协调,提高整体作业效率。

4.2 机器人互联与人机协作管理

建筑施工工艺流程复杂,要求多工种参与流水施工。单个建筑机器人能够进行的作业种类和工作量有限,多机器人协作施工可以增加组织结构的灵活性,成为建筑业工业化的必然趋势。例如,在建筑行业增材制造领域,合理部署多机器人协同作业可显著提升打印效率。在建筑机器人的多机协作领域,中国的大界机器人公司开发了可用于智能建造背景下的统一控制平台RoBIM,包含数字孪生、仿真建模等功能,以实现虚拟调试及动态调度。受自然界中黄蜂等生物集体建造方法的启发,Zhang等^[88]开发了一个可扩展的多机器人3D打印框架和管理平台,允许多机器人在人类监督下进行自主的3D打印,并适应建筑任务和机器人数的变化,为特殊场景下的飞行制造提供了新的可行性方案。

然而,伴随着建筑机器人的投入使用,多机械的复杂工作环境进一步增大了施工现场的管理难度。联网后的机器人与人员数据的整合以及协作管理系统与平台的研究是人机协作技术未来发展的核心。开发具备集成管理与调度功能的多机器

人协作平台对于建筑机器人的推广使用具有重要意义。如袁烽等^[89]设计的FUROBOT机器人建造平台能对接设计与建造流程,并适应不同厂商、不同型号的多类型建筑机器人,集成多种工艺,以实现数字建造的快速部署。近年来,许多研究着眼于打破BIM与建筑机器人之间的信息障碍,使用BIM生成可调节和辅助建筑机器人作业的指令和信息流,将建筑机器人通过各类传感器获取的多模信息通过BIM实现可视化^[90],结合虚拟现实技术模拟建筑机器人工作情景,以实现与智能建筑机器人的人机交互。为实现基于BIM的建筑机器人互联与人机协作管理平台,首先应开发BIM与建筑机器人之间的数据接口,确保BIM能够集成机器人的操作与传感器数据并将任务指令和设计数据下发至机器人。通过设计标准化的通信协议,实现不同机器人和系统之间的无缝数据交换和指令传递。最后,通过实现BIM模型与机器人传感器数据的实时同步更新,确保模型和实际施工状态的一致性。此时,可建立实时监控平台,展示施工进展、机器人状态和传感器数据,支持动态调整和决策。

5 总结与展望

建筑机器人的投入使用在提高建筑业施工自动化水平方面具有极大潜力,在智能建造的背景下,建筑业施工的自动化发展将长期处于人机协作阶段。尽管已经取得了一系列研究成果,智能建筑机器人与人机协作在建筑业的研发和应用依然面临众多挑战。在此基础上,未来人机协作的研究可主要着眼于以下几个方向:

- 1)当下建筑机器人的开发较为零散,多聚焦于某一施工过程或某项具体任务,建造任务覆盖率低。未来应针对更多施工工艺进一步研发更大使用空间的智能建筑机器人,从而将更多的施工工作自动化。
- 2)随着智能建筑机器人在施工建造活动中的局部应用增多,必然需要进一步开发集成化的智能建造管理平台,为工程项目建设全寿命周期的人机集成提供高效的信息交换,使参与施工建设的各方把握工程进度并能够灵活应对工程中的各种突发状况。
- 3)建筑机器人和人机协作技术涉及除土木工程外的计算机、机械、电子等多个学科,其研发应及时引入交叉学科的研究成果,充分利用不同学科的优势,增强建筑机器人的感知、分析和控制能力,建立有效的人机对话机制,提高其智能化水平。
- 4)为适应建筑机器人和人机协作技术的应用,

需进一步创新管理模式与管理制度,使新的管理流程与管理办法、技术发展形成合力,最大限度地发挥智能建造优势。

未来人机协作技术的应用应不仅局限于施工建造活动,建筑机器人的投入使用将进一步推动建筑业工业化的发展,并与智能化设计、运维相结合,共同推动建筑业全生命周期的自动化转型。

参考文献

- [1] 赵峰,王要武,金玲,等.2022年建筑业发展统计分析[J].工程管理学报,2023,37(1):1-6.
ZHAO F, WANG Y W, JIN L, et al. Statistics analysis of China's construction industry development in 2022 [J]. Journal of Engineering Management, 2023, 37 (1): 1-6. (in Chinese)
- [2] 陈翀,李星,邱志强,等.建筑施工机器人研究进展[J].建筑科学与工程学报,2022,39(4):58-70.
CHEN C, LI X, QIU Z Q, et al. Research progress of construction robots [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(4): 58-70. (in Chinese)
- [3] 牛伟蕊,王彬武.关于发展智能建造的国际经验启示[J].建筑经济,2022,43(5):10-16.
NIU W R, WANG B W. Enlightenment of international experience on the development of intelligent construction [J]. Construction Economy, 2022, 43(5): 10-16. (in Chinese)
- [4] LI Y M R. An economic analysis on automated construction safety: Internet of things, artificial intelligence and 3D printing [M]. Singapore: Springer, 2018
- [5] HAN C S. "Human-robot cooperation technology" an ideal midway solution heading toward the future of robotics and automation in construction [C]//Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC), 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2011). June 29-July 2, 2011. Seoul, Korea. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2011: 13-18.
- [6] MELENBRINK N, WERFEL J, MENGES A. On-site autonomous construction robots: Towards unsupervised building [J]. Automation in Construction, 2020, 119: 103312.
- [7] JUNG K, CHU B, HONG D. Robot-based construction automation: An application to steel beam assembly (Part II) [J]. Automation in Construction, 2013, 32: 62-79.
- [8] MA X Y, MAO C, LIU G W. Can robots replace human beings? —Assessment on the developmental potential of construction robot [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 56: 104727.
- [9] 王一波,柳建.非结构环境下移动机器人定位研究综述[J].机床与液压,2021,49(8):176-181.
WANG Y B, LIU J. Overview of mobile robots localization in unstructured environments [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(8): 176-181. (in Chinese)
- [10] 高琦,白金牛.基于多传感器融合的移动机器人定位算法研究[J].自动化与仪器仪表,2023(3):295-300.
GAO Q, BAI J N. Research on mobile robot positioning algorithm based on multi-sensor fusion [J]. Automation & Instrumentation, 2023(3): 295-300. (in Chinese)
- [11] 段金杰,江督,詹志明.多传感器数据融合室内定位方法[J].江汉大学学报(自然科学版),2023,51(3):47-54.
DUAN J J, JIANG D, ZHAN Z M. Indoor positioning method based on multi-sensor data fusion [J]. Journal of Jianghan University (Natural Science Edition), 2023, 51 (3): 47-54. (in Chinese)
- [12] 张亦然,钱银森,宋春林.一种激光雷达与视觉融合的同步定位及建图算法[J].信息技术与信息化,2022(12):5-8.
ZHANG Y R, QIAN Y S, SONG C L. A synchronous positioning and mapping algorithm based on laser radar and vision fusion [J]. Information Technology and Informatization, 2022(12): 5-8. (in Chinese)
- [13] 刘慧敏,李国丽,董翔,等.移动机器人室内外无缝切换定位方法研究[J].制造业自动化,2022,44(4):83-88,105.
LIU H M, LI G L, DONG X, et al. Research on seamless switching indoor-outdoor positioning of mobile robot [J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(4): 83-88, 105. (in Chinese)
- [14] 张江桥,范平清,陈勇.基于主观贝叶斯多传感器数据融合的AGV精确定位研究[J].云南大学学报(自然科学版),2023,45(5):1015-1021.
ZHANG J Q, FAN P Q, CHEN Y. Accurate location of AGV based on subjective Bayesian multi-sensor data fusion [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2023, 45(5): 1015-1021. (in Chinese)
- [15] 张书亮,谭向全,吴清文.基于多传感器融合技术的室内移动机器人定位研究[J].传感器与微系统,2021,40(8):53-56.
ZHANG S L, TAN X Q, WU Q W. Indoor mobile robot localization based on multi-sensor fusion technology [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(8): 53-56. (in Chinese)
- [16] MA Y T, WANG B B, PEI S Y, et al. An indoor localization method based on AOA and PDOA using virtual stations in multipath and NLOS environments for passive UHF RFID [J]. IEEE Access, 2018, 6: 31772-31782.
- [17] LIANG W C, WANG Y Q, WU Z A, et al. Indoor region localization with asynchronous sensing data: A

- Bayesian probabilistic model [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(24): 10174-10182.
- [18] MONTASER A, MOSELHI O. RFID indoor location identification for construction projects [J]. Automation in Construction, 2014, 39: 167-179.
- [19] 邱少林. 自主移动机器人动态避障轨迹规划方法[J]. 科学技术创新, 2022(8): 185-188.
QIU S L. Dynamic obstacle avoidance trajectory planning method for autonomous mobile robot [J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(8): 185-188. (in Chinese)
- [20] MUGARZA I, MUGARZA J C. A coloured petri Net-and D* lite-based traffic controller for automated guided vehicles [J]. Electronics, 2021, 10(18): 2235.
- [21] 郭红领, 马羚, 叶啸天, 等. 人机迫近交互下智能施工机械安全运行决策方法[J]. 土木工程学报, 2022, 55(5): 107-115, 128.
GUO H L, MA L, YE X T, et al. A decision-making method for safe operation of intelligent construction machinery within the context of human-machine approaching interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(5): 107-115, 128. (in Chinese)
- [22] MOURA M S, RIZZO C, SERRANO D. BIM-based localization and mapping for mobile robots in construction [C]//2021 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). April 28-29, 2021, Santa Maria da Feira, Portugal. IEEE, 2021: 12-18.
- [23] ZHAO X G, CHEAH C C. BIM-based indoor mobile robot initialization for construction automation using object detection [J]. Automation in Construction, 2023, 146: 104647.
- [24] 王凡, 李铁军, 刘今越, 等. 基于BIM的建筑机器人自主路径规划及避障研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(17): 224-230.
WANG F, LI T J, LIU J Y, et al. Research on autonomous path planning and obstacle avoidance of building robot based on BIM [J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(17): 224-230. (in Chinese)
- [25] 刘凤义, 熊学胜, 岳承涛. 基于力位混合控制方法的建筑外墙智能打磨机器人系统研究[J]. 机器人技术与应用, 2022(2): 26-30.
LIU F Y, XIONG X S, YUE C T. Research on intelligent grinding robot system for building exterior wall based on hybrid control method of force and position [J]. Robot Technique and Application, 2022(2): 26-30. (in Chinese)
- [26] ANDREEN D, JENNING P, NAPP N, et al. Emergent structures assembled by large swarms of simple robots [C]//ACADIA proceedings, Proceedings of the 36th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA). October 27-29, 2016. Ann Arbor (Michigan), USA. ACADIA, 2016: 54-61.
- [27] KNEPPER R A, LAYTON T, ROMANISHIN J, et al. IkeaBot: An autonomous multi-robot coordinated furniture assembly system [C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. May 6-10, 2013, Karlsruhe, Germany. IEEE, 2013: 855-862.
- [28] STROUPE A, OKON A, ROBINSON M, et al. Sustainable cooperative robotic technologies for human and robotic outpost infrastructure construction and maintenance [J]. Autonomous Robots, 2006, 20(2): 113-123.
- [29] STEWART R L, RUSSELL R A. A distributed feedback mechanism to regulate wall construction by a robotic swarm [J]. Adaptive Behavior, 2006, 14(1): 21-51.
- [30] NAPP N, NAGPAL R. Distributed amorphous ramp construction in unstructured environments [J]. Robotica, 2014, 32(2): 279-290.
- [31] 任孝平, 蔡自兴, 陈爱斌. 多移动机器人通信系统研究进展[J]. 控制与决策, 2010, 25(3): 327-332, 338.
REN X P, CAI Z X, CHEN A B. Current research in multi-mobile robots communication system [J]. Control and Decision, 2010, 25(3): 327-332, 338. (in Chinese)
- [32] 刘石磊, 耿伟, 崔立志, 等. 基于工业以太网的隧道施工通风环境参数自动监控系统研究[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(11): 1396-1403.
LIU S L, GENG W, CUI L Z, et al. Study of automatic monitoring system of environment parameters of tunnel construction ventilation based on industrial Ethernet [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(11): 1396-1403. (in Chinese)
- [33] JAMUNA M, VIJAYA PRAKASH A M. A study of communication protocols for Internet of Things (IoT) devices: Review [C]//Atlantis Highlights in Computer Sciences, Proceedings of the 3rd International Conference on Integrated Intelligent Computing Communication & Security (ICIIC 2021). May 7-8, 2021. Bangalore, India. Paris, France: Atlantis Press, 2021.
- [34] LI Y M, LIU C L. Integrating field data and 3D simulation for tower crane activity monitoring and alarming [J]. Automation in Construction, 2012, 27: 111-119.
- [35] SHAKED T, BAR-SINAI K L, SPRECHER A. Adaptive robotic stone carving: Method, tools, and experiments [J]. Automation in Construction, 2021, 129: 103809.
- [36] CHOI Y S, ANDERSON C D, GLASS J D, et al. Laser pointers and a touch screen: intuitive interfaces for autonomous mobile manipulation for the motor impaired [C]//Proceedings of the 10th International ACM SIGACCESS conference on Computers and Accessibility. Halifax Nova Scotia Canada. ACM, 2008: 225-232.

- [37] BENJAMIN L, SASCHA D. Interfacing the human/machine [J]. *Distinktion: Journal of Social Theory*, 2023, 24(3): 425-443.
- [38] WANG X, VEERAMANI D, ZHU Z H. Wearable sensors-based hand gesture recognition for human-robot collaboration in construction [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(1): 495-505.
- [39] BONARINI A. Communication in human-robot interaction [J]. *Current Robotics Reports*, 2020, 1(4): 279-285.
- [40] LIU Y Z, HABIBNEZHAD M, JEBELLI H. Brain-computer interface for hands-free teleoperation of construction robots [J]. *Automation in Construction*, 2021, 123: 103523.
- [41] 张英楠, 汪小林, 陈泽, 等. 面向工地作业环境的砌墙机器人研究[J]. 建筑施工, 2021, 43(10): 2170-2172, 2176.
- ZHANG Y N, WANG X L, CHEN Z, et al. Research on masonry robot for on-site working environment [J]. *Building Construction*, 2021, 43(10): 2170-2172, 2176. (in Chinese)
- [42] 王雷雷, 尹俊, 李志强, 等. 基于智能机器人的混凝土施工技术[J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(4): 16-18, 41.
- WANG L L, YIN J, LI Z Q, et al. Concrete construction technology based on intelligent robot [J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2023, 30(4): 16-18, 41. (in Chinese)
- [43] KHOSHNEVIS B. Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies [J]. *Automation in Construction*, 2004, 13(1): 5-19.
- [44] CHO J W, LEE J H, KIM Y S, et al. An analysis model for wind resistance performance of automated exterior wall painting robots in apartment buildings [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, 18(4): 909-919.
- [45] 吕冬冬, 郑松. 工业机器人开放式控制系统研究综述[J]. 电气自动化, 2017, 39(1): 88-91.
- LYU D D, ZHENG S. A summary of researches on open-architecture control systems for industrial robots [J]. *Electrical Automation*, 2017, 39(1): 88-91. (in Chinese)
- [46] 张佳乐, 骆汉宾, 徐捷. 建筑信息模型(BIM)在建筑自动化及机器人技术领域的研究与应用[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(6): 150-157, 177.
- ZHANG J L, LUO H B, XU J. Research and application of building information modeling (BIM) in construction automation and robotics [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2021, 38(6): 150-157, 177. (in Chinese)
- [47] 王耀南, 江一鸣, 姜娇, 等. 机器人感知与控制关键技术及其智能制造应用[J]. 自动化学报, 2023, 49(3): 494-513.
- WANG Y N, JIANG Y M, JIANG J, et al. Key technologies of robot perception and control and its intelligent manufacturing applications [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(3): 494-513. (in Chinese)
- [48] 张秋菊, 吕青. 机器人多模态智能操作技术研究综述[J]. 计算机科学与探索, 2023, 17(4): 792-809.
- ZHANG Q J, LYU Q. Research progresses of multi-modal intelligent robotic manipulation [J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2023, 17(4): 792-809. (in Chinese)
- [49] GAWEL A, BLUM H, PANKERT J, et al. A fully-integrated sensing and control system for high-accuracy mobile robotic building construction [C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). November 3-8, 2019, Macau, China. IEEE, 2019: 2300-2307.
- [50] BEER J M, FISK A D, ROGERS W A. Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction [J]. *Journal of Human-Robot Interaction*, 2014, 3(2): 74-99.
- [51] 赵鹏, 金成龙, 郭晓红. 自动测量机器人在建筑工程中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(20): 118-121.
- ZHAO P, JIN C L, GUO X H. Application of automatic measuring robot in construction engineering [J]. *Construction Technology*, 2021, 50(20): 118-121. (in Chinese)
- [52] 张鑫, 文怀兴. 自主挖掘机器人控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2009(4): 199-201.
- ZHANG X, WEN H X. Design of control system for autonomous robotic excavator [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009(4): 199-201. (in Chinese)
- [53] 付文俊. 基于负压吸附的井筒施工安监机器人技术研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(8): 112-119.
- FU W J. Research on wellbore construction safety monitoring robot technology based on negative pressure adsorption [J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(8): 112-119. (in Chinese)
- [54] NEUDECKER S, BRUNS C, GERBERS R, et al. A new robotic spray technology for generative manufacturing of complex concrete structures without formwork [J]. *Procedia CIRP*, 2016, 43: 333-338.
- [55] 董国梁, 张雷, 辛山. 基于深度学习的钢筋绑扎机器人目标识别定位[J]. 电子测量技术, 2022, 45(11): 35-44.
- DONG G L, ZHANG L, XIN S. Target recognition and location of steel bar binding robot based on deep learning [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(11): 35-44. (in Chinese)
- [56] LI S, ZHOU X H, CHENG G Z, et al. A scheme of installing ALC wall panels based on autonomous mobile robot [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 94: 109991.
- [57] LEE Y S, KIM S H, GIL M S, et al. The study on the

- integrated control system for curtain wall building façade cleaning robot [J]. *Automation in Construction*, 2018, 94: 39-46.
- [58] 杨赓, 周慧颖, 王柏村. 数字孪生驱动的智能人机协作: 理论、技术与应用[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(18): 279-291.
- YANG G, ZHOU H Y, WANG B C. Digital twin-driven smart human-machine collaboration: Theory, enabling technologies and applications [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(18): 279-291. (in Chinese)
- [59] AJOUDANI A, ZANCHETTIN A M, IVALDI S, et al. Progress and prospects of the human-robot collaboration [J]. *Autonomous Robots*, 2018, 42(5): 957-975.
- [60] LEE S Y, LEE K Y, LEE S H, et al. Human-robot co-operation control for installing heavy construction materials [J]. *Autonomous Robots*, 2007, 22(3): 305-319.
- [61] 杜鹏, 高群山. 大截面箱形钢柱机器人自动焊接施工技术[J]. *建筑施工*, 2021, 43(7): 1253-1255.
- DU P, GAO Q S. Robot automatic welding technology for large section box steel column [J]. *Building Construction*, 2021, 43(7): 1253-1255. (in Chinese)
- [62] JUNG K, CHU B, BAE K, et al. Development of automation system for steel construction based on robotic crane [C]//2008 International Conference on Smart Manufacturing Application. April 9-11, 2008, Goyang, Korea (South). IEEE, 2008: 486-489.
- [63] GONZALEZ DE SANTOS P, ESTREMERAS J, JIMENEZ M A, et al. Manipulators help out with plaster panels in construction [J]. *Industrial Robot*, 2003, 30(6): 508-514.
- [64] LEE S Y, LEE Y S, PARK B S, et al. MFR (Multi-purpose Field Robot) for installing construction materials [J]. *Autonomous Robots*, 2007, 22(3): 265-280.
- [65] 陈永灿, 陈嘉杰, 王皓冉, 等. 大直径长引水隧洞水下检测机器人系统关键技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(7): 1015-1031.
- CHEN Y C, CHEN J J, WANG H R, et al. Key technology of underwater inspection robot system for large diameter and long headrace tunnel [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2023, 63(7): 1015-1031. (in Chinese)
- [66] EKANAYAKE B, WONG J K W, 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.
- [67] ALAMI R. On human models for collaborative robots [C]//2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS), May 20-24, 2013, San Diego, CA, USA. IEEE, 2013: 191-194.
- [68] ZHANG X N, BAKIS N, LUKINS T C, et al. Automating progress measurement of construction projects [J]. *Automation in Construction*, 2009, 18(3): 294-301.
- [69] ILYAS M, KHAW H Y, SELVARAJ N M, et al. Robot-assisted object detection for construction automation: Data and information-driven approach [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(6): 2845-2856.
- [70] 李壮, 张立宁, 迟明, 等. 一种小型吸盘式幕墙清洁机器人的研究[J]. *建设机械技术与管理*, 2023, 36(3): 74-76.
- LI Z, ZHANG L N, CHI M, et al. Research on a small suction cup curtain wall cleaning robot [J]. *Construction Machinery Technology & Management*, 2023, 36(3): 74-76. (in Chinese)
- [71] 左义海, 张凯, 孔宪熠, 等. 水下管道清洁机器人的设计与研究[J]. *机械管理开发*, 2023, 38(2): 110-112.
- ZUO Y H, ZHANG K, KONG X Y, et al. Design and research of underwater pipeline cleaning robot [J]. *Mechanical Management and Development*, 2023, 38(2): 110-112. (in Chinese)
- [72] 肖维思, 庄然, 唐务生. 抹灰机器人施工研究 [J]. *施工技术(中英文)*, 2023, 52(11): 22-26.
- XIAO W S, ZHUANG R, TANG W S. Construction research of plastering robots [J]. *Construction Technology*, 2023, 52(11): 22-26. (in Chinese)
- [73] BROSQUE C, GALBALLY E, CHEN Y X, et al. Collaborative welding and joint sealing robots with haptic feedback [C]// 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2021), 2021 Proceedings of the 38th ISARC, Dubai, UAE, 2021: 1-8.
- [74] MARCHESCHI S, SALSEDO F, FONTANA M, et al. Body Extender: Whole body exoskeleton for human power augmentation [C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. May 9-13, 2011, Shanghai, China. IEEE, 2011: 611-616.
- [75] YU H, CHOI I S, HAN K L, et al. Development of a upper-limb exoskeleton robot for refractory construction [J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 72: 104-113.
- [76] REN B, LUO X R, LI H, et al. Gait trajectory-based interactive controller for lower limb exoskeletons for construction workers [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2022, 37(5): 558-572.
- [77] YU H, CHOI I S, HAN K L, et al. Development of a stand-alone powered exoskeleton robot suit in steel manufacturing [J]. *ISIJ International*, 2015, 55(12): 2609-2617.
- [78] LIU L, YANG H W, HAN G X, et al. A hand pressure sensing device for cable construction that can adjust exoskeleton assistance in real time [C]//2023 5th International Conference on Robotics, Intelligent Control and

- Artificial Intelligence (RICA). December 1-3, 2023, Hangzhou, China. IEEE, 2023: 565-571.
- [79] ZHANG M, XU R, WU H T, et al. Human-robot collaboration for on-site construction [J]. Automation in Construction, 2023, 150: 104812.
- [80] CHEN M, NIKOLAIDIS S, SOH H, et al. Planning with trust for human-robot collaboration [C]//Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. Chicago IL USA. ACM, 2018.
- [81] WANG X, LIANG C J, MENASSA C C, et al. Interactive and immersive process-level digital twin for collaborative human-robot construction work [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2021, 35(6): 04021023.
- [82] 惠记庄,樊博涵,丁凯,等.基于虚拟现实的钢结构桥梁装配化施工仿真系统[J].建筑科学与工程学报,2022,39(4): 108-116.
- HUI J Z, FAN B H, DING K, et al. Simulation system of steel bridge prefabricated construction based on virtual reality [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(4): 108-116. (in Chinese)
- [83] KIM J, CHI S, AHN C R. Hybrid kinematic-visual sensing approach for activity recognition of construction equipment [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102709.
- [84] LINARES-GARCIA D A, ROOFIGARI-ESFAHAN N, PRATT K, et al. Voice-based intelligent virtual agents (VIVA) to support construction worker productivity [J]. Automation in Construction, 2022, 143: 104554.
- [85] LIU Y Z, HABIBNEZHAD M, JEBELLI H. Brain-wave-driven human-robot collaboration in construction [J]. Automation in Construction, 2021, 124: 103556.
- [86] CANTRELL R, TALAMADUPULA K, SCHERMERHORN P, et al. Tell me when and why to do it!: Run-time planner model updates via natural language instruction [C]// HRI'12: Proceedings of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, 2012: 471-478.
- [87] 李铁军,刘应心,刘今越,等.基于阵列式触觉传感器的操作意图实时感知[J].仪器仪表学报,2020,41(1): 100-112.
- LI T J, LIU Y X, LIU J Y, et al. Real-time perception of operational intention based on arrayed tactile sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41 (1): 100-112. (in Chinese)
- [88] ZHANG K T, CHERMPRAYONG P, XIAO F, et al. Aerial additive manufacturing with multiple autonomous robots [J]. Nature, 2022, 609, 709-717.
- [89] 袁峰,陆明,朱蔚然.走向共享协同的建筑机器人建造平台:FUROBOT数字建造软件研发[J].当代建筑,2022(6): 24-28.
- YUAN F, LU M, ZHU W R. A platform towards sharing and collaborating construction robot: The development of digital construction software of furobot [J]. Contemporary Architecture, 2022(6): 24-28. (in Chinese)
- [90] VÄHÄ P, HEIKKILÄ T, KILPELÄINEN P, et al. Extending automation of building construction-Survey on potential sensor technologies and robotic applications [J]. Automation in Construction, 2013, 36: 168-178.

(编辑 王秀玲)