

DOI: 10.7672/sjgs2023230020

房建施工机器人的应用及展望

翟浩博,任宝双,陈洪敏,陈可,胡庆康,郁志伟,宋卓华

(中交建筑集团有限公司,北京 100022)

[摘要] 通过综合分析已有文献和研究成果,系统总结了建筑施工机器人在房建施工智能建造中的发展历程、技术分类、应用领域。探讨建筑施工机器人在提高施工效率、减少人力风险、改善施工质量中的优势和挑战,并提出未来发展的方向和前景。使用建筑机器人,可显著提高施工效率、降低施工成本、减少劳动力需求,并提升施工质量和安全性,在房建施工中的应用前景广阔。

[关键词] 智能建造;机器人;自动化;施工技术

[中图分类号] TU754.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2023)23-0020-07

Application and Prospect of Building Construction Robot

ZHAI Haobo, REN Baoshuang, CHEN Hongmin, CHEN Ke, HU Qingkang,

YU Zhiwei, SONG Zhuohua

(CCCC Construction Group Co., Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: Based on the comprehensive analysis of existing literature and research results, this paper systematically summarizes the development history, technical classification and application fields of building construction robots in intelligent construction. The advantages and challenges of building construction robots in improving construction efficiency, reducing labor risks and improving construction quality are discussed, and the future development direction and prospect are proposed. The use of robotics can significantly improve construction efficiency, reduce construction costs, reduce labor requirements, and improve construction quality and safety, the application prospect of building construction robot is broad.

Keywords: intelligent construction; robot; automation; construction

0 引言

当前建筑业仍为劳动密集型产业,建筑施工过程中,大多数工序仍需建筑工人手工操作,且工程质量严重依赖人工经验,整个施工过程需多人共同协作完成,建筑用工数量居高不下。近年来我国社会老龄化问题日益突出,人口红利逐渐消退,建筑业面临高人力成本、高危险性、低生产效率等问题。因此,建筑业亟需产业升级,加快建筑施工自动化、智能化的高质量发展步伐,以满足我国建筑业可持续发展的迫切需求^[1]。目前建筑施工机器人的技术水平不够稳定和成熟,特别是在复杂施工环境中,机器人性能和稳定性还存在一定不足^[2]。机器

人的自主导航和环境感知能力仍有待改进,机器人的灵活性和适应性需进一步提高,以满足不同施工场景需求。根据工业和信息化部规划,2020年工业机器人装机量达100万台,机器人专门人才需求量达20万人,2017—2020年工业机器人装机量和人才需求量如图1所示,各类机器人增长趋势如图2所示,由此可见,机器人应用前景非常广阔。

对房建施工机器人应用进行深入综合研究和分析是本文的研究目的。介绍国内外相关文献和研究成果,探讨建筑施工机器人在房建领域的应用现状、技术特点、优势和局限性,以及面临的挑战和未来发展趋势,为推动建筑施工机器人的应用和创新提供指导和参考,对系统梳理研究现状、发现应用优势与问题、探索未来发展方向、推动技术创新有重要意义,促进建筑业智能化和高效化发展。

[作者简介] 翟浩博,工程师, E-mail: 944837200@qq.com

[通信作者] 任宝双,高级工程师,国家一级注册结构工程师, E-mail: 123456@renfriends@sina.com

[收稿日期] 2023-08-14

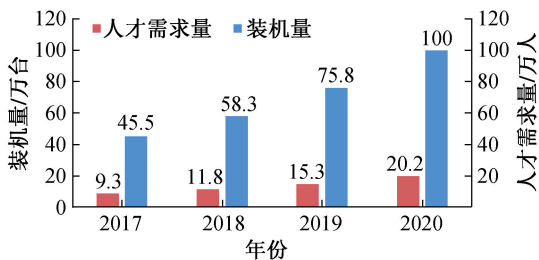


图 1 2017—2020 年工业机器人装机量和人才需求量
Fig. 1 Industrial robot installed capacity and talent demand in 2017—2020

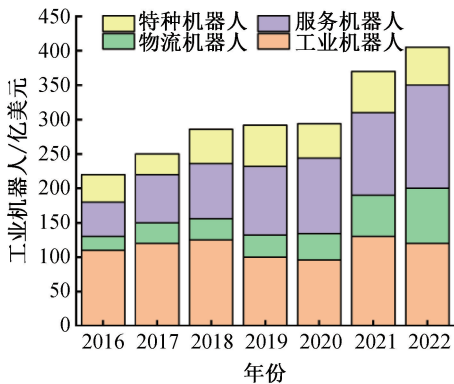


图 2 各类机器人增长趋势

Fig. 2 Growth trend of all kinds of robot

1 建筑施工机器人的发展历程

1.1 早期机器人应用

早期建筑施工机器人主要用于搬运砖块、混凝土、砂土等重复性高、劳动强度大的任务中,通常固定在工作站点上,执行单一、重复性动作。随着工业自动化技术发展,自动搅拌、自动浇筑等设备开始应用于建筑施工中^[3],自动化设备虽不完全是传统意义上的机器人,但代表了建筑施工向自动化方向发展的趋势。早期欧美等发达国家一直致力于研究不同类型的建筑施工机器人,但由于技术、成本等因素,这些设备一直未能广泛投入应用。直到近几年相关技术不断成熟完善,才开始从实验室研究走向现实场景应用,并发挥重要作用,代表性的有美国砌砖机器人山姆 100、捆扎钢筋机器人 Tybot、法国机器人公司 Effidence 开发的 EffiBOT(见图 3)。

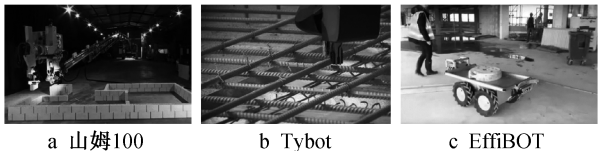


图 3 早期机器人

Fig. 3 Early robots

砌砖机器人山姆 100 由传送带、砂浆泵、喷嘴和机械臂构成。据调查研究表明,山姆 100 每小时砌砖 300~400 块,工作效率是普通工人的 5 倍,多用于大型建筑项目的平墙中,比较精细复杂的涂抹技术无法通过预设实现。TyBot 是自动钢筋捆扎机器人,可在桥梁、高速公路和预制系统中工作,已应用于宾夕法尼亚州的一座桥梁上,证明机器人进行钢筋绑扎的可行性,这是机器人在现场施工的首批实例之一,但施工效率不如传统人工绑扎。EffiBOT 可跟随工人搬运工具和材料,自动识别并避开障碍物。

1.2 建筑施工机器人的出现

历经早期机器人试验,建筑施工机器人通过强化学习,实现自主导航、避障、路径规划等功能,可执行传统搬运、浇筑任务,还涉及焊接、喷涂、检测等领域^[4]。建筑施工机器人经历简单重复性任务到多样化、智能化的发展历程,如图 4 所示。

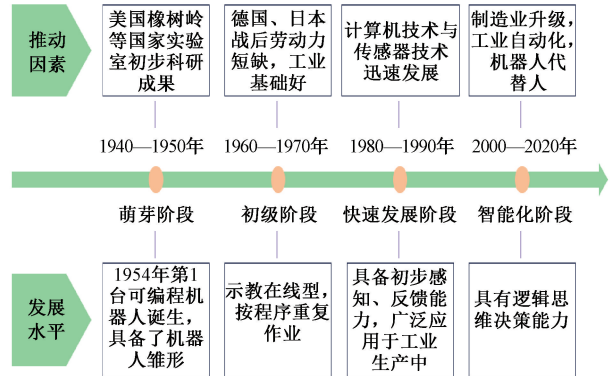


图 4 施工机器人的发展历程

Fig. 4 Development history of construction robots

随着技术进步、需求增加,建筑施工机器人开始在更多的任务和领域中出现。搬运机器人通常配备机械臂和传感器,可精确抓取、移动各种形状和质量的物体,代替人工搬运,减轻工人负担、提高工作效率。钻孔机器人根据预定坐标和参数,可在建筑物墙壁或地板上精确钻孔,通过内置算法检测、纠正钻孔位置和深度。此外,建筑施工机器人可执行焊接、装配等更复杂的任务。焊接机器人通过高精度运动控制和传感器反馈实现高质量焊接。装配机器人根据预定装配顺序和参数进行自动识别,并将门窗、墙壁板和管道等构件组装在一起,提高施工效率和准确性。应用在各行业的机器人数量均有增加,其中建筑工业机器人数量居高不下。

1982 年喷涂机器人 SSR-1 成功用于施工现场,被认为是世界上首台建筑机器人。随后掘进机 John Deeve 690C 用于修复被炸毁的跑道^[5]。麻省

理工学院的 Trackbot 和 Studbot 被用于墙体内部建设^[5]。建筑机器人种类不断增多,应用领域有混凝土预制大板生产线、钢筋骨架成型、模板组合与拆卸、大型容器组装、焊接及喷漆、混凝土布料、空调风管检查及清理、外墙饰面检查、地面压光与清扫等。

2010 年后,我国建筑机器人技术逐步成熟^[6-8],智能化和自主化成为发展趋势,建筑机器人企业顺势发展。根据 Martin Placek 统计数据,2021 年全球建筑机器人市场规模为 0.853 亿美元,预计 2022 年达 0.997 亿美元,2025 年全球建筑机器人市场达 2.26 亿美元^[6-7]。

在国家“十二五”科技支撑计划项目支持下,开发高空幕墙安装作业的机器人控制系统,研发六自由度高空幕墙安装机器人,通过建设部门鉴定,已达到国际先进水平^[9]。上海盈创建筑科技有限公司建造世界首套 3D 打印别墅和世界最高的 3D 打印楼房,研发出 3D 打印建筑机器人系统^[10]。此外,哈尔滨工业大学开发遥控式壁面爬行检查机器人,并用于建筑物和大型储罐等壁面检查及喷涂中。中国科学院开发的水下作业机器人已用于水下打捞及探测作业中,目前正开展挖掘型建筑机器人的研究工作。

1.3 发展趋势

1)智能自主、灵活协同化 随着人工智能和机器学习等技术发展,建筑施工机器人的自主性、智能化水平不断提高,通过学习和适应执行不同施工任务,并根据环境变化做出相应决策。近年来,建筑施工机器人不再是孤立工作的个体,而可以与其他机器人和工人协同工作。通过互相协作和信息共享,机器人可更好完成复杂的施工任务,提高工作效率和质量^[11]。自动化、智能化效果越来越明显,最终实现建筑施工作业与运行的完全自主化、智能化。

2)可重配置、作业模块化 近年来,装配式机器人开始采用模块化设计和可重配置技术,意味着机器人可根据不同任务需求进行重新配置和组装,以适应不同施工环境和任务要求。如机器人的机械臂根据作业需要更换工具头,以适应不同类型的施工任务^[12]。当下,机器人并不是单一作业,而是多种作业高质量随意切换。

3)安全可靠、精准高效化 建筑施工机器人将更多的先进技术融入机器人设计和控制中,以提高其安全性、可靠性,确保机器人在施工现场高效、安全、可靠运行。将激光雷达、红外线传感器和摄像

头等用于实时监测周围环境和障碍物,可具备更强大的自主避障能力,再配备先进的远程监控和控制系统,采用更智能化的机器学习技术,将不断优化自身性能和表现,持续提高机器人的安全性和可靠性。

4)故障检测和自愈、反馈灵敏化 通过引入传感技术、自动诊断算法、数据驱动的预防性维护等手段,提高机器人的故障处理能力和自愈能力,从而保障施工作业的连续性、高效性,使建筑施工机器人在复杂和变化的工作环境中更加稳定可靠工作。通过内置的自愈系统,能够在发生故障时自动修复至正常工作状态,通过采集大量的工作数据和运行状态信息,进行数据分析和挖掘,可提前预防故障发生。具备自动故障诊断能力,能根据故障特征和数据分析,快速确定故障原因,并提供相应的解决方案。

2 建筑施工机器人的技术分类

2.1 自主导航技术

自主导航包含定位、地图绘制、路径规划部分,如图 5 所示,是建筑施工机器人实现自主移动和定位的关键技术。激光雷达、视觉传感器、超声波传感器等感知设备通过对周围环境进行感知和建模,可实现自主导航^[13]。

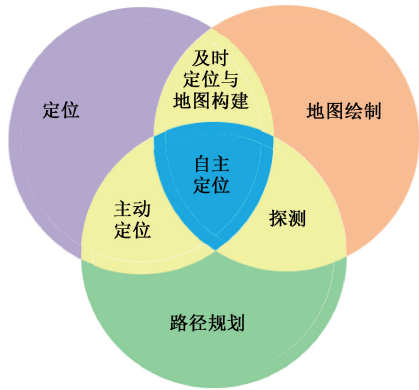


图 5 自主导航技术

Fig. 5 Technology of autonomous navigation

2.2 机械臂控制技术

机械臂控制技术是建筑施工机器人实现精确操作和灵活控制的关键技术,常见机械臂及其特点如表 1 所示。通过各种传感器和控制算法,机械臂可实现复杂运动和姿态调整,以适应不同施工任务。目前常用的可控弯曲微型机械臂已应用于手术拉钩、多自由度持镜等系统中。

机械臂末端位姿稳定可保证机器人执行施工任务时准确、精确控制末端工具或设备的位置和姿态,从而实现高质量施工效果,如图 6 所示,机械臂

末端装置、视觉传感器用于实时监测末端工具的位置和姿态。反馈控制技术根据传感器数据实时调整机械臂的控制信号,以保持末端位姿稳定。在机械臂末端设置安全保护装置,当机械臂末端遇到障碍物或异常情况时,能立即停止运动,确保施工安全。使用人工智能技术,如深度学习和强化学习,可使机械臂能够学习和优化控制策略,提高末端位姿稳定性和精度。



图 6 机械臂末端稳定位姿

Fig. 6 Stable position and attitude of the end of robot arm

2.3 传感器技术

建筑施工机器人依赖传感器获取环境信息和工作状态,如激光测距仪用于测量建筑物尺寸和形状,摄像头和视觉传感器用于识别和定位目标,力传感器用于控制机械臂施加的力度。机器人常用传感器如表 2 所示。传感器技术应加强建筑施工机

器人的感知、反馈能力,以实现对外部和任务执行过程中的实时感知与监测效果^[14]。

2.4 数据处理决策及其他相关技术

建筑施工机器人通过传感器收集环境数据,并将数据传至中央控制系统或云平台进行处理,通过数据处理和决策技术分析感知数据,做出最优决策和行动。同时在进行数据处理和决策时加强对数据的隐私保护,确保数据不被未授权访问和使用。

建筑施工机器人涉及其他相关技术,如用于机器人间的协同工作和数据传输的无线通信技术,用于模拟和仿真建筑施工场景的虚拟现实与增强现实技术,提升机器人的可操作性和人性化设计的人机交互技术,提高机器人的灵活性和精细度纳米技术等。

3 建筑施工机器人的应用领域展望

3.1 混凝土施工

1) 自动搅拌与输送 传统混凝土搅拌和输送需人工操作,工作强度大且效率低下。采用人工智能算法与建筑施工机器人融合技术,在混凝土搅拌和输送过程中,根据实时传感器数据和预设的混凝土配合比自动调整搅拌与输送参数,以实现最佳混凝土搅拌效果和输送效率。在搅拌过程中,使用数据分析和预测技术,对历史混凝土搅拌输送数据进行分析 and 建模,预测未来的施工需求和混凝土配合比,实现智能调控混凝土搅拌和输送过程,避免资

表 1 常见机械臂及其特点

Table 1 Common robotic arms and their characteristics

机械臂	自由度	功能	特点
直角坐标机械臂	—	每个方向运动解耦	每个方向运动解耦,运动学求算简单,结构不紧凑
Scara 机械臂	—	代替铰接式机器人	结构简单,占地面积更小,可靠性高,高速运行
关节机械臂	6 或 7	位置与姿态控制	灵活,但体型大、力矩有限
Delta 机械臂(并联)	3	位置控制	力矩很大,可高速运行,非常灵活
Stewart 机械臂(并联)	6	位置与姿态控制	继承并联机构优势,能提供很大力矩,适用于重型设备

表 2 机器人常用传感器

Table 2 Sensors commonly used in robots

传感器类型	探测距离/m	精度	功能	优点
激光雷达	>100	很高	动态障碍检测、识别与跟踪、路面检测、定位和导航、环境建模	功能强大,实时测量周围物体与自身距离,测量精度高
超声波	2~5	很高	通过发射、接收超声波测量目标物体的距离、位置,探测障碍物	精度达几毫米
摄像头	50	一般	利用计算机视觉判断周边环境、物体	目前唯一能够辨别物体的传感器
毫米波雷达	250	较高	感知大范围内车辆运行情况,多用于自适应导航系统	探测距离远,不受天气影响,性价比高
GPS	<3	高	探测低速环境,常用于自动泊车系统	可探测绝大部分物体,具有较高稳定性

源浪费和施工延误。通过自然语言处理技术,使用语音指令或图像交互功能,实现操作员与机器人的沟通和控制,并简化操作流程,提高施工灵活性和效率。通过不断优化机器学习技术,逐渐提高混凝土搅拌和输送的自动化水平与精确度。机器学习技术可以让机器人根据不同施工场景和需求,自主选择最佳的搅拌和输送方案。

2) 自动浇筑与抹平 传统混凝土浇筑和抹平作业需要大量人工,易出现不均匀、不平整的问题。施工机器人融合机器视觉技术,通过摄像头和传感器感知、识别施工场地情况,利用计算机视觉算法实时获取施工场地信息,并根据需要调整浇筑和抹平的位置、姿态。通过自动路径规划算法,根据浇筑、抹平的任务需求,自主选择最佳施工路径和运动轨迹,避免碰撞及重复运动,提高施工效率和精度。使用机器学习技术,对历史施工数据进行学习、分析,不断优化浇筑和抹平的动作、速度,实现施工过程自动化、智能化,提高施工稳定性和一致性。根据传感器数据和算法反馈对控制系统发出指令,实时控制、调整浇筑和抹平过程,以确保施工准确性和质量,并及时处理施工中的异常情况。通过分析和处理施工过程中收集的大量数据,从中提取有效信息和模式,为施工优化和决策提供参考,实现施工过程持续改进和优化。

3) 自动养护与处理 混凝土浇筑后需进行一定养护和处理工作,传统方式需耗费大量人力和时间,建筑施工机器人配备温度、湿度、振动传感器,用于实时监测建筑结构的性能和性能,以及混凝土养护过程中存在的裂缝和损伤等情况。通过自动收集、分析大量结构的健康状态、养护历史、使用情况等数据,识别潜在问题和异常,预测结构寿命和养护需求。从历史数据中学习建筑结构的养护规律,以构建养护模型,预测未来结构养护需求,制定有效养护计划。基于传感器数据和机器学习模型,机器人可自主决策养护方案,并规划养护路径。

建筑施工机器人在混凝土施工应用领域向更加智能化、智慧化的方向发展。随着技术创新和应用,建筑施工机器人将成为混凝土施工领域的得力助手,推动建筑业升级和发展。然而,同时也需充分考虑安全性和可行性等因素,在实际应用中应做好充分规划和评估。

3.2 砖墙施工

传统砖墙施工需人工搬运、砌筑和抹平,而建筑施工机器人能提高施工效率和质量,降低劳动力成本和风险。

1) 自动砖块搬运 建筑施工机器人通过机械臂、输送带等装置实现砖块自动搬运,大大提高施工效率、减轻人工负担。基于视觉传感器和摄像头,通过机器视觉技术实时识别与感知砖块位置、尺寸和形状。通过深度学习算法,机器人可对砖块进行检测、识别,确定砖块位置和方向。同时实时监测施工环境,根据障碍物和施工进度等信息,动态调整搬运路径,确保施工高效安全。多台机器人通过协作与系统集成,实现砖块搬运高效自动化。

2) 自动砌筑和定位 建筑施工机器人基于视觉感知数据和建筑设计模型,使用导航技术精确定位自身和目标位置,根据检测到的砖块位置和方向,精确抓取和搬运砖块。利用激光测距仪、全球定位系统等技术,确定自身位置和砖墙施工目标。基于智能决策算法和机器学习技术,可根据实时数据进行智能化决策和优化。

3) 自动抹灰 机器人基于机器视觉技术可实时识别和感知砖墙表面凹凸不平、缺陷等情况,通过深度学习算法检测和识别砖墙表面,确定需抹灰的位置,精确进行涂抹操作。通过智能决策算法和机器学习技术,根据实时数据进行智能化决策和优化,根据需要进行调整和修正,确保抹灰效果符合要求。

3.3 钢筋焊接

机器人根据设计要求和钢筋布置图可自动识别和定位钢筋,并使用焊接设备进行精确焊接,减少焊工劳动强度和焊接时间,确保焊缝质量。如图 7 所示,基于 1968—2019 年焊接机器人专利申请数量研究发现,2019 年专利申请数量达 693 件。可预见,随着人工智能和网络相关技术发展,爬行焊接机器人专利数量将呈快速增加的势头。

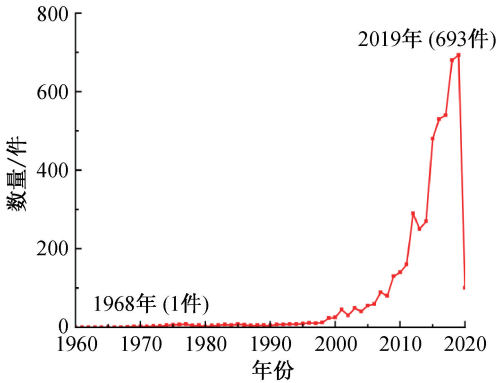


图 7 爬行焊接机器人全球专利申请趋势

Fig. 7 Global patent application trend of crawling welding robots

1) 钢筋自动切割 建筑施工机器人基于机器

视觉技术,对钢筋进行实时图像识别和检测,以确定切割位置和尺寸。同时,将机器人配备激光切割装置,利用激光技术精确切割钢筋。通过传感器实时监测切割过程数据,根据需要进行调整和修正,确保切割准确性和一致性,根据实时数据进行智能化决策和优化,确保切割质量和效率。

2) 钢筋焊接点定位 基于高分辨率的摄像头和机器视觉系统,经过图像处理和分析,可实时识别和定位钢筋焊接点。通过深度学习算法,机器人可检测和识别钢筋焊接点,包括判断焊接点位置、形状和角度等。利用激光扫描传感器的激光技术,对钢筋焊接点进行三维扫描,从而实现精确定位。

3) 自动焊接 建筑施工机器人基于焊接点的检测结果,自动规划焊接路径,确保焊接准确高效。

3.4 拆除和清理及其他应用领域

建筑施工机器人基于机器视觉系统,实时感知周围环境和识别建筑物的结构、材料、位置。通过深度学习算法,机器人可学习、识别不同类型的建筑结构材料与材料,实现精确拆除和清理。导航系统可精确定位拆除和清理的目标位置,规划最优路径和动作。超声波传感器可感知周围障碍物和危险区域,实现自动避障,保证施工安全。人机交互技术可远程监控、控制机器人的拆除和清理工作,并通过数据分析和反馈,优化拆除、清理过程和结果。

建筑施工机器人还被用于建筑物涂漆和喷涂作业中,提高施工速度和涂层质量。并应用于建筑物装修和装饰中,如贴墙纸、瓷砖和装饰板等。此外,还用于建筑物的维护保养中,如清洁玻璃幕墙、维修外墙涂层等。

4 建筑施工机器人的挑战

4.1 复杂施工环境

施工现场面临天气变化大、材料供应延误、人力资源变化大等不确定性因素,影响机器人工作计划和效率。在施工现场空间狭小的条件下,机器人需解决在有限空间内精准定位、精准作业的问题。建筑施工涉及搅拌、浇筑、抹灰、焊接等工艺,机器人需提高施工工艺的适应性^[15],以及机器人运动底盘多作业场景的适配能力。

4.2 智能控制和协作

在复杂的施工环境中,建筑施工机器人需要解决智能控制问题,对周围环境进行感知和理解,自主决策和规划最优施工路径和动作序列,以最大程度提高施工效率和精度。此外,机器人还需解决与其他机器人或人员的通信协调问题,使多台机器人共同合作,以实现高效施工作业。作业环境中建议

测试多种控制协作算法,以严格控制机器人姿态,保障作业精度,且应增加数据集训练,以提高控制精度。

4.3 技术成本和可行性挑战

建筑施工机器人的研发、制造和维护成本较高。先进的传感器、控制系统和人工智能算法需要昂贵的投入,且机器人设计和制造过程需大量研发和生产成本。此外,随着技术不断更新和升级,机器人维护和升级费用增加。当前建筑施工机器人在适应性方面还存在局限性,机器人只适用于特定类型的施工任务,无法适应多样化的工程要求。机器人研发需集成机械、电气、自动控制、人工智能等技术,由此增加技术难度和成本,故研发前应做好充足的现场调研。

4.4 社会接受与法律法规限制

建筑施工机器人的应用需遵守相关规范、法规。部分国家、地区对机器人的使用有一定限制和标准,需满足相关认证和审批要求,增加技术可行性和商业化应用难度。同时,建筑施工机器人的广泛应用将面临社会接受度的挑战,如担心人力失业及其他社会问题。此外,法律法规对机器人的使用和操作也存在限制和规范,需遵守相关安全标准和规定,确保机器人的合法性和安全性。在拓展阶段,应提高工人对建筑施工机器人的认知与接受度,推动机器人在建筑业的广泛应用。

要克服这些挑战,需持续的研发和创新,提高机器人技术水平和性能,降低成本,提高可靠性和安全性。同时,还需制定相关法律法规和进行社会宣传,增加人们对建筑施工机器人的认知与接受度。

5 建筑施工机器人的发展趋势

1) 关键技术突破 建筑施工机器人的发展侧重于关键技术突破,如智能感知技术,通过高精度传感器和感知系统,机器人可实时获取建筑结构、障碍物、工人位置的信息,用于导航定位、避障规划和施工任务执行,使机器人能够智能应对不同施工场景。机械臂控制和运动技术采用电动伺服控制技术,实现高精度运动控制和多自由度操作。采用人工智能和机器学习技术,对大量施工数据进行分析和学习,使机器人不断优化其行为和决策,提高自主性和智能化程度。

2) 潜在应用领域拓展 除传统砌砖、混凝土浇筑等任务,机器人还可用于其他施工环节,如钢筋绑扎、墙面涂装、与施工工人的协同作业中等。此外,机器人可应用于特殊施工场景,如高空施工、隧道施工、水下施工等,以解决传统施工方法难以实

现的问题。

3) 人机协作与智能化发展 人机协作技术实现机器人与工人共同完成复杂施工任务,如机器人承担繁琐和高危作业,而工人专注于技术指导和质量控制等复杂任务。此外,能够根据施工环境和要求进行自主调整和优化施工方案。

6 结语

本文对建筑施工机器人的发展趋势进行深入探讨。首先,指出关键技术在机器人发展中的重要性,讨论感知、决策和操作等关键技术。其次,扩展建筑施工机器人应用领域,涵盖传统和特殊场景下的施工任务。最后,重点强调人机协作和智能化发展在机器人发展中的重要性,并提出相应发展方向。

建筑施工机器人的应用前景非常广阔。首先,随着关键技术的突破,建筑施工机器人的性能得到进一步提升,可适应更复杂和多样化的施工任务。其次,随着在潜在应用领域中的拓展,建筑施工机器人可解决传统施工方法难以解决的问题。最后,人机协作和智能化发展促进机器人与工人的紧密合作,实现高效安全的施工过程。

未来,建筑施工机器人有望成为建筑施工领域的重要力量,改变传统施工方式。同时,建筑施工机器人的发展还将带来新的就业机会和经济效益,促进产业升级、社会进步。

综上所述,建筑施工机器人具有广阔的前景和重要的应用价值。未来发展需要持续的技术创新和跨界合作,以推动建筑施工机器人的快速发展。

参考文献:

[1] XU Z, SONG T, GUO S, et al. Robotics technologies aided for 3D printing in construction: A review [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2022, 118: 3559-3574.

[2] DIEHL W, QUANTMEYER F, LIU H X. Model-based development of algorithms for a battery-management system [J]. Solid state phenomena, 2015, 3433:220-221.

[3] CAI S Y, MA Z L, SKIBNIEWSKI, et al. Construction automation and robotics for high-rise buildings: Development priorities and key challenges [J]. Journal of construction engineering and management, 2020, 146(8):4020096.

[4] JUAN M, DAVILA D, LUKUMON O. Robotics in construction: A critical review of the reinforcement learning and imitation learning paradigms [J]. Advanced engineering informatics,

2022,54:3-7.

[5] 马宏,侯满哲,郭全花,等. 关于建筑机器人的研究 [J]. 河北建筑工程学院学报, 2015, 33(3):81-84.

MA H, HOU M Z, GUO Q H, et al. Research on construction robots [J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2015, 33(3):81-84.

[6] 王哲,冯晓辉,李艺铭,等. 智能机器人产业的现状与未来 [J]. 人工智能,2018(3):12-27.

WANG Z, FENG X H, LI Y M, et al. Current situation and future of intelligent robot industry [J]. AI-view, 2018 (3): 12-27. .

[7] 桂仲成,吴建东. 全球机器人产业现状趋势研究及中国机器人产业发展预测 [J]. 东方电气评论, 2014, 28(4):4-10.

GUI Z C, WU J D. Research on current situation and trend of global robot industry and development forecast of Chinese robot industry [J]. Dongfang electric review, 2014, 28(4):4-10.

[8] Tractica report: Construction robotics market to hit \$ 226 million worldwide by 2025 [J]. Wireless news, 2019.

[9] 岳建章. 高空智能幕墙安装机器人人机协同控制系统研究 [D]. 天津:河北工业大学,2023.

YUE J Z. Research on man-machine cooperative control system of intelligent curtain wall installation robot at high altitude [D]. Tianjin:Heibei University of Technology, 2023.

[10] 中国科学技术协会. 控制科学与工程学科发展报告 [M]. 北京:中国科学技术出版社,2011.

China Society and Technology Association. Development report of control science and engineering discipline [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011.

[11] TEHRANI, BEHNAM M, CAGRI G O. A decision support system for the integration of robotics in offsite construction [C]// Construction Research Congress 2022, 2022.

[12] TEHRANI M, BUHAMDAN B, ALWISY S. Robotics in assembly-based industrialized construction: A narrative review and a look forward [J]. Internation journal of intelligent robotics and applications, 2023,7:556-574.

[13] JALAS P. Information modeling of an underground laboratory for the R&D of mining automation and tunnel construction robotics [C]//34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction,2018.

[14] OKE A E, J ALIU, FADAMIRO P, et al. Robotics and automation for sustainable construction: Microscoping the barriers to implementation [J]. Smart and sustainable built environment, 2023,4,11147586.

[15] SARDROUD, JAVAD M. Barriers analysis to effective implementation of BIM in the construction industry [C]//35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC),2018.