

建筑施工中机器人技术的应用与发展

张雪芹 汪黎 张继丁 魏焱润 张皓翔
重庆市建筑科学研究院有限公司 重庆 400016

摘要：随着建筑行业向智能化转型，机器人技术正逐步打破传统施工模式的局限。本文聚焦建筑施工中机器人技术的应用与发展。首先概述建筑施工机器人的基本概念，接着深入剖析其关键技术，涵盖感知与定位、自主导航等多方面。随后详细阐述机器人在砌筑、混凝土施工等建筑施工各环节的具体应用情况。最后对建筑施工机器人未来发展趋势进行展望，指出其应用领域将不断拓展、智能化水平持续提高、协同作业渐成主流且朝着绿色低碳方向发展，旨在为建筑施工机器人技术的进一步研究与应用提供参考。

关键词：建筑施工；机器人技术；具体应用；发展趋势

引言：在科技飞速发展的当下，建筑行业正经历着深刻变革。传统建筑施工模式面临劳动强度大、效率不高、质量参差不齐以及安全风险多等诸多问题。而机器人技术的兴起为建筑行业带来了新的发展契机。建筑施工机器人凭借其高效、精准、安全等优势，逐渐在建筑领域崭露头角。从简单重复的砌筑作业到复杂危险的高空施工，机器人的应用范围不断扩大。深入研究建筑施工中机器人技术的应用与发展，对于推动建筑行业转型升级、提升建筑质量与效率、保障施工安全具有重要意义。

1 建筑施工中机器人的概述

建筑施工机器人是专门为建筑领域设计开发，能够部分或完全替代人工完成各类建筑施工任务的智能机械装置。它是多学科技术融合的产物，集机械设计、电子工程、计算机科学、传感器技术、人工智能等众多先进技术于一身。与传统建筑施工方式相比，建筑施工机器人具有显著优势。在效率方面，它能不知疲倦地连续作业，大大缩短施工周期，提升工程进度。精度上，凭借高精度的传感器和先进的控制系统，可实现精准操作，减少人为误差，保证施工质量。安全性上，对于一些危险系数高、劳动强度大的施工环节，如高空作业、深基坑作业等，机器人能够替代人工，降低安全事故发生的概率。随着建筑行业对高效、优质、安全施工的需求日益增长，以及科技水平的不断进步，建筑施工

基金项目：重庆市建设科技计划项目（城科字2024第3-21）；重庆设计集团关键技术类项目（2023-C3）。

参与人：张雪芹、汪黎、张继丁、魏焱润、张皓翔

作者简介：张雪芹（1968），男，博士，担任重庆市建筑科学研究院有限公司博士后导师，研究方向：建筑科学技术研究、检测技术与结构鉴定，建筑与房地产管理、工程监理与造价咨询等。

机器人的研发与应用愈发受到重视。从最初的概念设想逐步走向实际应用，并在不同类型的建筑项目中发挥着越来越重要的作用，成为推动建筑行业现代化发展的重要力量^[1]。

2 建筑施工中的机器人关键技术

2.1 感知与定位技术

建筑施工机器人的感知与定位技术是其精准作业的基石。感知技术依赖多种传感器获取环境信息，视觉传感器可捕捉图像与视频，通过图像识别算法分析建筑结构、材料特征等；激光雷达能发射激光束并测量反射时间，生成高精度的三维点云数据，精准感知周围障碍物的位置与形状；超声波传感器则用于近距离障碍物检测，辅助机器人避障。定位技术确保机器人在复杂施工场景中明确自身位置，全球定位系统（GPS）适用于室外开阔环境，提供大致位置信息；室内或遮挡环境下，超宽带（UWB）定位、惯性导航系统（INS）等发挥作用，UWB通过测量信号飞行时间实现高精度定位，INS利用加速度计和陀螺仪计算位置变化。多传感器融合是关键，将不同传感器的数据进行整合与互补，去除噪声干扰，提高感知与定位的准确性和可靠性，使机器人能在动态变化的施工环境中稳定运行，为后续的自主导航和作业执行提供精准的数据支持。

2.2 自主导航技术

自主导航技术赋予建筑施工机器人在复杂环境中自主移动的能力。路径规划是核心环节，分为全局路径规划和局部路径规划。全局路径规划基于预先构建的建筑环境地图，运用算法（如A*算法、Dijkstra算法）规划出从起点到终点的最优路径，考虑施工区域的布局、障碍物分布等因素。局部路径规划则针对实时感知到的动态障碍物，如移动的施工人员、设备等，快速调整路径以

避免碰撞。避障技术通过传感器实时监测周围环境，当检测到障碍物时，根据障碍物的距离、速度等信息，采取减速、绕行或停止等策略。同时，自主导航还需具备定位修正能力，在移动过程中不断更新自身位置信息，确保路径跟随的准确性。

2.3 驱动与控制技术

驱动与控制技术是建筑施工机器人实现各种动作和功能的关键。驱动系统为机器人提供动力，常见的驱动方式有电动驱动、液压驱动和气动驱动。电动驱动具有控制精度高、响应速度快等优点，适用于需要精确位置和速度控制的场景；液压驱动力量大，适合承载重物和进行大力矩操作；气动驱动结构简单、成本低，常用于一些对精度要求不高但需要快速动作的场合。控制系统则根据预设的程序和传感器反馈的信息，对驱动系统进行精确控制。它采用先进的控制算法，如比例-积分-微分（PID）控制、模糊控制等，实现对机器人关节角度、速度、力等的精确调节。分布式控制系统将控制功能分散到多个模块中，提高系统的可靠性和可扩展性。

2.4 施工作业执行技术

施工作业执行技术直接关系到建筑施工机器人的实际作业效果。针对不同的施工任务，机器人配备了专门的作业工具和执行机构。在砌筑作业中，机器人通过机械臂和末端执行器实现砖块的抓取、搬运和砌筑，要求具备高精度的定位和力控制能力，以确保砖块的位置准确和砌筑质量。混凝土施工环节，机器人需完成混凝土的搅拌、输送和浇筑等任务，需要精确控制混凝土的流量、速度和浇筑高度，避免出现离析、漏浆等问题。钢筋加工与安装环节，机器人要实现钢筋的切割、弯曲、焊接和绑扎等操作，对加工精度和焊接质量有严格要求。装饰装修作业中，机器人需进行墙面喷涂、地面铺设等工作，需要保证表面的平整度和均匀度。高空作业环节，机器人要具备稳定的附着和移动能力，同时确保作业安全。

2.5 数据融合与分析技术

数据融合与分析技术在建筑施工机器人中发挥着重要作用。建筑施工过程中，机器人会产生大量的数据，包括传感器数据、作业日志、设备状态信息等。数据融合技术将这些来自不同来源、不同格式的数据进行整合和处理，去除冗余和错误信息，提取有价值的数据特征。通过多传感器数据融合，可以提高数据的准确性和可靠性，为机器人的决策提供更全面的依据。数据分析技术则对融合后的数据进行深入挖掘和分析，运用统计学方法、机器学习算法等，发现数据中的规律和趋势。

对施工进度数据的分析，可以优化施工计划，提高施工效率。数据可视化技术将分析结果以直观的图表、报表等形式呈现，方便管理人员和操作人员理解和决策。数据融合与分析技术的应用，有助于实现建筑施工的智能化管理和优化，提高工程质量和社会效益。

3 机器人技术在建筑施工各环节的具体应用

3.1 砌筑环节

在砌筑环节，机器人凭借精准的定位与高效的作业能力，革新了传统砌筑模式。其通过先进的视觉识别系统，可快速识别砖块尺寸、形状及摆放位置，自动规划最优砌筑路径。机械臂搭载高精度传感器，能精确控制抓取力度与砌筑角度，确保砖块紧密贴合，灰缝均匀一致，有效提升砌筑质量。同时，机器人可不知疲倦地连续作业，不受疲劳、环境等因素影响，显著提高砌筑效率。此外，部分砌筑机器人还具备自动上料功能，与物料输送系统无缝对接，减少人工搬运环节，降低劳动强度。

3.2 混凝土施工环节

混凝土施工环节中，机器人技术实现了浇筑、振捣、抹平等工序的自动化与智能化。在浇筑环节，混凝土布料机器人可根据预设程序，精准控制混凝土浇筑位置与流量，确保混凝土均匀分布，避免出现离析现象。振捣机器人则利用高频振动装置，深入混凝土内部，有效排除气泡，提高混凝土密实度，增强结构强度。抹平环节，智能抹平机器人通过激光定位与传感器反馈，实时调整抹平高度与力度，使混凝土表面平整度达到极高标准，减少人工抹平的误差与不均匀性^[2]。

3.3 钢筋加工与安装环节

钢筋加工与安装环节，机器人技术大幅提升了加工精度与安装效率。在钢筋加工方面，智能钢筋切断机、弯曲机等设备，通过预设程序与高精度传感器，可精确控制钢筋的切断长度与弯曲角度，加工出的钢筋尺寸误差极小，满足严格的质量要求。钢筋安装环节，机器人利用机械臂与夹具，可快速准确地抓取、搬运钢筋，并按照设计要求进行定位与固定。部分先进的钢筋安装机器人还具备自动识别钢筋型号与位置的功能，通过与BIM模型的对比，及时发现并纠正安装偏差，确保钢筋工程的准确性与稳定性。

3.4 装饰装修环节

装饰装修环节中，机器人技术为施工带来了更高的精度与效率。墙面装饰方面，喷涂机器人可自动调配涂料，通过精确控制喷枪压力与移动速度，实现均匀喷涂，避免出现流坠、起皮等质量问题，且施工速度快，能大幅缩短工期。地面施工环节，地坪研磨机器人利用激光

导航与智能控制系统，按照预设路径进行研磨作业，确保地面平整度与光洁度达到高标准。瓷砖铺贴机器人则通过视觉识别与定位技术，准确计算瓷砖位置与角度，自动完成铺贴与勾缝工作，铺贴质量高，缝隙均匀。

3.5 高空作业环节

高空作业环节危险性高，机器人技术的应用有效降低了安全风险。高空清洁机器人可吸附在建筑物外墙，通过旋转刷头与喷水装置，自动完成墙面清洁工作，无需人工攀爬，保障了清洁人员的安全。高空检测机器人搭载高清摄像头与传感器，可对建筑物外墙、屋顶等进行全面检测，及时发现裂缝、渗漏等隐患，并将检测数据实时传输至控制中心，为维修提供准确依据。在钢结构安装与维护中，高空作业机器人可借助磁吸附或机械夹具，在钢结构表面灵活移动，完成螺栓紧固、焊接等任务，提高施工效率与质量。机器人高空作业不受天气、高度等因素限制，可全天候、高效率地完成各项任务，为建筑施工安全与质量提供有力保障。

4 建筑施工机器人未来发展趋势

4.1 应用领域不断拓展

未来建筑施工机器人的应用将突破传统边界，向更多细分领域和复杂场景延伸。除常规的砌筑、混凝土浇筑等环节，机器人将深度参与地下空间开发、超高层建筑建设、历史建筑修复等复杂工程。在应急抢险与灾后重建中，具备快速部署和灵活作业能力的机器人将发挥关键作用。同时，随着太空探索和深海开发的推进，建筑机器人有望在极端环境下执行空间站建设、海底隧道施工等任务，拓展人类建造活动的空间维度，满足多样化、高难度的建设需求。

4.2 智能化水平不断提高

人工智能、大数据、物联网等前沿技术将深度融入建筑施工机器人，推动其向高度智能化发展。机器人将具备更强的环境感知能力，通过多传感器融合实时获取施工场景信息，实现自主决策与精准操作。借助机器学习算法，机器人可不断优化施工工艺，提升作业效率与质量。此外，数字孪生技术将使机器人实现虚拟与现实世界的交互，提前模拟施工过程，预测潜在问题，为施工方案的优化提供科学依据，实现真正意义上的智能建造。

4.3 协同作业成为主流

未来建筑施工将呈现多机器人协同作业的常态化模式。不同类型的机器人将根据各自功能特点，通过统一的通信协议和数据平台实现无缝对接与高效协作。例如，运输机器人与施工机器人协同，确保物料及时供应；检测机器人与维修机器人联动，实时监测设备状态并快速修复故障。这种协同作业模式将打破单一机器人的作业局限，形成完整的施工生态系统，大幅提升施工效率、降低成本，并增强施工过程的灵活性与适应性。

4.4 绿色低碳发展

在“双碳”目标驱动下，建筑施工机器人将朝着绿色低碳方向加速转型。机器人将采用清洁能源动力，减少施工过程中的碳排放。同时，通过精准作业和智能控制，降低材料浪费和能源消耗，提高资源利用效率。例如，智能喷涂机器人可精确控制涂料用量，减少过量喷涂造成的污染；混凝土搅拌机器人可根据实际需求精准配料，避免原材料浪费。此外，机器人还将助力建筑废弃物的回收再利用，推动建筑行业实现可持续发展^[3]。

结束语

建筑施工中机器人技术的应用与发展，是时代进步与科技革新的生动写照。它以高效、精准、安全的优势，为传统建筑业注入全新活力，推动着行业向智能化、现代化大步迈进。从单一环节的初步应用到全流程的协同作业，从简单的自动化操作到复杂的智能决策，机器人的身影愈发活跃。展望未来，随着技术的持续突破与创新，建筑施工机器人必将拓展更广阔的应用空间，实现更深度的人机融合。我们有理由相信，在机器人的助力下，建筑施工将迈向更高质量、更低能耗、更可持续的新阶段，绘就建筑行业发展的崭新蓝图。

参考文献

- [1]张皓涵.建筑施工机器人技术的应用与发展[J].广东建材,2021,37(08):74-78.
- [2]李朋昊,李朱峰,益田正,喜冠南.建筑机器人应用与发展[J].机械设计与研究,2021,34(06):25-29
- [3]武士炳.建筑施工行业互联网应用发展趋势[J].中国标准化,2022(12):131-132.