

装配式建筑与机器人协同施工研究

杨阳 李晓东

青岛西海岸新区自然资源局, 山东青岛, 266520;

摘要: 本研究聚焦于建筑业劳动力短缺与双碳目标背景下, 如何突破装配式建筑施工效率瓶颈并融合机器人技术这一核心问题。通过构建“感知-决策-执行”协同施工框架, 系统研究了 BIM 与机器人操作系统 (ROS) 间的实时信息桥、部品与机器人末端的匹配规则、多机器人任务分配及人机安全交互等关键接口技术。基于现场对比实验与系统动力学建模, 量化评估了人机协同模式在工期、精度与碳排放等方面的综合效益, 并明确了其规模化应用的经济临界条件。研究成果为推动装配式建筑向智能化、高效化与低碳化转型提供了系统的理论方法与实践依据。

关键词: 装配式建筑; 人机协同; 信息物理融合; 智能建造

DOI: 10.69979/3029-2727.26.02.019

绪论

在当前劳动力短缺、双碳目标与智能建造政策的共同驱动下, 装配式建筑成为建筑业转型的重要方向, 但其施工效率仍受制于工序衔接与人为因素制约。同时, 建筑机器人虽在感知、规划等单点技术上不断成熟, 却面临与现场施工流程深度协同不足的挑战, 存在明显的技术应用落差。因此, 本文旨在研究装配式建筑与机器人的协同施工机理, 通过构建“感知-决策-执行”协同框架, 重点解决部品-机器人接口匹配、信息实时交互与多机协同决策等关键科学问题, 并建立涵盖工期、精度与碳排放的效益测度体系。研究将采用理论建模、软硬件开发与现场实验验证相结合的技术路线, 系统探索人机协同的优化路径与推广条件, 以推动装配式施工向智能化、高效化与低碳化发展。

1 文献综述与协同框架构建

1.1 装配式建筑技术发展脉络与工效制约因素

装配式建筑技术经历了从预制混凝土构件到模块化集成的发展脉络, 在标准化设计、工厂化生产方面已形成体系。然而, 现场施工工效仍面临显著制约: 其一, 设计与生产环节的标准化尚未完全传导至装配环节, 大量吊装、定位、连接作业仍依赖人工经验和协作, 工序衔接易出现等待与误差; 其二, 现场环境动态复杂, 构件容差与定位精度的不匹配常导致返工, 机械化与自动化程度不足成为提升整体效率的关键瓶颈。这些因素制约了装配式建筑在工期、成本与质量方面的预期优势。

1.2 建筑机器人研究热点: 感知、规划、末端执行

当前研究多聚焦于机器人单体技术或静态施工流程优化, 缺乏对“信息-物理-人”三元深度耦合的动态

建模。这导致在真实施工场景中, BIM 信息流难以实时驱动机器人物理作业, 人的决策与干预也无法高效融入自动化闭环。信息层、物理设备层与人员作业层之间缺少能处理动态交互、冲突消解与协同演进的统一模型, 构成了从理论技术迈向规模化协同应用的核心研究空白。

1.3 协同施工研究空白: 信息-物理-人耦合模型缺失

现有研究多集中于机器人单体性能或静态工序优化, 尚未建立能够深度融合信息流、物理设备与人员决策的动态耦合模型。具体表现为: 基于 BIM 的设计信息难以实时转化为机器人的自适应作业指令, 而施工人员的经验判断与突发干预也无法通过有效接口反馈至自动化控制回路。这种“信息-物理-人”三者的割裂, 使得协同系统缺乏应对现场不确定性、进行动态冲突消解与效能优化能力, 成为实现高效人机协同施工的核心理论瓶颈。

1.4 协同框架: 三层架构 (感知层-决策层-执行层) 与评价指标体系

针对现有“信息-物理-人”耦合模型的缺失, 本研究提出一个由“感知-决策-执行”三层构成的协同框架, 其设计参考了面向无人化建造的智能体分层架构思路^[1]。该框架旨在通过统一的信息中枢 (如 BIM 与机器人操作系统桥接) 整合环境与机器人实时数据 (感知层), 驱动多智能体任务规划与动态决策 (决策层), 并最终精确控制机器人集群的物理作业 (执行层)。为量化协同效能, 框架配套一个涵盖时间、成本、质量、安全与碳排放的多维评价指标体系, 以为第五章的综合效益评估提供基准。

2 协同施工关键接口与信息建模

2.1 部品部件标准化-机器人末端匹配规则库

为实现机器人与多样化建筑构件的精准交互,构建“部品部件标准化-机器人末端匹配规则库”是协同施工的基础。该规则库的核心是将预制构件的标准化设计参数(如尺寸、重量、预埋件类型与位置)映射为机器人末端执行器的具体选型、抓取姿态与作业参数。通过建立构件编码与执行器型号、夹持力、路径规划模板的对应关系,形成数字化交互规则,从而将上游 BIM 设计数据自动转化为下游机器人可理解、可执行的标准化作业指令,从源头打通信息流与物理作业的壁垒。

2.2 基于 BIM-ROS 的实时信息桥与轻量级消息协议

为解决 BIM 设计信息与 ROS 机器人控制系统之间的数据壁垒,构建高效的实时信息桥是关键。研究表明,可通过引入“机器人施工动作节点(RCAN)”等中间层系统,将 IFC 格式的 BIM 构件信息与施工流程语义关联,并转换为 ROS 可解析的机器人任务指令,从而实现设计信息对建造过程的动态驱动^[2]。在此基础上,制定一种基于关键状态更新的轻量级消息协议,能显著减少网络传输负载,保障多机器人协同作业的实时性与可靠性,为动态施工环境下的信息-物理同步提供底层支撑。

2.3 多机器人任务分配模型:改进合同网+时空冲突约束

在动态的装配式施工现场,为实现多机器人的高效协同,本研究构建了融合时空约束的改进合同网任务分配模型。该模型将来自 BIM 的构件吊装序列转化为任务集,在传统合同网的招标-投标机制中,为每个任务和机器人嵌入其作业所需的区域与时间窗作为约束条件。通过引入冲突检测与消解算法,模型能在任务投标阶段即预判并规避机器人间的路径交叉与资源争抢,从而生成无冲突、高效率的分布式任务分配方案,保障墙板安装等流水线作业的顺畅进行。

2.4 人机混合安全域:数字围栏与可穿戴预警硬件

为保障人机协同施工安全,本研究构建了“人机混合安全域”体系,其核心由动态数字围栏与智能可穿戴硬件协同构成。基于 BIM 模型与机器人实时位姿,系统在虚拟施工场景中为每作业机器人动态划分核心作业区、缓冲预警区及绝对禁入区等多层安全域。现场人员佩戴集成 UWB 定位与振动警报的智能手环,当其进入动态缓冲预警区时,手环会发出触觉与视觉警示;一旦接近禁入区,系统将同时向人员发出强烈警报并向

机器人发送降速或暂停指令,从而实现主动、实时的碰撞预防。

3 机器人作业单元优化与现场验证

3.1 典型工序识别:墙板抓取-对位-临时固定-灌浆

针对机器人协同施工的关键场景,第四章聚焦于预制墙板安装这一典型工序的机器人化实现。基于装配式建筑的标准施工工艺,本章将墙板安装流程提炼并分解为四个可被机器人独立或协同执行的标准化工序:抓取、对位、临时固定与灌浆。其中,高精度的“对位”是保障后续灌浆连接质量的核心,也是机器人视觉与力控能力的主要挑战^[3]。对这四个工序的识别与建模,为后续运动规划与末端执行器的优化设计(4.2 与 4.3 节)提供了明确的对象与性能目标。

3.2 运动规划:基于 Bézier-GA 的免碰撞路径与能耗双目标

为优化预制墙板安装机器人的运动效能,本节提出一种基于 Bézier 曲线与遗传算法(GA)的双目标运动规划方法。该方法利用 Bézier 曲线的几何特性生成平滑的初始路径,有效减少机器人关节的冲击与构件的晃动。在此基础上,构建以路径总长度(关联能耗)和与障碍物最小距离为核心的双目标优化函数,通过遗传算法进行迭代求解,最终在动态的施工场景中,为机器人规划出一条兼顾低能耗与高安全性的无碰撞最优运动轨迹。

3.3 末端执行器快速换装机构设计:5 kg 级轻量锁付模组

为实现机器人对不同作业任务(如抓取与锁付)的快速响应,末端执行器的快速换装机构设计至关重要。针对装配式施工现场墙板安装的锁付工序,本研究设计了一款 5 kg 级的轻量锁付模组^[4]。该模组集成了电批与螺丝吸附功能,并通过一个无需外部电源、手动操作的标准化快换接口(如 MC-10)与机械臂末端连接。这种设计使得机器人在完成墙板抓取、对位后,能快速切换至锁付模组进行高效、精准的螺丝锁固作业,显著提升工序衔接的自动化与柔性。

3.4 现场对比实验:某装配式住宅项目,30 m² 标准单元,人工 vs 协同,工期-精度-碳排三维指标

为验证机器人协同施工体系的综合效能,本研究在某一装配式住宅项目中,选取一个 30 m² 的标准户型单元进行现场对比实验。实验设置纯人工组与人机协同组,在完成相同墙板安装任务后,从工期、安装精度与碳排放三个维度进行定量评估。初步结果表明,协同组在施工效率上具有显著优势,施工精度可稳定控制在毫米级,并有助于降低现场施工的碳排放。该实验为第五章的综

合效益评估提供了关键的实证数据基础。

4 协同施工综合效益评估与敏感性分析

4.1 评价维度：时间-成本-质量-安全-碳排

为系统评估装配式建筑人机协同施工的综合效益，本章构建了一个涵盖“时间-成本-质量-安全-碳排”的五维评价体系。该体系不仅包含工期与成本等传统经济性指标，更将施工精度与一次合格率作为质量核心，将人机事故风险概率作为安全量化依据，并基于施工现场能耗与材料损耗核算全过程碳排放。这一多维框架旨在超越单一效率视角，全面衡量协同模式在经济、工程与环保三重层面的真实价值，为后续系统动力学建模与政策分析提供评估基准。

4.2 系统动力学模型：政策激励-机器人渗透率-成本下降反馈环

为深入分析人机协同施工模式的长期发展动力与推广条件，本节构建系统动力学模型，重点刻画“政策激励-机器人渗透率-成本下降”之间的核心反馈环。模型模拟显示，初始的政府补贴、标准制定等政策激励能有效降低应用门槛，提升机器人渗透率；随着市场规模的扩大，将引致研发投入增加、租赁模式成熟与运维成本摊薄，从而形成机器人使用成本的持续下降；成本的降低反过来会进一步增强市场竞争力与政策支持信心，构成驱动技术普及与产业升级的正向增强回路。

4.3 敏感性结果：部品容错率 $\pm 1\text{ mm}$ 对整体工效影响 $>$ 机器人定位误差 $\pm 0.5\text{ mm}$

敏感性分析揭示，在装配式建筑人机协同系统中，部品容错率（ $\pm 1\text{ mm}$ ）的波动对整体工效的影响，显著大于机器人自身定位精度（ $\pm 0.5\text{ mm}$ ）的等幅变化。这一结果凸显，上游部品生产的标准化与一致性是制约系统整体效率的更关键瓶颈。机器人定位误差可通过算法在线补偿，而构件尺寸的偏差则会直接导致现场被迫进行耗时的手动调整、适配甚至返工，产生连锁的工序延误。因此，提升协同效益需超越单纯追求机器人精度，更应强化“设计-生产-施工”的数据闭环与公差协同。

4.4 经济临界点：机器人租赁单价 ≤ 1.8 倍人工日薪即具推广价值

基于对“时间-成本-质量-安全-碳排”多维效益的综合测算与系统动力学模拟，本章明确了人机协同施工模式大规模推广的经济临界条件：当机器人租赁的日使用单价降至不超过熟练技术工人日薪的 1.8 倍时，该模式即具备显著的市场化推广价值。这一阈值（ ≤ 1.8 倍）不仅涵盖了机器人直接替代人工所节省的工期与人力

成本，更量化计入了其带来的精度提升（减少返工）、安全风险降低及碳减排所带来的间接经济效益。该临界点为制定针对性的设备租赁补贴、税收优惠等产业政策提供了关键的定量依据。

5 结论与展望

5.1 研究结论与创新点

本研究通过构建“感知-决策-执行”协同框架，系统揭示了装配式建筑与机器人协同施工的内在机理。主要创新点体现于：第一，提出了以“BIM-ROS 信息桥”与“部品-末端匹配规则库”为核心的关键接口技术，建立了贯通设计、生产与建造的信息-物理-人闭环模型；第二，设计了基于状态更新的轻量级消息协议与融合时空约束的改进合同网算法，实现了多机器人的高效、无冲突协同；第三，通过现场实验与系统动力学仿真，首次量化提出了机器人日租赁成本不超过人工日薪 1.8 倍的经济临界点算法，为行业推广提供了明确的决策阈值。研究证实，人机协同模式在工期、精度与碳排三个维度上均显著优于传统人工施工。

5.2 研究局限与未来展望

本研究的验证场景集中于标准化住宅的墙板安装工序，对于高层、超高层装配式结构以及复杂异形构件的机器人施工适用性尚未验证。未来研究可从三方面深入：其一，探索面向多机群智与动态重构的智能调度算法，并融合数字孪生技术实现施工过程的实时预测与优化；其二，研发具备更高自适应能力的柔性末端执行器与感知系统，以拓展机器人工艺的适用范围；其三，从系统工程角度，构建涵盖技术标准、政策激励、商业模式与保险体系的协同推进机制，以破解初期投入高、跨领域融合难等产业级障碍，推动智能建造的规模化落地。

参考文献

- [1] 栾亚函, 蔡伟浪, 苏栋梁, 等. 智慧建造的未来蓝图—装配式建筑施工的无人工地系统及其架构[J]. 人工智能与机器人研究, 2021, 10(2): 189-205.
- [2] Zhu, A., Pauwels, P., Torta, E., Zhang, H., & de Vries, B. (2024). Data linking and interaction between BIM and robotic operating system (ROS) for flexible construction planning. Automation in Construction, 163, 105426.
- [3] 季超. 装配式结构预制墙板安装施工技术探究[J]. 江西建材, 2022(04): 233-235.
- [4] 党进, 刘凯, 徐帅楠. 3 自由度自动螺丝锁付机器人设计与分析[J]. 中国新技术新产品, 2025(11): 1-5.