

引用格式: 苏群山, 徐笑东, 张坤, 等. 基于多模态感知与协同控制的装配式墙板智能吊装系统研究[J]. 工业建筑, 2026, 56(2): 170-174. SU Qunshan, XU Xiaodong, ZHANG Kun, et al. Research on Intelligent Hoisting System for Prefabricated Wall Panels Based on Multimodal Perception and Collaborative Control[J]. Industrial Construction, 2026, 56(2): 170-174 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG25072403

基于多模态感知与协同控制的装配式墙板智能吊装系统研究^{*}

苏群山¹ 徐笑东¹ 张 坤² 吴远超¹ 康克家²

(1. 河南省第二建设集团有限公司, 郑州 450000; 2. 河南工业大学机电工程学院, 郑州 450001)

摘 要 针对装配式建筑墙板吊装过程中人工干预多、姿态调整难度大与精度低等问题, 提出一种融合智能吊钩、自平衡吊梁与机器视觉的协同控制方法。设计了磁吸附定位机构与两级齿轮减速机构耦合的智能吊钩, 实现了吊环的自动挂钩与脱钩; 研发了基于滚珠丝杠的可调三吊点自平衡吊梁, 采用姿态传感器-PID 闭环控制策略, 实现 $0.5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 倾角连续调节 (调节精度 $\pm 0.05^{\circ}$); 构建双目视觉-嵌入式融合的识别系统, 通过几何轮廓匹配算法实现墙板三维特征重建, 经 200 组样本测试, 类型识别准确率达 98.2%。该系统集成了 LoRa 无线通信与模块化架构, 工程实测表明, 典型墙板吊装全流程时间缩短至传统工艺的 62.4%, 为装配式建筑施工自动化提供了高效、高可靠性的解决方案。

关键词 装配式建筑; 智能吊装; 自平衡吊梁; 双目视觉; PID 控制; 模块化设计

Research on Intelligent Hoisting System for Prefabricated Wall Panels Based on Multimodal Perception and Collaborative Control

SU Qunshan¹ XU Xiaodong¹ ZHANG Kun² WU Yuanchao¹ KANG Kejia²

(1. Henan D. R. Construction Group, Zhengzhou 450000, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To address the issues of excessive manual intervention, difficulty in posture adjustment, and low precision during the hoisting process of prefabricated building wall panels, a collaborative control method integrating intelligent hooks, self-balancing lifting beams, and machine vision is proposed. An intelligent hook coupling a magnetic adsorption positioning mechanism with a two-stage gear reduction mechanism is designed to achieve automatic hooking and unhooking of lifting rings. A self-balancing adjustable three-point lifting beam based on ball screws is developed, employing a posture sensor-PID closed-loop control strategy to enable continuous tilt angle adjustment within the range of 0.5° to 15° . A binocular vision-embedded fusion recognition system is constructed, utilizing a geometric contour matching algorithm to achieve 3D feature reconstruction of wall panels. Through 200 sample tests, the type recognition accuracy reached 98.2%. The system integrates LoRa wireless communication and a modular architecture. Engineering tests demonstrate that the entire hoisting process for typical wall panels is reduced to 62.4% of the time required by traditional methods, providing an efficient and highly reliable solution for automation in prefabricated building construction.

Keywords: prefabricated buildings; intelligent hoisting; self-balancing spreader; binocular vision; PID control; modular design

^{*} “十四五”国家重点研发计划(2022YFC3801400)。

第一作者: 苏群山, 正高级工程师, 主要从事建筑工程施工技术研究。

电子信箱: 17637839799@163.com

收稿日期: 2025-07-24

0 引言

随着建筑工业化的快速发展,装配式建筑以其施工效率高、资源消耗低、环境污染小等优势,成为现代建筑业的重要发展方向^[1-2]。然而,在装配式建筑施工过程中,墙板吊装作为关键环节,仍面临着人工干预多、姿态调整难度大、定位精度低等问题,严重制约了施工效率和质量^[3]。传统吊装工艺依赖人工经验,存在操作繁琐、耗时较长、安全性不足等缺陷,难以满足现代化建筑施工的高效化、智能化需求^[4-7]。

近年来,多模态感知与智能控制技术的进步为装配式建筑吊装自动化提供了新的解决方案^[8-9]。通过融合机器视觉、智能吊具和协同控制方法,可显著提升吊装过程的精准性和自主性^[10-11]。然而,现有研究在吊装系统的集成性、能耗优化及实时控制精度方面仍存在不足,亟需一种高效、可靠的智能吊装系统以突破技术瓶颈^[12-13]。

针对上述问题,本研究提出一种基于多模态感知与协同控制的装配式墙板智能吊装系统。通过设计磁吸附定位机构与两级齿轮减速机构耦合的智能吊钩,可实现快速定位与高效吊装;研发基于滚珠丝杠的可调三吊点自平衡吊梁,结合姿态传感器-PID闭环控制策略,可显著降低能耗并提高调节精度;构建双目视觉-嵌入式融合的识别系统,利用立体匹配算法实现墙板三维特征的高精度重建。工程试验表明,该系统有效提升了吊装效率与自动化水平,为装配式建筑施工提供了可靠的技术支撑。

1 智能吊装系统设计

针对装配式建筑墙板吊装过程中的自动化需求,本研究提出一种基于多模态感知与协同控制的智能吊装系统,如图1所示,其主要由自平衡吊梁、智能吊钩、视觉识别及无线通信等模块组成。

1.1 自平衡吊梁模块

自平衡吊梁采用高强度合金钢横梁与可动主吊点构成可调三吊点空间模型,基于静力学平衡原理构建主动调平体系。横梁两端通过冗余约束机构对称连接智能吊装节点,并与预制墙板标准化吊点形成刚性连接;横梁的几何中心设置为主吊点,与起重设备提升机构耦合形成非对称三角悬挂系统。姿态调节机构采用精密滚珠丝杠传动装置,由伺服电机驱动主吊点沿梁体纵轴移动,基于力学平

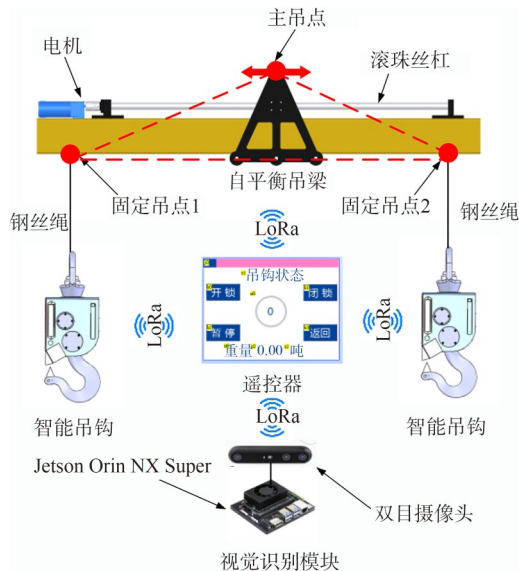


图1 智能吊装系统

Fig. 1 Intelligent hoisting system

衡原理实现倾角精准调控。结合横梁上固定的角度传感器(分辨率 0.01°)实时反馈位姿数据,通过李雅普诺夫稳定性理论构建的PID控制算法形成闭环调节机制^[14],在额定载荷下可实现 $0.5^\circ \sim 15^\circ$ 倾角连续调节,调节精度达到 $\pm 0.5^\circ$ 。横梁两端节点通过高强度防旋转钢丝绳连接智能吊钩。

1.2 智能吊钩模块

智能吊钩模块作为自平衡吊装系统的核心执行终端,集成了多模态感知与智能控制功能,如图2所示,其通过高精度称重传感器实时监测吊装载荷并触发超载保护机制,有效防止误操作风险。其内置的齿轮-弹簧复合传动机构在提供高效转矩输出的同时,也具备智能离合保护特性,当异常扭矩超过安全阈值时可自动解耦传动链,二级齿轮与三级齿轮将分离,如图3所示,从而保护驱动电机^[15]。

永磁吸附定位单元利用梯度磁场分布实现吊钩的自适应对中,显著提升与墙板吊环的对接效率。永磁吸附定位单元由19块NdFeB永磁体拼装而成,总体尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 170\text{ mm}$,形成中间部位磁场强度最强,两端磁场强度相对较弱的磁场,如图4所示,其中中间部位磁铁两侧的磁铁起到导向作用,保证吊环孔正对吊钩,如图5(a)所示。另外,在永磁吸附单元外围包裹有一层不锈钢壳体,避免永磁吸附单元磁场被屏蔽而不利吊环的自动吸取。

内置磁电编码器(分辨率 0.05°)实时反馈吊钩转动位姿,为自平衡吊具的姿态调控提供关键输入

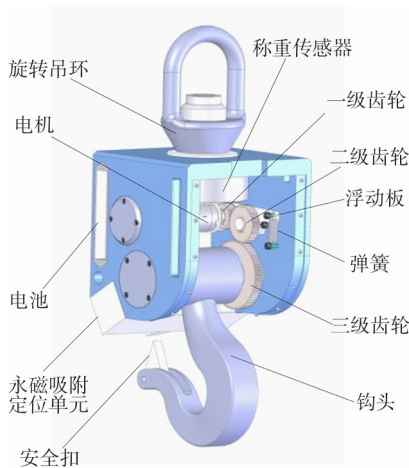
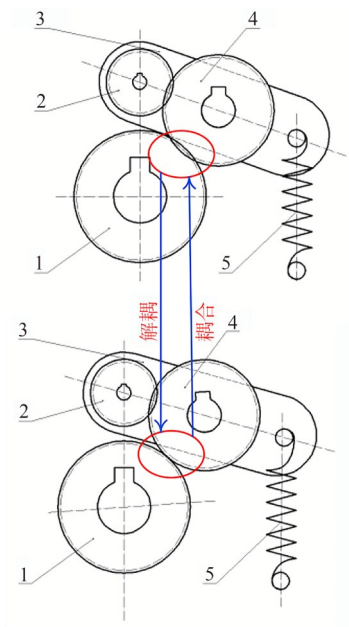


图2 智能吊钩三维模型

Fig. 2 3D model of the smart hook



1—三级齿轮;2—一级齿轮;3—浮动板;4—二级齿轮;5—弹簧。

图3 齿轮-弹簧复合传动机构及解耦/耦合过程

Fig. 3 Gear-spring composite transmission mechanism and its decoupling/coupling dynamics

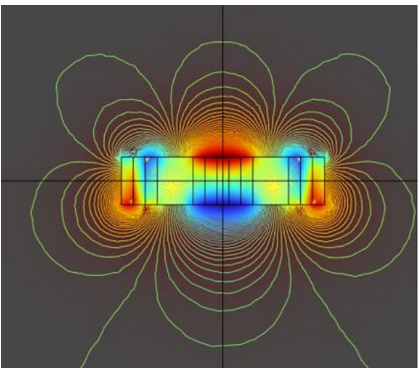


图4 永磁吸附定位单元磁场仿真分析

Fig. 4 Magnetic field simulation analysis of the permanent magnetic adsorption positioning

数据,共同构建“感知—决策—执行”全闭环控制架构。

1.3 视觉识别模块

视觉识别模块采用奥比中光 Gemini 335L 双目结构光相机构建几何特征主导的识别架构。通过背景分割与边缘增强技术提取墙板轮廓特征,结合基于轮廓矢量的立体匹配算法,克服室内外环境干扰,避免对表面纹理的依赖^[16]。部署于 Jetson Orin NX 平台可实现 50 ms 级实时处理,在含移动设备/人员的复杂场景中保持较高的识别准确率,为装配式建筑全场景应用提供可靠视觉基准。

1.4 无线通信模块

无线通信模块采用星型拓扑的 LoRa 网络架构,遥控器作为主节点通过 433 MHz ISM 频段与智能吊钩、自平衡吊梁及视觉识别模块建立双向链路,如图 1 所示。通信机制基于指令广播与状态轮询协同范式:遥控器广播含目标地址的控制指令,各终端通过 TDMA 时隙分配策略在专属时隙反馈状态,核心控制逻辑本地化执行。



(a) 智能吊钩完全打开状态



(b) 磁吸定位装置吸附吊环



(c) 完全打开状态

图5 智能吊钩工作过程

Fig. 5 Intelligent hook working process

2 智能吊装系统工作流程

结合预制墙板的吊装作业工序,规划并固定智能吊装系统的工作流程。

1)首先,自平衡吊梁经起重设备驱动到达堆场附近,在距离预制墙板前上方 1~3 m 附近区域短暂停留。

2)固定在吊梁上的视觉识别模块识别墙板类型,并通过 LoRa 通信模块将识别结果传送至遥控器端,显示墙板类型。

3)如果识别的墙板类型与实际需要吊装的预制墙板类型不符,须更换吊装对象;如果识别的墙板类型与实际需要吊装的预制墙板类型相符,调整自平衡吊梁至预制墙板上方,且智能吊钩与墙板预装的吊环相对应。

4)缓慢调节吊梁位置直至智能吊钩的磁吸定位单元吸附住吊环,如图 5(a)所示,然后通过遥控器发送“闭锁”指令,智能吊钩执行闭合指令,同时回传智能吊钩闭合的实时状态,当吊钩达到预定位置后,吊钩停止转动,此时吊钩上的警示灯开始显示黄色,通过遥控器和警示灯提示操作人员吊钩完全闭合,可以执行下一步操作。

5)完成吊环的自动抓取后,起重设备吊起吊梁,在此过程中若智能吊钩中的称重传感器检测到质量超过 100 kg 后,将激活智能吊钩的保护措施,此时遥控器传送来的控制指令将无法执行,同时智能吊钩的警示灯由黄色转变为红色,如图 5(b)所示。

6)待预制墙板完全离地后,控制自平衡吊梁悬停,此时通过遥控器激活自平衡吊梁的自平衡功能,如图 6 所示,待自平衡完成后起重设备吊起墙板至待安装位置。



(a) 初始状态

(b) 调平状态

图 6 自平衡吊梁工作过程

Fig. 6 Self-balancing hanging beam working process

7)预制墙板安装就位后,下调自平衡吊梁至智能吊钩警示灯由红色转变为黄色后,通过遥控器启

动“开锁”指令,吊钩执行打开指令,同时回传智能吊钩开合的实时状态,待吊钩完全打开后,智能吊钩警示灯由黄色转变为绿色,如图 5(c)所示,通过遥控器和警示灯提示操作人员吊钩已完全打开。智能吊装系统转运至楼层底层,进行下一轮操作。

在预制墙板的智能吊装过程中,吊梁两端连接智能吊钩的两条钢丝绳的长度需尽可能保持相同。另外,墙板安装就位之前,操作人员可以视安装需要,通过遥控器实现墙板平衡状态的点动调节。

3 智能吊装系统的应用测试

本系统针对 3 类典型预制墙板构建了包含 900 张多样性样本的训练数据集(每类 300 张),如图 7 所示,覆盖了多视角(俯仰 $-45^{\circ} \sim +45^{\circ}$ /偏航 $-45^{\circ} \sim +45^{\circ}$)、变距离(1~3 m)及复杂背景(设备/人员/遮挡),并基于改进 YOLOv5s 架构进行墙板识别系统的开发训练。为定量评估识别性能,本系统在 200 次测试中对 3 类墙板(图 7)分别进行了统计,其分类识别准确率分别为:Ⅰ类(矩形标准板)100% (200/200)、Ⅱ类(带窗洞板)98.0% (196/200)、Ⅲ类(带窗洞-花纹板)96.5% (193/200),平均准确率为 98.2%。其中,Ⅱ类墙板的 4 次识别失败均因现场人员的遮挡超过 60% 所致;Ⅲ类墙板的 7 次失败案例中,2 次因现场人员的遮挡超过 60% 所致,5 次识别失败均发生于极端强逆光条件下,因窗洞边缘图像特征对比度丧失导致内轮廓提取失败。即使在极端工况(>40% 遮蔽+强逆光)下,系统对 3 类墙板的整体识别率仍保持在 96.2%,表明其具备较强的鲁棒性。各类别的识别速度无显著差异,均稳定在 0.22~0.28 s 之间。

为评估智能吊装系统的工程适用性,选取尺寸为 3.2 m×3 m、质量为 1.8 t 的预制墙板为实验对象,系统验证了从堆场识别、空中转运、姿态调整到精准安装的全流程性能。表 1 对比了传统吊装与智能吊装各个工序的耗费时间。可知:传统安装模式依赖人工验板、挂钩脱钩、手动调平与就位对正等工序,单板作业耗时为(40.2±1.8) min。智能系统通过视觉识别、磁吸附自动挂钩及闭环调平控制实现全流程协同优化。自动调平环节耗时由 10.5 min 压缩至 1.0 min(效率提升 90.5%),脱钩环节耗时从 4.0 min 缩减至 1.0 min(效率提升 75.0%);但因智能吊钩的位姿控制精度的问题,挂钩环节耗时增加 8.3%。全流程协同作用使单板作业时间降至(25.1±0.9) min,综合效率提升 37.6%,仅相当于传统工艺耗时的 62.4%。

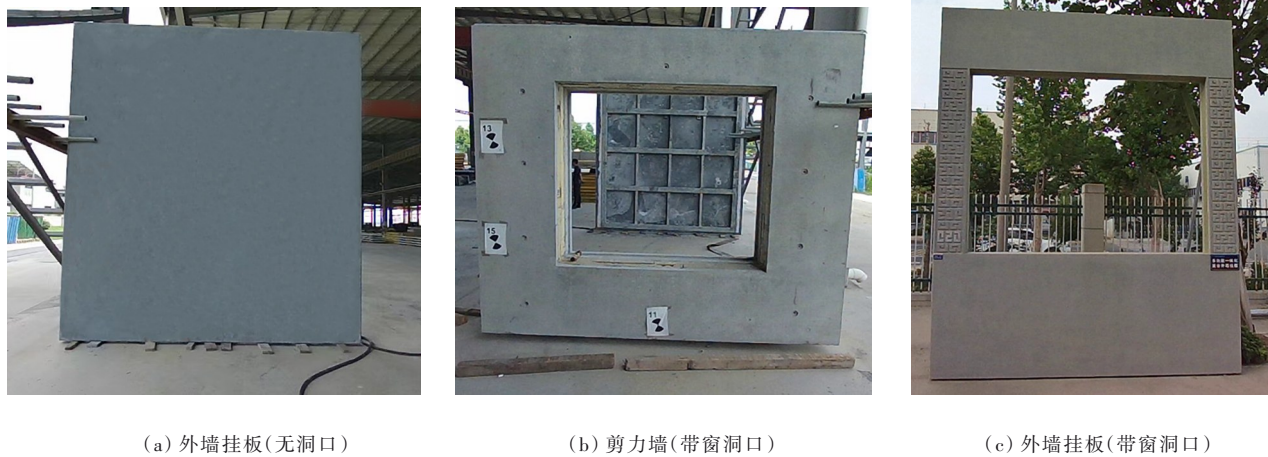


图7 三种不同类型的墙板

Fig. 7 Three different types of wall panels

表1 人工吊装与智能吊装各工序效率对比

Table 1 Comparison of each procedure's efficiency of artificial and intelligent hoisting

工序	传统吊装耗时/min	智能吊装耗时/min	时间差/min	效率提升率/%
挂钩	6.0±0.5	6.5±0.1	-0.5	-8.3
脱钩	4.0±0.3	1.0±0.1	+3.0	75.0
调平	10.5±0.8	1.0±0.2	+9.5	90.5
就位对正	12.0±0.7	9.5±0.5	+2.5	20.8
其他	7.7±0.5	7.1±0.5	+0.6	7.8
总计(单板)	40.2±1.8	25.1±0.9	+15.1	37.6

注:时间差=传统耗时-智能耗时;效率提升率=[(传统耗时-智能耗时)/传统耗时]×100%;“其他”工序含堆场识别、空中转运及系统自检时间。

4 结束语

本研究攻克了装配式墙板吊装中人工依赖性强、姿态控制精度不足的技术瓶颈,成功研制基于多模态感知与协同控制的智能吊装系统。通过智能吊钩磁吸附定位与齿轮减速机构的有效耦合,实现吊环的自动挂钩和自动脱钩,减少了人工参与、降低了安全风险;基于螺纹丝杠驱动的可调三吊点自平衡吊梁融合了姿态传感-PID闭环控制,在达成±0.5°倾角调节精度的同时,实现了0.5°~15°倾角连续调节;双目视觉识别系统依托几何轮廓匹配算法,于复杂施工场景中保持了98.2%识别准确率。工程实证表明:系统通过模块化集成架构,将典型墙板吊装全流程耗时压缩至传统工艺的62.4%。该成果显著提升了装配式建筑施工的自动化水平与作业安全性,为行业转型升级提供了关键技术支撑。后续研究将着力突破非标准构件动态识别、多机协同吊装优化等工程化应用难题。

参考文献

- [1] 范青玉,孙瑞武,吕悦. 装配式建筑的技术经济分析[J]. 工业建筑, 2023, 53(增刊1): 815-817.
- [2] 刘学春,商子轩,张冬洁,等. 装配式多高层钢结构研究要点与现状分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(5): 1-10.
- [3] 马倩. 装配式建筑发展瓶颈与对策[J]. 住宅与房地产, 2021(6): 37-38.
- [4] 肖帅. 装配式建筑建设过程多主体信息协同研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [5] 焦安亮,冯大阔,程晟钊,等. 装配式建筑构件高效吊装安装综合装备与施工技术[J]. 建筑结构, 2019, 49(增刊2): 568-573.
- [6] 薛茹,王新渊,史科. 基于建筑信息建模技术的装配式建筑施工问题及对策分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(11): 207-210.
- [7] 田昱. 基于装配式建筑智能化的现场进度管理模型[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(13): 193-195.
- [8] 林志豪,莫芝枫,李宗社,等. 多模态感知融合技术在堆取料机自动化控制中的应用[J]. 冶金与材料, 2025, 45(8): 121-123.
- [9] 牛咪. 基于多传感融合的预制构件吊装信息智能标注与精准控制[D]. 南京:东南大学, 2022.
- [10] 张颖,刘洋,赵鹏程,等. 机器视觉下吊装作业吊物与吊钩实时监测方法[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(2): 508-517.
- [11] 徐佳琦. 可遥控自动吊钩的设计与研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2024.
- [12] 颜旭众,朱怡巧,张宏,等. 预制构件吊装延误干扰智能感知与评估[J]. 土木工程与管理学报, 2025, 42(1): 104-111.
- [13] 杨志伟,吴凯军,刘劲云,等. 基于精准对位的钢箱梁吊装智能控制系统研究[J]. 公路, 2025, 70(6): 155-160.
- [14] 郭佳,徐兴洋,张佳兴,等. 基于MATLAB的PID控制和模糊控制比较[J]. 工程机械, 2025, 56(5): 67-72.
- [15] 吴宗泽,高志. 机械设计师手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2019.
- [16] 王学广. 基于机器视觉的水下目标三维重建关键技术研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2024.