

基于工业机器人的桥梁预制构件智能建造实践

刘攀攀

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200082]

摘要: 当前建筑行业面临劳动力短缺与成本上升的双重挑战,传统施工生产模式已难以满足现代化建造的需求。基于装配式桥梁的预制构件在生产过程中的难点和痛点,在环境较好的预制构件厂内引入工业机器人技术,对桥梁预制构件现有的生产工艺进行总结与分析。针对钢筋骨架的生产工艺,基于工业机器人,重点攻克钢筋的加工与装配的数据驱动。基于视觉识别的三维坐标计算、机械臂的自动绑扎或焊接等关键技术,研发了可靠有效的小箱梁顶板钢筋骨架的自动化生产线,提升了工程效率与质量。为桥梁预制构件生产全流程的自动化、智能化改造指明方向。

关键词: 桥梁工程;预制构件;工业机器人;智能建造

中图分类号: U445.47

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)02-0161-06

Intelligent Construction Practice of Bridge Prefabricated Components Based on Industrial Robots

LIU Panpan

[Shanghai Highway and Bridge (Group) Co., Ltd, Shanghai 200082, China]

Abstract: Under the double challenges of labor shortage and rising costs faced by the current construction industry, it has been difficult for the traditional construction production mode to meet the needs of modern construction. Based on the difficulties and pain points in the production process of prefabricated components of prefabricated bridges, industrial robot technology is introduced in the prefabricated component factory with a better environment, and the existing production processes of bridge prefabricated components are summarized and analyzed. For the production process of the reinforcement framework, based on industrial robots, key technical links such as data-driven processing and assembly of reinforcement, three-dimensional coordinate calculation based on visual recognition, and automatic binding or welding of mechanical arms are the focus to overcome. A reliable and effective automated production line for the reinforcement framework of the top plate of small box girders has been developed to improve engineering efficiency and quality. The direction is clarified for the automated and intelligent transformation of the entire process of bridge prefabricated component production.

Keywords: bridge engineering; prefabricated components; industrial robots; intelligent construction

0 引言

随着我国老龄化程度不断提高,在劳动力供应减少和人工成本上升的趋势下,路桥施工因其劳动密集型的特点也面临劳动力老龄化及工人技能素质低等问题,而该领域艰苦的作业环境和较低的人工成本进一步加剧了这种困局。现阶段作业环境、作业方式没有改变,难以吸引劳动人口。随着基础设施投资的不断扩大,建筑业对劳动力的需求与日俱

增,但当前的工作环境和条件并未得到根本改善,导致劳动力供需之间的矛盾日益加剧。随着建筑行业面临的挑战日益增加,采用新技术革新传统建造方法已变得迫在眉睫。

2020年住房和城乡建设部联合多个部门发布了《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》。该文件明确提出了推动智能建造与建筑工业化协同发展的主要任务,其中包括数字化设计体系建设,推动部品部件智能化升级等。旨在提升建筑业的智能化水平,促进建筑业的转型升级,提高建筑工程的质量和效率。

预制装配式技术的发展为建筑行业带来了新的生命力,它不仅能提高建筑质量和施工效率,还能推

收稿日期: 2024-07-29

基金项目: 上海市经信委课题(2023-GZL-RGZN-01031)

作者简介: 刘攀攀(1991—),女,硕士,工程师,从事工程数字化工作。

动建筑行业的绿色转型。随着上海市在桥梁预制装配技术领域的不断探索与推广,现阶段桥梁预制构件工厂引进一些自动化生产设备来实现不同程度的自动化生产,从而减轻工人的劳动强度,减少对工人的依赖。预制工厂的自动化应用,主要体现在钢筋预加工、液压模板和一些辅助设施的应用,对降低劳动力依赖作用不够显著。随着科技不断进步,机器人逐渐被引入建筑行业中。但目前机器人在施工现场的应用有一定局限性,面向整体施工流程自动化的机器人技术仍不成熟。装配式建筑将构件的施工场所转移至施工环境相对理想的预制工厂内,更适合目前机器人技术的应用。

本文基于装配式桥梁的预制构件在生产过程中的难点和痛点,在环境较好的预制构件厂内引入工业机器人技术,重点解决钢筋的加工与装配的数据驱动、基于视觉识别的三维坐标计算、机械臂的自动绑扎或焊接等关键技术环节,研发基于工业机器人的桥梁预制构件自动化生产线。

1 建筑工业化的发展

1.1 国内外建筑机器人产业发展现状

装配式建筑的推行加快了建筑工业化的进程,随着市场的需求与科技的进步,机器人从一个概念到逐渐应用于多个领域,考虑到一些建筑活动具有危险性、重复性和技能需求较少的特点,机器人逐渐被引入建筑行业中。在1985年,Warszawski和Sangrey首次提出在建筑施工中使用机器人技术^[1],这极大地解决了误工、操作失误、受伤等人为因素,从长远来看,机器人技术远比传统的人工施工经济、可靠。

在钢筋加工方面,传统方法是人工在车间完成所需钢筋的加工,然后运送到模板上安装,这种方法费时费力。在PC构件领域,机器人钢筋生产系统可用于自动化钢筋切割、弯曲和绑扎,进一步提高了生产的自动化程度^[2]。如图1所示,苏黎世联邦理工学院设计了一种新型的专用机器人末端执行器,通过控制钢筋的参数,该机器人能自动化建造不同曲率和网格尺寸的非标准钢筋网^[3]。

国内自动化生产线起步较晚,长时期处于对单独的工艺环节实现自动化阶段。近期,国内的三一集团引进国外预制构件生产流水线,并在该基础上加入自主研发的集拆模、边模输送及清理、模台清理、划线、布模、边模库管理功能于一体的拆模、布模

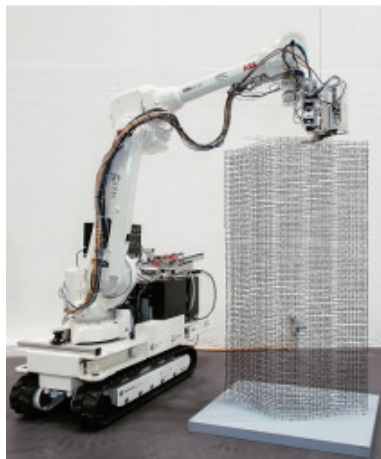


图1 钢筋加工机器人

机器人^[4],如图2所示。机器人通过激光扫描与伺服控制系统,精准识别边模,实现标准拆模、布模节拍仅需8 min,大大节省了操作时间^[5]。



图2 拆模、布模机器人

国内这几年也开始进行机器人在建筑业的应用,碧桂园作为房地产的龙头企业,专门成立了建筑机器人研发公司,即广州博智林机器人有限公司。研发的机器人有:地面整平机器人、地面抹平机器人、地面抹灰机器人、地库抹光机器人、螺杆洞封堵机器人、混凝土内墙面打磨机器人等多种类型的建筑施工机器人。中建八局近几年在机器人在建筑业领域的应用也投入了不少应用,包括:梁体外观质量智能检测机器人,可快速实现预制梁外观质量的检测,降低预制梁质量检查时间与人工成本,并提供量化的预制梁施工质量缺陷数据,可避免检测人员自身判断的影响,保障检查结果可靠。

国内外通过机器人自动化进行钢筋捆扎技术尚不成熟,机器人的结构形式多种多样,缺乏一种相对可靠稳定的形式;缺少较为成熟的基于钢筋网面的机器人路径规划方案;钢筋交叉节点的识别技术不完善。在预制构件的施工工序中,钢筋绑扎是耗时耗人工较多的一个工序,钢筋捆扎机器人关键技术的研发十分紧迫。

1.2 桥梁预制构件自动化生产发展现状

建筑预制简化了施工现场的工作流程,最早的

预制装配技术起源于欧洲,应用于混凝土大梁,之后推广到上下部全部构件,其中桥梁的上部结构发展较早,下部结构发展相对缓慢。

随着混凝土技术的不断改进和创新,桥梁的预制构件在自动化生产方面也有很多进展,主要有液压模板、自动喷淋、精细化预应力张拉、生产线生产、自动数控弯配,有了单点技术的工业化方向的进步。如液压模板采用全自动的液压控制模板系统,模板侧模采用全液压系统开合,提高模板安装效率及梁体成型精度;目前用于钢筋原材加工的数控弯箍机、全自动数控弯曲中心设备为各类桥梁预制拼装技术的研发提供精准的钢筋加工服务。但是耗时耗工较大的钢筋绑扎的环节依然没有根本改变,且受到桥梁设计方案的多样性以及桥梁结构钢筋骨架空间结构的复杂性影响,目前相关研究处于空白。

1.3 分析讨论

目前,采用机器人进行建筑与桥梁工程的施工,已是学术界、企业界的普遍共识,各高校、研究机构、企业,均有进行该领域研究的行动与意愿。由于人工智能技术近几年才火热与成熟,且技术更新快,在工业、IT行业发展迅猛,但我们的建筑业历来有对信息化技术投入偏低、变革缓慢的弊端,大部分产品的研发仍处于试验阶段。市面上现存的一些半自动化设备大多通过人机结合手段,在一定程度上减少对工人师傅身体的危害,提高生产效率。但其存在价格昂贵、操作技术难度较高、难以适应复杂环境等问题。实际用于建筑工地的自动化机器人亟须落地使用,以顺应“中国建造”核心竞争力。

2 智能建造实践

2.1 预制构件的选取

现阶段国内桥梁预制构件主要包含预制桩、预制墩柱、预制盖梁以及预制箱梁等构件。由于桥梁中的桩基础的桩径较粗、桩身较长,大多数预制桩只适用于小型桥梁或者地质基础较好的情况,所以一般预制厂内生产预制桩基础的情况不多,生产数量也较少。预制厂内主要还是以生产预制墩柱、预制盖梁以及预制箱梁等构件为主。预制构件的生产过程存在相似性,预制墩柱、盖梁、小箱梁的生产过程主要包括钢筋骨架制作安装、模板安装、浇筑混凝土、构件养护这四大模块,其详细流程图如图 3 所示。

在当前建筑施工领域,针对预制构件的制作与

安装流程进行深入分析,我们发现钢筋骨架的构建及其养护阶段在整个生产链条中占据了显著的时间比重。根据现场统计,钢筋绑扎人工工时占比达到 48%~63%。但由于预制构件的养护并不需要消耗太多的人力物力,最终选取钢筋骨架的绑扎这一工序进行智能化的优化。

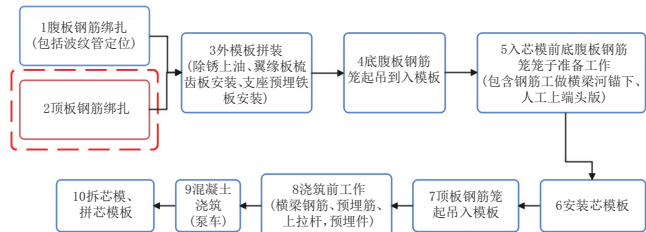


图 3 预制小箱梁生产流程图

2.2 主要研究内容

根据目前桥梁预制构件生产的实际情况,期望借鉴制造业工业化生产的经验,逐步提高桥梁预制构件生产自动化水平,降低劳动力的需求。通过研究基于工业机器人的桥梁预制构件钢筋骨架方面的智能生产技术,重点解决 BIM 模型的数据驱动、视觉识别焊接/绑扎点、机器人长距离行走的精确定位、集识别、抓取、绑扎于一体的多功能手臂等问题。最终在上海预制构件生产基地建立钢筋骨架的自动化生产线,实现钢筋骨架的自动化安装与绑扎成型,降低劳动力成本,提高生产效率。期望将来推广使用后能够提升建筑行业的智能化水平。

根据装配式桥梁中小箱梁构件的特征,从易于实现的角度出发,基于人工智能与工业机器人等技术,研究开发桥梁预制构件小箱梁顶板钢筋骨架的智能化生产技术,实现全自动化的钢筋安装、钢筋绑扎,从而为桥梁预制构件钢筋的智能化生产提出可行、可用、经济有效的技术方案。

2.3 关键核心技术

2.3.1 钢筋骨架自动化生产流程

针对当前预制小箱梁顶板钢筋骨架生产的技术流程,结合先进的智能化技术应用,我们概括出其实现自动化制造的关键步骤,如图 4 所示。

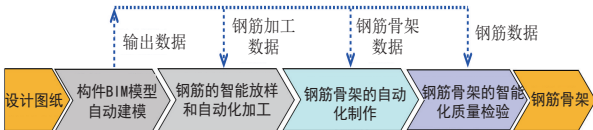


图 4 钢筋骨架自动化生产流程

首先,通过多种 BIM 建模软件,实现从设计图纸上的二维信息转换至三维模型,为钢筋的精准放样、机械加工、自动化安装以及质量检验提供精确的数

据支持。

基于BIM模型导出的精确数据,运用先进的优化算法,可以实现钢筋的智能放样,将放样数据传送至自动化钢筋加工设备,完成高效加工。接下来,通过研发能够适应各种复杂情况的柔性自动化生产线,实现不同类型钢筋骨架的成型。

最后通过基于视觉智能的自动化钢筋骨架质量验收系统,结合BIM模型的钢筋数据,检验钢筋骨架的钢筋位置、钢筋数量、钢筋焊接或绑扎等质量信息,实现钢筋骨架的智能化质量检验。

以下几个小节对生产流程中的关键技术进行梳理和分析。

2.3.2 钢筋的加工与装配的数据驱动

土木工程中,钢筋的用量非常大,而且种类与形态多样化。当前的钢筋加工,虽然已采用机器加工,但是其加工数据仍然是由人工钢筋翻样后,手动输入加工机器,这就难免产生数据错误的问题。因此,引入建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM),BIM模型中的数据能够与加工设备直接对接,比如数控钢筋弯曲机可以根据BIM模型提供的数据,自动调整弯曲角度和长度。通过特定的软件接口,将模型中的钢筋数据直接传输到自动化加工设备,实现了数字化的生产流程。这不仅提高了加工效率,还确保了加工精度的一致性。图5所示为小箱梁钢筋BIM模型。

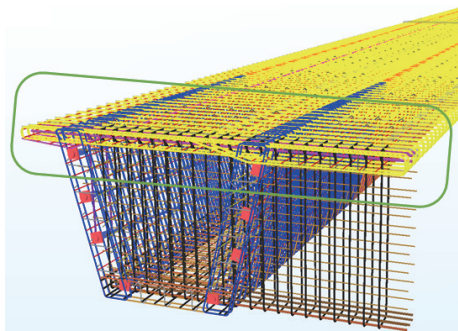


图5 小箱梁钢筋BIM模型

2.3.3 基于人工智能视觉的三维空间识别与三维坐标计算技术

本项目中采用的人工智能视觉与常见的图像识别有很大的不同,常见的图像识别是二维的,只需获取二维信息,而本项目中采用的人工智能视觉是三维的,需要获取三维信息。因为小箱梁的钢筋是双层的,二维识别是无法判断钢筋上下层的,只有三维识别方可进行判断,如图6所示,为单层钢筋交叉点识别测试。

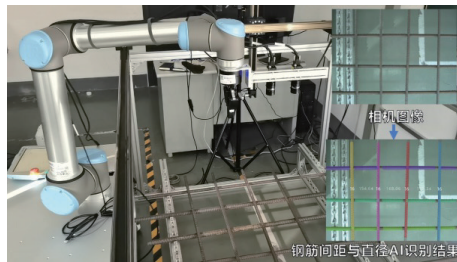


图6 单层钢筋交叉点识别测试

本项目研发两种RGBD深度相机的识别技术,即双目相机和结构光深度相机。双目相机将分别采用两种技术进行测试与结果比较:第一种是直接利用双目相机的深度信息进行识别,第二种是先进行单目的识别,然后将识别结果利用钢筋的特点,进行两只相机的识别结果数据拟合。而对于结构光深度相机(见图7),由于其可提供四维度的RGBD图像数据,也可提供RGBXYZ六维度的点云数据,同时结合最新的yoloV5算法,识别钢筋节点的准确率在98%左右。

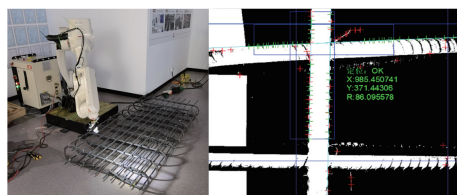


图7 结构光深度相机交叉点识别测试

2.3.4 钢筋的自动绑扎

钢筋绑扎是建筑工程中劳动密集型的工作之一,需要工人重复使用铁丝和钳子捆绑钢筋交叉点,这种施工方式劳动强度大,且工作效率低。现阶段有多种手持式自动绑扎机,能自动完成钢筋绑扎过程中的吐丝、收丝、缠绕、咬紧、切断等步骤,实现钢筋绑扎的机械化。将绑扎枪进行供电、送丝、大直径钢筋的适应等改造后安装在机械臂末端,同时该末端还有识别系统与抓取系统,是集识别、抓取、绑扎于一体的多功能手臂(见图8)。



图8 多功能机械臂

2.4 分析讨论

通过对预制构件生产工艺流程与智能化需求分析,指出了目前钢筋骨架的生产对于劳动力需求较大,对智能化生产需求迫切,同时对不同构件的钢筋

骨架生产工艺在智能化转型中所遇到的关键问题进行了分析。本章对小箱梁顶板钢筋骨架的自动化生产流程与其中的关键技术展开讨论。

3 实践效果

3.1 小箱梁箍筋环自动成型生产线

桥梁小箱梁箍筋环的形状复杂,目前只有钢筋的弯箍工作由机械与人工协同完成,其原材的上料、半成品摆放加工仍然全部依赖人工。本部分的箍筋环自动成型生产线,从原材的下料到弯箍、摆放、箍筋环的点焊成型全都由机器完成,实现小箱梁箍筋环的自动成型生产。

本部分采用两台工业机器人,配合一台自动弯折机,进行协同作业,由转运机器人从分料机构抓取直钢筋,送至自动弯折机进行弯折,使其成型为箍筋环,然后由转运机器人抓取成型后的箍筋环,转身送至集成交接定位焊接平台,然后由焊接下料一体机机器人进行箍筋环开口位置的固定点焊,使箍筋环的开口位置固定,加工完成后,由焊接下料一体机机器人将钢筋送至配筋下料打齐机构,最后转运至成品收集架,生产全流程见图 9 和图 10。

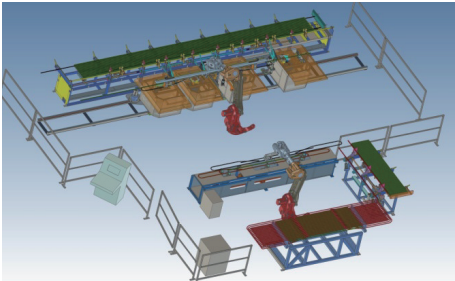


图 9 小箱梁箍筋环自动成型生产线模型



图 10 小箱梁箍筋环自动成型生产线

3.2 研发小箱梁顶板钢筋骨架的自动化安装与绑扎生产线

本部分主要实现小箱梁顶板钢筋骨架的自动化安装与绑扎,其生产线布置如图 11 所示。本部分实现小箱梁顶板钢筋骨架的自动分料、送料、钢筋自动安装与自动绑扎技术,采用自动化设备实现钢筋的自动分料与送料,采用机器人进行纵筋、箍筋环的钢

筋自动安装。由 BIM 技术进行整体绑扎点的移动路径规划,由人工智能视觉识别技术进行机器人操作范围内的钢筋绑扎点的识别与空间定位,然后由机器人对各个绑扎点进行钢筋的自动绑扎,从而实现小箱梁顶板钢筋骨架的智能化、自动化生产。见图 12。

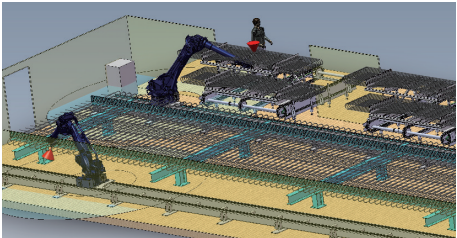


图 11 小箱梁顶板钢筋骨架的自动化安装与绑扎生产线模型



图 12 小箱梁顶板钢筋骨架的自动化安装与绑扎生产线

3.3 分析讨论

该成果首先应用于上海路桥江川路预制场承接的 S3 公路(周邓公路-G1503 公路两港大道立交)新建工程,通过生产模式的进步显著减少人工成本、增加预制构件的生产及流转效率。两条产线经过测试与应用,最终测得视觉拍照成功识别率 $\geq 98\%$;夹具抓取摆放箍筋成功率 $\geq 96\%$;捆扎成功率 $\geq 96\%$;对比人工生产与自动化生产的流水节拍与生产效率,同工位减少人员 60%,生产效率提高 50%。

4 结 语

本项目在行业内首次实现装配式桥梁中大构件的钢筋骨架的焊接和绑扎,以及桥梁异形环箍结构的自动安装与焊接、绑扎施工,实现基于工业机器人的预制构件钢筋骨架智能制造。

本项目的研究可以解决当前桥梁施工企业所面临的劳动力紧缺、劳动力老龄化问题,吸引更多的年轻人参与施工企业,达成企业人才的良性循环,提高装配式桥梁施工的准确性与施工质量,提高施工效率,降低总体成本,实现桥梁施工企业的数字化、智能化、工业化改革。

本项目的研发与落地将与其他施工企业提供很好的示范作用,同时,本项目的研发思路将为其其他施

工企业提供可参考的技术实施路线,因此,本项目的研发将进一步促进智能建造产业的快速发展,推动更多更好的智能建造成果与产品在我们行业落地与应用,从而为全面响应国家的智能建造发展方向提供助力。

参考文献:

- [1] Warszawski A, D A Sangrey. Robotics in building construction[J]. Journal of construction engineering and management, 1985. 111(3): 260-280.
- [2] Neubauer, Robert. Mechanisation and Automation in Concrete Production[M]. New York: Willey, 2017.
- [3] Nitish Kumar, Norman Hack, Kathrin Doerfler, *et al.* Design, development and experimental assessment of a robotic end-effector for non-standard concrete applications[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Singapore: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017:1707-1713.
- [4] 肖阳功杰,朱生媛,李佳荣,等.智能机器人在装配式建筑中的应用分析[J].智能建筑,2021(1):65-67.
- [5] 陈光,刘纪超,马云飞.数字化技术在装配式建筑设计、生产、施工全过程中的应用——以国家合成生物技术创新中心项目为例[J].土木工程信息技术,2022,14(5):110-115.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

