

基于五维模型理论的码垛工作站数字孪生系统

王法勇^{1,2}, 赵凌燕^{1*}, 张洁洁², 焦培刚¹

1. 山东交通学院工程机械学院, 山东 济南 250357; 2. 合肥哈工热气球数字科技有限公司, 安徽 合肥 230601

摘要:为提高码垛工作站的智能化水平,以数字孪生五维模型理论为基础,采用三维建模软件 SolidWorks 对物理码垛工作站进行三维建模,通过仿真软件 Simreal 将三维模型转化为虚拟码垛工作站,设置虚拟码垛工作站中六轴工业机械臂、气动吸盘、传感器等结构的物理属性和初始参数,采用可编程逻辑控制器设计并实现码垛工作站的工艺流程,通过通信协议 Modbus、Siemens S7 等实现物理码垛工作站与虚拟码垛工作站间的数据交互和实时通信,构建码垛工作站的数字孪生系统。开展试验测试码垛数字孪生系统功能,在线可视化监测系统运行工作状态,验证数据传输的准确性和实时性。结果表明:所构建的码垛数字孪生系统可同步映射实体码垛工作站的动作,统计码垛过程中的产能等数据,物料放置的准确率达 99% 以上,避免错位现象发生。

关键词:数字孪生; 五维模型; 码垛工作站; 通信协议

中图分类号: U169; TP278

文献标志码: A

文章编号: 1672-0032(2025)01-0074-08

引用格式: 王法勇, 赵凌燕, 张洁洁, 等. 基于五维模型理论的码垛工作站数字孪生系统[J]. 山东交通学院学报, 2025, 33(1): 74-81.

WANG Fayong, ZHAO Lingyan, ZHANG Jiejie, et al. Digital twin system of stacking workstation based on five-dimensional model theory[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(1): 74-81.

0 引言

智能制造的发展程度直接关系我国制造业的质量水平,其实施与发展依赖高端智能技术的研发^[1]。在智能制造过程中,码垛是采用工业机器人实现智能制造的重要手段之一。在码垛工作站中,提高机器人码垛智能化水平有助于改善生产管理方式,及时掌握生产现场的数据并优化生产策略,提高产能。

在机器人码垛智能化研究中,学者们多关注机器视觉、智能算法和仿真技术等。Lamon 等^[2]采用视觉感知算法解决码垛过程中的监测和定位问题,采用移动协作机器人助手提高协同码垛任务的工作效率;Rafal 等^[3]采用改进的人工蜂群算法解决单个机械臂处理 3 条生产线的码垛问题,提高生产率,降低码垛能耗;Tea 等^[4]提出基于自主移动机器人的混合箱码垛解决方案,采用基于代理的仿真模型适应不同的布局配置和操作策略;Jaroslaw 等^[5]为码垛机器人的末端夹具设计模块化夹持器系统,该系统能实现集体包装中货物的码垛;李翀等^[6]设计基于视觉的码垛错位智能检测和闭环反馈系统,有效解决码垛的堆叠错位检测问题;罗文^[7]以方体货箱码垛为研究对象,采用机器人仿真软件 Robotstudio 完成码垛仿真验证与离线编程,加快工业机器人的应用进度;王冬梅等^[8]设计的工业码垛机器人系统采用机器视觉采集和识别物体信息,并通过运动规划算法优化运动轨迹,试验效果较好。

在机器人码垛智能化过程中,仍有两方面问题未解决:一是无法可视化监测机器人等生产设备状态,

收稿日期:2024-05-23

基金项目:山东省重点研发计划项目(2019GNC106032)

第一作者简介:王法勇(1997—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为智能制造、数字孪生等,E-mail:3588208334@qq.com。

*通信作者简介:赵凌燕(1981—),女,哈尔滨人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为智能制造、机器人技术、人体生物力学等,E-mail:206082@sdjtu.edu.cn。

不利于工作人员准确掌握现场设备情况;二是无法实时统计和展示码垛的生产数据,不利于及时掌握生产情况和优化生产。数字孪生是实现工业智能化关键技术之一,通过构建物理实体的虚拟模型和采集生产设备的工作数据并建立虚实模型间的连接,为解决上述问题提供新思路。

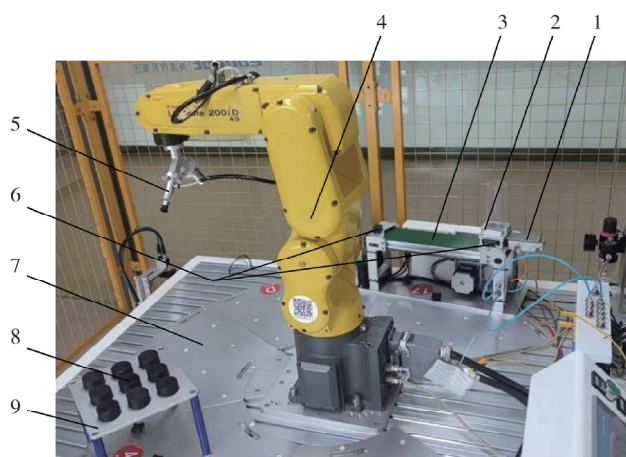
数字孪生以多维虚拟模型和融合数据为双驱动,通过虚实闭环交互,实现监控、仿真、预测、优化等实际功能服务和应用需求^[9-10]。数字孪生技术目前已广泛应用于车间管理^[11]、智慧交通^[12]、发电输电^[13]和采煤管控^[14]等领域,提高各产业的数字化和智能化水平。采用数字孪生技术可对物理实体进行可视化监控、状态预测和虚拟调试。赵浩然等^[15]基于数字孪生技术提出三维可视化监控方法,并在某制造车间实现实时可视化监控;刘娟等^[16]基于数字孪生技术提出运行状态在线预测方法,应用到某加工车间,实现对车间运行状态的仿真和预测;傅贵武等^[17]以五轴加工中心智能生产线为例,开展数字孪生技术在仿真、虚拟调试和监控等方面的研究;邓建新等^[18]将数字孪生技术应用到物流配送管理中,提高货物配送的全生命周期管理水平,优化配送过程。

为提高码垛工作站智能化水平,本文基于数字孪生技术,以五维模型理论为基础,设计并实现机器人码垛工作站的工艺流程,采用仿真软件 Simreal 从 5 个维度建立码垛工作站的虚拟模型,通过 Modbus、Siemens S7 等通信协议实现数据交互,构建码垛工作站数字孪生系统,实现物理码垛工作站与虚拟码垛工作站间的实时通信,可视化展示物理码垛工作站的运动参数和产能信息,以期数字孪生技术应用于工业机器人领域提供试验验证。

1 码垛工作站及其工艺流程

本文研究的码垛工作站主要包括输送带模块、料仓模块、机器人模块、码垛托盘和工作站平台,其中机器人模块包括六轴工业机械臂和气动吸盘,如图 1 所示。工作站通过异步输送带进行物料的上料,到达指定位置后由六轴工业机械臂抓取物料,在托盘上码垛物料,重复进行上料、搬运和码垛,直至完成设定码垛任务。

采用可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)实现码垛工作站系统的整体控制,以及机器人模块与其他组件的协同工作。码垛工作站的工艺流程如图 2 所示。



1—推料气缸;2—料仓模块;3—输送带模块;
4—六轴工业机械臂;5—气动吸盘;6—传感器;
7—工作站平台;8—物料;9—码垛托盘。

图1 码垛工作站

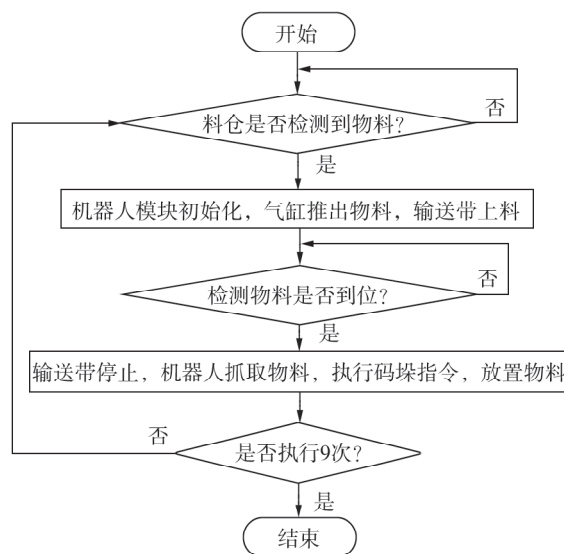


图2 码垛工作站的工艺流程

在初始状态下,码垛托盘 9 个工位均处于无料状态,料仓处于物料填满状态。当料仓中的物料检测传感器检测到有物料后,料仓底部的气缸推出物料,输送带启动运输物料,机器人模块进行初始化。物料到达输送带末端后,物料检测传感器检测到物料到位信号,输送带停止运输并触发机器人模块搬运程序,

机器人模块中的气动吸盘抓取物料并搬运到托盘正上方,执行码垛程序。物料检测传感器再次检测到物料后,重复执行上料、搬运、码垛等动作,直至全部占用码垛托盘上的 9 个工位,完成码垛任务。

2 码垛工作站数字孪生系统

2.1 数字孪生五维模型理论

数字孪生是实现物理与信息深度融合的有效方式,采用数字孪生方法需先建立应用对象的数字孪生模型^[19]。Grieves^[20]提出数字孪生模型,即物理实体、虚拟实体及二者间连接。陶飞等^[21]基于三维模型理论提出数字孪生五维模型理论。

在三维模型的基础上加入服务和孪生数据 2 个维度构成数字孪生五维模型,公式为:

$$M_{DT} = (P_E, V_E, S_S, D_D, C_N)$$

式中: P_E 为物理实体对象; V_E 为虚拟实体对象, $V_E = (G_v, P_v, B_v, R_v)$, 其中, G_v 为几何模型, P_v 为物理模型, B_v 为行为模型, R_v 为规则模型; S_S 为服务; D_D 为孪生数据; C_N 为各部分间连接。

数字孪生五维模型结构^[22]如图 3 所示。由图 3 可知:物理实体、虚拟实体、服务和孪生数据两两间均建立双向连接,外围 3 个维度间的连接能不断迭代优化。

2.2 码垛工作站建模

本文研究的虚拟实体对象为码垛工作站虚拟模型,采用三维建模软件 SolidWorks 和仿真软件 Simreal 联合建模实现。具体步骤为:1)采用 SolidWorks 创建物理码垛工作站的三维几何模型,如图 4 所示;2)将三维几何模型导入 Simreal 中,提取料仓模块、输送带模块、机械人模块、码盘托盘、工作站平台等组件;3)选择 Simreal 模型库中与物理实体相同型号的六轴工业机械臂替换导入的六轴工业机械臂,设置六轴工业机械臂的姿态参数和位置参数;4)设置其他组件的物理属性和初始参数。

在 Simreal 中,结合码垛的工艺流程,采用布尔信号和 Python 脚本设置虚拟码垛工作站各组件的物理行为及建模方法,如表 1 所示。

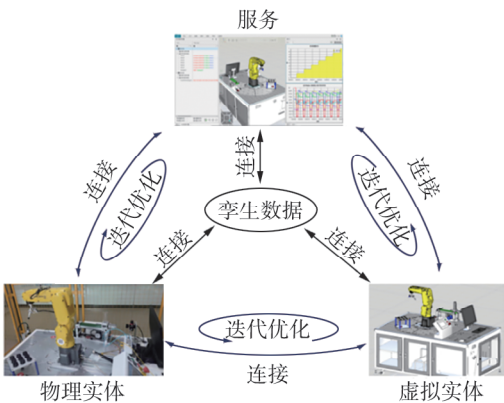


图 3 数字孪生五维模型结构

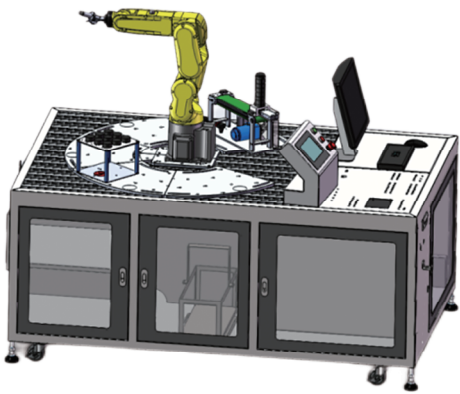


图 4 码垛工作站的三维几何模型

表 1 码垛工作站各组件物理行为及建模方法

组件名称	物理行为	建模方法	备注
码垛工作台	无	提取组件,定义原点	
码垛托盘	无	提取组件,定义原点	
气动吸盘	物料的抓取/释放	添加接口、工具中心点(tool center point, TCP)坐标、布尔信号、组件容器	
输送带模块	输送物料	添加路径、接口、布尔信号、伺服控制器	输送速度为 200 mm/s
料仓模块	存料/上料	推杆设置运动链接,添加布尔信号和 Python 脚本	推杆行程为 0~30 mm
物料	自由移动	提取组件,定义原点	

为验证所建虚拟码垛工作站能否模拟物理码垛工作站的行为,在 Simreal 中对虚拟码垛工作站的操作功能开展仿真测试。虚拟码垛工作站如图 5 所示,通过测试可知,六轴工业机械臂的 6 个关节 J1~J6 运动正常,所建虚拟码垛工作站能正确执行测试人员预先设置的上料、输送、抓取、释放、旋转等动作指令,按照码垛工作站的工艺流程完成码垛任务,实现对物理码垛工作站的动作映射,可与物理码垛工作站进行数据交互。

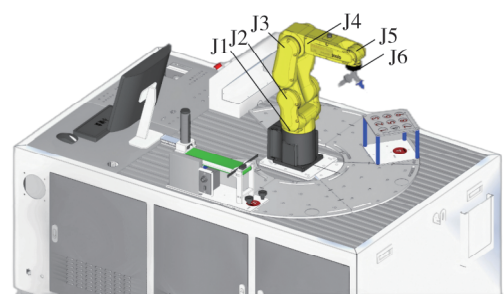


图 5 虚拟码垛工作站

3 数据通信

3.1 数据通信协议选择

在数字孪生模型和物理实体的连接交互过程中,选择合适的通信方式实现实时性高、误码率低的数
据交互^[23]。工业生产中常用的通信方式有以太网通信、现场总线、串行通信和无线通信,可依据通信设备对象、通信质量要求和成本等因素选择合适的通信方式。

在码垛过程中,由机器人控制器控制机器人模块,在数字孪生系统中建立 Simreal 和机器人控制器间的数据连接。作为工业通信协议的业界标准,通信协议 Modbus 可满足大多数情况下的通信需求,在电子设备中应用广泛,在数字孪生系统中选择该协议作为机器人控制器和虚拟码垛工作站间的通信协议。

在本码垛工作站中,主要的控制器是西门子 PLC,主要控制输送带和料仓上料,及与机器人控制器进行 I/O 通信。要实现数字孪生系统中虚拟码垛工作站和物理码垛工作站间实时地数据通信,需在 PLC 和 Simreal 间建立有效的通信连接。Siemens S7 是以太网通信中常用的通信协议,是 Simreal 中支持的典型通信协议,在数字孪生系统中选择该协议作为 PLC 与 Simreal 间的通信协议。

3.2 Modbus 通信协议

Modbus 通信包括主站、从站和通信协议代码三部分。主站和从站是通信对象,通信协议指 Modbus 专用的通信代码,按一定规则和约定处理数据。

将机器人控制器作为主站,查阅机器人的技术文档,按规定代码采集机器人各轴数据^[24]。将 Simreal 作为从站,通过 Python 脚本建立虚拟服务器,将采集数据传至虚拟码垛工作站。

为观察数据传输的准确性,统计物理码垛工作站中六轴工业机械臂和虚拟码垛工作站中六轴工业机械臂在 1 个周期内任意不同时刻各关节的角位移,计算分析二者之差的绝对值 e ,结果如表 2 所示。

由表 2 可知:不同时刻物理、虚拟码垛工作站中六轴工业机械臂各关节角位移最大差值的绝对值为 $0.002\ 65^\circ$,满足数字孪生系统数据传输的准确性要求,物理、虚拟六轴工业机械臂的各关节角位移之差均在允许范围(0.01°)内^[17]。

表 2 物理、虚拟码垛工作站中六轴工业机械臂不同时刻各关节角位移对比

关节	角位移/ $^\circ$								
	时刻 1			时刻 2			时刻 3		
	物理	虚拟	e	物理	虚拟	e	物理	虚拟	e
J1	0.000 00	-0.000 89	0.000 89	-90.000 00	-89.999 82	0.000 18	-83.765 00	-83.764 52	0.000 48
J2	-0.001 00	-0.001 36	0.000 36	-0.001 00	-0.000 97	0.000 03	47.967 00	47.967 25	0.000 25
J3	-0.001 00	-0.001 59	0.000 59	-0.001 00	-0.003 65	0.002 65	-31.525 00	-31.524 83	0.000 17
J4	45.000 00	44.999 87	0.000 13	45.000 00	44.999 90	0.000 10	47.553 00	47.552 55	0.000 45
J5	-90.000 00	-90.000 06	0.000 06	-90.000 00	-89.999 74	0.000 26	-72.289 00	-72.288 58	0.000 42
J6	0.000 00	0.000 43	0.000 43	0.000 00	0.000 20	0.000 20	-27.181 00	-27.180 80	0.000 20

表 2(续)

关节	角位移/(°)								
	时刻 4			时刻 5			时刻 6		
	物理	虚拟	<i>e</i>	物理	虚拟	<i>e</i>	物理	虚拟	<i>e</i>
J1	-83.765 00	-83.764 52	0.000 48	44.172 00	44.171 70	0.000 30	44.170 00	44.170 47	0.000 47
J2	39.703 00	39.703 07	0.000 07	34.047 00	34.046 88	0.000 12	24.553 00	24.552 60	0.000 40
J3	-15.610 00	-15.610 18	0.000 18	-44.844 00	-44.843 51	0.000 49	-31.698 00	-31.697 59	0.000 41
J4	45.050 00	45.049 79	0.000 21	56.890 00	56.890 28	0.000 28	51.006 00	51.005 68	0.000 32
J5	-83.323 00	-83.323 16	0.000 16	-57.267 00	-57.267 08	0.000 08	-65.037 00	-65.037 47	0.000 47
J6	-15.426 00	-15.426 40	0.000 40	-32.867 00	-32.866 66	0.000 34	-20.735 00	-20.734 65	0.000 35

3.3 Siemens S7 通信协议

Siemens S7 通信能在复杂电磁干扰的工业环境提供可靠数据传输,支持复杂的控制应用,如工艺流程数据处理、流水线监控等。PLC 控制码垛工作站的上料和位置检测行为,采用通信协议 Siemens S7 和 Simreal 进行通信。

在 Simreal 中添加服务器 Siemens S7,添加实物 PLC 的 IP 地址^[25],以便与以太网接口实现 PLC 与 Simreal 间的连接。连接成功后,在 Simreal 中加载 PLC 程序的变量表,并将其与数字孪生模型的变量配对。配对成功后,当 PLC 的变量改变时,数字孪生模型的配对变量也随之改变。采用软件 TIA Portal 的在线监控功能^[26]可实时监控 PLC 的变量。对比某时刻 PLC 和 Simreal 中的启动信号、停止信号、物料到位信号等同一变量,如图 6 所示。由图 6 可知:该时刻 Simreal 中启动信号、停止信号、物料到位信号等变量与 PLC 中同一变量的数值相同,数据传输实时、准确。

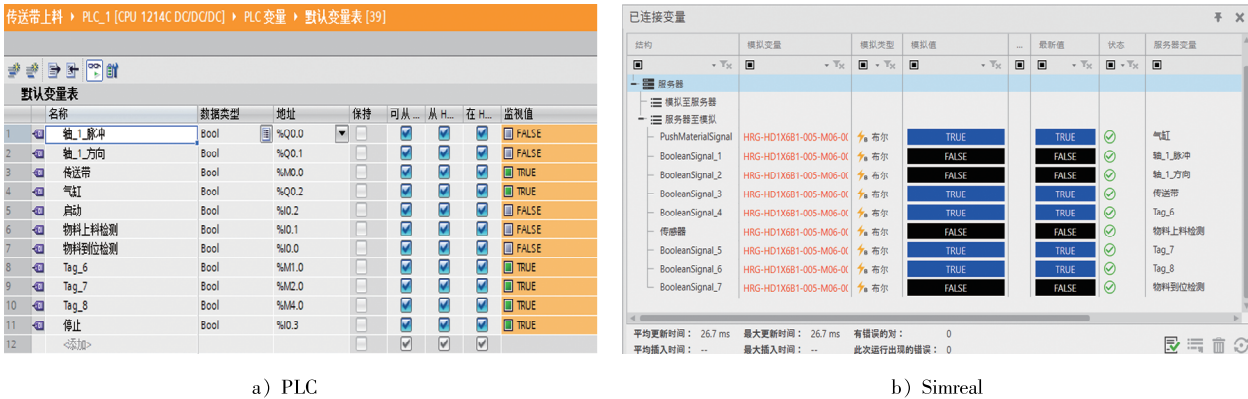


图 6 同一时刻下 PLC 与 Simreal 中启动信号、停止信号、物料到位信号等同一变量对比

4 测试与分析

4.1 系统测试

实现物理码垛工作站和虚拟码垛工作站间的通信后,启动工作站,测试码垛数字孪生系统,验证通信渠道能否及时准确地传输信号和变量,计算通信延迟时长,判断通信是否符合数字孪生的实时性要求^[22]。测试表明:虚拟码垛工作站能同步映射物理码垛工作站的动作,可实时可视化监测物理码垛工作站的工作过程。码垛工作站数字孪生系统现场测试情况如图 7 所示。

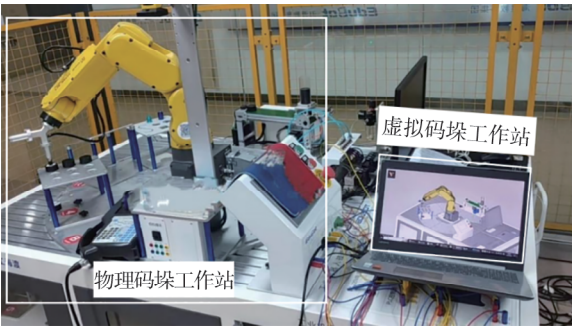


图 7 码垛工作站数字孪生系统现场测试

4.2 功能分析

所构建的码垛工作站数字孪生系统可实时统计各时刻六轴工业机械臂6个关节的运动数据,测试结果如图8所示。由图8可知:在1个码垛周期内,六轴工业机械臂各轴关节的运动轨迹不完全重复,原因是在1个周期内六轴工业机械臂搬运物料的动作重复,但放置物料的目标位置不同,物料被依次摆放在托盘上,各轴关节运动轨迹大致呈周期变化。六轴工业机械臂从第2秒开始稳定工作,每约5s完成1个物料的码垛。工作人员可借助 Simreal 中统计图观察机器人模块实时的工作状态,掌握现场的工作情况。

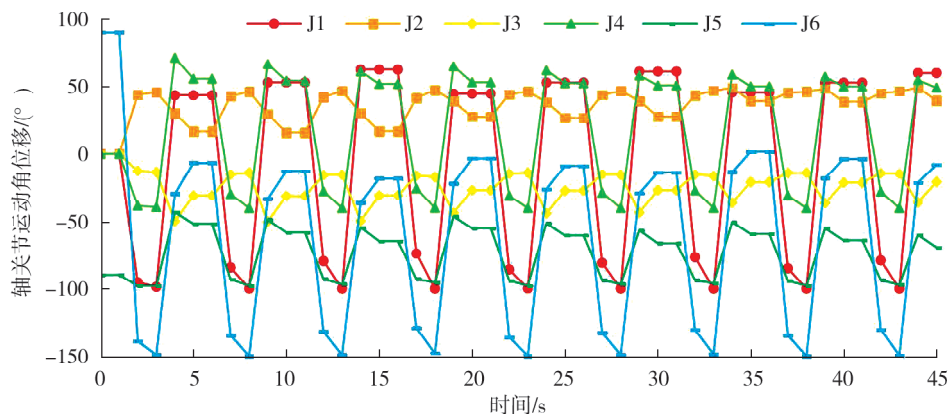


图8 码垛过程中六轴工业机械臂各关节的角位移随时间的变化曲线

码垛工作站数字孪生系统实时统计六轴工业机械臂的运动数据和码垛产能数据,工作人员可通过 Simreal 中统计图直观了解码垛的速度,进而优化工艺,提高生产效率。

测试过程中,物料由机器人模块码垛到码盘时,出现物料抓取位置不准确、放置错位等定位问题。定位误差主要来源及解决方法为:1)六轴工业机械臂抓取位置示教不准确,未捕捉到物料中心,解决方法是对六轴工业机械臂抓取位置坐标点重新示教,借助 Simreal 的仿真和离线编程功能,精确定位机器人抓取物料的位置点,并在测试中反复验证。2)物料在输送带的末端等待抓取的位置不固定,输送带停机导致物料和输送带的夹具未夹紧,解决方法是修改 PLC 控制逻辑,物料到位后输送带不停机,在 V 形夹具中夹紧物料,固定物料位置。3)码垛程序中放置物料的坐标点位示教不准确,未保证示教坐标点位在料槽中心,解决方法是对码垛程序中的坐标点位重新示教,借助 Simreal 的仿真和离线编程功能,精确定位放置物料的位置点,并在测试中反复验证。

定位误差解决前、后的测试物料总数均为 180 个,物料放置错位分别为 20、1 个,物料放置准确率分别为 88.9%、99.4%。优化后,机器人模块放置物料的准确率提高 10.5%,码垛错位的情况得到改善,证明数字孪生技术在码垛方面的可行性和应用价值。

5 结束语

本文以数字孪生五维模型理论为指导,设计并构建码垛工作站数字孪生系统,并对其进行测试。测试结果表明:所构建数字孪生系统可实时统计码垛工作站的数据信息,如六轴工业机械臂运动数据和码垛产能数据等;分析码垛过程中的物料放置错位的情况,提出解决方法。所构建数字孪生系统能实时监测码垛工作站工作过程,方便工作人员及时掌握生产现场的数据信息,数字孪生技术的应用价值较高,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 李洋. 中国智能制造领域技术转移促进策略研究[J]. 智慧中国, 2024(5): 23-24.
- [2] LAMON E, LEONORI M, KIM W, et al. Towards an intelligent collaborative robotic system for mixed case palletizing

- [C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Paris, France: IEEE, 2020: 9128-9134.
- [3] RAFAL S, KRYSTIAN E, MATEUSZ T, et al. Optimal scheduling for palletizing task using robotic arm and artificial bee colony algorithm[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 113: 104976.
- [4] TEA C, ELENA T, EMILIO M, et al. Evaluating the performance of autonomous mobile robots in an automated palletizing system: a simulation model [J]. Communications of European Council for Modelling and Simulation, 2023, 37 (1): 380-386.
- [5] JAROSLAW P, WOJCIECH K, MICHAL S, et al. Test bench concept for testing of gripper properties in a robotic palletizing process[J]. Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering, 2022, 13: 51-64.
- [6] 李翀, 付文杰, 王浩, 等. 基于视觉的机器人码垛错位检测系统和方法[J]. 制造业自动化, 2021, 43(10): 119-121.
- [7] 罗文. 基于 ABB 工业机器人的码垛应用与设计[J]. 自动化博览, 2022, 39(10): 50-52.
- [8] 王冬梅, 白锐, 高升, 等. 工业码垛机器人系统设计与实现[J]. 制造业自动化, 2024, 46(5): 157-164.
- [9] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1-15.
- [10] PANDHARE V, NEGRI E, RAGAZZINI L, et al. Digital twin-enabled robust production scheduling for equipment in degraded state[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2024, 74: 841-857.
- [11] 孙玉成, 宋家焯, 王健, 等. 面向生产过程的智能车间数字孪生建模及应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(3): 481-488.
- [12] 冯保国, 廉宇峰. 基于 B/S 模式和自有架构的智慧交通数字孪生系统[J]. 中国交通信息化, 2023, 279(2): 137-140.
- [13] 郭俊韬, 张珏, 郑宁敏, 等. 数字孪生技术在电网工程中的应用研究[J]. 南方能源建设, 2023, 10(2): 136-142.
- [14] 肖桀俊, 刘红梅, 石发强, 等. 基于数字孪生的煤矿智能管控平台架构研究与实现[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(5): 43-49.
- [15] 赵浩然, 刘检华, 熊辉, 等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1432-1443.
- [16] 刘娟, 庄存波, 刘检华, 等. 基于数字孪生的生产车间运行状态在线预测[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 467-477.
- [17] 傅贵武, 王兴波, 田英. 基于五轴加工中心智能生产线的数字孪生应用研究[J]. 工程设计学报, 2021, 28(4): 426-432.
- [18] 邓建新, 卫世丰, 石先莲, 等. 基于数字孪生的配送管理系统研究[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 585-604.
- [19] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
- [20] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[J]. Digital Twin White Paper, 2014(1): 1-7.
- [21] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
- [22] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(10): 2405-2418.
- [23] 陶飞, 马昕, 戚庆林, 等. 数字孪生连接交互理论与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(1): 1-10.
- [24] 谢景一. 基于 Modbus/RTU 通信协议的工业控制系统[J]. 信息技术, 2019, 43(4): 121-123.
- [25] 沈盛阳, 陈峰. 西门子 S7 通信在智能冲压中的应用[J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56(2): 57-59.
- [26] 董延青. 基于西门子博途 TIA 软件的 PLC 培训实验平台设计[J]. 自动化应用, 2024, 65(4): 90-92.

Digital twin system of stacking workstation based on five-dimensional model theory

WANG Fayong^{1,2}, ZHAO Lingyan^{1*}, ZHANG Jiejie², JIAO Peigang¹

1. School of Construction Machinery, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Hefei Hagong Balloon Digital Technology Co., Ltd., Hefei 230601, China

Abstract: To improve the intelligence level of the palletizing workstation, based on the five-dimensional model

theory of digital twins, SolidWorks 3D modeling software is used to create a three-dimensional model of the physical palletizing workstation. The 3D model is transformed into a virtual palletizing workstation using the simulation software Simreal. The physical properties and initial parameters of the six-axis industrial robotic arm, pneumatic suction cup, sensors, and other mechanisms in the virtual palletizing workstation are set. A programmable logic controller is used to design and implement the process flow of the palletizing workstation. Data interaction and real-time communication between the physical and virtual palletizing workstations are achieved through communication protocols such as Modbus and Siemens S7, constructing a digital twin system for the palletizing workstation. Experimental tests are conducted to validate the functionality of the palletizing digital twin system, with online visual monitoring of the system's operational status and verification of data transmission accuracy and real-time performance. Research shows that the constructed palletizing digital twin system can synchronously map the actions of the physical palletizing workstation, collect data such as productivity during the palletizing process, improve the accuracy of material placement to over 99%, and prevent misalignment occurrences.

Keywords: digital twin; five-dimensional model; palletizing workstation; communication protocol

(责任编辑:边文超)

.....
(上接第 73 页)

13, modified corn straw fibers are added to the asphalt mixture. Under different mass fractions (0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0%) and lengths (3, 6, 9 mm) of the modified corn straw fibers, the asphalt mixture is subjected to rutting tests, beam bending low-temperature tests, freeze-thaw splitting tests, and surface performance tests. The results show that the addition of modified corn straw fibers can effectively improve the dynamic stability, maximum tensile strain, and freeze-thaw splitting strength ratio of the asphalt mixture, while reducing the rut depth caused by repeated loading. When the mass fraction of modified corn straw fibers is low, the performance of the asphalt mixture improves with the increase in fiber length. When the mass fraction of modified corn straw fibers is high, the performance of the asphalt mixture first increases and then decreases with the increase in fiber length. When the lengths of the modified corn straw fibers are the same, as the mass fraction increases, the performance of the asphalt mixture first enhances and then weakens. For modified corn straw fibers with lengths of 3, 6, and 9 mm, the best performance is achieved at mass fractions of 0.8%, 0.6%, and 0.4%, respectively, with the best performance observed in the asphalt mixture containing 6 mm long modified corn straw fibers at a mass fraction of 0.6%.

Keywords: SMA-13; road performance; modified corn stalk fiber; fiber length; fiber content

(责任编辑:王惠)