

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407687

门机无人作业数字孪生三维监控系统研究*

杨玉林¹ 丁伟利^{1,2} 张晓雨¹ 向天鹤¹

(1. 燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学智能控制系统与智能装备教育部工程研究中心 秦皇岛 066004)

摘要:提出的系统致力于解决港口门座式起重机在大场景作业中面临的全视角监控难题。鉴于传统监控系统常常无法全面覆盖复杂的港口环境,特别是在满足门座式起重机和散货料场的全方位监控需求方面存在明显不足。为此,系统采用自研的视觉雷达融合系统,结合 Unity3D 和三维实时彩色点云,提出基于实时激光点云和门座式起重机运行数据驱动的港区散货料场和门座式起重机作业数字孪生映射方法,通过实时采集和处理激光点云数据,结合门座式起重机的运行状态信息,精确模拟并呈现出港口散货料场的实时情况和门座式起重机作业的工作状态。此外,还实现了港区散货料场的全方位三维可视化,支持用户进行动态漫游和实时视角切换,系统还具备强大的设备信息管理功能,能够实时监控各个门座式起重机的工作状态,并支持单机和多机作业实时监控,从而提高港口作业的效率 and 安全性。实验结果表明,系统运行帧数相比于直连数据库的三维监控系统,平均综合效率提升约 13.88%,所开发的系统具有良好的实时性,可以真实再现大规模港口散货料场的无人作业场景,为数字港口的管理奠定了基础。

关键词: 门座式起重机数字孪生; 三维监控系统; 实时激光点云; Unity3D; 数字港口

中图分类号: TP391; TN249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.2050

Research on digital twin 3D monitoring system for unmanned operation of port portal cranes

Yang Yulin¹ Ding Weili^{1,2} Zhang Xiaoyu¹ Xiang Tianhe¹

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Engineering Research Center of Intelligent Control System and Intelligent Equipment, Ministry of Education of Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The proposed system is committed to solving the full-view monitoring problem faced by port portal cranes in large-scale operations. Considering that traditional monitoring systems often fail to adequately cover the complexities of port environments, there are significant shortcomings in addressing the comprehensive monitoring needs of portal cranes and bulk cargo yards. To achieve this goal, the proposed system utilizes a self-developed visual radar fusion system in conjunction with Unity3D and three-dimensional real-time color point clouds. It introduces a digital twin mapping method for bulk cargo yards and portal crane operations within the port area, driven by real-time laser point clouds and operational data from the portal crane. This method accurately simulates and presents the real-time conditions of the port's bulk cargo yard and the operational status of the portal crane by collecting and processing laser point cloud data and crane operational information in real-time. Additionally, the system achieves a comprehensive three-dimensional visualization of the bulk cargo yard in the port area. This capability allows users to dynamically explore and switch real-time perspectives. The system also includes a robust equipment information management function capable of real-time monitoring the operational status of each portal crane. It supports real-time monitoring of both single-machine and multi-machine operations, thereby enhancing the efficiency and safety of port operations. The experimental results indicate that the system's overall efficiency is improved by approximately 13.88% compared to the 3D monitoring system that is directly connected to the database. The developed system exhibits excellent real-time performance, accurately reproducing unmanned operations in large-scale port bulk cargo yards, thereby laying a solid foundation for digital port

收稿日期: 2024-07-16 Received Date: 2024-07-16

* 基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目 (U22A2050)、广西科技重大专项项目 (桂科 AA22067064)、河北省自然科学基金重点项目 (F2024203051)、河北省高等教育科学研究项目 (CYZD202505)、河北省重大科技支持计划项目 (242G1802Z) 资助

management.

Keywords: portal crane digital twin; 3D monitoring system; real-time laser point cloud; unity3D; digital port

0 引言

随着工业 4.0、工业物联网的发展和“新基建”的浪潮,数字孪生技术为智能制造企业的发展提供新的机遇和途径。数字孪生是将物理实体的过程和系统以数字化的形式进行虚拟映射^[1],它可以通过多种方式获得物理实体的真实信息,并以高精度数据^[2]在虚拟场景中呈现出物理实体的整个生命周期^[3]。近年来,数字孪生技术越来越受到研究人员的关注^[4],特别是在智慧港口建设中,数字孪生可以有效提高港口的管理效率^[5],智慧港口逐渐成为港口发展的趋势^[6]。相比传统的信息管理和二维视频监控的方式,数字孪生适应港口对于智能化、可视化、网络化、无人化技术的需求,在这种情况下,学者们针对智慧港口、数字孪生港口技术进行了大量研究。如苏志国^[7]、丁伟利等^[8]提出港口煤炭码头三维可视化系统可以全方位的展现港口各个生产环节,在厂区中迅速完成设备定位服务,方便工作人员对厂区进行全方位管理;黄永军等^[9]提出“云上港航”数字孪生系统,以港口和船舶的需求为研究背景搭建了港口三维立体平行仿真平台,让港航参与者在不同角度享受不同的智能化信息服务;魏世桥等^[10]提出客货滚装港口数字孪生系统,利用 BIM 技术管控 BIM 信息模型的全部生命周期的特点,将安检称重、船只装载和票务收发集于一体,实现港口的数字化与智能化;毕磊等^[11]提出了涵盖全要素、全流程、全场景的数字孪生架构和五维模型,该系统可以全面准确反映港口运营情况、规避煤炭自燃安全隐患、大幅提升运营效率的目标。林成东等^[12]提出了铜冶炼厂三维数字孪生虚拟工厂平台研究与应用,该系统将实体空间中的生产过程进行虚拟呈现。Laima 等^[13]提出了基于 DT 的智能港口管理模型系统框架,它提供了 DT 驱动的平台,可以智能的管理设计、运输、运营等港口活动。Lin 等^[14]通过数字孪生方法构建自主的管理和控制系统来协助工厂运营由于大多数港口都存在供应链中之间交换信息的问题,Natalia 等^[15]提出以现代港口运营的信息化视角,提取海关需要的信息。Senyo 等^[16]提出基于加纳无纸化港口数字转型和技术供给理论的案例研究,进而促进公共部门转型。杨少龙等^[17]提出面向任意位置姿态估计的无人艇虚实交互研究,该系统实现了无人艇实时状态从物理空间向信息空间的真实映射。

在数字港口研究中,虽然上述学者已经提出了许多港口数字孪生系统,但仍存在明显不足,许多系统的设计集中于单一功能,未能全面考虑散货港口的复杂性和动

态特征。虽然部分系统具备一定的可视化能力,但在实时更新和动态响应方面仍显不足,限制了对复杂作业环境的有效管理。另外,在港口的日常作业中,应用于集装箱的智慧港口较多,在干散货港口及其门座式起重机的应用较少,散货料堆主要以露天为主,且形状各异,料堆装卸主要依靠人工操作起重机,这对于起重机操作员的技术、经验依赖性强,难以实现无人化作业^[18]。由于传统的港口作业监控系统需要使用众多摄像头,而且存在监控范围较小、安装成本较高、存在视野盲区等弊端,在使用过程中,港口工作人员不但要在监控室实时观测各种视频画面以判断港区是否存在危险,而且还要面对视频画面不完整、被遮挡以及恶劣天气下监控失灵的问题^[19],这使得传统监控系统越来越不能满足智慧港口的需求,急需一种能够对散货料堆及起重机进行三维实时在线监控的系统,而该系统的难点在于对不规则形状的散货料堆进行全方位可视化动态监控^[20]。

为了实现散货港口作业过程的全方位动态监控,满足港区对大规模、复杂环境和恶劣天气条件下的监控需求^[21],以门座式起重机项目为工程背景,以 SolidWorks 软件构建的 1:1 比例港区三维虚拟场景为基础,通过 PLC 控制器、自研视觉雷达融合系统提供真实的数据来源,利用 Unity3D 虚拟引擎软件搭建三维虚拟场景并结合 Oracle 数据库实现对整个港区的三维全方位实时动态可视化,同时集成应急处理和历史回放等功能,通过三维虚拟在线监控反映门座式起重机实体的完整作业流程。本文系统与传统的仿真系统相比,数字孪生系统主要集合物理模型、传感器数据更新、系统运行历史数据、多学科物理量和多尺度的仿真过程,并可以实时感知并预测工程机械的运动状态并进行智能决策,港口数字孪生无人作业三维监控系统可实现同时段、不同地点、不同设备的同步全方位监控,监控效果不受天气、光线的影响,无监控死角,可大范围的对厂区进行监测,系统整体交互性强、虚实数据同步效果良好。

1 港口门座式起重机数字孪生三维监控系统架构设计

港口门座式起重机数字孪生是利用物理模型、传感器、运行数据等,结合多学科内容以数字化的形式创建港口门座式起重机物理实体的虚拟模型,并通过三维仿真来完成门座式起重机在虚拟场景中的真实映射,并在虚拟场景中展现门座式起重机完整产生生命周期的方法。本文设计的港口数字孪生无人作业三维监控系统软件框

图如图 1 所示,系统总体架构如图 2 所示,主要包括物理空间、数据管理层和虚拟空间 3 个部分。

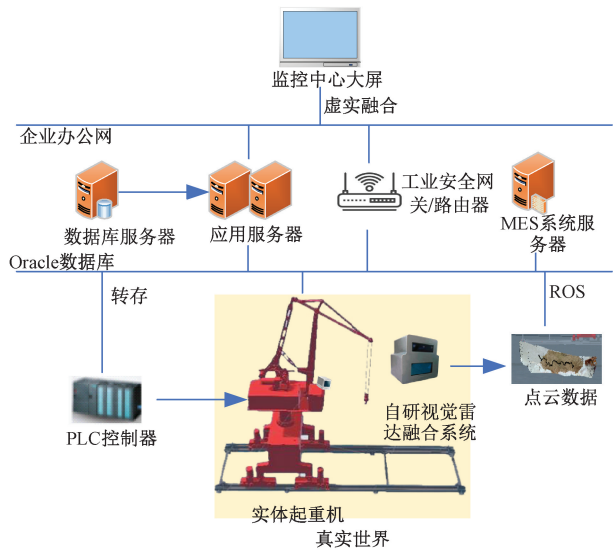


图 1 港口数字孪生无人作业三维监控系统软件框图

Fig. 1 Software block diagram of port digital twin unmanned operation 3D monitoring system

港口数字孪生无人作业三维监控系统的物理空间主要包括门座式起重机、安装在门机上的各类传感器、控制器、厂区模型和料堆等一切物理实体;数据管理层包括港口生产管理制造执行系统 (manufacturing execution system, MES) 系统、力控数据库、Oracle 数据库、服务器和机器人操作系统 (robot operating system, ROS) 终端,以及物理空间和虚拟空间接口组成;虚拟空间安装在客户端中,主要包括门座式起重机的孪生体、厂区模型、料堆孪生体、UI 界面、数据传输模块和三维可视化模块。厂区中的门座式起重机以及料堆为物理实体对象,门座式起重机通过 PLC 控制器读取实时数据并传入中央控制器,中央控制器将门机数据先传入力控数据库中再转存至 Oracle 数据库中。自研视觉雷达融合系统对厂区料堆进行扫描再将数据实时传入 Oracle 数据库。港口生产管理 MES 系统将管控数据及生产数据传入 Oracle 数据库。服务器通过 ADO 访问并操作数据库,服务器基于多线程架构不断从数据库中读取门机数据、料堆数据、用户登录信息和注册信息,并通过多线程读取多个客户端请求的数据,同时对客户端发送请求的数据进行序列化与反序列化进而实现与客户端的通信。

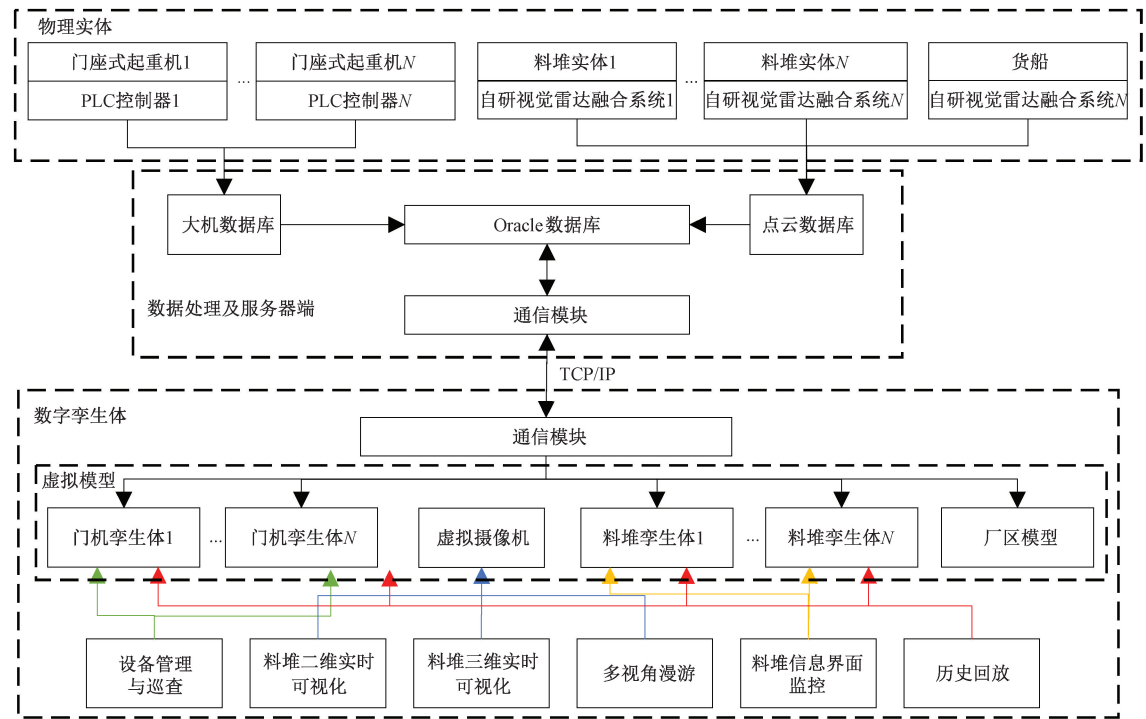


图 2 监控系统总体架构

Fig. 2 Overall architecture diagram of monitoring system

2 港口数字孪生三维监控关键技术

2.1 服务器端基础架构

无人作业港口不同类型的设备通常具有多种方式的

传感器、控制器和数据采集接口。因此,底层传感数据的实时采集和传输对于数字孪生系统的构建至关重要。针对厂区中的门座式起重机的运动数据,采用 PLC 控制器对每台门机数据进行实时采集,并通过将数据先存入力控实时数据库再转存至 Oracle 数据库的模式实现多机异

构数据的存储和传输。针对料堆,采用自研视觉雷达融合系统进行扫描,直接将数据存入 Oracle 数据库中的模式实现海量数据的存储;针对港口生产管理数据,则通过 MES 系统将管控数据和生产数据直接存入 Oracle 数据库。服务器直连数据库,通过多线程模式进行 Oracle 数据的实时读取和传输,服务器和客户端之间采用 TCP/IP 协议通信,该协议采用 Socket 套接字下的 Protobuf 协议进行各类数据的序列化与反序列化操作。Protobuf 协议可以加快传输的效率,节省内存空间。

服务器端采用 C/S 基础框架,服务器端用于数据处理,客户端负责与用户进行信息交互,通过局域网连接来实现客户端与服务器端的网络通信。C/S 架构具有交互性强、存取模式安全、交互效率高、利于处理大量数据的特点。

客户端与服务器端在 C/S 框架下,当客户端接收到用户的门机和料堆请求信息后,客户端向服务器端发出相应的请求信息,服务器将从数据库中得到的料堆数据和门机数据发送给客户端,客户端将接受到的数据传入脚本,脚本控制虚拟引擎中的组件,控制门机和料堆的组件动态运动,并将显示结果呈现给用户。

2.2 料堆大规模激光点云数据三维实时孪生映射

精确建立模型是进行场景虚实交互的前提也是实现数字孪生的基础,系统中门机、厂房、大棚均是采用 1:1 建模方式。通过 SolidWorks 对物体进行建模,门机由于结构复杂,故需要精细的绘制,但精细绘制会导致门机面数增加,当数据以 .fbx 的文件导入 Unity3D 时,会导致系统帧数下降明显。因此在保持门机逼真同时对门机进行了相应的减面操作,来使整个系统帧数保持在 30 帧以上。同时门机接收到相应的运动信息数据时可以按照真实数据实时运动并和厂区内真实门机的运动保持一致。

厂区中主要为散货料场。在散货料场三维实时彩色点云^[21]采集前,需要在 ROS 端启动自研视觉雷达融合系统,运行点云采集程序,将采集到的点云实时存入 Oracle 数据库中,服务器通过实时读取 Oracle 数据库中的点云数据,然后将读取到的数据进行序列化后发送至 Unity 客户端,客户端在接收到消息后,对该数据进行反序列化和解析,提取出该时刻点云的数据量并提取出坐标信息和 RGB 颜色信息,然后将接收到的料堆数据的坐标存入 Vector3 类型的数组中、RGB 颜色存入 Color 类型数组中,并对 RGB 颜色进行归一化处理。对每一时刻接收到的三维实时彩色点云数据创建一个物体,用于显示该时刻的点云。由于在 Unity3D 引擎中 Mesh 顶点的数目最多为 65 536,故如果点云数据量过大,则需要将二维数据进行分割,以便将全部数据加以显示。

在该系统中,虚拟空间与现实世界中的门座式起重机、料堆大小关系均为 1:1,即不存在虚实之间的比例

缩放变换。在散货料场与门座式起重机进行虚实映射时,首先需要确定自研视觉雷达融合系统相对于门座式起重机实体对象的位置,然后在虚拟模型中的同一位置设定为自研视觉雷达融合系统的位置,设物理世界中点云的坐标为 V_0 ,传入 Unity 的坐标依然为 V_0 ,设虚拟模型中自研视觉雷达融合系统的坐标为 V_{lidar}^u ,虚拟世界中点云的位置应当为 V_0^u ;则点云坐标与虚拟模型中自研视觉雷达融合系统坐标的偏移量如式(1)所示,则坐标转换后的第 i 个点云的坐标 V_i^u 如式(2)所示。

$$offset^u = V_{lidar}^u - V_0^u \quad (1)$$

$$V_i^u = V_{lidar}^u - offset^u \quad (2)$$

由于在现实世界中,自研视觉雷达融合系统的视角与水平面之间并非水平关系,而是存在夹角 α ,所以自研视觉雷达融合系统扫描的得到的料堆点云数据与水平面之间同样存在夹角 α ,针对此问题,需要将虚拟空间中的点云数据旋转 $-\alpha^\circ$ 以实现对齐,坐标旋转后的第 i 个点云的坐标 V_i^u 如式(3)所示,其中 R 为旋转矩阵,如式(4)所示。

$$V_i^u = R \cdot V_i^u \quad (3)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 实时 SLAM 轨迹映射

实时 SLAM 轨迹映射主要是对自研视觉雷达融合系统运动轨迹的映射,运动孪生映射与空间坐标相关,运动轨迹孪生映射即对虚拟环境中的门座式起重机的自研视觉雷达融合系统的位置进行精确、迅速地映射。ROS 端将 SLAM 轨迹数据上传到服务器端,再由服务器端发送至客户端,然后由客户端进行位置变换得到映射轨迹。

第 i 个点的虚拟位置如式(5)所示,其中 P_i^r 为 SLAM 轨迹中的第 i 个轨迹点,偏移量如式(6)所示。

$$P_i^u = offset + P_i^r \quad (5)$$

$$offset = P_{lidar}^r - P_0^r \quad (6)$$

式中: P_{lidar}^r 为虚拟模型中自研视觉雷达融合系统的位置; P_0^r 为 SLAM 轨迹中的第 1 个轨迹点。

2.4 料堆三维 Mesh 网格构建

三维 Mesh 网格构建主要是对采集到的三维实时彩色点云进行三维重建。由于采集到的点云均为无序点云,点与点之间不存在任何关系,所以三维 Mesh 网格构建的主要目标是对点云的所有点之间形成关系。三维 Mesh 网格构建首先需要将所有点通过法向量投影在一个二维平面上,然后使用 Delaunay 三角剖分算法获取点之间的二维拓扑关系,根据二维拓扑关系可以得到三维点之间的拓扑连接关系,最后根据三维点之间的拓扑连接关系生成三维 Mesh 网格。

Unity 在创建三维 Mesh 网格时,根据三角形索引的顺序,逆时针定义三角形顺序,得到三角形的正面,正面为可见面;顺时针定义三角形顺序,得到三角形的反面,反面为不可见面。假设顶点数组为 *vertices*,三角形顶点索引数组为 *triangles*,RGB 颜色归一化后的数组为 *colors*。其中,三角形顶点索引数组 *triangles* = {1,2,3,4,5,6,...,*n*} ,均为逆时针可见面,每 3 个索引构成一个三角形,即 {1,2,3} 构成一个三角形,{4,5,6} 构成另一个三角形,以此类推。然后创建一个 Mesh,将顶点数组 *vertices* 的值赋给 *mesh.vertices*,RGB 颜色数组赋给

mesh.colors,三角形顶点索引数组 *triangles* 赋给 *mesh.SetIndices*,即可得到有序点云的 Mesh 网格^[22]。

3 港口数字孪生三维监控系统功能实现及效果

港口数字孪生三维在线监控系统主要由多角度漫游、设备管理与监控、料堆信息监控、生产仿真、应急处理、历史回放构成,总体功能框架如图 3 所示。

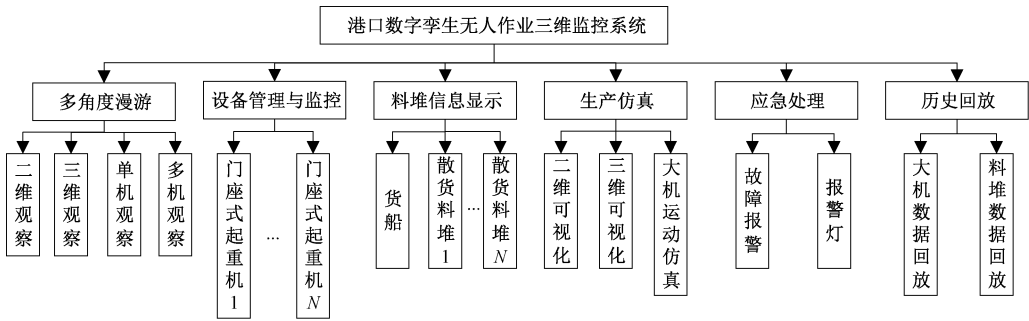


图 3 总体功能框架
Fig. 3 Overall function frame diagram

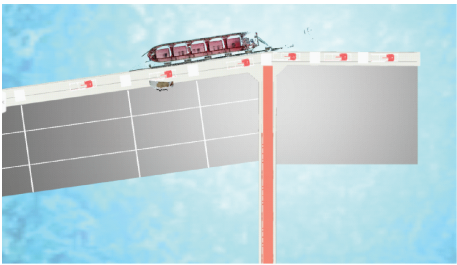
其中多角度漫游主要包括二维观察和三维观察、单机观察和多机观察,设备信息管理与监控主要包括对门座式起重机的单机状态监控和管理。料堆信息监控主要实现对散货料场进行监控。生产仿真主要包括料堆二维可视化、料堆三维可视化、门机运动仿真。应急处理主要包括故障报警及报警灯提示。历史回放主要包括门机的历史回放和料堆的历史回放,通过读取历史数据来重现欲回放时间段的厂区整体变化情况。

3.1 多角度漫游

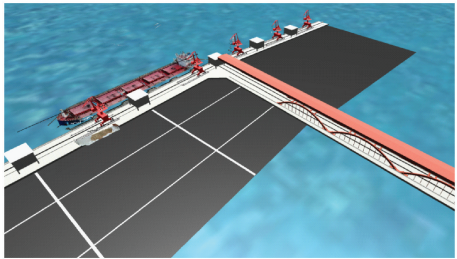
多角度漫游主要包括全景监控、单机观察、多机观察。利用切换虚拟场景中摄像机的位置及摄像机的数量来实现视角的切换。

1)全景监控界面,主要对整个厂区进行监控,点击全景监控按钮,系统的视野会回到初始界面,二维俯视观察整个码头。在全景监控界面可以对整个码头进行二维观察和三维观察。二维观察可以俯视整个码头,三维观察以 45°俯视角来观察整个码头。利用按键 WASD 来改变相机的位置,实现码头的全景漫游。当鼠标悬浮门座式起重机之上提示起重机的名称,点击起重机可以对起重机进行单机观察。二维观察和三维观察界面分别如图 4(a)和(b)所示。

2)单机观察界面,单机观察主要监控码头中选中的门机,在单机观察菜单栏中选择相应料场下的机器,即可对门机单独进行监控。点击菜单栏的蓝色全景观察按



(a) 二维观察
(a) Two dimensional viewing



(b) 三维观察
(b) Three dimensional viewing

图 4 二/三维观察界面

Fig. 4 Two/three dimensional viewing interface diagram

钮,可以对单个机器全方位的观察。点击人物观察按钮可以实现以场景中工作人员的视角巡视整个码头。点击上述的单机观察按钮即单个门机相互切换,在单机观察界面右下方显示着门机的和料堆的基本信息。单机观察结果如图 5 所示。

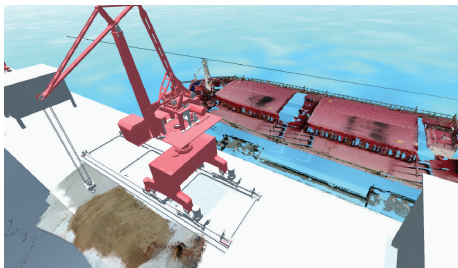


图 5 单机观察结果

Fig. 5 Single machine observation result diagram

3) 多机观察界面,多机观察主要为四机监控,点击鼠标右键弹出选择机器界面,可以对厂区中 4 个门座式起重机进行监控在四机监控界面可以同时监控四个机器。多机监控结果如图 6 所示。

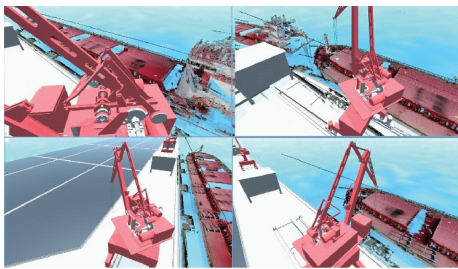


图 6 多机观察结果

Fig. 6 Multi machine observation result diagram

3.2 设备管理与监控

设备信息界面主要包含门机的所有信息,在设备信息左下角显示门机的实时运动视频,门机的实时运动视频通过切换 Unity3D 中相机的位置来实现。该部分可实时监控每台门机详细作业信息,包括运动状态、通信状态、作业状态和故障信息等。点击想要观看的门机视频即可切换到相应的门机显示界面。设备管理与监控如图 7 所示。



图 7 设备管理与监控

Fig. 7 Equipment management and monitoring diagram

3.3 虚实融合

点击料堆界面的虚实融合按钮,ROS 端采集到的实时料堆会传入 Unity,虚拟环境下的门座式起重机与料堆的位置相同,形状和高度都相同。虚实融合效果如图 8 所示。

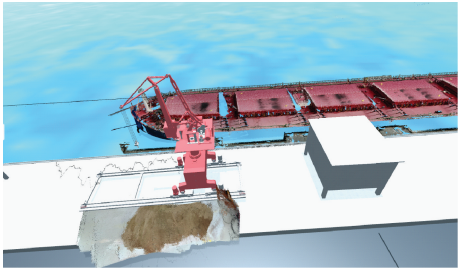


图 8 虚实融合结果

Fig. 8 The result of the fusion of reality and illusion

3.4 作业过程在线生产仿真

生产仿真主要包括料堆实时可视化和门机的运动仿真。厂区中的料场主要为散货料场。自研视觉雷达融合系统实时采集料堆的数据并将数据以二进制的形式直接写入 Oracle 数据库中,服务器通过多线程读取数据将料堆的二进制数据同过 Protobuf 进行序列化通过 TCP/IP 协议传入客户端,客户端中将字节数组进行反序列化,将解析后的字节数组用于生成 Texture 纹理,RawImage 通过改变 Texture 的纹理的改变,来实现料堆的二维可视化。将解析到的字节数组通过转化生成 short 类型的二维数组,利用二维数组和 Mesh 的顶点数组 vertex 对应生成料堆实现料堆的三维实时可视化。由于料堆数据过大且料堆短时间内不会有明显的变化,故客户端 1 min 向服务器端发送一次请求数据命令,以此可以保证除全景监控界面,其他界面运行帧数在 30 帧以上,有效避免系统卡顿现象的产生。

1) 料堆三维可视化

料堆的三维可视化主要对厂区中的散货料场进行实时的显示,料堆主要通过 Mesh 网格来实现。Mesh 是 Unity3D 的一个组件,称为网格组件,网格是由多个彼此相连的三角形构成的。Mesh 主要由顶点坐标数组(vertex)、线(normal)、纹理坐标(uv)、三角形序列(triangle)、网格过滤器(meshFilter)、格渲染(meshRenderer)组成。虚拟场景中料堆的生成图片如图 9 所示。

2) 门机运动仿真

该系统对门机的实际运动做了仿真。主要包含门机的行走动作、旋转动作、俯仰动作及铲斗的运动仿真。PLC 控制器采集厂区中真实门机数据,通过中央控制器先传入力控数据库中再转存至 Oracle 数据库中,服务器

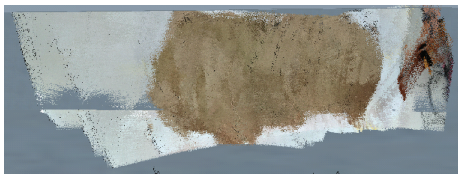


图 9 料堆的生成

Fig. 9 Pile generation diagram

通过线程不断读取 Oracle 数据库中门机的数据,将门机数据通过 Protobuf 进行序列化传入客户端,客户端对数据进行反序列化,将门机需要的各个参数传给控制机器运动的代码所对应的组件中,通过 Update 函数不断更新门机的实时运动状态。

本文系统与直连数据库的系统进行帧数对比,各个界面的运行帧数对比如表 1 所示。实验结果证明,相比于直连数据库,所用方法在所有界面的帧率均优于直连数据库的方法,显著提高了系统的实时性和用户视觉体验。

表 1 运行帧数对比

Table 1 Comparison of running frames interface

(fps)

界面名称	本系统帧数	直连数据库帧数
全景监控	20.4	18.3
单机观察	180.4	169.6
多机观察	31.7	23.2
设备管理与监控	50.8	39
料堆信息监控	30.9	28.7
历史回放	157.2	140.2

3.5 应急处理

应急处理主要用于对厂区中门机的故障状态和数据库的联通状态做出迅速的预警提示。数据库的联通状态通过通信数是否变化来确定,当通信数长时间保持不变即可证明通信断开,否则通信正常。门机故障状态通过状态报警灯来实现,当门机正常运行时报警灯变为绿色,否则为红色,并在门机对用的界面上做出相应的提示,工作人员可通过观察报警灯提示来判断门机是否正常工作。报警灯和警报信息显示界面如图 10 所示。



图 10 报警信息提示

Fig. 10 Alarm information prompt diagram

4 结 论

针对散货港口难以实现全方位监控的问题,提出了基于三维实时彩色点云和自研视觉雷达融合系统的港口门座式起重机数字孪生三维实时监控系統。利用 Unity3D 作为开发工具,使用 PLC 和自研视觉雷达融合系统,将门机和料堆数据实时传入数据库中,并通过服务器将数据发送至客户端进行处理,实现了港口门座式起重机虚拟空间对物理空间的真实映射和三维在线监控;针对料堆数据与门座式起重机相对位置的关系问题,将散货料堆数据与门座式起重机进行虚实融合,实现了散货料堆虚拟空间对物理空间的真实映射;同时实现了厂区及门机的多角度漫游、设备管理与监控、料堆信息显示、生产仿真、应急处理及历史回访等功能。经实验对比,系统运行时帧数可达到 30 帧以上,系统交互性强,具有更好的实时性,可实现虚拟场景对物理空间的实时可视化。由于所建立的港口数字孪生无人作业三维监控系统只是初步实现了虚拟空间对物理空间的映射,尚未实现虚拟空间对物理空间的控制和优化调度管理,所以下一步将继续探讨基于数字孪生技术的无人作业港口门机作业控制、故障诊断、作业过程智能识别和智慧管控方法,以便更进一步实现港口作业过程的“一键控制”。

参考文献

[1] 程昊,王红军,杨俊峰,等. 面向生产线全生命周期的数字孪生模型应用[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(4):115-121.
CHENG H, WANG H J, YANG J F, et al. Digital twin application for the entire life cycle of the production line [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(4):115-121.
[2] 庞景月,赵光权. 数字孪生驱动多算法自适应选择的空电源系统故障检测[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(6):91-99.
PANG J Y, ZHAO G Q. Digital twins drive multi-algorithm adaptive selection of space power system fault detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(6):91-99.
[3] 房巨山,王君玲. 动车所数字孪生可视化运维管理平台设计与应用[J]. 技术与创新管理,2021,42(4):477-482.
FANG J SH, WANG J L. Design and application of digital twin visualization operation and maintenance management platform for motive power station [J]. Technology and Innovation Management, 2021,42(4):

- 477-482.
- [4] 张云翼,林佳瑞,张建平. BIM与云、大数据、物联网等技术的集成应用现状与未来[J]. 图学学报, 2018, 39(5):806-816.
- ZHANG Y Y, LIN J R, ZHANG J P. Present and future of integrated applications of bim, cloud computing, big data and internet of things[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(5):806-816.
- [5] 王艺,李彩霞,李智,等. 基于Vega Prime的“数字港口”三维可视化系统与构架设计[J]. 水运工程, 2014(8):71-76.
- WANG Y, LI C X, LI ZH, et al. Architecture design of 3D visualization technology for digital port based on Vega Prime[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(8):71-76.
- [6] 董建伟,李海滨,孔德明,等. 基于多视图立体视觉的煤场三维建模方法研究[J]. 燕山大学学报, 2016, 40(2):136-141.
- DONG J W, LI H B, KONG D M, et al. Research on 3D modeling of coal field based on multi-view stereo vision method[J]. Journal of Yanshan University, 2016, 40(2):136-141.
- [7] 苏志国. 黄骅港煤炭码头三维可视化管理系统研究[J]. 黑龙江科技信息, 2014(34):122-124.
- SU ZH G. Research on three-dimensional visualization management system of coal terminal in Huanghua port[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2014(34):122-124.
- [8] 丁伟利,杨韬,王文锋. 基于Unity3D的煤炭码头视景仿真监控系统研究与实现[J]. 高技术通讯, 2019, 29(8):791-798.
- DING W L, YANG T, WANG W F. Research and implementation of visual simulation and monitoring system for coal terminal based on Unity3D[J]. High Technology Letters, 2019, 29(8):791-798.
- [9] 黄永军,王闰成,马枫. “云上港航”数字孪生系统助航解决方案[J]. 信息技术与信息化, 2018(12):67-70.
- HUANG Y J, WANG R C, MA F. “Cloud Port and Shipping” digital twin system navigation solution[J]. Information Technology & Informatization, 2018(12):67-70.
- [10] 魏世桥,王东魁,张煜,等. 客货滚装港口数字孪生智慧运作模式[J]. 港口装卸, 2020(1):41-45.
- WEI SH Q, WANG D K, ZHANG Y, et al. Digital twin intelligent operation mode of the passenger-cargo RORO port[J]. Port Operation, 2020(1):41-45.
- [11] 毕磊,郭享,柳海宇,等. 煤炭港口数字孪生系统构建及应用[J]. 水运工程, 2024(5):185-192.
- BI L, GUO X, LIU H Y, et al. Construction and application of digital twin system for coal ports[J]. Port & Waterway Engineering, 2024(5):185-192.
- [12] 林成东,周天驰,张沅,等. 铜冶炼厂三维数字孪生虚拟工厂平台研究与应用[J]. 冶金自动化, 2021, 45(4):12-19.
- LIN CH D, ZHOU T CH, ZHANG Y, et al. Research and application of 3D digital twin virtual factory platform for copper smelter[J]. Metallurgical Industry Automation, 2021, 45(4):12-19.
- [13] LAIMA G, CHRISTOPHER M. Small and medium-sized ports in the ten-t network and nexus of europe's twin transition: the way towards sustainable and digital port service ecosystems[J]. Sustainability, 2021, 13(8):4386-4386.
- [14] LIN L, ATHE P, ROUXELIN P, et al. Digital-twin-based improvements to diagnosis, prognosis, strategy assessment, and discrepancy checking in a nearly autonomous management and control system[J]. 2021, DOI:10.48550/arXiv.2105.11039.
- [15] NATALIA K, ANASTASIA G, SVETLANA M, et al. Digital platform for maritime port ecosystem: Port of hamburg case[J]. Transportation Research Procedia, 2021, 54:909-917.
- [16] SENYO P K, JOHN E, OSABUTEY E L C. Digital platformisation as public sector transformation strategy: A case of Ghana's paperless port[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2021, 162:120387.
- [17] 杨少龙,孙延浩,黄金,等. 面向任意位置姿态估计的无人艇虚实交互研究[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(11):151-156.
- YANG SH L, SUN Y H, HUANG J, et al. Research on unmanned surface vehicles' reality-virtual interaction for attitude observing[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(11):151-156.
- [18] 李齐权,王诗伟,刘青. 干散货港口三维数字堆场系统[J]. 港口科技, 2024(2):6-10.
- LI Q Q, WANG SH W, LIU Q. 3D digital yard system for dry bulk cargo ports[J]. Port Science & Technology, 2024(2):6-10.
- [19] 李林,张钊,范垂荣,等. 干散货码头数字孪生综合管控平台架构与实践[J]. 水运工程, 2024(1):189-195.
- LI L, ZHANG ZH, FAN C R, et al. Architecture and practice of digital twin integrated management and control platform for dry bulk terminal[J]. Port & Waterway Engineering, 2024(1):189-195.

[20] 刘世栋,龚和艳,戴新旺. 干散货码头设备状态可视化研究与应用[J]. 通信与信息技术,2022(6):11-14.
LIU SH D, GONG H Y, DAI X W. Research and application of equipment state visualization in dry bulk terminal[J]. Communication and Information System, 2022(6):11-14.

[21] 陈熙源,戈明明,姚志婷,等. 雨雪天气下的激光雷达滤波算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 172-181.
CHEN X Y, GE M M, YAO ZH T, et al. Research on LiDAR filtering algorithm in rainy and snowy weather[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 172-181.

[22] 张晓雨. 基于 3D 彩色点云的散货装卸场景三维感知及测量方法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2024.
ZHANG X Y. Research on 3D perception and measurement method for bulk cargo loading and unloading scene based on 3D color point cloud[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.

作者简介



杨玉林,2022 年于燕山大学里仁学院获得学士学位,现为燕山大学硕士研究生,主要研究方向为数字孪生和路径规划。
E-mail: yulinyang@stumail.ysu.edu.cn

Yang Yulin received his B. Sc. degree from Liren College of Yanshan University in 2022. He is now a M. Sc. candidate at Yanshan University. His main research interests include digital twin and path planning.



丁伟利(通信作者),2008 年于中国科学院沈阳自动化研究所获得博士学位,现为燕山大学教授,主要研究方向为计算机视觉、虚拟现实和模式识别。
E-mail: weiye51@ysu.edu.cn

Ding Weili (Corresponding author) received her Ph. D. degree from the Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2008. She is now a professor in Yanshan University. Her main research interests include computer vision, virtual reality and pattern recognition.