

基于数字孪生的高保真推耙机虚拟调试系统

李元龙¹, 禹鑫燚², 欧林林², 魏岩²

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023;

2. 浙江工业大学 信息处理与自动化研究所, 杭州 310023)

摘要: 为提前预知无人推耙机控制系统的风险, 降低推耙机的无人化作业开发成本和调试周期, 基于数字孪生技术虚实高度一致的特性, 提出了一种针对全自动无人推耙机控制算法演练与仿真的虚拟调试方法; 根据无人推耙机的实际运行控制机理, 从机械传动, 液压推动到电气控制建立了推耙机在物理层面多领域统一的数字孪生模型; 根据无人推耙机清舱作业的感知机理, 构建了激光雷达、惯导、里程计和 RGB-D 的多传感器融合数字孪生模型; 基于虚幻引擎的实时渲染特性与 AGX Dynamics 多体动力学库, 设计了高保真的数字孪生模型, 并构建了孪生推耙机的虚拟控制系统; 通过在港口岸桥应用于全自动无人推耙机的调试实例, 展示了基于数字孪生的高保真推耙机虚拟调试方法的有效性和可行性, 有效避免了调试开发周期过长的缺陷。

关键词: 数字孪生; 无人推耙机; 虚拟调试; 多领域建模; 高拟真渲染

Virtual Debugging System for High-Fidelity Rake Pushing Machine Based on Digital Twins

LI Yuanlong¹, YU Xinyi², OU Linlin², WEI Yan²

(1. Engineering of Information, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Institute of Information Processing and Automation, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to predict the risk of unmanned rake pushing machine control systems in advance and reduce the development cost and debugging cycle of the unmanned rake pushing machine, based on the highly consistent virtual and real characteristics of digital twin technology, a virtual debugging method for simulating and practicing fully automatic unmanned rake pushing machine control algorithm was proposed. According to the actual operation and control mechanism of the unmanned rake pushing machine, a unified digital twin model of the unmanned rake pushing machine in multiple physical fields was established, including mechanical transmission, hydraulic propulsion, and electrical control. Through the perception mechanism of the unmanned rake pushing machine cleaning operation, a digital twin model integrating multiple sensors such as lidar, inertial navigation, odometer and RGB-D was constructed. Based on the real-time rendering characteristics of virtual engine and AGX Dynamics multi-body dynamics library, a high-fidelity virtual debugging system was designed, and a virtual control system of the twin rake pushing machine was constructed. Debugging examples of the fully automatic unmanned rake pushing machine in ports, banks, and bridges verify the effectiveness and feasibility of the virtual commissioning method for the high-fidelity unmanned rake pushing machine based on digital twins, which effectively avoids the disadvantages of long debugging and development cycle.

Keywords: digital twins; unmanned rake pushing machine; virtual debugging; multi-domain modeling; high-fidelity rendering

收稿日期:2025-03-12; 修回日期:2025-04-01。

基金项目:国家自然科学基金(62373329);浙江省自然科学基金委员会,白马湖实验室联合基金,浙江省自然科学基金重大项目(LBMHD24F030002)。

作者简介:李元龙(2000-),男,硕士研究生。

欧林林(1980-),女,博士,教授。

通讯作者:禹鑫燚(1979-),男,博士,副教授。

引用格式:李元龙,禹鑫燚,欧林林,等. 基于数字孪生的高保真推耙机虚拟调试系统[J]. 计算机测量与控制,2025,33(8):216-224.

0 引言

随着我国经济转向高质量发展阶段,产业结构进一步转型升级,5G、数据中心、新能源汽车等新基建持续发展建设,工程作业电改进程不断加速,我国全社会电量需求与电力负荷在未来几年中将保持高速增长。作为我国目前最主要发电方式,燃煤火力发电全国占比超60%。在港口火力发电作业中,清舱转运机械作为散货船作业的核心装备,其功能覆盖舱内清理与货物转运等关键环节。这类重型设备不仅能有效提升船舶作业效率与能源利用率,更在火力发电厂的燃煤卸载及大中型散货码头作业中发挥着重要作用。推耙机负责清理抓斗作业后的舱底残余煤料,但是,存在受机械自由度限制,传统人工操作存在粉尘污染严重、作业效率低等问题,推动清舱卸船设备无人化改造势在必行。然而,码头连续作业特性导致实地调试面临三大难点:停机实验成本高昂、密闭船舱安全隐患突出、技术迭代周期冗长。

数字孪生技术为解决以上问题提供了新的方法和途径,数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程。该技术能够帮助人们做出更加准确的预测、合理的决策和明智的计划^[1-2],目前数字孪生的应用已涉及智能制造、航空航天、交通运输、能源电力、智慧城市和工业工程等多个领域^[3]。

数字化技术驱动下的虚实映射系统近年成为工业智能化领域的研究热点^[4]。该技术体系依托数字化建模与仿真平台,通过建立产线运行的三维动态模型,在虚拟空间完成工艺流程的预验证与参数优化。这种工程验证前移的创新模式,使设备联调周期较传统方式缩短40%以上,不仅有效降低物理调试阶段的资源消耗,更为工业4.0时代的智能制造提供了可靠的数字化验证手段^[5-6]。

针对高粉尘、动态、非结构化等环境条件难以重建的问题,静态的三维模型已不能满足自动化作业系统日益丰富的功能要求,因此需要综合考虑各类自动化设备的动态特性和物理表征,并利用适当的方法对工程装备的动力学特性进行还原,融合传感器信息,以获得精确可靠的具有全属性生命周期的数字孪生模型。仿真主要包括多体动力学机械系统仿真(MSS)和有限元仿真(FEA)。

在复杂机械系统仿真领域,多体动力学(MMS)与有限元(FEA)方法呈现互补特性。多体动力学仿真擅长处理构件间大范围运动关联分析,其运动学解算能力可为弹性体分析提供载荷边界条件。但受制于刚性体假设,该方法未考虑结构柔性特征,导致应力应变预测精度受限^[7]。与之形成对比,有限元分析在构件级建模中展现出刚柔耦合效应解析优势,其精细化建模能力需

依托精确的边界条件定义,这对工程师的接触非线性处理能力提出较高要求。值得注意的是,有限元方法在系统级运动学仿真中存在计算效率瓶颈,难以有效处理多自由度系统的整体运动传递问题。另一方面不适合在仿真引擎中做实时的高拟真渲染,因此需要从整个系统的建模效率出发。

在机械系统动态仿真领域,ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems)作为美国MDI公司研发的工程仿真平台,其核心价值体现在多体系统运动学与动力学耦合分析方面^[8]。该软件采用参数化建模方法,能够实现复杂机械系统的时域响应特性解算,包括静平衡状态求解、运动轨迹规划以及动态载荷谱生成等功能。通过建立包含约束关系的多体拓扑结构,工程师可精确获取系统关键节点的运动学参数及关节约束反力等特征曲线。

在工程应用层面,ADAMS的仿真数据具有双重技术价值:既可用于评估机械装置的工作性能包络,又能为有限元分析提供动态边界条件输入。相较于传统有限元方法在构件级应力分析中的优势,ADAMS更擅长处理多自由度系统的大范围运动学问题,其刚柔耦合建模能力突破了传统多体动力学刚性假设的局限。在工程机械、车辆底盘、航空航天等涉及复杂运动链的领域,该平台通过模块化求解器的协同工作,显著提升了多物理场耦合系统的数值仿真置信度。

但是,针对复杂的柔性多体动力学结构,ADAMS依旧存在一些实时性的不足,文献[9-11]提出了一种针对柔性刚体类似线缆和土方的实时模拟方法,既能很好地弥补ADAMS不能够实时对柔性多体动力学结构实时模拟的缺陷,又弥补了有FEA和MSS无法高拟真实时渲染的不足。针对自动化过程作业的数字孪生中无法很好感知环境的问题,目前文献[12-13]研究了激光雷达、IMU、RGB-D相机等多种传感器的仿真方法,很好地阐述了将移动系统设备中仿真环境的感知数据与ROS机器人操作系统通信的方法,在gazebo, matlab, UE等平台中取得了非常不错的效果,提升了虚拟感知的精确性和实时性。

综上所述,本文开发基于数字孪生的高保真推耙机虚拟调试系统可以提高无人推耙机作业算法开发的效率,减少环境危害,促进工业无人化技术的发展,为数字孪生技术应用提供更多的可能性。

1 系统整体实施方案

1.1 无人驾驶推耙机整体特性分析

在整体构造上,传统的推耙机组成包括发动机、传动系统、下部行走体、前端工作装置(推耙铲斗)和驾驶室及其外壳如图1所示。不同于传统的推耙机组成,

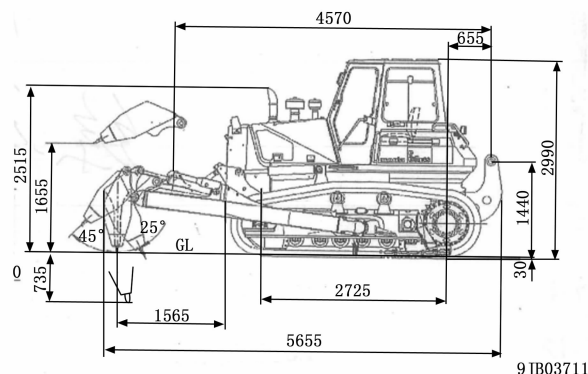
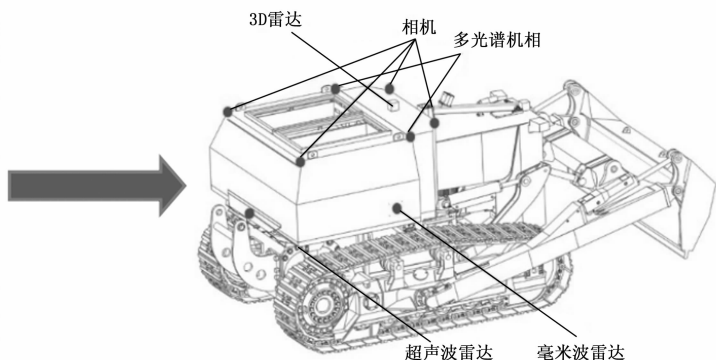


图 1 传统推耙机与无人推耙机构造



无人推耙机的组成如图 1 所示融合有各类传感器包括激光雷达、IMU、RGB-D 相机和红外传感器等。

在控制方式上，无人驾驶的推耙机由上位机远端向推耙机 PLC 下位机发布自动控制指令或人为远程操作，感知环境信息并发送给控制器完成规划算法和作业策略的实现。

1.2 无人驾驶推耙机虚拟调试需求分析

对无人推耙机实施虚拟调试主要趋于两个方面：1) 能够在实地在线调试开发受限的情况下（如硬件损坏、场地受限、环境恶劣、台风导致的港口停摆等）仍能够进行离线调试开发；2) 对无人推耙机的特性及控制参数进行分析，并结合实际推耙机给出无人推耙机控制的输入输出接口，校准推耙机控制算法。

无人推耙机的传感器类型较多且感知数据庞大，需要确保控制算法的输入输出同真实推耙机一致，确保孪生环境下的传感器感知数据类型与实际一致，同时确保数据通信的时效性与可靠性，校验输入数据流是否能够即时抵达控制端并与算法频率同步^[14]。其次，需要校验孪生推耙机物理结构、机械元器件及电气参数是否与实际推耙机一致。最后，在控制程序设计上，需确保控制程序的稳定性和逻辑正确性，参考实际推耙机的运转逻辑验证虚拟推耙机的机械元器件行程速度和元件作业范围是否正确，避免控制输出出现极端情况。

1.3 虚拟调试系统架构设计

通过对火电作业中的推耙机、煤堆、作业环境等对象进行高保真数字化映射，结合高效建模、实时感知、数据采集和实时数据互通等构建基于数字孪生的无人推耙机虚拟调试系统。该虚拟调试系统支持对定位建图、路径规划、协同控制等方法 and 策略进行仿真验证，本文研究基于数字孪生的无人推耙机虚拟调试方法实现清舱作业全过程的动态实时数据双向流动与信息反馈。

根据以上研究内容和系统需求，设计的基于数字孪生的无人推耙机虚拟调试系统总体框架如图 2 所示，包含了实际清舱系统与孪生清舱系统间的数据互联与信息交互方案。首先，由开发人员确定调试内容，上位机控

制中心会向下发与调试目标相关的控制指令例如线速度、角速度、位置、姿态、区域点等，然后，孪生推耙机在孪生作业环境中感知环境信息并通过 ROS 的话题机制^[15]传给实际控制器，实际控制器再根据感知数据进行相关处理，并输出控制量到孪生作业环境中的推耙机中，开发人员对孪生推耙机在孪生环境中的动作行为和数据进行监测判断是否满足调试要求^[16]。

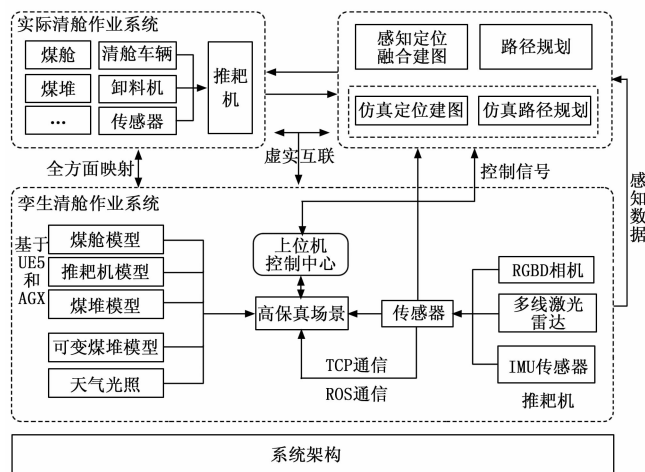


图 2 虚拟调试系统架构

2 数字孪生模型构建

2.1 推耙机孪生模型建模方法

本研究以日本小松推耙机为原型，基于多领域集成信息总成图，提出了一种跨物理域协同的无人推耙机数字孪生建模方法。研究首先构建了涵盖机械结构、电气系统和运动学特征的三维几何模型，通过 Solid-Works^[17]实现精确机械装配建模，结合 Blender^[18]完成复杂曲面拓扑优化；继而采用 Polygon Crusher 工具实施网格优化处理，确保模型在保留关键特征量的前提下实现计算效率提升。在此基础上，通过 ANSYS Spaceclaim^[19]平台建立多层级结构分化策略，系统性地完成：1) 机械传动系统参数化建模与材料属性映射；2) 液压驱动单元动力学特性嵌入；3) 多自由度关节运动学约

束配置。最终在虚幻引擎 5^[16] 中实现了基于物理的渲染材质映射与动态环境优化, 构建了具有多物理场耦合特征的高保真度虚拟映射模型。

2.2 机械多体动力学系统建模

在完成无人推耙机的三维建模之后, 还需要对推耙机自身以及各零部件之间的物理特性进行分析和重构。

依据上文对无人推耙机的结构组成和运动特性分析, 在本文中将孪生的无人推耙机系统基于其内部各零部件之间的运动关系和空间属性划分为物理多体子系统、前端作业子系统和下部行走子系统。

2.2.1 物理多体子系统建模

基于 STEP AP242 标准化格式的原始 CAD 模型, 本研究采用 SpaceClaim 平台以及 AGX Dynamics^[20] 实现以下预处理流程:

- 1) 几何修复: 消除模型微小特征 (如倒角、螺孔) 与非流形拓扑结构, 确保仿真稳定性 (满足 Jacobian $>1\times10^{-6}$ 条件)。
- 2) 功能模块划分: 推耙机机体: 包含动力舱、控制单元及液压管路系统, 定义为父级装配体。下部行走体: 差速驱动底盘与悬挂模块, 通过布尔切割分离履带轮组。前端作业件: 分割耙铲结构、大 H 架与液压模块。
- 3) 轻量化重构: 基于 Polygon Crasher 平台通过自适应网格划分 (平均单元尺寸 $l=5\text{ mm}$, 曲率容差 $\delta=0.01\text{ mm}$), 将模型面片数从 2.3×10^5 优化至 3.2×10^4 , 在性能优化的同时满足了实时仿真需求。
- 4) 保留旋转运动副、柱式运动副、平面运动副和螺旋运动副特征, 表 1 提供了这些运动副的特性。

表 1 推耙机运动副组成

名称	图标	特性
旋转运动副		1 个旋转自由度
柱式运动副		1 个移动自由度和旋转自由度
球型运动副		3 个旋转自由度

在数字孪生建模中, 旋转运动副的摩擦属性和柱式运动副的刚度是影响多体动力学仿真精度的关键参数。为了确保虚拟调试的有效性和仿真的稳定性, 本文基于 AGX Dynamics 对所有运动副进行理想化建模。摩擦属性方面, 设置旋转摩擦系数为 0.2, 静摩擦扭矩范围为 0.5~1, 动摩擦系数为 0.1; 刚度方面, 基于 AGX 物理引擎引入柔度 (刚度的倒数) 与隐式阻尼 (在数值仿真中抑制约束系统的高频振荡, 提升计算稳定性), 为了达到理想化刚性约束, 柔度设置为 $1\times10^{-08}\text{ m/N}$,

隐式阻尼设置为 0.006 7。

2.2.2 前端作业子系统建模

无人推耙机的前端作业件子系统是由四液压杆、耙铲和一个大 H 架组成, 由液压缸提供作业动力, 前端液压缸通过控制前端液压杆的行程来推动耙铲的开合, 中间的连杆提供缓冲, 后端的液压缸通过控制后端液压杆的行程来控制大 H 架的升降。

基于标准 STEP 格式的网格体模型导入至 SpaceClaim 软件环境中。在 SpaceClaim 内基于布尔切割和 AGX Momentum 重组刚体的方法将模型的各个部分独立出来, 形成多个 AGX 刚体组件, 特别是将前端作业件中耙铲的楔形结构及各连杆部分, 并融合成不同的刚体单元。同时, 在液压杆一耙铲铰接点部位添加了旋转副充当铰接组件, 在液压缸一液压杆连接点添加了柱式副充当液压组件以精确模拟推耙机的机械运动特性。

并且, 在虚幻引擎中基于 AGX 和蓝图事件图表设计了可采用压杆的行程速率控制与力矩控制方式和大 H 架的抬升高度与推耙铲角度的反馈信息来优化无人推耙机的作业方式, 避免极端输出扭矩的情况发生。

2.2.3 下部行走子系统建模

无人推耙机下部行走系统采用双履带差速驱动设计, 核心由以下模块构成: 动力模块, 单电机驱动, 通过分动箱将动力分配至双侧履带轮组, 配合电液比例阀实现扭矩动态调节; 悬挂模块, 每侧履带含 8 组独立悬挂单元, 通过液压缓冲机构连接履带轮与机体。约束层级: 履带轮→悬挂→机体, 形成两级运动副传递路径。

本文基于 AGX Dynamics 的 track 模块定义了一种集总元件的数据结构, 该结构元件由 AGX Dynamics 模拟为单独的刚体, 用 Track Node (履带节点) 来表示。连续的履带节点刚体再以铰接的形式约束在一起形成闭环拓扑链, 从而构建履带系统的多体动力学模型。履带通过主动轮、从动轮和承重轮来驱动, 本文基于动力传递与功能差异, 将履带轮系统分为三类核心模型进行设计:

- 1) 主动轮: 通过 AGX 的刚体合并算法将履带节点与链轮齿面进行几何绑定, 形成刚性接触对, 采用矢量控制电机, 输出扭矩带宽实现动态载荷跟踪;
- 2) 从动轮: 通过旋转副约束绕轴旋转自由度, 允许履带自由张紧;
- 3) 承重轮: 基于等效质量—弹簧—阻尼的弹性支撑模型, 履带节点与承重轮间保留独立接触检测, 避免运动干涉。

由于推耙机下部行走体履带板之间存在复杂且庞大的力学特性和接触计算, 本文采用 AGX track 组件开发推耙机的履带结构, 履带在虚幻引擎中的资产属性包括 Shape Matereial、Track Properties 和 Internal Merge Properties, 在初始化履带期间, 本文为履带的每个履

带板节点创建 AGX rigidbody 和 AGX shape, 并将 Shape Matereial 属性上设置的物理参数分配给每个创建好的 AGX shape。履带的初始化属性如表 2 所示。

表 2 推耙机下部行走体设计参数

属性	描述
节点数/nodes	要创建的履带带节点个数
宽度/cm	履带的宽度
厚度/cm	履带的厚度

在 AGX 的接触力学参数设定中, 界面摩擦特性通过法向刚度系数和切向阻尼系数进行数值表征。以弹性模量 (Young’s Modulus) 为核心的材料本构关系可表述为: 在弹性变形阶段, 单轴应力状态下材料法向应力 σ 与轴向应变 ϵ 呈线性比例关系, 其本构方程可表示为:

$$E = \sigma / \epsilon$$

(1)

其中: E 为杨氏模量, σ 为正向应力, ϵ 为正向应变。

根据文献 [21] 的计算方式, 松散煤堆对应的杨氏模量应该在 0.1~1 MPa, 压实的煤堆对应的杨氏模量应该在 1~10 MPa, 而粘滞因子和力矩范围则关系到推耙机履带的滑移率, 一般不超过 1。本文以此来构建参数化后的无人推耙机下部行走体的 Shape Matereial 属性, 以使得孪生推耙机的行走动作逼近真实的情况。

2.3 多传感器建模

在无人推耙机的开发周期中, 需要对原型推耙机自身进行软硬件上的改造, 包括对推耙机的自重减轻化改造, 传感器的加装改造等。对应到孪生推耙机上, 也需要对应传感器的仿真设计和模块化应用^[22], 在无人推耙机开发过程中涉及的传感器有 IMU、RGB-D 相机与多线激光雷达 (由于 IMU 在虚幻引擎中的仿真构造过程中较为容易, 是由引擎自带的函数所实现, 因此本文中只对激光雷达和 RGB-D 相机的实现做相关描述)。

2.3.1 激光雷达建模

本文以 Velodyne VLP-16 为例进行孪生环境下的多线激光雷达传感器实现。Velodyne VLP-16 采用旋转测距, 通过 16 线垂直排布的 905 nm 激光器阵列进行 360° 机械扫描, 单轴旋转每秒 10 圈生成 160 万点云。其通过计算激光脉冲往返时间实现最大 100 m 测距, 结合 APD 接收阵列与 IMU 姿态补偿输出三维坐标。

表 3 显示了激光雷达的参数, 本文通过虚幻引擎内置的射线碰撞检测机制, 实现了激光雷达传感器的空间感知功能。核心算法采用 LineTraceSingleByChannel () 函数, 其数学本质可描述为三维空间中的几何相交判定问题。该函数执行如式 (2) 所示的空间线性插值:

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{P}_s + t(\mathbf{P}_e - \mathbf{P}_s) \quad (0 \leq t \leq 1)$$

(2)

表 3 多线激光雷达参数

参数	性能
激光线数	16/32/48/64 线
波长	903 nm
测量距离	100 m
水平视场角	360°
水平角分辨率	0.1~0.4°
垂直视场角	-30~30°
垂直角分辨率	2
旋转速率	10 Hz

其中: 射线起点为 $\mathbf{P}_s(x_s, y_s, z_s)$, 终点为 $\mathbf{P}_e(x_e, y_e, z_e)$, 参数 t 表征射线路径上的归一化位置。碰撞检测过程中, 引擎物理系统将实时计算射线与场景物体的最小包围盒的相交性。

射线检测的实现流程为: 首先, 初始化 LineTraceSingleByChannel () 函数, 指定碰撞通道 (Collision Channel) 参数、检测范围参数和检测模式参数。其次, 解析射线碰撞响应字段, 如表 4 所示, 利用产生碰撞的对象指针将碰撞坐标缓存至点云 pointcloud2 数据结构中。

表 4 推耙机下部行走体设计参数

参数名称	数据类型	物理意义
bBlockingHit	bool	碰撞是否发生
ImpactPoint	FVector	碰撞点全局坐标
HitActor	AActor *	命中物体的对象指针
Normal	FVector	碰撞面法线向量

最后, 基于 ROSIntegration^[23] 实现与 ROS 服务器的通讯, 每一帧清空上一帧的点云数据。交互控制组件都由蓝图实现。提供接口给蓝图模块调用。

此外, 在多线激光雷达 C++ 实现中开放接口给虚幻蓝图, 实现了在推耙机蓝图事件图表中可自定义参数的孪生多线激光雷达, 并创建了虚拟网格体进行渲染如图 3 所示。



图 3 多线激光雷达渲染

2.3.2 可调 RGB-D 相机建模

在无人推耙机自主控制系统的开发过程中, RGB-D 相机作为多模态感知的核心传感器, 其视觉数据 (包括 RGB 图像与深度信息) 的精确仿真是实现离线虚拟调试的关键前提。

本文基于虚幻引擎的相机建模框架, 提出了一种面向工业场景的 RGB-D 相机虚实映射方法, 其技术实现涵盖传感器行为建模、数据流同步优化及跨平台接口设计 3 个核心层面。基于以上虚幻引擎自身的相机特性, 本文实现了 RGB-D 相机的模块化通用接口, 设计了 RGB-D 相机传感器的数据传输方式, 并针对性地优化了相机实现流程。

通过虚幻引擎内置的相机子系统多层次可扩展接口对相机投影模式多样性、光学参数可编程性和后处理管线进行了对应的调试和开发, 通过继承 ACameraActor 基类构建定制化 URGBDCameraActor 组件, 首先, 重写 OnConstruction () 方法配置相机参数, 其次, 在 Tick (float DeltaTime) 方法中实现位姿动态更新, 最后, 通过异步渲染管线获取 RGB-D 数据。图 4 为孪生 RGB-D 相机传感器的仿真效果。

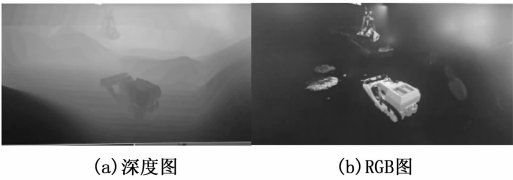


图 4 孪生 RGB-D 相机传感器实现

2.4 多领域孪生模型高拟真渲染

在所有有关孪生推耙机的组件都建模设计完成之后, 需要对与推耙机交互的地形对象进行建模设计, 具有力学反馈的实时可变地形环境和高拟真的纹理贴图对呈现最终的仿真实验和虚拟调试具有重要意义。

2.4.1 耙铲—散料交互渲染

本文基于 AGX Terrain 将煤粒采用六自由度离散元模型进行动力学描述, 其本构关系遵循非线性力理论。且每个粒子具有独立的质量惯性张量:

$$I_p = \frac{2}{5} m_p r_p^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: m_p 为颗粒质量, r_p 为等效半径。煤堆离散化程度通过自适应体素网格实现动态调节, 其空间分辨率函数为:

$$\Delta x = \frac{d_b \cdot \tan \varphi_r}{n_l} \cdot [1 - 0.18 \ln(\dot{\gamma}/10^{-3})] \quad (4)$$

其中: d_b 为铲斗特征尺寸, n_l 为挖掘长度系数, $\dot{\gamma}$ 为局部剪切速率。当接触探测模块识别到应力集中区域时, 自动触发网格细化, 最小单元尺寸可达初始值的 12%。

此外, 煤堆还存在休止角, 指静止的煤堆坡度必然会小于某一个角度阈值, 其公式为:

$$\varphi_r = \varphi + \delta\varphi_r \quad (5)$$

其中: φ_r 是材料的有效休止, φ 是材料的内摩擦角, $\delta\varphi_r$ 是材料的 δ 休止角。

交互体和地形之间指定的接触材料是清舱铲煤阻力仿真的决定性因素。煤堆通常通过来自外部几何图形的接触被挤压, 外部几何图形生成表面地形接触, 其中接触面积由几何图形重叠的体素计算。根据接触力和估计面积, 本文估算出体素接触贴片的均匀表面应力。可以从地形中提取产生煤堆压力的主动地形接触点, 并提取其属性:

$$\sigma_z^v(z) = \sigma_s \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{A_s + z^2}} \right)^3 \right] \quad (6)$$

其中: $\sigma_z^v(z)$ 为从表面到 z 深度的局部应力, A_s 为受力面积, σ_s 为均匀表面应力。然后, 根据煤堆的结构化力学特性配置到煤堆的 AGX shape material, 即获得了基于 AGX Terrain 的煤堆初始物理表征。

其次, 基于 AGX Dynamics 对散料的力学交互和三维可视化进行了分析设计。可变散料的物理模型由 AGX 的 Terrain 模块实现, 在虚幻引擎中, 底层散料数据模型由地形模块的分层稀疏 3D 网格组成, 该模型基于具有重叠表面高度字段的对称 3D 网格数据结构实现, 它可以通过不同的交互模型执行不同的操作来产生形变, 此处的交互模型是指推耙机的前端作业铲斗与煤堆散料的交互, 与散料进行交互的对象是通过指定两个切割边缘, 切割方向和切割体来定义的。

煤堆散料的实时可变交互如图 5 所示, 散料地形表示为二维高度场, 当底层网格结构发生变化时, 高度场会更新。散料的单位质量通过相互作用的交互对象在地形中移动, 当铲体及其活动区移动到地形 a 中时, 新的散料被分解成颗粒或流动性对象, 并形成一部分聚合体。与实体占用度相对应的体素高度值是通过投影到交互区域。当铲体升起 b 时, 交互间隙被附近从流动颗粒质量转化而来的固体散料填充到铲体边缘, 将静态网格

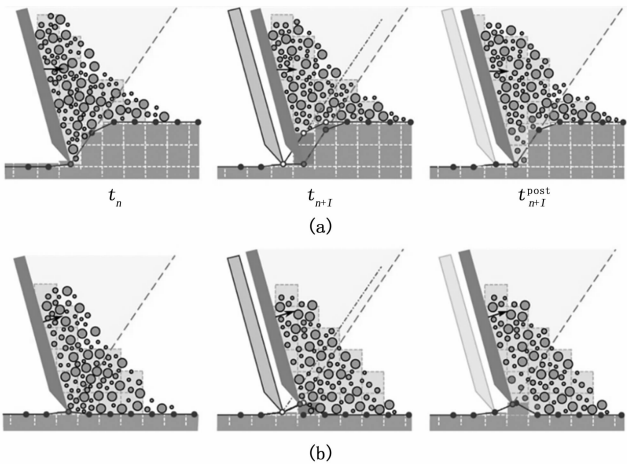


图 5 煤堆散料交互示意图

单元转换为动态的散料质量,从而实现煤堆整体的动态表现。

2.4.2 材质及纹理设计

为了使得孪生推耙机及推耙机的作业环境和细节更加拟真,需要对孪生模型赋予高质量的材质及贴图,虚幻引擎中存在非常复杂的材质表达式和材质节点用以设计材质和纹理。针对本研究存在两个重要的材质纹理:推耙机体包含煤灰材质的纹理贴图和可变散料的煤堆贴图。本研究基于基础材质顶点法线的方向控制,使用纹理进行动态混合。目的是实现一种孪生推耙机上多纹理混合的效果(如煤堆散料与物体表面材质的混合),并在此基础上封装了用户可调节材质属性面板。

2.4.3 孪生场景构建

孪生推耙机需要有孪生作业场景才能进行正常调试与开发,因此本研究参考实际作业环境与船舱的几何属性,基于虚幻引擎自身模型库和建模软件构建了如图 6 所示的船舱作业环境,为了实现煤堆的表面能与现实同步,通过虚幻引擎的地形模式实现了初始煤堆可实时编辑。并基于虚幻引擎自身的 Lumen 光线追踪渲染和 Ultra Dynamic Sky 气象调节插件对推耙机的孪生作业环境的地理信息进行了重构。



图 6 孪生作业环境图

3 无人驾驶推耙机虚拟调试系统实现

3.1 虚拟控制器实现

在孪生模型和仿真场景构建好后,需要为孪生传感器感知到的数据和实际控制器输入的控制指令设计通信桥梁,搭建闭环反馈回路。以虚幻引擎的 Actor 为基类,派生出推耙机的驾驶室,再以驾驶室为基类派生出推耙机的下部行走体和前端作业件。

在孪生推耙机的子类蓝图事件图表,相当于推耙机的虚拟控制器中对底层 AGX 动力学和孪生传感器模块进行了初始化,确保孪生推耙机的感知和规划行为是依据客观物理规律进行,同时也确保了控制算法调试的有效性和虚实一致性。其次,对来自实际控制器的指令输入进行了编解码,最后封装了手动控制孪生推耙机的远控端口。

3.2 虚拟控制器—传感器信息通信实现

由于实际推耙机的开发过程中所有的算法和软件都有 ROS 的依赖,因此为了达到与实际调试相同的效果,本文所构建的仿真环境需要与 ROS 操作系统建立通信,才可以将在仿真系统中获取到的传感器数据传给实际控制器端,才可以在 ROS 端开发 SLAM 和路径规划算法并验证。

本文提出一种基于 ROS 架构的通信优化方法,通过重构分布式节点通信机制实现跨平台数据高效传输。在技术实现层面,本研究采用 ROSintegration 插件搭建基础通信框架,基于 ROSbridge 协议建立标准化数据通道,通过 BSON (Binary JSON) 二进制数据封装格式进行数据序列化,依托 TCP/IP 协议构建可靠的数据传输链路。

针对传统 ROS 分布式架构在异构环境下的适配性问题,本文创新性地设计了三层代理转发机制:将原有分布式节点间的点对点通信重构为客户端—代理—服务器的递阶式架构 (Client-Agent-Server Architecture)。在此架构中,代理节点承担协议转换与请求转发功能,实现客户端节点与 ROS 服务端的解耦。经实验验证,该架构可使 Windows 平台客户端无需部署完整 ROS 环境,仅需通过标准化网络接口与代理节点交互即可完成感知数据的双向传输。相较于传统实现方案,本方法有效降低了客户端节点的资源消耗(内存占用减少约 42%),同时保持端到端通信延迟在可接受范围内(平均延迟 < 85 ms),显著提升了跨平台系统的部署灵活性与可维护性。

3.3 虚拟控制器—实际控制器通信实现

实际的无人推耙机采用以 ubuntu 下位机作为控制器进行感知数据的处理和控制算法的设计实现,以 Windows 作为上位机进行实时监控和指令操作的下发,而指令集的下发是由推耙机的可编程 PLC 实现,因此,在实现虚实互联(虚拟控制器到实际控制器)的过程中需要考虑两层通信与交叉反馈。

在本研究中基于 Modbus Slave 设计了虚拟 PLC,按照实际推耙机 PLC 完成了寄存器及寄存器属性(类型,地址,读写方式)重构,并在虚幻引擎中移植了 ModbusTCP 网络通信协议,在推耙机的虚拟控制器事件图表中设计了数据解析脚本,图 7 包含了从 ModbusTCP 报文数据到收发宏处理再到孪生系统的全过程。

4 虚拟调试系统应用验证

本文所研究设计的基于数字孪生的高保真推耙机虚拟调试系统有两种应用场景:1) 进行虚实互联;2) 进行虚拟调试。

4.1 实验设备和环境

清舱卸船虚实互联的试验场地在浙江嘉兴电厂一号

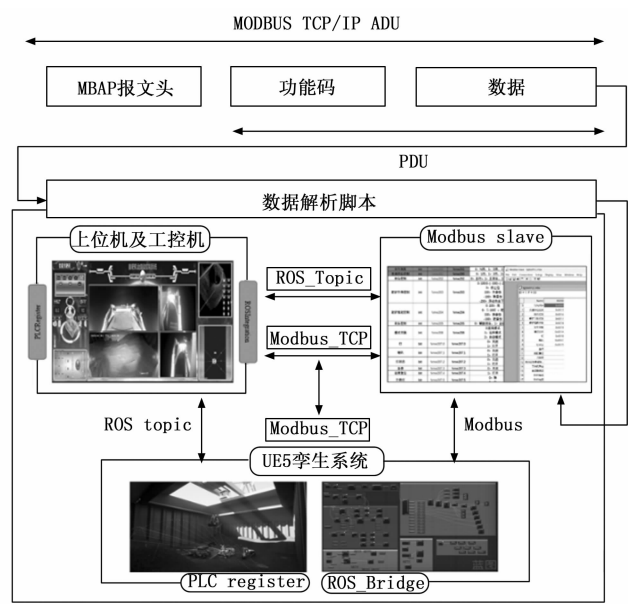


图 7 虚拟调试系统数据互联互通示意图

码头，硬件设备为一台经日本小松 D63E-12 型推耙机改装后的全自动推耙机、散货船、64 位个人电脑一台和个人主机一台，连接在同一局域网下，设备相关参数和安装的软件环境如表 5 所示。

表 5 实验 PC 设备相关参数

参数	PC(x64)	Laptop(x64)
系统	Windows11	Ubuntu20. 04
CPU	I9 13900kf	AMD R7-5800H
GPU	RTX 4080	RTX 3050
软件	UE5. 1. 1	ROS

4.2 虚实互联实验测试

图 8 为无人推耙机的虚实互联验证，虚拟控制器和实际控制器同时接收来自上位机下达到 PLC 寄存器的指令集，同时进行解码并输出对应的动作。其次，对虚拟推耙机和实际推耙机的控制量响应延迟和动作轨迹进行了 3 次实验，每次进行 10 次采样取平均值，如表 6 分析统计后，得出虚实互联误差在工况要求范围内，孪生系统虚实互联功能可行。



图 8 推耙机虚实互联实验测试图

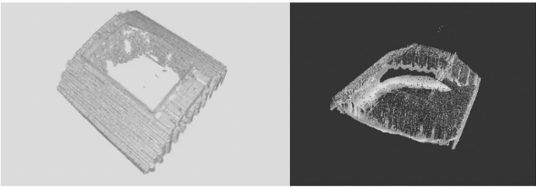
表 6 虚实互联实验误差统计

实验次数	轨迹误差 RMS/%	响应延迟/ms
第一次	9	67
第二次	8	54
第三次	8	69

4.3 虚拟调试实验测试

由上位机给出的运动控制及感知信号指令通过工控机上的信号转换模块转译成 PLC 能够识别的信息再由 modbus slave 传给下虚幻引擎的 PLC 数据处理模块处理成车辆的运控信息后再交由孪生推耙机的虚拟控制器进行移动、感知、作业等动作。通过 ROS topic 返回实时点云和 IMU 等信息至工控机进行解算，RGB-D 信息反馈给上位机，通过分析记录推耙机的行为是否与算法期望一致来反复调试控制算法，最终达到虚拟调试的目的。

定位建图和路径规划是清舱卸船作业过程中的核心算法，针对定位建图算法的虚拟调试实验，本文采用 A-LOAM 算法进行散货船的定位建图虚拟调试，该算法采用纯激光雷达数据提取边缘和平面特征，通过特征匹配和 ICP 优化算法进行位姿估计并构建全局点云地图^[24]。图 9 左侧为实际环境下建图，右侧为仿真系统下的建图，得出本系统可以得出保真度较高的点云地图并用于后续的路径规划实验。



(a) 实际环境点云地图 (b) 仿真环境点云地图

图 9 定位建图虚拟调试过程图

针对路径规划算法的虚拟调试实验，本文从算法效率和实时性需求出发，选取了改进 A * 算法及改进 RRT * 算法进行调试实验验证。

首先，将舱口及船舱地图合并为路径规划的初始地图，采用一种体素化的广义迭代最近点 (VGICP) 算法^[25]，用于快速、准确地进行三维点云配准。其次，基于传统 A * 算法在栅格地图上搜索路径，并使用共轭梯度法平滑 A * 搜索出的路径，最后用 Dubins 曲线试探到达终点的路径。以 (0, 0) 为起始点，(0, 10) 为目标点，算法调试的过程如图 10 所示，可以看出，推耙机在该路径规划算法调试过程中平稳输出轨迹且系统能够正确收发感知数据和算法输出。

图 10 上侧为路径规划算法，左下侧为调试开发可视化界面，右下侧为孪生系统。

5 结束语

本文以无人推耙机的虚拟调试和虚实互联为目标，

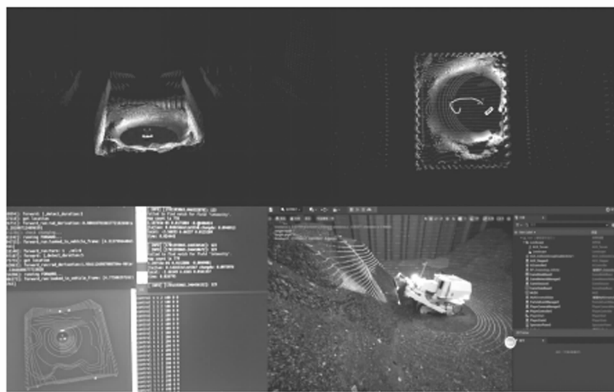


图 10 路径规划虚拟调试过程图

给出了一种基于数字孪生技术的高保真建模方法, 依据此方法构建建立了孪生推耙机的多物理领域耦合数字孪生模型, 构建了孪生传感器, 搭建了孪生推耙机的虚拟控制系统包括推耙机的虚拟控制器和基于 ModbusTCP 和 ROSbridge 的数据通信接口, 实现了虚拟/实际控制器—感知数据—控制指令之间的多向互联和控制反馈。以本研究针对的无人推耙机为被控对象, 给出了该套系统的应用验证案例, 验证了无人推耙机的虚拟调试可行性, 本文所述系统模型及方法可对无人推耙机的动作和行为模式进行验证, 以克服无人推耙机实地调试中易损坏、效率低、工况复杂及极端天气的负面影响, 提升了开发效率, 将原有的开发周期缩短了 50%, 同时降低了开发成本。

参考文献:

- [1] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15 (4): 2405–2415.
- [2] QI Q, TAO F, HU T, et al. Enabling technologies and tools for digital twin [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 3–21.
- [3] TAO F, QI Q. Make more digital twins [J]. Nature, 2019, 573: 490–491.
- [4] 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.
- [5] 刘大同, 郭 凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (11): 1–10.
- [6] 张辰源, 陶 飞. 数字孪生模型评价指标体系 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27 (8): 2171–2186.
- [7] 王 俊, 雷宏宇. 基于有限元仿真结果识别的建筑物毁伤评估 [J]. 指挥控制与仿真, 2024, 46 (4): 150–155.
- [8] 张越今, 宋 健. 多体动力学仿真软件 ADAMS 理论及应用研讨 [J]. 机械科学与技术, 1997, 5: 5–10.
- [9] SIHLBERG J. Rendering of physically simulated wires [J]. Dissertation, 2018, 1157: 45.
- [10] SERVİN M, BERGLUND T, NYSTEDT S. A multiscale model of terrain dynamics for real-time earthmoving simulation [J]. Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, 2021, 8 (1): 1–7.
- [11] AOSHIMA K, SERVİN M. Examining the simulation-to-reality gap of a wheel loader digging in deformable terrain [J]. Multibody System Dynamics, 2024, 64 (1): 121–148.
- [12] 陈少扬. 多线激光雷达点云数据的模拟仿真研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2022.
- [13] 王 喆, 修春娣. 一种动态环境下的视觉/IMU 融合定位方法 [C] //中国高科技产业化研究会智能信息处理产业化分会. 第十七届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集, 2023: 174–178.
- [14] 向文平, 楼应侯, 柴志渊, 等. 基于 MCD 软件的自动化生产线虚拟调试平台 [J]. 机械制造, 2024, 62 (11): 25–33.
- [15] QUIGLEY M. ROS: an open-source robot operating system [C] // ICRA, 2009: 5–10.
- [16] 李 妍, 程璐璐, 殷守霄. 基于 Unreal Engine 模具拆装实训平台的研究与开发 [J]. 模具制造, 2024, 24 (11): 27–29.
- [17] 赵 黎, 王 凯, 宋凤敏, 等. 基于 SolidWorks 的蔬菜精量播种机三维虚拟设计 [J]. 机械工程与自动化, 2025, 54 (1): 84–85.
- [18] 赵大龙, 王丽欣. 基于 Blender 制作地貌晕渲图的研究与实践 [J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47 (7): 180–182.
- [19] 王伟达, 黄志新, 李苗倩. ANSYS SpaceClaim 直接建模指南与 CAE 前处理应用解析 [M]. 第 1 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [20] LACOURSIÈRE C. Ghosts and machines: regularized variational methods for interactive simulations of multibodies with dry frictional contacts [D]. Umeå: Umeå Universitet, 2007.
- [21] 郭 旭. 粮食散料静动力特性试验及 PFC-FLAC 耦合三轴数值模拟研究 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
- [22] 王崇鑫, 刘晓军, 孙 洋, 等. 面向数字孪生的虚拟传感器模型构建方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2025: 1–19.
- [23] MANIA P, BEETZ M. A framework for self-training perceptual agents in simulated photorealistic environments [J]. ICRA, Montreal, QC, Canada, 2019: 4396–4402.
- [24] ZHANG J, SINGH S. LOAM: lidar odometry and mapping in real-time [J]. Robotics: Science and Systems, 2014.
- [25] KOIDE K, YOKOZUKA M, OISHI S, et al. Voxelized GICP for fast and accurate 3D point cloud registration [J]. ICRA, 2021: 11054–11059.