

文章编号: 1671-251X(2022)11-0080-05

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.17999

基于平行控制理论的矿区无人驾驶卡车仿真系统

杨荣明¹, 丁震¹, 杨健健^{2,3}, 付建华⁴, 高玉⁴, 魏亚⁴, 艾云峰⁴, 张致铭²

(1. 国家能源集团 煤炭运输部, 北京 100013; 2. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083; 3. 矿业大学(北京)内蒙古研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 010300; 4. 北京慧拓无限科技有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对矿用车辆实车测试无人驾驶存在危险性大、测试时间长、测试成本高、测试内容覆盖面窄等问题, 研究了基于平行控制理论的矿区无人驾驶卡车仿真系统。该系统采用矿用卡车动力学建模、高保真场景重构、虚拟传感器建模等关键技术, 实现无人驾驶算法全面推演、系统集成可靠性测试、矿区生产预测模拟、虚实互动平行推演等功能。矿用卡车动力学建模主要步骤分为整车模型搭建与可视化场景创建2个部分, 将车辆动力学模型与虚拟场景关联, 利用车辆模型产生的仿真数据实时驱动虚拟场景中的车辆运动。针对大型露天矿场景复杂、不规则的特性, 通过无人机航拍测绘、激光雷达三维扫描等手段, 获取矿山高精度三维模型数据, 基于虚拟微多边形几何体技术、高像素虚拟纹理技术、三维场景实时渲染技术, 构建高保真虚拟三维场景。虚拟传感器主要包括虚拟激光雷达、虚拟毫米波雷达、虚拟惯导装置、虚拟视觉相机, 搭载于虚拟矿车上, 负责生成虚拟场景中的数据信息, 并将数据发送到自动驾驶控制器进行处理。基于该仿真系统, 可以进行单车测试、多车调度测试、智能调度算法测试, 还可以对现场车辆和虚拟车辆的虚实互动进行测试, 为整个矿区的稳定运输、复杂路口的推演模拟、智能调度算法的最优决策提供验证平台, 确保无人驾驶测试效率和安全, 加快矿区无人驾驶技术升级。

关键词: 无人驾驶; 平行控制; 矿用车辆动力学建模; 高保真场景重构; 虚拟传感器建模; 虚实互动

中图分类号: TD67

文献标志码: A

Simulation system of mine unmanned vehicle based on parallel control theory

YANG Rongming¹, DING Zhen¹, YANG Jianjian^{2,3}, FU Jianhua⁴, GAO Yu⁴,
WEI Ya⁴, AI Yunfeng⁴, ZHANG Zhiming²

(1. Coal Transportation Department, CHN Energy, Beijing 100013, China; 2. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. Inner Mongolia Research Institute of China University of Mining and Technology-Beijing, Erdos 010300, China; 4. Beijing Huituo Infinite Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: The test of mine unmanned vehicle has problems of great danger, long test time, high test cost and narrow test coverage. In order to solve the above problems, the simulation system of unmanned mine vehicle based on parallel control theory is studied. The system adopts key technologies such as mine vehicle dynamics modeling, high-fidelity scene reconstruction, and virtual sensor modeling. The system realizes the functions of comprehensive deduction of the unmanned driving algorithm, system integration reliability test, mining area production prediction simulation, and virtual and actual interactive parallel deduction. The main step of dynamic modeling of the mine vehicle is divided into two parts: vehicle model building and visual scene creation. The vehicle dynamic model is associated with the virtual scene. The simulation data generated by the vehicle model is

收稿日期: 2022-08-08; 修回日期: 2022-10-27; 责任编辑: 胡娴。

作者简介: 杨荣明(1965—), 男, 山西忻州人, 教授级高级工程师, 现主要从事煤矿开采、露天煤矿无人驾驶、煤矿智能化等技术研究及管理工作, E-mail: 10010005@ceic.com。

引用格式: 杨荣明, 丁震, 杨健健, 等. 基于平行控制理论的矿区无人驾驶卡车仿真系统[J]. 工矿自动化, 2022, 48(11): 80-83, 100.

YANG Rongming, DING Zhen, YANG Jianjian, et al. Simulation system of mine unmanned vehicle based on parallel control theory[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(11): 80-83, 100.



扫码移动阅读

used for driving the vehicle in the virtual scene to move in real-time. In view of the complex and irregular characteristics of the large-scale open-pit mine scene, the high-precision 3D model data of the mine is obtained by means of UAV aerial mapping and laser radar 3D scanning. Based on the virtual micro polygon geometry technology, high pixel virtual texture technology, and 3D scene real-time rendering technology, a high-fidelity virtual 3D scene is constructed. The virtual sensor mainly comprises virtual laser radar, virtual millimeter wave radar, virtual inertial navigation device and virtual vision camera. The virtual sensor is carried on the virtual mine car. It is responsible for generating virtual data information in a simulated mining area scene, and sending the data to the automatic driving controller for processing. Based on the simulation system, single-vehicle test, multi-vehicle scheduling test and intelligent scheduling algorithm test can be carried out. The dynamic virtual-reality interaction between on-site vehicles and virtual vehicles can be tested. The system is used to provide a verification platform for stable transportation of the whole mining area, deduction simulation of complex intersections and optimal decision of intelligent scheduling algorithm. The system ensures the efficiency and safety of unmanned driving test and accelerates the upgrading of unmanned driving technology in the mining area.

Key words: unmanned driving; parallel control; dynamic modeling of mining vehicles; high fidelity scene reconstruction; virtual sensor modeling; virtual reality interaction

0 引言

矿用车辆体积大、载质量大、轮胎特殊,采用专用的全液压转向方式,直接用实车测试无人驾驶存在危险性大、测试时间长、测试成本高、测试内容覆盖面窄等问题。基于虚拟仿真平台可对矿用车辆无人驾驶进行大规模测试和模拟演练,从而有效解决矿区场景数据不足、极端工况测试困难等问题。

目前国内外针对公路用车辆无人驾驶的仿真测试技术取得了突破性进展,有效促进了公路用车辆无人驾驶系统的开发。但是受限于矿区特殊环境条件,公路用车辆无人驾驶仿真测试平台无法有效应用于矿用车辆,因此,亟需开发一套针对矿用车辆的无人驾驶仿真测试系统,对各种极端工况进行反复测试,从而提高测试安全性,缩短测试周期,降低测试成本。基于此,本文提出一种基于平行控制理论的矿区无人驾驶卡车仿真系统。

1 平行控制理论

平行系统可以分为理论层、方法层、技术层、平台层和应用层^[1-2]。理论层为整个系统的基础,包含建模分析、训练与测试、决策与引导。方法层是系统的核心,提供数据流向与环节操作,核心方法包括联邦学习、平行学习等。技术层是系统的关键,包括平行感知、平行控制、平行测试、平行路径规划等。平台层是物质基础,每个库构成独立模块,不同模块完成不同任务。应用层则是现实接口,用于将控制理论嫁接到不同场景中,完成该场景下的特定任务。

平行控制是指采用综合集成研讨厅体系对复杂社会物理信息系统(Cyber-Physical-Social Systems,

CPSS)构建人工模型,在“不断探索和改善”的原则下,通过实时传感、持续建模及虚实协同计算,实现人工模型与实际系统开源闭环反馈和虚实双向引导。

2 矿区无人驾驶卡车仿真系统

基于平行控制理论的矿区无人驾驶卡车仿真系统采用矿用卡车动力学建模、高保真场景重构、虚拟传感器建模等关键技术,实现无人驾驶算法全面推演、系统集成可靠性测试、极端危险场景模拟验证等功能,具有高精度、超实时、虚实互动等特点。基于该仿真系统,可以进行单车测试、多车调度测试、智能调度算法测试,还可以对现场车辆和虚拟车辆的虚实互动进行测试。

2.1 矿用卡车动力学建模

矿用卡车系统是典型的复杂非线性系统,主要包括长度为10~20 m的车身、大型油气悬架、巨型轮胎、大功率动力系统、全液压转向系统等。车辆各子系统之间相互耦合,使得整车表现出较强的非线性特性。因而,需要分析各类型车辆拓扑结构的共同特征,探索各子系统之间耦合作用对车辆动力学的影响机理,建立包含各子系统非线性特征的各类型车辆动力学模型,研究道路不平、悬架变形、全液压不对称转向等因素作用下车辆的动态特性,为矿区无人驾驶技术研究提供基础数据^[3-5]。

矿用卡车模型搭建主要步骤分为整车模型搭建与可视化场景创建2个部分。建立包括车身动力学模型、全液压转向系统模型、转向机构动力学模型、轮胎动力学模型、矿车专用悬架系统模型在内的大型矿用车辆动力学模型,并通过实车试验进行验

证。同时,在三维软件中建立整车与道路环境的三维模型,通过三维场景编辑器建立虚拟车辆、场景等,进而完成整车虚拟模型的搭建。最后定义整车数学模型与虚拟场景之间的数据交互接口,将车辆动力学模型与虚拟场景关联,利用车辆模型产生的仿真数据实时驱动虚拟场景中的车辆运动,并对模型仿真效果进行分析与评估^[6-7]。

2.2 高保真场景重构

基于虚拟微多边形几何体技术、高像素虚拟纹理技术、三维场景实时渲染技术,构建高保真虚拟三维场景。针对大型露天矿场景复杂、不规则的特性,通过无人机航拍测绘、激光雷达三维扫描等手段,获取矿山高精度三维模型数据。鉴于三维模型数据量庞大,采用三维场景实时渲染技术,对扫描的等比例三维模型进行多边形表面法线烘焙、程序化地表材质设计、光照效果处理等,获得实时渲染的虚拟矿山场景^[8-9],如图 1 所示。



图 1 高保真虚拟矿山重构渲染效果

Fig. 1 Reconstruction rendering effect of high fidelity virtual mine

2.3 虚拟传感器建模

虚拟传感器搭载于虚拟矿车上,负责生成虚拟场景中的数据信息,并将数据发送到自动驾驶控制器进行处理。虚拟传感器主要包括虚拟激光雷达、虚拟毫米波雷达、虚拟惯导装置、虚拟视觉相机^[10-11]。

虚拟激光雷达:对无人驾驶常用的激光雷达进行仿真,开发虚拟的 128 线、64 线、32 线、16 线、单线雷达,对各类激光雷达的点云输出动态特性、线束间隔、点云数量、回波次数、衰减率等进行模拟,并对虚拟激光雷达进行测试,以验证其与真实激光雷达的等效性。

虚拟毫米波雷达:对无人驾驶常用的毫米波雷达进行仿真,开发虚拟的长距毫米波雷达、短距毫米波雷达,对各类毫米波雷达的毫米波距离、感知覆盖角度、波长特性、衰减率等进行模拟,输出与真实毫米波雷达相一致的感知结果。将虚拟毫米波雷达采集的数据发送到上层算法单元,上层算法单元对数据进行解析处理,形成可用的感知数据。

虚拟惯导装置:对无人驾驶常用的惯导装置进行仿真,模拟真实惯导装置发送的数据信息。真实

惯导装置的数据包括位置(经度、纬度)、速度、朝向、卫星信息、时钟偏差等。创建虚拟惯导装置时,由于上层算法模块仅使用位置、速度、朝向等主要数据,其他次要数据可考虑屏蔽或过滤。

虚拟视觉相机:对无人驾驶常用的视觉相机进行仿真,模拟真实相机的视角、分辨率、色彩等特性,在虚拟场景中生成各类视频格式的数据流。将虚拟场景中获取的视频影像数据发送到无人驾驶控制器,可用于自动驾驶算法训练和测试、自动驾驶系统虚拟遥控等。

虚拟传感器获取的点云数据如图 2 所示。

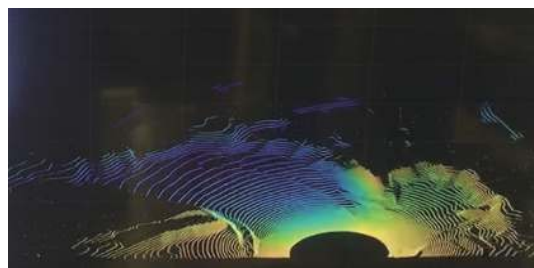


图 2 虚拟传感器获取的点云数据

Fig. 2 Point cloud data acquired by virtual sensors

3 无人驾驶卡车仿真系统功能

3.1 无人驾驶算法测试

通过矿区无人驾驶卡车仿真系统,可实现无人驾驶算法快速全面验证、软硬件系统集成可靠性测试、卡车差异化性能模拟、极端危险场景的模拟验证等,解决无人驾驶技术开发与应用中测试成本高、安全风险高、测试周期长等问题。

(1) 无人驾驶算法快速全面验证:包括云端无人驾驶调度管理算法验证及车载无人驾驶感知、决策、规划、控制等算法验证。

(2) 软硬件系统集成可靠性测试:对无人驾驶所有软硬件模块进行集成安装,确保与现场软硬件系统完全一致,开展系统集成可靠性测试,验证系统整体稳定性与硬件连续运行可靠性。

(3) 卡车差异化性能模拟:针对实际大型矿用车辆性能差异大、不确定性因素多导致的无人驾驶控制难题,可依托高精度矿用卡车动力学模型,开展车辆差异化性能模拟。

(4) 极端危险场景的模拟验证:基于矿区无人驾驶卡车仿真系统,开展极端危险场景下的无人驾驶仿真测试。

3.2 卡车驾驶培训

矿用卡车视野盲区大,方向盘缺少自动回正功能,操作控制难,新司机极易发生安全事故,且学习驾驶成本较高。借助矿区无人驾驶卡车仿真系统,

可进行丰富的虚拟驾驶培训,实现1:1虚实互动技巧练习。通过虚拟驾驶器,可对驾驶员进行操作培训,对不规范操作进行提醒,还可以进行远程实车接管驾驶操作,实现真正的虚实互动^[12]。虚拟驾驶器如图3所示。



图3 虚拟驾驶器

Fig. 3 Virtual driver

3.3 无人驾驶系统技能培训

通过矿区无人驾驶卡车仿真系统,可实现无人驾驶车端模拟培训、无人驾驶智能调度中心模拟培训、无人驾驶运维模拟培训、无人驾驶混编作业模拟培训。通过对无人驾驶各模块的单独训练,操作人员可以熟练掌握软件的操作。通过全方位的技术培训,为未来智能矿区建设储备人才,从而提高矿区运营效率,保证安全生产^[13-14]。

3.4 矿区生产预测模拟

通过矿区无人驾驶卡车仿真系统,进行大批量无人驾驶控制器、精准车辆动力学、高逼真三维动态变化矿区环境仿真,实现不少于100辆无人驾驶作业车辆的调度管理测试及生产预测模拟,寻找最优调度策略,降低安全风险。开展露天矿无人化开采全过程仿真模拟,为将来整个露天矿完全无人化的生产变革提供参考。

3.5 虚实互动平行推演

基于大量虚拟数据和真实矿区数据,形成基于混合数据的仿真模型,实现复杂环境下海量虚拟矿卡与真实矿卡的高效平行运行,可有效解决无人驾驶技术在矿山应用时危险场景数据不足、极端工况测试困难、现场调试安全风险高等难题。虚实互动平行推演场景如图4所示。

4 结语

研究了基于平行控制理论的矿区无人驾驶卡车仿真系统关键技术,包括矿用卡车动力学建模、高保真场景重构、虚拟传感器建模等。该系统实现了无人驾驶算法测试、卡车驾驶培训、无人驾驶系统技能培训、矿区生产预测模拟、虚实互动平行推演等功能。依托矿区无人驾驶卡车仿真系统,可延伸开



图4 虚实互动平行推演场景

Fig. 4 Virtual reality interaction parallel deduction scene

发不同的产品,服务于终端用户,如矿用卡车驾驶模拟培训系统、无人驾驶操作技能培训系统、基于虚拟现实的安全生产监控系统、矿区生产预测模拟系统等,为煤矿生产安全、生产效率提供可靠保障。

参考文献(References):

- [1] 杨超,高玉,艾云峰,等.端对端平行无人矿山系统及其关键技术[J].智能科学与技术学报,2019,1(3):228-240.
YANG Chao, GAO Yu, AI Yunfeng, et al. End-to-end parallel autonomous mining systems and key technologies[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(3): 228-240.
- [2] 陈龙,王晓,杨健健,等.平行矿山:从数字孪生到矿山智能[J].自动化学报,2021,47(7):1633-1645.
CHEN Long, WANG Xiao, YANG Jianjian, et al. Parallel mining operating systems: from digital twins to mining intelligence[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(7): 1633-1645.
- [3] 王国法,任怀伟,庞义辉,等.煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展[J].煤炭科学技术,2020,48(7):1-27.
WANG Guofa, REN Huaiwei, PANG Yihui, et al. Research and engineering progress of intelligent coal mine technical system in early stages[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 1-27.
- [4] PAZOOKI A, RAKHEJA S, CAO Dongpu. Kineto-dynamic directional response analysis of an articulated frame steer vehicle[J]. International Journal of Vehicle Design, 2014, 65(1): 1-30.
- [5] HE Y, KHAJEPOUR A, MCPHEE J, et al. Dynamic modelling and stability analysis of articulated frame steer vehicles[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2005, 12(1): 28-59.
- [6] DAHER N, IVANTYSYNOVA M. Yaw stability control of articulated frame off-highway vehicles via displacement controlled steer-by-wire[J]. Control Engineering Practice, 2015, 45: 46-53.
- [7] PAZOOKI A. Ride and directional dynamic analysis of articulated frame steer vehicles[D]. Montreal: Concordia University, 2012.

(下转第100页)