

文章编号: 1005-0523(2024)05-0056-09



基于 BIM 技术的轨道工务运维智慧 信息平台研发

胡赵磊¹, 宋 鑫², 徐蕴航¹, 张鹏飞¹, 张 洪¹, 余 路¹

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
2. 佛山市地铁运营有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要:【目的】为推动轨道工务运维信息化、智慧化, 提高检修效率, 【方法】基于 Revit 二次开发和 Unity3D 平台, 研发了铁路轨道工务运维智慧信息平台。平台采用数据层、应用层和界面层三层构架, 集成了人机交互、运维信息管理和技术信息查阅三大模块, 可实现 AR 扫描、BIM 模型漫游展示、复杂设施拆装作业动画模拟、轨道几何形位波形图绘制、TQI 值计算、检修记录查阅、技术规章和 CAD 图纸查询等功能, 具有实用性高、便携性好、可操作性强的特点。【结果】经工务现场应用测试, 平台性能良好, 各功能均稳定运行, 达到了研发预期目的。【结论】平台的构建和研发为推动铁路轨道工务运维信息化、智慧化提供了一种新思路。

关键词: 铁路工务; BIM 技术; 智慧信息平台; 移动增强现实; 人机交互

中图分类号: U216

文献标志码: A

本文引用格式: 胡赵磊, 宋鑫, 徐蕴航, 等. 基于 BIM 技术的轨道工务运维智慧信息平台研发[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(5): 56-64.

Research and Development of Intelligent Information Platform for Operation and Maintenance of Track Maintenance Based on BIM Technology

Hu Zhaolei¹, Song Xin², Xu Yunhang¹, Zhang Pengfei¹, Zhang Hong¹, Yu Lu¹

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Foshan Metro Operation Group Co., Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: 【Objective】To promote the informatisation and intelligence of railway engineering operation and maintenance, and to improve the efficiency of maintenance, 【Method】Based on the secondary development of Revit and Unity3D platform, a railway track engineering operation and maintenance intelligent information platform is developed. The platform adopts a three-layer structure of data layer, application layer and interface layer, integrates three modules of human-computer interaction, operation and maintenance information management and technical information access, and can realize functions such as AR scanning, BIM model roaming display, animation simulation of complex facilities disassembling and assembling operation, drawing of track geometric

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2602201); 国家自然科学基金项目(52178425, 52368063); 2022 年江西省科技专项(国家科技奖后备培育项目)(20223AEI91004); 江西省高层次高技能领军人才培养工程项目(1600223003)

waveform, calculation of TQI, access to maintenance records, querying of technical regulations and CAD drawings, et al., which is of high utility, high portability, and strong operability. It has the features of high practicality, good portability and strong operability. **【Result】** The platform performs well in the field application test of public works, and all functions can run stably, which achieves the expected purpose of research and development. **【Conclusion】** The construction and development of the platform provides a new way of thinking to promote the informatisation and intelligentisation of railway engineering operation and maintenance.

Key words: railway engineering; BIM technology; intelligent information platform; mobile augmented reality; human-computer interaction

Citation format: HU Z L, SONG X, XU Y H, et al. Research and development of intelligent information platform for operation and maintenance of track maintenance based on BIM technology[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 56–64.

【研究意义】随着我国铁路运营里程的不断增长,现场静态检查数据、维修计划、整治方案、质量验收数据等工务运维信息激增。这些信息通常以离散形式保存,如纸质资料、Excel或Word文件,难以方便地查询和统计,不仅对后期查询检索与统计分析造成困难,还会对检修人员夜间天窗期检修材料的使用带来不便。因此,铁路运维信息共享与管理平台的开发,对于显著提高线路检修效率具有重要意义。

【研究现状】近年来,建筑信息模型(building information model, BIM)技术在轨道交通基础设施领域得到了越来越广泛的应用,国内外学者开展了大量的研究工作并取得了丰硕的成果。卢春房等^[1]融合BIM、AI、IoT、GIS等技术,建立了线路设备空天地一体化检测监测平台,提出了平台应用层的主要技术功能,为重载铁路线路设备智能运维提供支撑。王同军^[2]根据智能高速铁路的现有研究成果,构建了三维智能高速铁路体系架构模型。闫立忠^[3]针对铁路四电工程的BIM应用,提出了一种覆盖协同设计到施工管理的全过程技术路线,利用BIM模型完成铁路四电工程的拓展应用。万伟明等^[4]开发了铁路车站改扩建工程资料管理系统,实现了改扩建工程资料5D可视化管理。刘惊灏等^[5]基于B/S架构,通过监测物联网体系中的传感器,搭建了铁路运维管理数据系统,将可视化BIM技术应用在铁路运维中。任星辰^[6]结合各平台BIM软件,开发BIM插件,对装配式建筑进行了三维可视化协同设计。刘珍珍^[7]建立了以BIM技术为支撑的铁路信号专业

运维管理模式,提出了专业-工程单元-系统-设备四级模型结构树构建方法。韩德志等^[8]针对城市轨道交通工程建设,通过建立建设阶段与运维阶段的数据映射关系,实现建设与运维的顺畅衔接。陈东生等^[9]利用移动互联网和云计算技术,开发了一款铁路工务智能移动终端系统,系统通过Android平台发布,能够为工务现场提供完整的辅助检修服务。Min等^[10]结合英国干线铁路网络上的工程案例,基于BIM与GIS技术,提出了一种铁路养护投资评价方法,确定了更经济的铁路养护策略。Hassanain等^[11]基于IFC(industry foundation classes)标准定义运维信息,提出了设备运维管理模型,以描述设备运维工作中的检查和维护信息。Riaz等^[12]通过可视化呈现BIM模型,对监测传感器接收到的数据进行实时分析,以避免在建筑工地密闭空间中工作的工人遇到紧急情况。

【关键问题】现有研究大多集中于轨道运维平台功能性的研发,虽在一定程度上降低了工人劳动量,提高了运维效率,但在提高平台便携性、实用性等方面的研究还相对较少。

【创新特色】为推动轨道工务运维信息化智慧化,提高检修效率,本文以某高校轨道交通实验中心轨道为研究对象,针对轨道的构造特点,基于Revit二次开发和Unity3D平台,研发了轨道工务运维智慧信息平台,通过人机交互、运维信息管理和技术信息查阅三大功能,为推动轨道工务运维数字化、信息化、智慧化提供了一种新思路。

1 轨道BIM模型自动构建

构建轨道BIM模型是轨道工务运维智慧信息平台功能实现的基础。本文通过对CAD二次开发和Revit二次开发实现了轨道BIM模型的自动建立,其设计思路如图1所示。

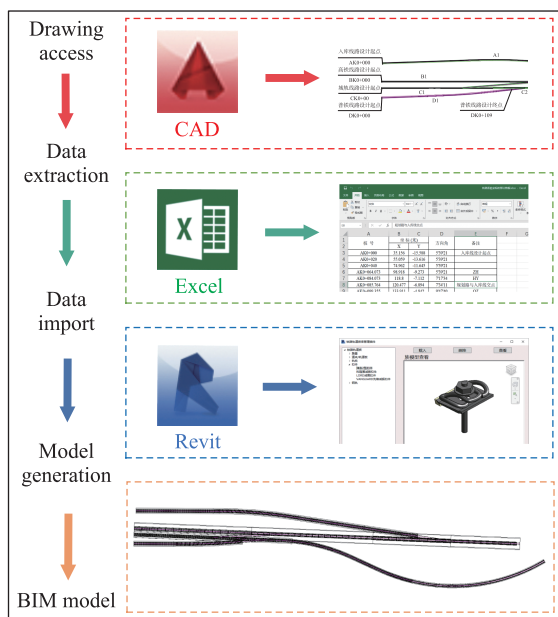


图1 轨道BIM模型自动构建设计思路
Fig. 1 Design ideas for automatic construction of track BIM model

1.1 轨道构件族创建及族库插件开发

目前Revit软件主要应用于房屋建筑工程中,Revit的系统构件族多为墙、柱和梁等,并不适用于轨道构件的创建。因此需要利用Revit族编辑器,选择合适的族样板,结合轨道构件的特点,创建轨道构件族。

通过Revit二次开发扩展软件功能对构件族进行管理,族库以树结构形式对构件族进行分类,通过调用RevitAPI来执行族文件载入、族文件删除和族模型查看等操作。

1.2 Revit二次开发及模型的建立

先获取CAD图纸中所有多段线,然后计算每个数据所在方格的最大点和最小点,得到所需二维数据,最后把读取到的二维坐标加上对应构件的控制点相对坐标和高程数据,即可得到对应构件的三维坐标。

对Revit进行二次开发,通过提取出的数据,自

动创建轨道结构中路基、道床、轨道板、轨枕、扣件、钢轨等构件BIM模型,最终建立轨道BIM模型。轨道BIM模型构建流程图如图2所示。

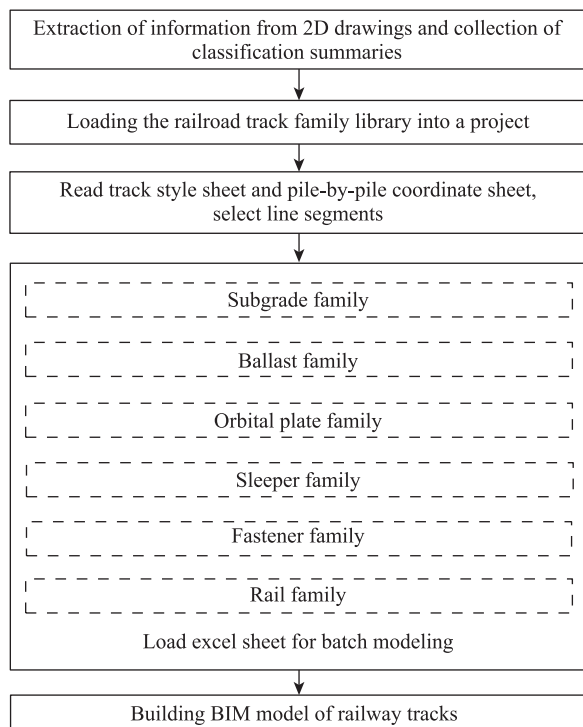


图2 轨道BIM模型构建流程图
Fig. 2 Railway BIM model construction flow chart

2 轨道工务运维智慧信息平台开发

2.1 平台需求分析及主要功能

现场检修过程中,复杂结构的检修需要进行多器械、多工序作业,是工务维修的重点和难点。工务现场累积了大量的纸质和电子资料,储存形式的不同,导致难以系统地查询和统计。此外,现场作业需要设备台账和历史检修数据支持,纸质资料不方便携带,也不便于在夜间天窗期使用。所以,可以利用先进的技术手段,研发基于BIM技术的铁路轨道工务运维智慧信息平台,提供便捷的辅助维修服务。根据需求分析,本文所研发的平台拟实现以下功能。

1) 人机交互功能。基于BIM和移动增强现实技术,针对轨道部件开发人机交互功能,展示构件的BIM模型以及模拟构件拆装作业。在轨道工务维修过程中使用移动设备识别工务现场的设施设备,通过放大、缩小和上下左右滑动屏幕等操作,观察构件的细部结构,展示相关设施设备的拆装作业

模拟过程,为轨道工务检修提供参考,增加本平台的实用性。

2) 运维信息管理功能。运维信息管理功能能够集成设备的名称、型号、数量和编码等信息,实现各系统间信息的关联;展示铁路轨道的结构和空间位置排布,记录主要设施设备的检修故障数据;通过载入轨道几何形位检测数据,可以绘制轨道几何形位波形图,计算各段线路轨道质量指数(track quality index, TQI)^[13],为铁路轨道工务运维检修决策提供参考。

3) 技术信息查阅功能。可在平台中查看铁路

轨道的工务维修规范和相关设施设备CAD图纸等技术信息,现场务工人员通过移动端即可查询所需的检修资料,提高铁路轨道工务运维检修效率。

2.2 平台开发环境及架构设计

本轨道工务运维智慧信息平台开发环境:PC操作系统为Windows 10操作系统,PC开发平台为Unity3D 2017.3.0f3,开发环境为.NET Framework 4.7,开发工具为Vuforia SDK, JDK,开发语言为C#(Visual Studio 2017),应用运行平台为Android端。平台架构采用了经典的3层架构设计,如图3所示。

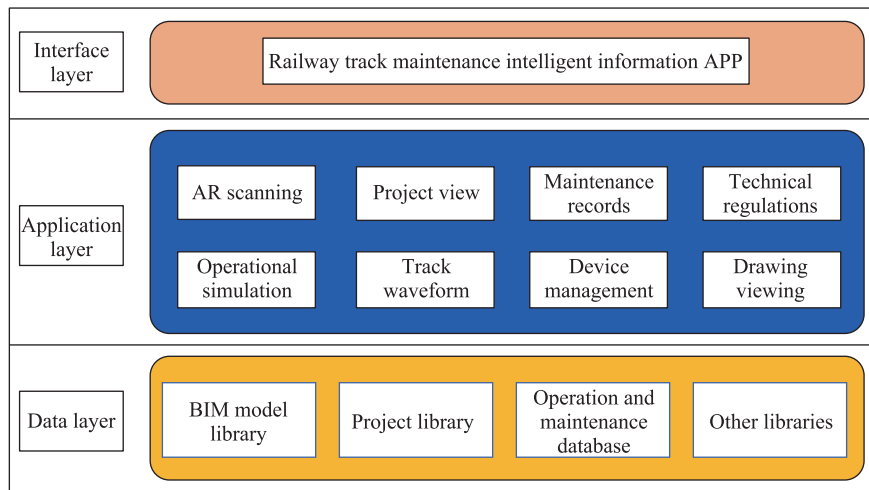


图3 平台架构

Fig. 3 Platform architecture

界面层主要是通过轨道工务运维智慧信息APP对平台应用功能进行展示,方便使用。应用层主要基于Unity3D平台定制相应功能,共分为3个功能模块,分别为人机交互模块、运维信息管理模块和技术信息查阅模块,通过相应的功能程序与数据层建立联系,实现数据的存储与提取。数据层主要由BIM模型库、运维数据库和技术信息库构成。

2.3 人机交互功能实现

1) 移动增强现实技术实现。该技术实现流程如下:首先采集目标图片提取特征点,打包成数据集;然后与摄像机的视频帧率进行对比,通过三维跟踪注册技术实现在现实世界中的跟踪和定位;将虚拟世界的元素添加到现实世界中进行人机交互。移动增强现实技术实现流程如图4所示。

2) 构件BIM模型展示功能实现。使用移动增强现实技术识别到构件后,在屏幕上展示构件BIM

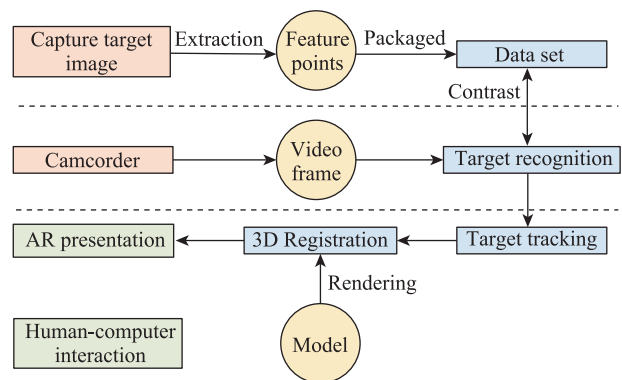


图4 移动增强现实技术实现流程

Fig. 4 Mobile augmented reality technology implementation process

模型,并添加交互功能,如模型旋转、放大、缩小,以及触发按钮等。实现这些交互功能,需要判断交互所使用的手指数量及其触摸状态,并根据不同的情

况调用相应的控制指令。单指滑动屏幕旋转模型,双指滑动屏幕根据两点滑动相对距离实现模型的放大和缩小,双击模型跳转到构件拆装作业模拟场景,点击退出按钮退回到平台首页场景。实现模型旋转、放大、缩小、跳转功能的程序逻辑如图5所示。

3) 构件拆装作业模拟功能实现。在展示构件BIM模型的基础上,添加Animator组件,模拟复杂设备拆装作业动画。设置“上一步”和“下一步”按钮,以便对每一步动画进行控制,并添加相应的文字说明。相应的动画控制逻辑如图6所示。

2.4 运维信息管理和技术信息查阅功能实现

TQI是指200 m单元区段内轨道的左高低、右高低、左轨向、右轨向、轨距、水平和三角坑7项不顺的标准偏差之和,通过将全线分为若干个单元进行计算后得到TQI的平均值,以表示线路的整体状态,TQI在轨道区段质量状态评价中发挥了巨大的作用。

TQI值的计算式为

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \quad (2)$$

$$TQI = \sum_{i=1}^7 \sigma_i \quad (3)$$

式中: n 为采集点的个数(200 m单元区段中 $n=800$); x_{ij} 为200 m单元区段中各项几何偏差的幅值, $i=1,2,\dots,7,j=1,2,\dots,n$; σ_i 为各项几何偏差的标准差, $i=1,2,\dots,7$,分别为:左高低、右高低、左轨向、右轨向、轨距、水平、三角坑。

通过导入轨道几何形位检测数据文件,将轨道的左高低、右高低、左轨向、右轨向、轨距、水平和三角坑数据按测点导入到对应设备模型中,可在对应轨道模型上显示轨道几何形位波形图,计算并显示该段轨道的TQI值。

基于Unity3D平台开发检修记录和设备管理界面,该界面可编辑并保存如基本数字、字符串、照片等多种格式的信息,实现运维信息管理功能。将铁路

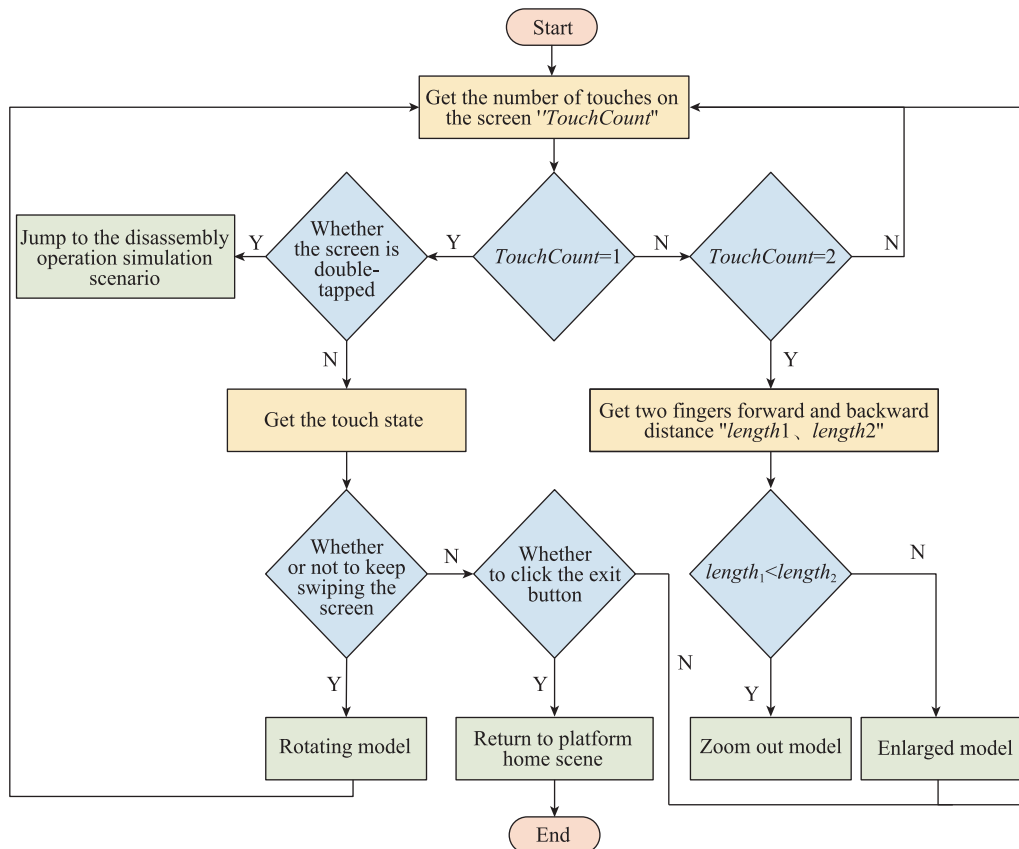


图5 BIM模型展示功能实现逻辑

Fig. 5 BIM model display function realization logic

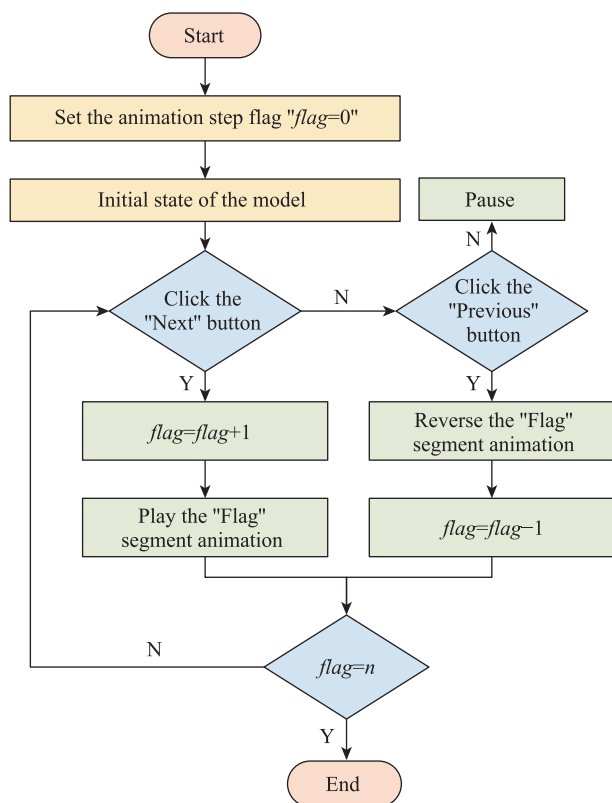


图6 动画控制逻辑

Fig. 6 Animation control logic

轨道的工务维修规范和相关设施设备CAD图纸等技术信息录入平台,实现技术信息查阅、查询功能。

3 平台功能测试

3.1 测试环境

当前以智能手机为代表的移动智能终端设备在性能表现上呈现跨越式发展,本次测试所使用的移动设备配置参数见表1。

表1 移动设备参数

Tab.1 Mobile device parameters

Item	Parameter
CPU	Snapdragon 870
Running memory/G	12
Screen resolution/dpi	2 340×1 080
Operating system	MIUI 13.0.6 stability

3.2 测试过程

为检验轨道工务运维智慧信息平台的功能,进行了工务现场应用测试。测试主要包括页面测试、

人机交互功能测试、运维信息管理功能测试和技术信息查阅功能测试。本平台发布于Android平台,打开App进入平台主界面。平台主界面设置了8个功能按钮,包括“AR扫描”“作业模拟”“工程浏览”“轨道波形”“检修记录”“设备管理”“技术规章”和“图纸查看”。平台模块共分为人机交互模块、运维信息管理模块和技术信息查阅模块。人机交互模块由“AR扫描”和“作业模拟”按钮进入,运维信息管理模块由“工程浏览”“轨道波形”“检修记录”和“设备管理”按钮进入,技术信息查阅模块由“技术规章”和“图纸查看”按钮进入。

页面测试主要是各页面按钮的功能性和UI显示效果测试,经现场测试效果表明,各页面按钮的功能性和UI显示均能达到预期的效果。

点击“AR扫描”按钮,进入移动增强现实功能页面,调用移动智能终端的摄像机,在工务作业现场进行扫描识别,屏幕显示相应设备的三维模型于设备上方,如图7所示。

可通过滑动或点击屏幕进行人机交互,双击三维模型进入构件BIM模型展示场景,如图8所示,通过放大、缩小、上下左右滑动屏幕等操作,观察模型的细部结构。点击“拆装模拟”按钮,可进入构件

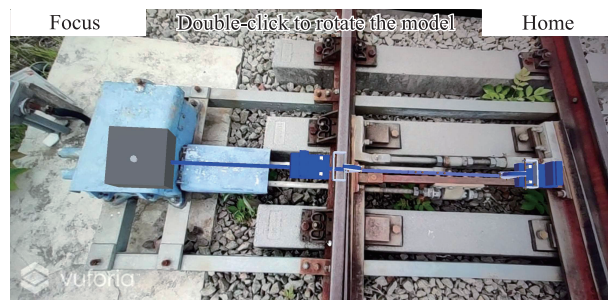


图7 移动增强现实识别功能测试

Fig. 7 Mobile augmented reality recognition function test

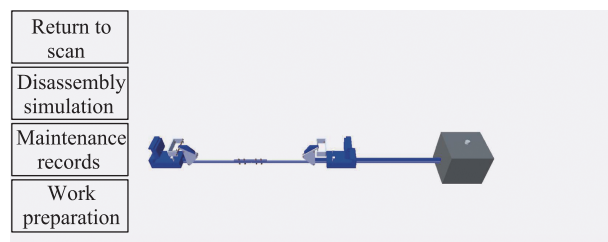


图8 BIM模型展示测试

Fig. 8 BIM model demonstration test

拆装作业模拟场景,点击“上一步”和“下一步”按钮拆装转辙器,如图9所示,如需查看相应构件具体维修作业信息,可通过“技术规章”按钮进入技术信息查阅模块查阅。

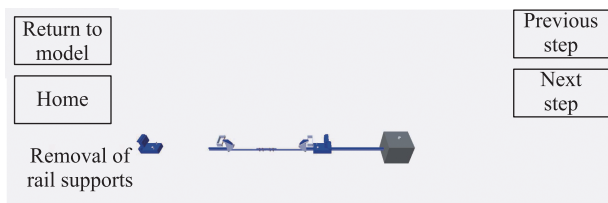


图9 拆装作业模拟测试

Fig. 9 Assembly-disassembly operation simulation test

通过点击平台主界面的“工程浏览”按钮,进入工程浏览界面,双击构件三维模型,即可显示相关设施设备详细参数信息,如图10所示。

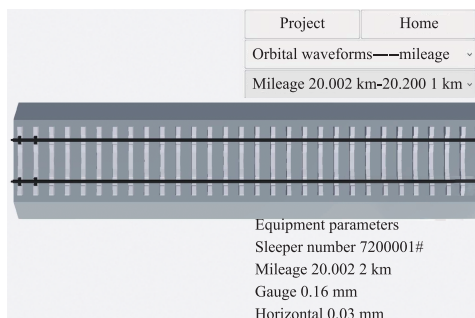


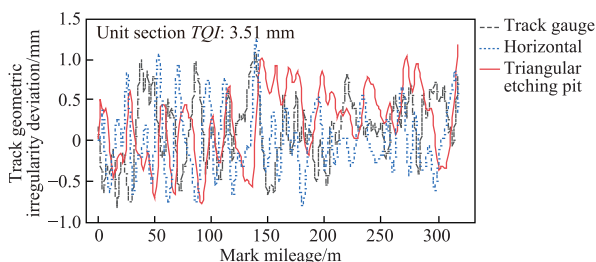
图10 设备参数查看测试

Fig. 10 Equipment parameters view test

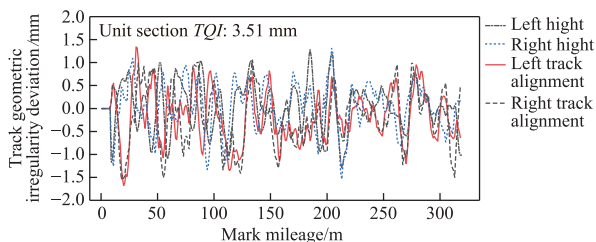
在工程浏览界面点击“轨道波形图——选择标示里程”或主界面“轨道波形”按钮,进入轨道几何形位波形图界面,可在轨道模型上方查看对应标识里程轨道几何形位波形图及该段轨道的TQI值,也可将数据从系统中导出,由使用者自行绘制轨道几何形位波形图。以某高校轨道交通实验中心其中一段为例,计算标示里程BK0+000-BK0+200区段的TQI值,如图11所示。

通过点击平台主界面“设备管理”按钮进入设备管理界面,在表格中按照相应的编号、名称、型号、数量、单位和现状录入设施设备信息,点击“+”按钮可增加表格的行,如图12所示。

通过点击平台主界面的“检修记录”按钮或点击模型展示界面的“检修记录”按钮进入检修记录界面,在表格中按照相应的设备名称、设备编号、设



(a) Gauge, horizontal, triangular pit rail waveform diagram



(b) Height, track alignment rail waveform diagram

图11 轨道几何形位波形图显示测试

Fig. 11 Track geometry waveform display test

Device management						Return
Number	Name	Model	Quantities	Units	Present situation	
1	Track inspection trolley	GPR1000	1	a	Well	+
2	Hydraulic track puller	YQB—15	1	a	Well	
3	Digital torque wrench	TZCEM	5	a	Well	
4	Torque wrench	410—530	15	a	Well	
5	Electric tamper	DZG—350	4	a	Well	
6	Jack	YCW250	2	a	Well	

图12 设备管理录入测试

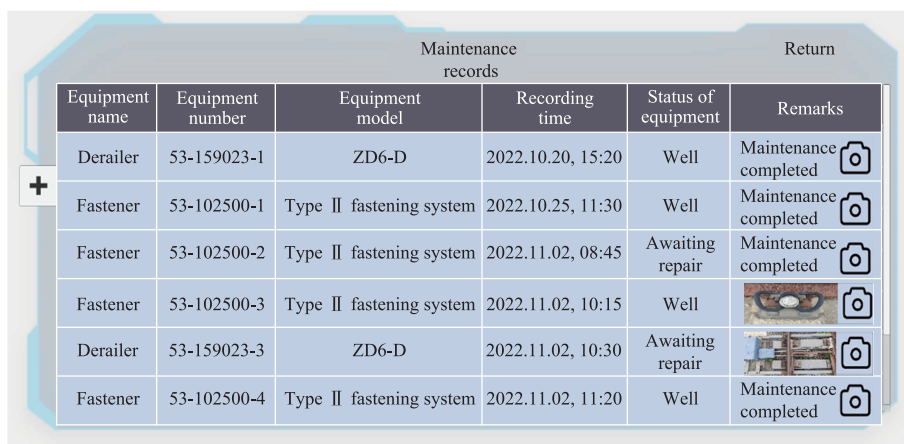
Fig. 12 Equipment management input test

备型号、记录时间、设备现状和备注录入检修记录,点击相机图标可以拍照记录设备现状,点击“+”按钮可增加表格的行,如图13所示。

通过点击平台主界面的“技术规章”按钮进入技术规章界面,可选择查看设备标准、修理要求及设备修理主要作业要求。通过点击平台主界面的“图纸查看”按钮进入CAD图纸库界面,如图14所示,点击对应按钮,可以展示铁路轨道主要设施设备的CAD图纸。

通过工务现场应用测试,人机交互功能、运维信息管理功能和技术信息查阅功能均能正常使用,且都能达到预期目的。

当前,工务运维平台主要分为网站型平台和APP型平台,如孙雷等^[14]基于B/S设计了铁路工务维修辅助平台,张超等^[15]基于Unity3D平台开发了



Maintenance records					Return
Equipment name	Equipment number	Equipment model	Recording time	Status of equipment	Remarks
Derailer	53-159023-1	ZD6-D	2022.10.20, 15:20	Well	Maintenance completed
Fastener	53-102500-1	Type II fastening system	2022.10.25, 11:30	Well	Maintenance completed
Fastener	53-102500-2	Type II fastening system	2022.11.02, 08:45	Awaiting repair	Maintenance completed
Fastener	53-102500-3	Type II fastening system	2022.11.02, 10:15	Well	
Derailer	53-159023-3	ZD6-D	2022.11.02, 10:30	Awaiting repair	
Fastener	53-102500-4	Type II fastening system	2022.11.02, 11:20	Well	Maintenance completed

图13 检修记录录入测试

Fig. 13 Maintenance record entry test

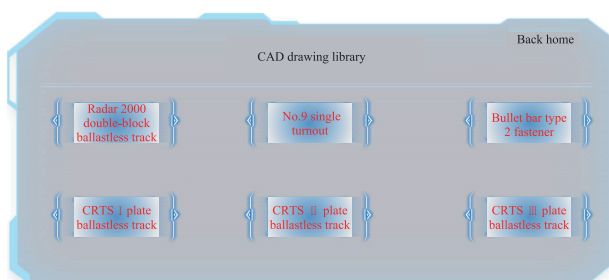


图14 CAD图纸库界面测试

Fig. 14 CAD drawing library interface test

高速铁路工务智能维修移动应用程序。相比于其他工务运维平台,本平台在实用性和可操作性上具有明显优势。

相比于网站型平台,本平台运行更加流畅、稳定,同时所有功能均能离线使用,可避免在偏远山区工务维修现场由于网络不畅而导致平台不能正常使用的问题。

相比于Windows端应用,本平台为移动应用程序,便携性大大提高。和同类型的移动端平台相比,本平台内存大小仅80 M,对移动设备配置要求不高,平台界面简洁,操作简单,能有效满足工务现场辅助维修的需要。

4 结论

以某高校轨道交通实验中心轨道为研究对象,基于Revit二次开发和Unity3D平台研发了轨道工务运维智慧信息平台,详细地阐述了平台的构建过程及功能实现。主要结论如下。

1) 基于Unity3D开发平台,采用三层架构模

型,研发了轨道工务运维智慧信息平台,并根据平台需求分析,实现了人机交互功能、运维信息管理功能和技术信息查阅功能。

2) 平台能够漫游展示轨道的结构和空间位置排布;在维修过程中,可以识别现场的设施设备,直接提供相关设施设备的三维可视化模型和拆装作业模拟动画;导入轨道几何形位检测文件和轨道几何形位数据,可绘制轨道几何形位波形图并计算TQI值;可以查阅检修记录、设备管理资料、技术规章和CAD图纸等。相比于其他工务运维平台,本平台的实用性和可操作性大大提高,能有效提升工务现场的维修效率。

3) 平台集成了多个独立功能,以标准化的检修场景为驱动,通过移动终端提供轨道工务运维信息,携带方便,可进一步提升轨道工务运维的智能化水平,对推动轨道工务运维向信息化、智慧化方向迈进具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 卢春房, 马战国, 蔡超勋. 重载铁路线路设备智能感知体系框架研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(8): 1-6.
LU C F, MA Z G, CAI C X. Research on intelligent perception system framework of heavy haul railway track infrastructure[J]. Railway Building, 2022, 62(8): 1-6.
- [2] 王同军. 中国智能高速铁路体系架构研究及应用[J]. 铁道学报, 2019, 41(11): 1-9.
WANG T J. Research and applications of China intelligent high-speed railway architecture[J]. Railway Journal, 2019, 41(11): 1-9.
- [3] 闫立忠. 基于青连铁路四电工程BIM技术的应用研究

- [J]. 铁道标准设计, 2019, 63(4): 141-147.
- YAN L Z. Research on application of BIM technology in Qingdao-Lianyungang Railway four electric/electronic systems engineering[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(4): 141-147.
- [4] 万伟明, 何越磊, 程岩, 等. 铁路车站改扩建工程资料管理可视化研究[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(6): 156-160.
- WAN W M, HE Y L, CHENG Y, et al. Visualization research on data management of railway station reconstruction and extension project[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(6): 156-160.
- [5] 刘惊灏, 苏谦, 陈俊杰, 等. 基于 WebGL 扩展模型的铁路运维可视化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(4): 892-900.
- LIU J H, SU Q, CHEN J J, et al. Research on visualization of railway operation and maintenance based on BIM model extended by WebGL[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(4): 892-900.
- [6] 任星辰. 装配式 BIM 技术在建筑全生命周期中的应用[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(6): 90-94.
- REN X C. Application of prefabricated BIM technology in the whole life cycle of building[J]. Journal of Railway Engineering, 2022, 39(6): 90-94.
- [7] 刘珍珍. 铁路信号运维阶段 BIM 模型交付及数据标准研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(4): 144-148.
- LIU Z Z. Research on BIM model delivery and data standards in railway signal operation and maintenance phase[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(4): 144-148.
- [8] 韩德志, 李博, 华福才, 等. 面向城市轨道交通运维阶段的 BIM 模型建设[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(4): 182-187.
- HAN D Z, LI B, HUA F C, et al. Construction of BIM model for urban rail transit at operation and maintenance stages[J]. Urban Fast Rail Transit, 2022, 35(4): 182-187.
- [9] 陈东生, 徐贵红, 陶凯, 等. 铁路工务智能移动终端系统的设计与实现[J]. 铁道建筑, 2016(3): 118-121.
- CHEN D S, XU G H, TAO K, et al. Design and realization of the intelligent mobile terminal system of railway maintenance[J]. Railway Building, 2016(3): 118-121.
- [10] MIN S P, ZHAO L L. Whole life cycle of railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 10: 15-20.
- [11] HASSANAIN M, FROESE T, VANIER D. Development of a maintenance management model based on IAI standards[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 2001, 15(2): 177-193.
- [12] RIAZ Z, ARSLAN M, KIANI A K, et al. CoSMoS: a BIM and wireless sensor based integrated solution for worker safety in confined spaces[J]. Automation in Construction, 2014, 45: 96-106.
- [13] 许玉德, 吴琰超, 魏子龙, 等. 基于放大系数和权重组合的无砟轨道 TQI 计算[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(5): 101-109.
- XU Y D, WU Y C, WEI Z L, et al. Calculating TQI of ballastless track based on amplification coefficient and weights[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(5): 101-109.
- [14] 孙雷, 余朝刚, 冯超, 等. 铁路工务维修辅助平台的研究与应用[J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(4): 974-979.
- SUN L, YU C G, FENG C, et al. Research and application of railway engineering maintenance auxiliary platform[J]. Computer and Digital Engineering, 2020, 48(4): 974-979.
- [15] 张超, 何越磊, 路宏遥. 基于 BIM+移动增强现实的高速铁路工务智能维修技术研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(12): 44-49.
- ZHANG C, HE Y L, LU H Y. Research on intelligent maintenance technology of high-speed railway based on BIM+mobile augmented reality[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(12): 44-49.



第一作者: 胡赵磊(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨道交通 BIM 技术。E-mail: 2075839595@qq.com。



通信作者: 张鹏飞(1975—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 国家自然科学基金获得者。研究方向为桥上无缝线路设计理论与关键技术。E-mail: zhangpf4236@163.com。

(责任编辑:吴海燕)