

doi: 10.7690/bgzd.2026.03.010

装备 IETM 系统虚拟漫游导航交互方式

邱煌彬, 阳加远, 周 畅, 李先航, 郑 鑫

(中国航天科技集团有限公司第一研究院, 北京 100076)

摘要: 为解决原有交互式电子技术手册 (interactive electronic technical manual, IETM) 产品导航模式单一, 不直观的问题, 提出一种应用虚拟漫游导航交互方式的装备 IETM 系统。创造性地将虚拟现实技术嵌入 IETM 中, 设计“模型-数据”双向导航交互算法, 并以某坦克驾驶舱 IETM 手册浏览为例进行虚拟漫游导航试验验证。结果表明, 该系统能够使用户以第一人称视角浏览装备细节, 且大大提高 IETM 的展示性。

关键词: IETM; 虚拟漫游; 导航; 交互方式

中图分类号: TJ811; TP391 **文献标志码:** A

Navigation Interactive Mode for Virtual Roaming in Equipment IETM Systems

Qiu Huangbin, Yang Jiayuan, Zhou Chang, Li Xianhang, Zheng Xin

(No. 1 Research Academy, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to solve the problem that the original interactive electronic technical manual (IETM) product navigation mode is single and not intuitive, an equipment IETM system based on virtual roaming navigation interactive mode is proposed. The virtual reality technology is creatively embedded into the IETM, and the interactive algorithm of "model-data" two-way navigation is designed. Taking the IETM manual browsing of a tank cockpit as an example, the virtual roaming navigation test is verified. The results show that the system enables users to browse the details of the equipment from the first-person perspective, and greatly improves the display of IETM.

Keywords: IETM; virtual roaming; navigation; interactive mode

0 引言

随着武器装备研制技术的发展, 装备种类和数量的激增, 同时装备信息化程度的提高, 武器单体所需记录的技术信息不断增加, 技术资料总量呈指数形式逐年攀升。传统的纸质技术资料早已不能满足部队使用需求, 亟需通过数字化与电子化手段提升技术手册的记录密度。

交互式电子技术手册 (IETM) 是在信息技术的推动与信息化战争的军事需求牵引下产生与发展起来的一项重要的装备信息化保障技术^[1-3]。它成功地克服了传统纸质手册所存在的诸多弊端, 显著地提高了装备维修、人员训练及技术资料管理的效益与效率, 受到世界各国军事部分的高度重视与密切关注, 并且得到了极其广泛的应用。

现有 IETM 产品的市场调研结果显示, 各厂家、设计单位均参照 IETM 设计标准 (S1000D 和 GJB6600 等) 进行 IETM 产品的研制^[4-6], 绝大多数产品在展示形式上大多采用文字、图片、视频等传统展示方式, 在导航查询上仍采用传统的结构树导航方式, 用户体验不佳, 产品使用率低^[7]。部分研

究单位提出采用 3 维仿真模型进行产品结构定位^[8-10], 该方法虽提升了 IETM 的导航效率, 但用户浏览视角受限, 尤其在装备内部空间进行浏览时, 展示效果有待提升。

随着 IETM 在辅助人员培训和故障检修中的作用日益重要, 充分借鉴虚拟现实等新技术, 扩展 IETM 素材展现形式, 增强 IETM 交互性和操作性, 从而进一步提高 IETM 产品的使用效率和使用体验。虚拟漫游导航在 IETM 中的应用研究将成为 IETM 展示和交互技术的重要研究方向^[11]。笔者提出一种应用虚拟漫游导航交互方式的装备 IETM 系统, 创造性地将虚拟现实技术嵌入 IETM 中。用户能够以第一人称视角浏览装备细节, 大幅提升了用户体验, 同时该技术还设置了 3 维模型与数据模块的双向交互算法, 大大提高了 IETM 的展示性。

1 总体方案

笔者主要设计了一种虚拟漫游导航方式, 并将该方式应用于 IETM 的导航设计中。通过构建轻量化的 3 维模型与虚拟场景, 将虚拟现实技术融入

收稿日期: 2024-11-16; 修回日期: 2024-12-16

第一作者: 邱煌彬 (1992—), 男, 福建人, 硕士。

IETM 系统的设计中，以沉浸式的视角浏览装备信息，提升 IETM 的交互性和素材的展示性。

系统采用导航树与虚拟漫游场景热点的双向驱动导航模式，如点击虚拟场景中的单机部件可以同步链接导航树的目录，内容区显示相应的数据内容。通过构建 3 维漫游场景，用户以沉浸式视角体验 IETM。系统支持从包含整体的武器系统开始，从顶层向下，从外到内以漫游方式进行导航，可逐级定位到具体单机。虚拟漫游导航实现的系统如图 1 所示。

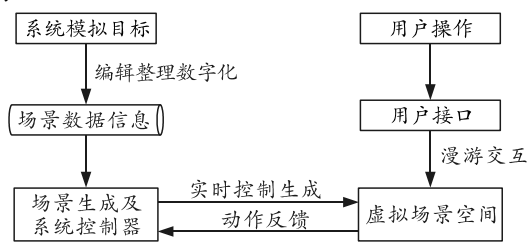


图 1 虚拟漫游导航系统框架

该虚拟漫游导航方式的技术特点如下：

- 1) 双向驱动导航模式加强了 3 维漫游场景与导航树的相互联系，直观准确，提高了交互性；
- 2) 3 维漫游场景和导航树均可独立导航，操作简便；
- 3) 轻量化的模型使得系统运行流畅，提升用户的体验性；
- 4) 引入虚拟现实技术，构建沉浸式的虚拟场景漫游，IETM 交互性得到提升；
- 5) 提高培训和技术资料查询的效率。

为进一步提升 IETM 系统人机交互操作体验，将虚拟现实、3 维热点、3 维导航等多种技术综合应用于 IETM 导航交互设计中，通过构建虚拟场景、3 维模型，在虚拟场景中建立热点链接，实现 3 维场景的虚拟漫游与数据模块的双向链接。

装备 IETM 系统虚拟漫游导航交互技术通过虚拟场景和 3 维模型设计、热点设置和交互功能开发来实现。其中虚拟场景和 3 维模型设计需要对产品的模型进行轻量化处理，具体开发步骤如图 2 所示。

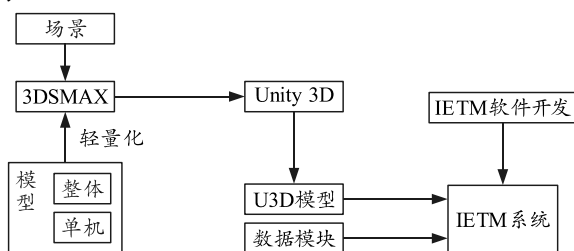


图 2 装备 IETM 系统虚拟漫游导航交互技术架构

2 模型轻量化算法设计

2.1 算法概述

武器系统组成复杂，整个装备 3 维模型所占存储容量很大，受限于便携式平板电脑的性能，在 IETM 中一次性加载装备全套模型，会极大程度影响操作体验，甚至会造成浏览器软件崩溃、无法运行。

场景模型的复杂度决定着 IETM 系统运行的流畅度，需要在场景模型对完成的模型进行优化处理，模型优化本质上是对模型的简化，即在保证模型真实合理的基础上，尽可能减少点线面^[12-13]。

IETM 系统由于硬件的制约以及用户体验性的需要，其对模型的要求很高，既要满足高度的逼真性，又要满足硬件的承受能力，使系统可以流畅地运行；为此，必须开展包括模型创建及优化在内的 3 维模型的轻量化设计。

2.2 模型预处理

笔者主要采用顶点删除法和边折叠的网格简化法^[14-16]。顶点删除法根据网格各顶点局部拓扑信息对顶点进行分类，依据判断标准将不合格的顶点删除，然后将剩余的孔洞重新进行三角划分，重复操作直至没有不合格顶点，简化效果如图 3 所示。

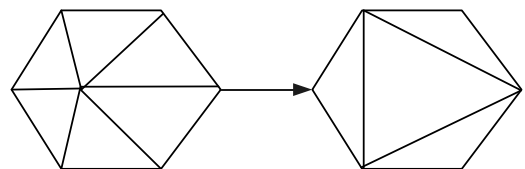


图 3 顶点删除简化效果

首先确定边折叠法折叠代价最小的边或三角形，然后计算折叠后新顶点的 3 维空间位置，最后连接该新顶点与其他顶点，简化效果如图 4 所示。

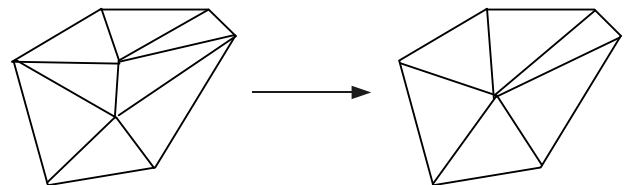


图 4 边折叠法简化效果

通过装备模型进行试验，结果如表 1 所示，模型面数从 5 035 减少至 598 时，轮胎仍具有基本的外形，如图 5 所示。此时，减面压缩比达到了 88%。

表 1 模型预处理结果

参数	原始模型	一次处理	二次处理	三次处理
面数	5 035	1 257	598	218
压缩率/%	0	75	88	96

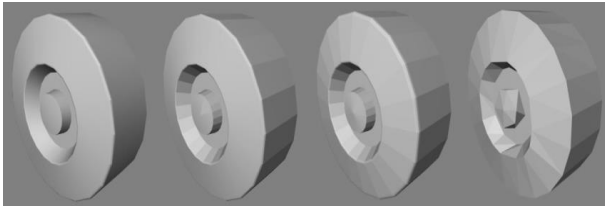


图 5 模型减面试验效果

2.3 模型实例化

在模型预处理的基础上对模型进行实例化，进一步简化模型。模型实例化是将场景中的对象设置为预设对象，通过链式的存储方式，减少模型被反复绘制调用时的数量。实例化的物体具有相同的几何属性，但是非几何属性是不同的，在一个场景中使用多个相同的模型，无需每次都重新渲染加载，只需要记录待添加对象的大小、位置、方向等信息作为变换矩阵，然后对预设的对象进行各种变换便可得到^[17]。模型实例化流程如图 6 所示。

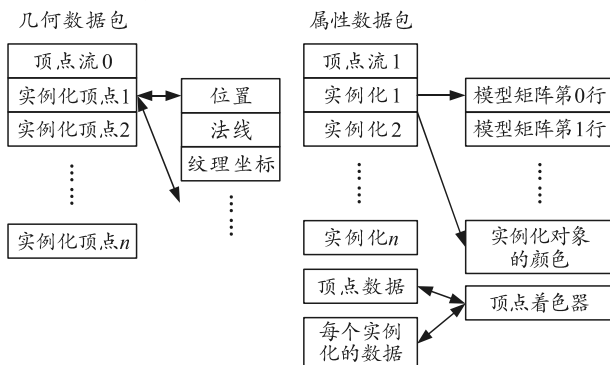


图 6 模型实例化流程

2.4 场景层次化

在每次加载 3 维模型时，预先设置场景的层次，根据显示动态调整 3 维模型的显示内容。层次如表 2 所示，场景由宏观至微观进行逐一铺设，在展示某层次的 3 维场景时，其他层次的产品均为隐藏或虚化状态，可进一步减少模型加载时间。

表 2 场景分层次结果

序号	场景层次	展示效果
1	总体层	仅展示环境及所有装备外观
2	系统层	仅展示某装备的外观
3	分系统层	仅展示某装备的部段外观
4	单机层	仅展示某装备的单机外观
5	部件层	仅展示某部件的外观

以发动机为例，在技术厂房中，当浏览整体发动机外观时，发动机内部结构可以全部隐藏；当浏览到某舱段时，外部可见的部件/单机加载显示，其余部分隐藏；当浏览单机结构时，仅加载单机模型，便于观察细节。

3 虚拟漫游场景构建

3.1 虚拟 3 维漫游场景制作

根据实际环境构建 3 维漫游场景，用户以沉浸式视角体验 IETM。系统支持从包含武器系统 3 维模型开始，从顶层向下以漫游方式进行导航，可逐级定位到具体单机。不论定位到系统还是单机，定位对象均会高亮显示，并同步出现名称标注及其特征信息。用户可以通过滑动鼠标，或者在 PAD 触摸屏上滑动手指切换视角。3 维场景的制作流程如图 7 所示，步骤如下：

- 1) 从装备总体、分系统设计单位搜集装备 3 维设计模型；
- 2) 通过 3DMAX 软件对各模型进行轻量化处理，提升浏览速度，优化导航效果；
- 3) 将轻量化处理后模型导入 Unity3D 软件中处理^[18]，包括建立单机和各系统的导航热点、编制各导航热点与武器装备素材编码的对应关系表等；
- 4) 在 Unity3D 软件中添加真实场景模型，使武器装备模型和虚拟场景融为一体，提升真实感；
- 5) 将制作后 Unity3D 模型上传至 CSDB 数据库^[19]。

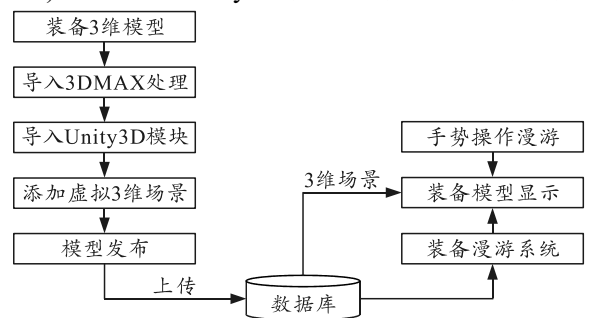


图 7 3 维场景的制作和使用流程

3.2 基于 Light Probes 的动态全局场景光照

3 维场景在 Unity3D 中通过实时光照和阴影以及本身的材质动态变化，对 GPU 造成很大的消耗以及对 CPU 计算量增大。为了使 3 维模型在虚拟环境运行达到最优秀显示效果的同时降低计算机渲染层的开销，需要对 3 维场景进行处理，如图 8 所示。

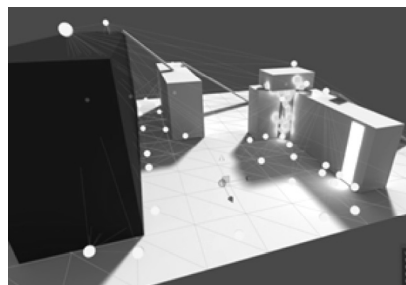


图 8 Light Probes 制作效果

通过构造由小探测球模型组成的 Light Probes 组件,将光源探测球均匀地分布在动态模型的周围。设置 3 种不同颜色的光照信息分层投射在小球上,小球都会分配到不同的光照亮度和颜色。设置完成后将灯光关闭,场景中的光照信息仍然存在 Light Probes 之中,为主体提供光源,从而实现动态的全局光照^[20]。

按照 Light Probe 组件特性,Light Probes 小球会跟随在设置的动态模型前,无论动态模型旋转移动,每个 Light Probes 小球的光源都会将自身的光源信息投射在模型身上。实时光源可以完全关闭也不会影响模型的投影和光照,同时没有来自实时光照带来性能上的消耗,模型预处理之后只需要应用动态加载的模型即可,该模型自带预处理效果,不需要重复设置。

4 “模型-数据”双向导航交互算法设计

4.1 基于 SNS 的 IETM 模型热点匹配

通过在虚拟场景和 3 维模型的不同位置设置多个热点,使 3 维模型中的部段、单机等能够与 IETM 数据模块之间建立起链接关系,实现从“模型→数据”模块的链接过程。热点设置的具体步骤如下:

1) 选择需要进行热点设置的模型,将模型导入到 Unity3D 软件中^[21],根据提前规划好的热点链接内容进行热点设置;

2) 为每个热点添加唯一的特征值(此处采用 SNS 码进行标识),能够在链接过程中进行准确且唯一的识别;

3) 将设置好热点的 3 维场景和模型重新上传至 CSDB 数据库,替换原有模型;

4) 通过 3 维场景中的特征值,将数据包与特征值进行关联,从而实现模型与数据的有效关联。

通过数据与软件分离设计的方法,达到兼容不同型号的目的。管理发布系统将数据模块制作后导入 CSDB 中,并在 CSDB 内对 3 维模型部件的 SNS 码以及模型部件的编码进行关联,最后发布成数据包;数据包被上传至 IETM 浏览系统,由浏览系统的逻辑引擎进行数据包数据的解析,并由显示框架将数据包的内容进行显示^[22-24]。

4.2 双向导航交互算法

为提升用户操作体验,采取导航树与虚拟漫游场景中 3 维模型的双向驱动导航模式,点击导航树各系统及单机节点,虚拟漫游场景会切换高亮显示

对应 3 维模型^[25];在虚拟漫游场景区选择各单机模型时,导航树和内容区也会切换显示单机素材^[26]。双向导航原理如图 9 所示。

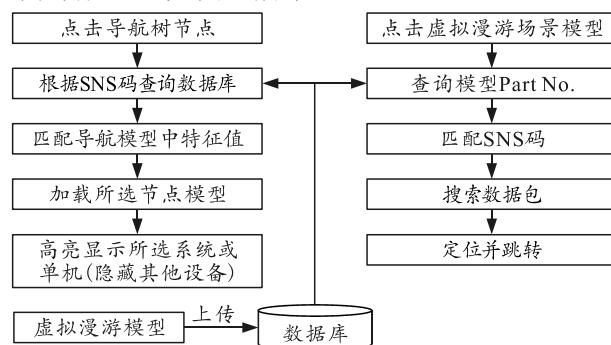


图 9 双向导航交互算法流程

双向导航的流程如下:

1) 导航树导航。

① 点击导航树节点;

② 系统根据节点的 SNS 码查询数据,并匹配导航模型中的特征值;

③ 根据查询结果加载节点模型;

④ 所选择的系统或单机设备在模型上高亮显示。

2) 3 维模型导航。

① 点击虚拟漫游场景中 3 维模型想要了解的部件;

② 系统查询该部件的特征值;

③ 系统根据该特征值匹配节点的 SNS 码;

④ 搜索数据库中的数据包,并定位数据内容;

⑤ 在内容区展示相应的内容。

图 10 是 IETM 中 3 维漫游场景的展示内容,通过点击图中的热点,能够快速链接到对应部件/产品/号手的数据介绍,当关闭该页面时,IETM 自动定位至对应介绍数据包的位置。



图 10 IETM 双向导航实施效果

5 试验验证

以坦克驾驶舱 IETM 手册浏览为例进行虚拟漫游导航试验验证, 场景如图 11 所示, 试验环境在国产化环境进行, 具体配置参数如表 3 所示。

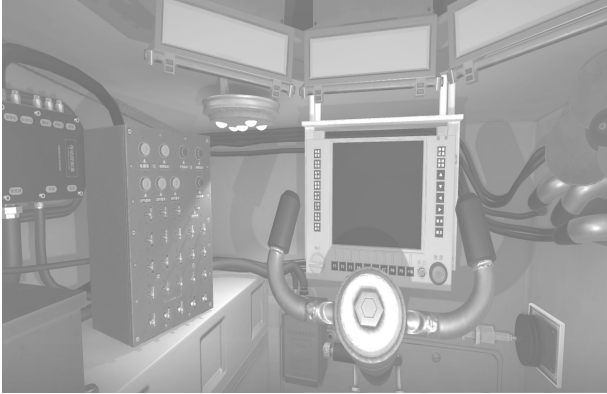


图 11 虚拟漫游场景效果

表 3 试验环境配置

序号	项目	参数
1	CPU	飞腾 D2000-8
2	操作系统	银河麒麟系统 V10
3	内存	16 G
4	硬盘	512 G
5	显卡	独显 1 G

如表 4 所示, 构造了以坦克驾驶舱相关部件组成的装备结构树, 并将坦克驾驶舱的结构树节点赋予 IETM SNS 节点, 同时与 3 维导航模型中的节点进行匹配, 如表 5 所示。

表 4 装备结构树

序号	一级节点	二级节点
1	坦克驾驶舱	/
2	/	方向盘
3	/	换挡装置
4	/	传动控制盒
5	/	温度控制盒
6	/	控制系统

表 5 IETM SNS 节点与模型节点编码

序号	装备节点	结构树 SNS	模型节点编码
1	坦克驾驶舱	A0-00-00	PRT0000
2	方向盘	A0-00-01	PRT0001
3	换挡装置	A0-00-02	PRT0002
4	传动控制盒	A0-00-03	PRT0003
5	温度控制盒	A0-00-04	PRT0004
6	控制系统	A0-00-05	PRT0005

经试验, 点击结构树节点, 3 维场景中对应的 3 维模型高亮显示, 同时点击场景中的 3 维模型, 结构树跳转至对应的节点并显示对应的数据模块, 如图 12 所示, 结果准确率如表 6 所示。

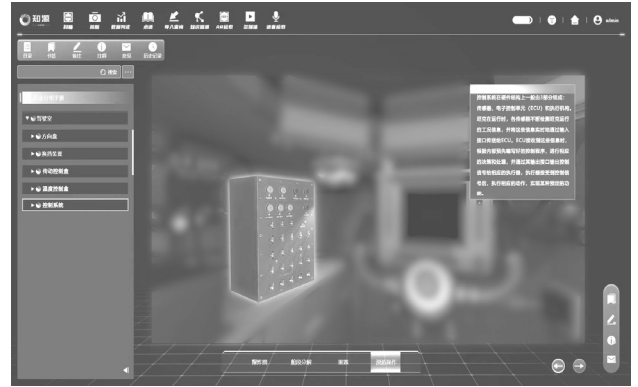


图 12 IETM 双向交互试验结果

表 6 IETM 双向交互准确率

序号	装备节点	场景层次	准确率/%
1	坦克驾驶舱	总体层	100
2	方向盘	单机层	100
3	换挡装置	单机层	100
4	传动控制盒	单机层	100
5	温度控制盒	单机层	100
6	控制系统	系统层	100

同时对加载时间进行对比, 在表 3 的试验环境下, 结果显示轻量化后的时间有了较大提升, 如表 7 所示。

表 7 加载时间对比

序号	装备节点	未轻量化	轻量化后
1	坦克驾驶舱	6.5	2.0
2	方向盘	2.1	0.5
3	换挡装置	2.3	0.5
4	传动控制盒	3.8	0.8
5	温度控制盒	3.6	0.8
6	控制系统	3.5	0.6

该交互技术在经济、军事等方面均具有多重效益:

1) 提升市场竞争力和客户满意度: 该交互技术极大程度提升了 IETM 技术的交互性能, 能够提升客户满意度, 成为新的竞争亮点;

2) 经济效益: 将该技术应用于 IETM 技术中, 可为 IETM 等信息化保障产品在竞标时取得竞争优势, 促成 IETM 产品的批量订货, 还可以进一步带动拓展其他综合保障资源的研制及订货, 成为一个经济点;

3) 军事效益: 利用虚拟现实等技术可以提升 IETM 在技术资料管理、辅助人员培训和辅助故障检修等的效率, 提高部队的自主保障能力以及信息化条件下的战斗力。

6 结束语

作为一种新颖的导航方式, 该系统不仅能够在

IETM 产品中获得应用,而且可以应用至具有导航交互需求的系统设计中,在民用和军用领域都具有广泛的应用需求,市场前景广大,具有较强的推广价值。

参考文献:

- [1] 张爱民. 战区联合作战后勤与装备保障力量建设研究[J]. 军事交通学院学报, 2018, 20(10): 27-31.
- [2] 秦敬辉, 王子剑. 空军综合保障基地在军事物流体系建设中的应用[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(9): 54-57.
- [3] 李文俊, 杨学强. 装备保障信息系统集成研究现状[J]. 军事运筹与系统工程, 2018, 32(2): 53-59.
- [4] 刘一鸣, 王晓东, 陈杰. 基于 S1000D 标准构建航空发动机技术资料体系[J]. 航空动力, 2022(5): 59-63.
- [5] 轩振原, 詹珂昕, 杨鑫. 基于 S1000D 的动车组 IETM 管理平台研究[J]. 铁路计算机应用, 2022, 31(3): 42-47.
- [6] 郑志良. 基于 IETM 的故障诊断系统关键技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023: 33-37.
- [7] 周平宇, 李智国, 万国强, 等. 基于 IETM 平台的轨道车辆运维文件编制方法研究[J]. 电子设计工程, 2021, 29(23): 94-102.
- [8] 李艳, 吕川. 交互式 3D 技术在交互式电子技术手册中的应用研究[J]. 中国科技信息, 2006, 24: 114-116.
- [9] 王怡恬, 陈静, 王本国, 等. 交互式电子技术手册中三维模型的应用研究[J]. 科技与创新, 2022(15): 10-15.
- [10] 王凌, 成斌. 交互式电子技术手册中三维导航方法[J]. 兵工自动化, 2016, 35(3): 20-23.
- [11] 牛亚峰, 吴闻宇, 周蕾. 融合虚拟现实技术的交互式电子技术手册在机械制图教学中的展望[J]. 机械设计, 2018(35): 51-53.
- [12] 霍铮, 郑瑜杰, 陈翊. 模型轻量化与加速研究进展[J]. 数据通信, 2023(3): 35-40.
- *****
- (上接第 28 页)
- [18] BARRAU A, BONNABEL S. The invariant extended Kalman filter as a stable observer[J]. IEEE Trans. Autom. Control, 2017, 62, 4: 1797-1812.
- [19] CHEN Y, ZHAO Y. New rapid transfer alignment method for SINS of airborne weapon systems[J]. 系统工程与电子技术(英文版), 2014, 2(2): 281-287.
- [20] 李寿鹏, 穆荣军, 崔乃刚, 等. 一种大安装偏差快速传
- [13] 李昂, 孙士杰, 张朝阳. 改进 YOLOv5s 的轨道障碍物检测模型轻量化研究[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(04): 197-207.
- [14] 刘钊, 张涛, 施洪刚, 等. 利用顶点删除法简化道路三维地形模型[J]. 测绘通报, 2014(8): 62-64.
- [15] 刘学人, 宜恒, 刘康. 面向复杂坡面地形航摄的无人机俯视航摄面提取算法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(2): 152-154.
- [16] 褚苏荣, 牛之贤, 宋春花, 等. 面向移动端的渐进网格简化算法[J]. 计算机应用, 2020, 40(3): 806-811.
- [17] 方明. 一种 UML 模型的实例化计算机网络威胁风险评估模型[J]. 通信技术, 2019, 52(5): 1234-1241.
- [18] 翟仕奇, 王海涛, 孙志丹. 基于 Unity3D 的发动机虚拟示教系统设计[J]. 应用与优化, 2021, 6: 124-126.
- [19] 白庆本, 王军, 胡梁勇, 等. 基于 CSDB 的装甲装备 IETM 技术研究[J]. 航空制造技术, 2012(10): 82-85.
- [20] 陈学超. 基于光场探针的实时动态全局光照算法[J]. 现代计算机, 2021(8): 93-97.
- [21] 康兴无, 黄顺勇, 甌占昌, 等. 基于 IETM 技术的装备三维零部件电子管理手册研究[J]. 电子设计工程, 2011, 19(22): 37-39.
- [22] 王凌, 马超, 王南松. 基于 Android 系统的 IETM 阅读器研究与设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(1): 205-209.
- [23] 李宁, 王瑶. 交互式电子技术手册标准体系的研究[J]. 电子测试, 2020(5): 121-124.
- [24] 王明岩, 潘晓明, 刘华汉. 交互式电子技术手册 IETM 在轨道交通行业的运用分析[J]. 电子技术与软件工程, 2022(18): 116-119.
- [25] 陈琳, 邹惠之, 陈武, 等. IETM 中交互式线缆管理系统研究与应用[J]. 电子设计工程, 2015, 23(9): 26-29.
- [26] 赵伟, 费琪. 基于 VR 技术的军用操控设备训练虚拟化技术[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(9): 109-113.
- *****
- 递对准中的闭环卡尔曼滤波算法[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(3): 293-301.
- [21] TIGMANSHU P, RAOM S, JALESH P, et al. Improved estimation of algebraic states for nonlinear descriptor systems by integration of evolutionary algorithms within EKF framework[J]. Dynamics and Control, 2023, 11(5): 2484-2498.
- [22] 秦永元, 张洪斌, 王叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.