

一种航空标准件立体仓储系统数字孪生交互样机的设计

李 麒, 吴文凯, 董 莘, 赵寒涛

(黑龙江省科学院智能制造研究所, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 航空工业是机械制造业的重要分支, 为进一步提升小尺寸航空标准件存取技术的数字化水平, 基于数字孪生理论, 以小尺寸航空标准件立体仓储系统为研究对象, 构建相应的三维模型及数据模型, 开发数字孪生交互样机。通过激活三维模型与数据模型的实时关联性, 实现数字孪生交互样机与物理实体样机间有价值数据的交换, 并利用有价值数据驱动两者更新自身运行状态。

关键词: 航空工业; 立体仓储系统; 小尺寸航空标准件; 数字孪生; 三维模型; 数据模型; 数据交换

中图分类号: TP273; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0084-05

Design of a stereoscopic warehouse digital twins subsystem for aviation standard parts

LI Qi, WU Wenkai, DONG Shen, ZHAO Hantao

(Institute of Intelligent Manufacturing Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150090, China)

Abstract: The aviation industry is an important branch of the mechanical manufacturing industry. In order to further enhance the digital level of small-sized aviation standard parts storage and retrieval technology, this article takes the stereoscopic warehouse system for small-sized aviation standard parts as the research object, constructs relevant 3D model and data model based on the theory of digital twin, designs a digital twin subsystem. By activating the real-time correlation between 3D model and data model, valuable data exchange can be achieved between the digital twin subsystem and the physical entity subsystem, and valuable data can be used to drive both to refresh their operating status.

Keywords: aviation industry; stereoscopic warehouse system; small-sized aviation standard parts; digital twin; 3D model; data model; data exchange

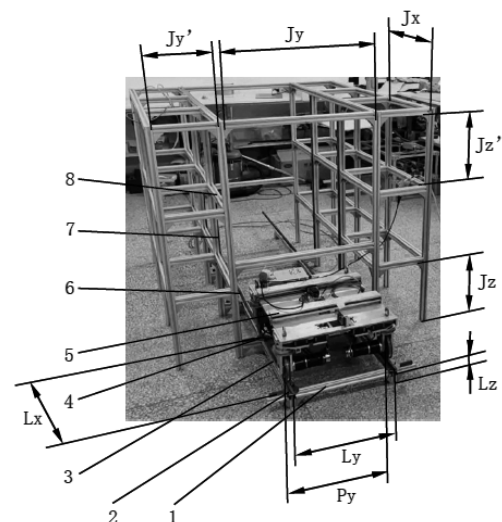
0 引言

航空工业是机械制造业的重要分支, 是我国以及我省重点发展的制造业领域之一, 战略意义极其重要^[1-3]。文献[4]针对航空工业加工零部件生产储运环节的工艺特点, 提出了一种适用于小尺寸航空标准件单独包装、单独标记、单独存放的立体仓储系统的设计方案, 其物理实体样机如图 1 所示, 可实现与生产企业现有小尺寸航空标准件加工制造环节的无缝衔接, 增强其物料管理水平和存储密度, 解放人力、提高效率。本文是文献[4]研究内容的延续, 为进一步提升其中提出的航空标准件立体仓储系统的数字化水平, 本文基于数字孪生理论构建相关核心三维模型及数据模型, 开发立体仓储系统的数字孪生交互样机。通过激活三维模型与数据模型的实时关联性, 实现数字孪生交互样机与物理实体样机间有价值数据的交换, 并利用有价值数据驱动两者更新自身运行状态。

1 立体仓储系统物理实体样机概述

本文涉及的航空标准件立体仓储系统物理实体样机

的结构组成如图 1 所示, 其尺寸参数与作业控制参数如表 1 所示, 当有且只有一辆物流轨道车工作时, 系统存取货箱的作业流程如图 2 所示。



1—固定导轨; 2—转向接轨 A; 3—过渡导轨; 4—转向接轨 B; 5—物流轨道车; 6—水平导轨; 7—立式导轨; 8—货架横梁

图 1 立体仓储系统物理实体样机及尺寸参数示意图

* 基金项目: 黑龙江省科学院重点研发计划项目 (ZDYF2024ZN05)

收稿日期: 2024-09-11

表1 立体仓储系统尺寸参数与作业控制参数汇总

部件	参数	参数性质	备注	
物流轨道车	θ_{xz}	控制	车轮角度	
	P_y	控制	纵向轮距	
	L	控制	托板伸缩量	
网格化轨道	L_x	尺寸	固定导轨中心间距	
	L_y	尺寸	过渡/水平导轨中心间距	
	L_z	尺寸	导轨轨道离地高度	
	S_0	控制	物流轨道车在网格化轨道上的初始位置	
	转向接轨 A	S_{za}	控制	目标转向接轨 A 的位置
	转向接轨 B	S_{zb}	控制	目标转向接轨 B 的位置
	过渡导轨	J_x	尺寸	立式导轨横向中心间距
组合式货架	固定导轨	J_y	尺寸	立式导轨纵向中心间距
	水平导轨	J_z	尺寸	货架横梁离地高度
	立式导轨	J_y'	尺寸	货架横梁外间距
	货架横梁	J_z'	尺寸	货架横梁层间高度
		H	控制	流轨道车在立式导轨上的攀爬/下降距离
	ΔH	控制	取放托盘高度补偿量	

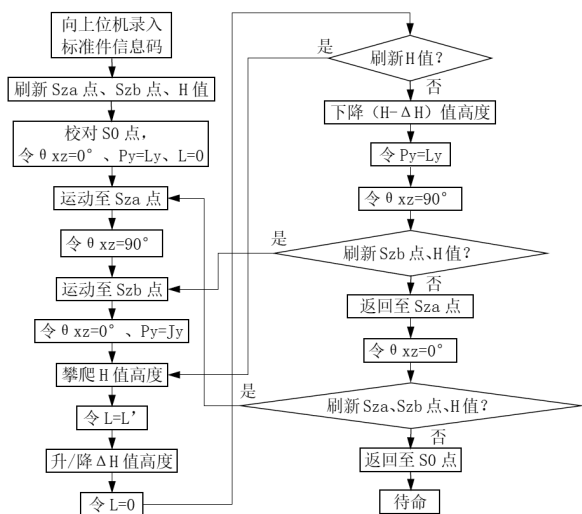


图2 立体仓储系统工作流程(单车版)

2 立体仓储系统数字孪生交互样机设计

数字孪生技术是促进数字经济^[5-7]发展、推动产业数字化、落实装备制造业数字化升级的关键技术。它以数字化的方式在数字世界中创造物理实体的虚拟模型,并由数据驱动模拟仿真物理实体在现实环境中的行为、状态,并通过数据分析、虚实交互等方式为物理实体拓展新的功能^[8]。本文设计的立体仓储系统数字孪生交互样机,用于对物理实体样机的储运作业流程进行模拟仿真,是物理实体样机在工控电脑中的三维镜像。通过建立物理实体样机的三维模型和数据模型并激活两者间的实时关联性,一方面可在三维虚拟应用场景中再现物理实体样机的实时动作,对货箱托盘的储存状态进行记录;另一方面还可通过操作三维虚拟应用场景的相关按钮,控制物理实体样机进行对应动作。

2.1 数字孪生交互样机功能框架

本文基于 MVC 模式设计构建数字孪生交互样机的框架,其具有的系统功能用例如图 3 所示,主要的参与者包括用户 User、用户控制器 UserController 以及物流轨道车

LogisticsRailCar。在本系统中,用户 User 可操作键盘鼠标与用户控制器 UserController 进行交互,观察系统的运行状态;用户控制器 UserController 负责实现与航空标准件立体仓储有关的各种功能,如确认存储或者提取货箱托盘的信息、刷新并发送物流轨道车 LogisticsRailCar 的物理实体驱动信号、调整用户 User 观察三维虚拟应用场景的视角、对货箱托盘的存储情况进行存档等;物流轨道车 LogisticsRailCar 负责接收用户控制器 UserController 传递的物理实体驱动信号并执行对应的动作,可将自身的运行状态反馈回系统,驱动相应的三维模型进行仿真运动。

根据图 3 所示的系统用例,结合表 1、图 2 中物理实体样机的控制参数和工作流程信息,可得到立体仓储系统数字孪生交互样机的总体类图如图 4 所示,主要包含实体类《entity》、边界类《boundary》、控制类《control》3 种类型。

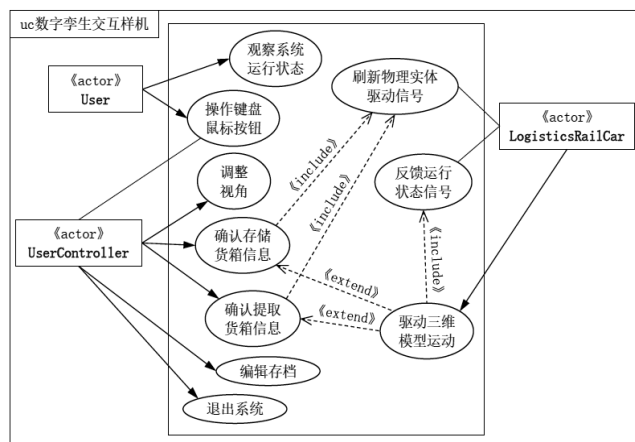


图3 基于 MVC 模式的数字孪生交互样机功能用例图

2.2 功能实现的途径

本文基于 C++/OpenGL 语言对数字孪生交互样机三维场景和三维模型的几何图形显示以及数据通讯接口进行构建。其几何图形显示方面的管线工作流程如图 5 所示,由 C++/OpenGL 编写的交互程序发送图形数据到顶点着色器,随着管线处理,最终生成在显示器上显示的像素点。

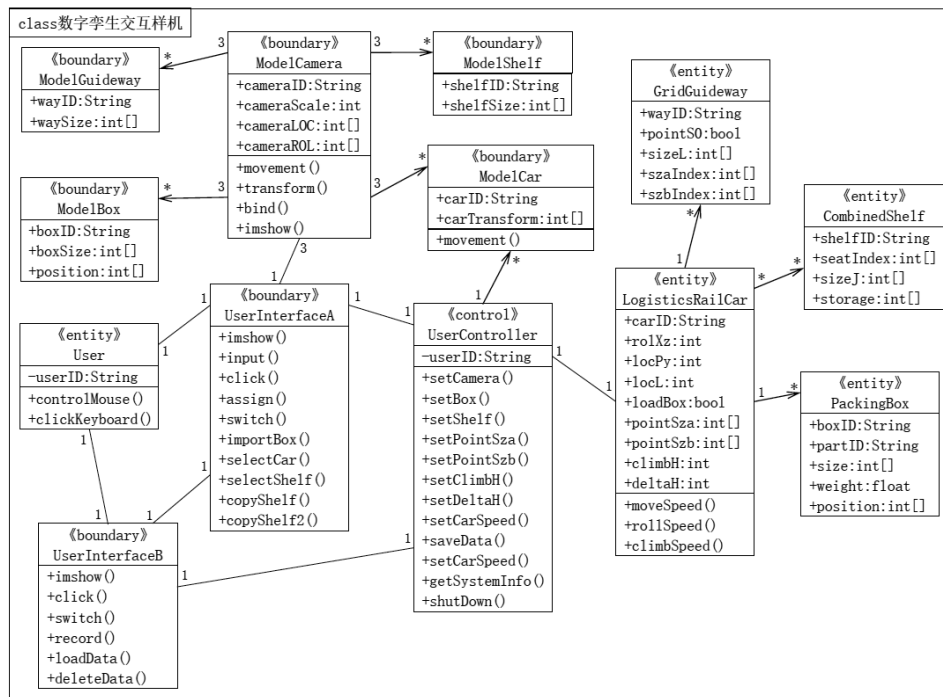


图 4 数字孪生交互样机的总体类图

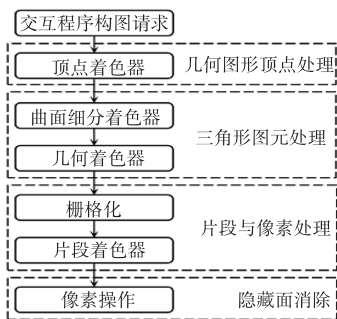


图 5 OpenGL 管线概览

2.3 三维模型的轻量化

工程版本的立体仓储系统物流轨道车 LogisticsRailCar 的三维装配图如图 6 所示,主要用于预览物理实体样机可能的实施方案,对其核心零部件进行应力分析、运动学与动力学分析、模态分析等机械性能分析,优化零部件的结构形式并确定最终实施方案,生成零件的加工图纸和整车的装配图纸。本文涉及的数字孪生交互样机,是在完成物理实体样机的加工、装配、调试之后,在运行、调度、管理等储运作业流程方面开展的数字化功能拓展,因此应对所使用的三维模型进行轻量化处理,保留与储运作业流程相关的结构尺寸,精简无关结构,以降低工控电脑的能耗开销。

根据前文所述,可知物流轨道车 LogisticsRailCar 的作业控制参数主要有纵向轮距 P_y 、车轮角度 θ_{xz} 、托板伸缩量 L ,三者与系统的储运作业流程息息相关,在轻量化处理的过程中需要保留相关的运动副属性及运动轨迹尺寸,但对具体的实现方式如电机、丝杠、蜗轮蜗杆、齿轮齿条、轴承、螺栓螺母等则可进行简化。孪生轨道车 ModelCar 用到的经过轻量化处理后的三维模型如图 7 所示,同理,孪生轨道

ModelGuideway、孪生货架 ModelShelf、孪生托盘 ModelBox 所用三维模型的外形尺寸 ModelGuideway. waySize、ModelShelf. shelfSize、ModelBox. boxSize 也应在简化连接和安装细节后予以保留。

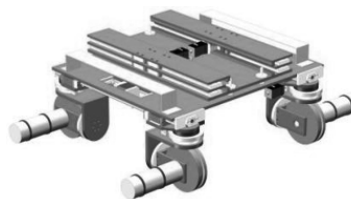


图 6 物流轨道车工程版三维模型



图 7 物流轨道车轻量化版三维模型

2.4 三维应用场景的搭建

利用轻量化版本的立体仓储系统三维模型建立的数字孪生三维虚拟应用场景如图 8~11 所示,其中,图 8 展示了主视角下的三维虚拟应用场景,图 9 展示了第三人称视角下孪生轨道车 ModelCar 提取孪生托盘 ModelBox 的场景,图 10 展示了俯视视角下的三维虚拟应用场景,图 11 展示了可视化窗口切换至“存/读档”界面时的情景。可视化窗口的视觉呈现由视角相机 ModelCamera 以及人机操作界面 UserInterface 协同完成。

图 8 中孪生轨道车 ModelCar 的当前所在位置 SOL

点,即为物理实体样机中物流轨道车 LogisticsRailCar 在网格化轨道 GridGuideway 上的初始位置 S0 点;而孪生轨道 ModelGuideway 和孪生货架 ModelShelf 的设置,则是在图 1 所示物理实体样机结构的基础上,进行了对称式阵列补充,使得可使用的孪生货架 ModelShelf 由 2 个扩展至 16 个,对应可储存的孪生托盘 ModelBox 由 18 个扩展至 144 个。人机操作界面拥有两种类型,分别为 UserInterfaceA、UserInterfaceB,其中 UserInterfaceA 包含的可视化组件有图 8~10 中窗口底部的两排单击式按钮及输入式文本框、顶部的显示式文本框及进度条、右上角的单击按钮;UserInterfaceB 包含的可视化组件有图 11 中窗口中部的一个显示式文本框和四个单击按钮。

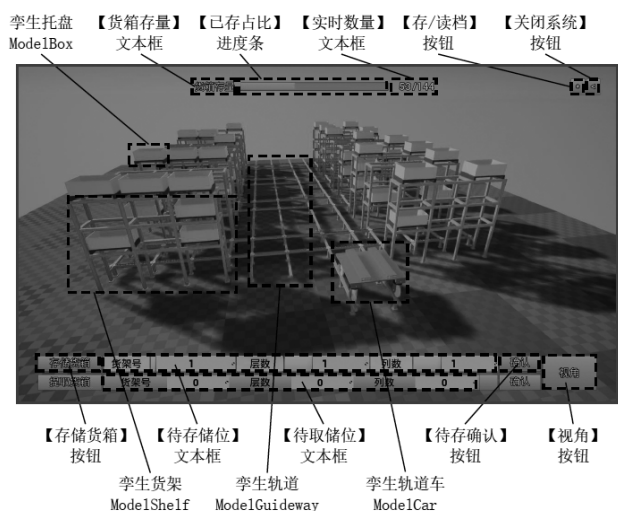


图 8 主视角下的单车版立体仓储系统
三维虚拟应用场景



图 9 孪生轨道车从“9-3-2”货位提取货箱
(第三人称视角)



图 10 取货后的孪生轨道车返回至 S0L 点(俯瞰视角)

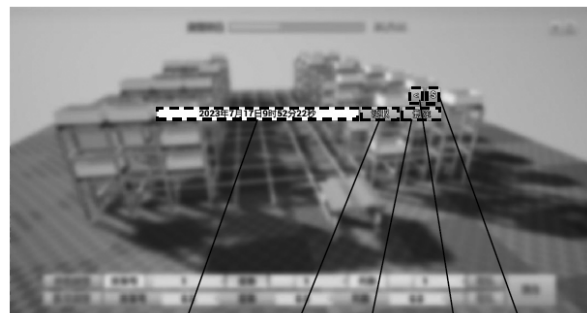


图 11 三维虚拟应用场景的“存/读档”界面

2.5 数据通讯流的设计

本文以图 3 所示系统功能用例图中的关键用例“驱动三维模型运动”为例,对所涉及数字孪生交互样机的通信数据流程进行说明,其对应的通信图如图 12 所示。在“驱动三维模型运动”用例中,参与交互作业的对象主要有用户 User 的实例(:User)、人机操作界面 UserInterfaceA 的实例(:UserInterfaceA)、用户控制器 UserController 的实例(:UserController)、物流轨道车 LogisticsRailCar 的实例(:LogisticsRailCar)、孪生轨道车 ModelCar 的实例(:ModelCar)、视角相机 ModelCamera 的实例(:ModelCamera),其主要步骤如下。

1) User 通过消息 1.1 实现与 UserInterfaceA 的交互,借助消息 1.2、1.3、1.4 向 UserController 输入 PackingBox、CombinedShelf 的相关信息。

2) UserController 将上述信息进行计算后,利用消息 1.5、1.6、1.7、1.8、1.9、1.10 向 LogisticsRailCar 发送物理实体驱动信号,两者之间利用文献[4]中提及的无线通信模块进行数据通信。

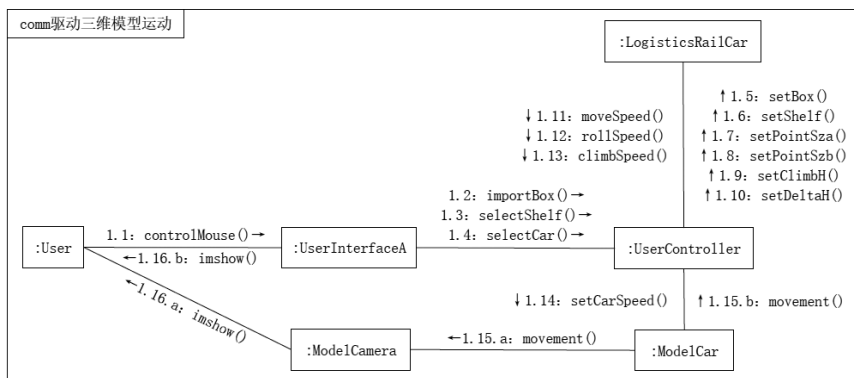


图 12 用例“驱动三维模型运动”通信图

(下转第 172 页)