

工具生成对应新的逻辑模型并运用于现实车间。

孪生终端作为数字孪生系统的可视化终端用以实时展示场景内各设备运行状态与机械臂运行状态。终端定以 200ms 为间隔时间读取状态文本文件，逐行加载文件中的状态指令，对指令进行解读，判断设备与机械臂相应状态是否变更，若变更，则按指令执行对应可视动画输出。

孪生终端作为数字孪生系统的可视化终端用以实时展示场景内各设备运行状态与机械臂运行状态。终端定以 200ms 为间隔时间读取状态文本文件，逐行加载文件中的状态指令，对指令进行解读，判断设备与机械臂相应状态是否变更，若变更，则按指令执行对应可视动画输出。

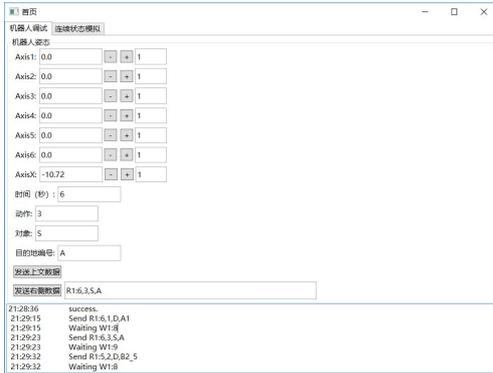


图 4：检测调试终端



图 5：数字孪生终端

3 系统关键技术

3.1 数字孪生技术

数字孪生，又被称为数字双胞胎 (Digital Twin)，是一种将现实环境的可数字化、可形态化、可测控化的信息完成在虚拟环境中的映射仿真技术。数字孪生通过逐渐发展的物联网通信技术、虚拟仿真技术，实现了由现实物理系统向赛博空间的数字化模型的实时数据反馈。

作为符合智慧城市发展需求的智慧车间，数字孪生技术被广泛运用其智慧车间生产以提高工业生产效率。本系统利用数字孪生技术通过对数字化生产车间的机器人运动、机器运行情况等参数进行捕捉，通过单信道通信进行机器运行状态信号的传输，传输至云平台服务器后，服务器对输入信号数据进行数字化处理并进行对应 Unity3D 引擎的数字翻译，最后虚拟仿真引擎利用其传输数据进行赛博空间中的可视化反馈输出。

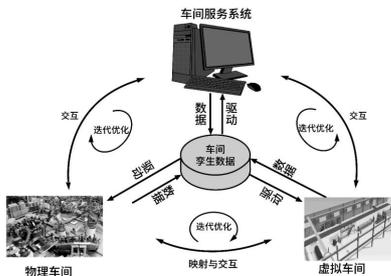


图 6：数字孪生系统结构

3.2 Unity3D 技术

Unity3D,是由 Unity Technologies 所开发的一款集成游戏动画制作、3D/VR/AR 开发、虚拟仿真系统结构搭等数字媒体类综合应用平台。因其简明的交互图形化开发环境与跨平台开发特性，平台被广泛运用于数字媒体类项目的研发。

系统利用 Unity3D 引擎作为数字孪生可视化终端的开发环境，利用引擎的内置通信接口对服务器传输数据进行接收。在已经完善的车间模型的基础上，通过对传输数据按对象进行分类后，对各个相应对象进行动态绑定，各个虚拟对象根据其绑定数据进行状态输出。

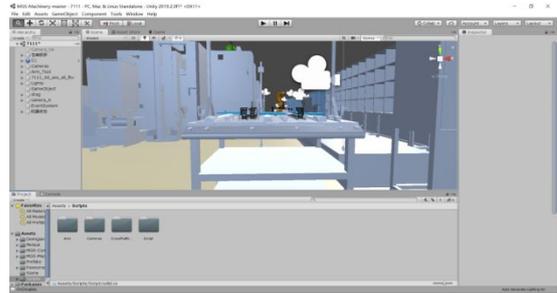


图 7：孪生终端 Unity3D 开发环境

3.3 机器运动仿真

机器人运动姿势仿真

作为智能车间的主要操作者，多自由度机械臂的虚拟仿真是智慧车间全景仿真的重要一环。在 Unity3D 的开发环境下，利用引擎自有的物理学运动系统，针对现实车间六自由度机械臂的运动特点，系统构建了一种基于父子对象层级的铰链与连杆（机械手臂）的结构。即每个铰链关节的转动都是基于联体坐标系进行的变换。其中，六个空对象作为实现球关节的效果，六个空对象成父子关系。每个空物体控制一个自由度的转动，每个空物体的转动都是相对于其父物体坐标系的。

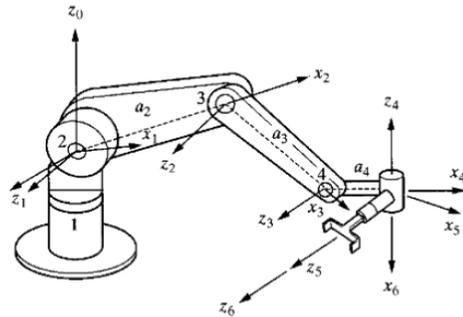


图 8：六自由度机械臂模型

利用基于 D-H 法（即在机器人的每个连杆上都固定一个坐标系，利用 4×4 的齐次变换矩阵来描述相邻两连杆的空间关系并约束每次转动后的位姿）的运动规律变化来表示机械手臂状态。

其中，对于单一的手臂运动，我们设 A_1 为机械手臂对于基础坐标系 B 的位置姿态， A_2 表示第二个连杆 H_2 对于第一个连杆 H_1 的位置姿态，则 H_2 对于 B 的坐标位置可表示为：

$$T_2 \quad 1 \quad 2$$

根据推得其六自由度的各手臂坐标位置即为：

$$T_n \quad 6 \quad n \quad n \quad 1$$

六自由度机械臂对旋转参数进行处理时，引擎将所接受数据存入（下转第 22 页）

(上接第 19 页)

储在临时参数库中,根据对对应对象的类别识别并利用引擎系统函数

$transform.localRotation = Quaternion.Euler(temp_{n,n}, 0, temp_{n,n})$

对该对象进行对应的控制角度可视化旋转。其中

$temp_{n,n}$ 表示各个空对象对应现实铰链传输角度控制。

机器人运动轨迹规划

状态适配层向孪生系统发送的信息包括机械手臂下一装配设备信息,机械臂需根据终端设备信息(DestinationCode,简称“DC”)进行自动寻路,并根据传输信息进行对应操作。为了使机械手臂在赛博空间进行运动时需规避运动过程中的差错碰撞,系统利用Unity引擎的Navigation组件进行场景烘焙,将设备等模型设置为场景障碍物。虚拟机械臂在接收DC数据后,执行系统函数

$transform.position = MoveToward(position_{current}, position_{c}, speed_{translate})$

机器人运动时间仿真

针对状态适配器进所传输的时间数据,系统采用协程的组件方式实现机械臂运动时间精准化的控制。协程(Coroutines),是一种比线程更轻量级的程序组件。由于协程最大的特点是不被操作系统内核所管理,而完全由程序所控制。在进行时间参数(Time)传输时能够规避由于系统CPU刷新帧率的微小变化而引起的误差。

$StartCoroutine(function_{Rotate})$

$StopCoroutine(function_{Rotate})$

差错分析优化

系统运行误差主要来自与浮点数精度误差引起的帧同步误差。由于孪生系统不断接收远端口的信息数据并进行对应的可视化反馈,操作运算频率极高。浮点数的精度误差会导致数字孪生终端运行出现巨大差异。帧同步最基本的问题在于帧同步算法的优化与浮点数的一致性的控制。

帧同步原理:

$np_{current} = Time_{current} - ispla_{current}$

为了使反馈结果不与硬件CPU运行速度相关联,孪生终端摒弃了Unity系统传统的历经时间参数Time,deltaTime作为差值阈值

进行动作计算,而利用固定的时间片段Section_{fixed}作为阈值,通过Unity协程函数进行实现。以此控制远端发送运行的时间间隔,恒定逻辑执行次数。

对于帧同步的框架中,消除浮点数误差的常用方法是浮定点数转换。信息科学计算中,通常利用浮点数与定点数表示数据错误!未找到引用源。。浮点类型数据范围大,但运算复杂,且不同平台不同CPU对浮点数的处理结果有可能是非一致的,因此不适合大量数据并行处理使用。孪生终端利用框架定点数库Fix64.cs对浮点数进行定点数转换,并将转换操作重现进行系统函数封装,进行替换,经过试可完整规避浮点数带来的运行帧不一致误差。

4 结论

本文通过对中国航天成都711分局现实车间的数字孪生仿真,利用物联网融合技术、机械臂仿真技术和与Unity3D平台进行对接,实现对应现实空间的实时仿真(孪生终端)。现实车间进程的虚拟可视化,能够极大地减轻车间监管工作量。孪生终端全模拟仿真整个车间项目的仿真过程,经过实际测试,基于Unity3D的数字孪生智慧车间能够做到低延时、基本无差错运行,达到预期效果。

5 参考文献

- [1]陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18. DOI:10.13196/j.cims.2018.01.001.
- [2]柳林燕,杜宏祥,汪惠芬,等.车间生产过程数字孪生系统构建及应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1536-1545. DOI:10.13196/j.cims.2019.06.021.
- [3]Chiara Cimino,Elisa Negri,Luca Fumagalli. Review of digital twin applications in manufacturing[J]. Computers in Industry,2019,113.
- [4]赵浩然,刘检华,熊辉,等.面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1432-1443. DOI:10.13196/j.cims.2019.06.011.
- [5]Jiangfeng Cheng,He Zhang,Fei Tao,Chia-Feng Juang. DT-II:Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2020,62.
- [6]董凤慧.计算机中定点数与浮点数表示范围大小的研究[J].中国西部科技,2011,10(22):38+48.