

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.07.005

微电机装配线实时仿真系统的研究*

王 钰¹, 陈炳发^{1*}, 丁力平¹, 周志光²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 江苏雷利电机股份有限公司, 江苏 常州 213011)

摘要:针对离散制造业生产过程复杂多变、生产数据管理困难等问题,将实时仿真技术应用到微电机装配线的现场监控中。对实时仿真系统的实时数据管理、机构运动进行了参数化建模,对数据驱动映射关系建立等方面进行了研究,提出了一种基于内存数据库技术和运动建模插件的实时仿真系统开发方法;设计了主从架构的数据库服务器端,对离散制造业的典型机构运动进行了参数化建模,并开发了映射定义插件。研究表明:该方法适用性广、开发效率高;所开发的实时仿真系统可有效地提高微电机装配线的现场管控水平。

关键词:实时仿真;Unity 3D;内存数据库;插件开发

中图分类号:TH166;TP277

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)07-0685-05

Real-time simulation system for micro-motor assembly line

WANG Yu¹, CHEN Bing-fa¹, DING Li-ping¹, ZHOU Zhi-guang²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu 210016, China; 2. Jiangsu Leili Motor Co., Ltd., Jiangsu 213011, China)

Abstract: Aiming at the problems of the complex and variable production process of discrete manufacturing and the difficulty of production data management, the real-time simulation technology was applied to the on-site monitoring of the micro-motor assembly line. The real-time data management, mechanism motion parametric modeling and data-driven mapping relationship establishment of real-time simulation system were studied. A development method of real-time simulation system based on in-memory database technology and motion modeling plug-in was proposed. The database server side of the master-slave architecture was designed. Parametric modeling was carried out for the typical mechanism movement of discrete manufacturing, and the mapping definition plug-in was developed. The results indicate that the method has wide applicability and high development efficiency, and the real-time simulation system can improve the level of on-site control of the micro-motor assembly line.

Key words: real-time simulation; Unity 3D; in-memory database; plug-in development

0 引 言

“中国制造 2025”提出了企业建设重点领域数字化车间的发展目标^[1]。数字化车间面向产品的生产制造过程,基于信息化和数字化仿真技术,在计算机的虚拟环境中,实现了物流流虚拟规划、工艺流程仿真验证和生产线实时监控^[2]。以生产制造执行系统

(MES)为代表的传统生产监控工具,在企业顶层的资源管理系统(ERP)和底层的过程控制系统(PCS)之间搭建了车间级的实时数据监控及反馈平台^[3]。然而,高水平的现场监控不仅要求获取和显示实时数据,对于数据的显示形式、突发事件反馈的时效性以及生产线运行实况的全方位展示也提出了更高的要求。以往的二维图表显示结合线上报警系统的数据反馈形式,

收稿日期:2018-12-14

基金项目:江苏省重点研发计划资助项目(BE2017062)

作者简介:王钰(1994-),女,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事数字化仿真系统及技术等方面的研究。E-mail:445145067@qq.com

通信联系人:陈炳发,男,教授,硕士生导师。E-mail:chen_bf@126.com

不能使生产管理者直观地获取车间的运行状态,也不利于生产线故障的快速响应。因此,数字化车间的构建需要设计一种可视化程度高、交互性强的车间监控系统,辅助生产管理者进行生产线监控、故障处理以及资源配置,提高车间的综合管理水平^[4]。

近年来,数据库技术不断更新,计算机渲染能力不断提高,给实时仿真技术的发展提供了坚实的技术基础。在工业领域,实时仿真的技术实现形式主要有3种:(1)利用底层图形库。CHAI J F^[5]基于 OpenGL 和开放式数据库连接搭建了生产线三维可视化监控系统,为车间管控提供了有效的支持;龚文^[6]在 VC++ 和 DirectX 开发环境下,实现了串口数据驱动的挖掘机实时仿真系统,为挖掘机的模拟操控和远程监控提供了良好的平台。(2)使用工业仿真软件。TANG X Y^[7]使用 Flexsim 对生产系统进行了建模和仿真,通过优化瓶颈工位的方法提高了产线的生产效率;CHUNG Y^[8]研究了基于进阶生产规划及排程(APS)原理,使用 eM-Plant 搭建了虚拟工厂,实现了订单响应时间的提升。(3)基于通用三维引擎进行开发。张涛^[9]利用 Unity 3D 建立了数字化车间模拟平台,获得了良好的运行效果;顾岩^[10]开发了基于 OPC UA 的服务端和基于 OSG 引擎的客户端,实现了机器人焊接工程的动态三维监控^[11]。总体来说,三者各有优劣:直接使用图形库,开发效率低,但系统的可定制化程度高;工业仿真软件具有成熟的功能模块,但是其平台依赖度高,限制了技术的应用场景;通用三维引擎在交互多样性、渲染效果、平台兼容性等方面均优于前两者,但相比于工业仿真软件,三维引擎缺少配套的组态软件^[12],也没有成熟的刚体运动定义模块。

为了实现企业的定制化开发需求,本文选用 Unity 3D 引擎作为技术的实现平台,结合内存数据库技术、刚体运动参数化建模技术和数据驱动技术,设计实时数据库服务器端和刚体运动映射定义插件;以微电机装配线作为实现对象,对研究结果进行验证。

1 实时仿真系统整体设计

1.1 整体架构设计

本文所涉及的微电机装配线由 11 个工位组成,包含齿轮装配、导线焊接、铭牌张贴、产品检测等工序。目前,该条装配线缺乏有效的实时生产动态监控工具,不能满足企业对自动装配线的管控需求。

因此,本研究设计了相应的功能模块。

综合考虑企业的数据安全、功能的实现效果以及

系统的易用程度,系统基于 C/S 架构进行开发,其整体架构如图 1 所示。

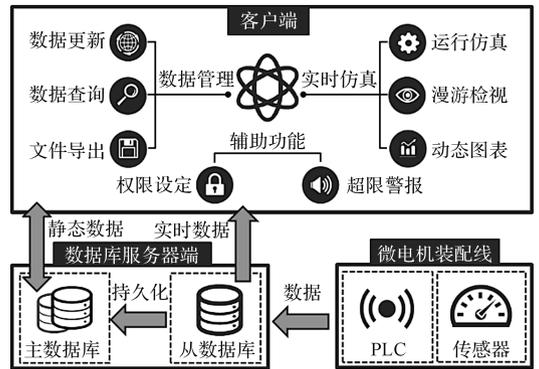


图 1 系统整体架构

图 1 中,客户端包含数据管理、实时仿真和辅助功能 3 个功能模块,作为系统功能的实现载体,用户通过客户端进行生产线运行实况观察、生产关键数据管理等操作;数据库服务器端负责数据的采集、通讯和存储,利用数据采集模块采集实时 PLC 数据和传感器数据,再对数据进行处理和传输,为系统提供实时仿真驱动数据和静态数据交互支持。

1.2 硬件布局设计

实时仿真系统的硬件布局由微电机装配线的工位排布和企业的内部通讯方式决定,其硬件布局如图 2 所示。

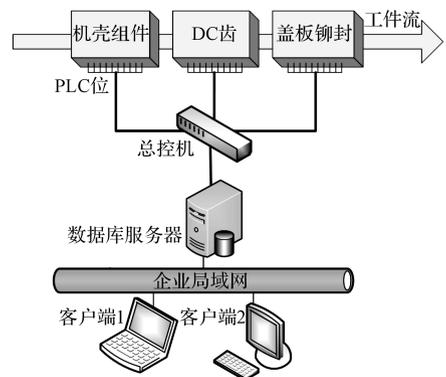


图 2 系统的硬件布局

微电机装配线采用单件流的设计思想,工位之间紧密相连,呈纵向分布;为了降低硬件布局的复杂程度,本研究在生产线设置总控机,数据库服务器端直接通过总控机采集各工位的 PLC 数据。客户端与数据库服务器端基于 TCP/IP 协议通过企业局域网完成实时通讯。

2 数据库服务器端设计

2.1 服务器端整体架构

数据库服务器端包含数据采集及处理模块、主数据库和从数据库 3 部分,其整体架构如图 3 所示。

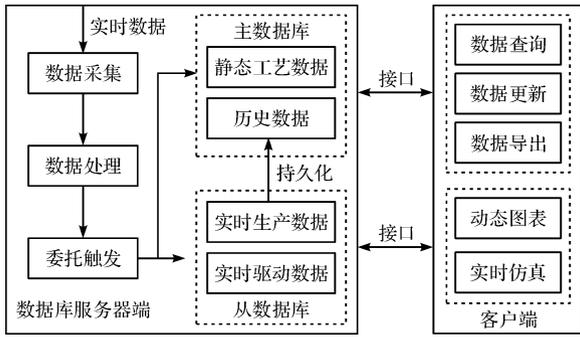


图3 数据库服务器端架构

数据采集模块将实时生产数据采集到服务器端进行数据处理,数据处理完毕后触发对应的委托。委托包含定时委托和不定时委托,定时委托以一定的频率向数据库更新实时生产数据,不定时委托负责记录微电机装配线的设备故障、不良品记录等不定时事件的信息。

数据库部分采用主从架构。从数据库以高吞吐量为设计原则,存储实时仿真模块的驱动数据和其他生产线实时数据,主数据库存储历史数据和静态数据(历史数据指持久化到主数据库的实时生产数据,静态数据则包含生产线工艺信息、用户权限等级等信息)。主数据库的设计重点是海量数据的查询优化问题。面向客户端的功能实现需求,服务器端提供了对应的应用接口,用于客户端请求的实时响应。

2.2 PLC 数据的采集及管理

实时仿真功能的实现,要求对生产线实时 PLC 数据进行采集、处理和读写^[13],传统的轮循查询造成平均查询等待时间过长,简单的多线程操作会使线程数过多,造成资源浪费,因此,需要对数据采集方法进行优化设计。此外,PLC 数据更新具有不稳定性,因此,针对已采集到的 PLC 数据要设计合理的数据管理方法。

PLC 数据采集基于 HSL 协议实现。首先根据配置文件创建 PLC 连接;然后基于 .NET4.0 提供的 Task 类创建数据采集任务序列,每个任务对应一个工位的 PLC 数据,利于线程池原理执行数据采集任务;之后将采集到的 PLC 数据放入数据缓冲区,数据缓冲区基于生产者消费者模式设计;最后遵循 FIFO 原则,对于缓冲区的数据进行解析处理。

2.3 主数据库批量查询优化

主数据库选用 MySQL,同时,需要针对 MySQL 批量查询进行优化。

本研究遵循数据表的高性能设计原则,减少表间约束,同时在正确存储数据的前提下选择尽可能小的数据类型,降低批量查询所需的 CPU 处理时间。在此

基础上,笔者设计了生产线静态数据查询优化方法。生产线静态数据的特点是记录的时间字段单调递增,且客户端的查询请求多会限定时间范围的批量查询,因此将历史数据的时间字段设定为 int 类型,并在该字段建立 B-Tree 索引。在进行批量查询时,使用 SQL 语言的 limit 关键字,避免进行全表扫描。结合 SQL 语句,通过索引设定优化方法,提升客户端批量数据查询的响应速度。

2.4 不定时事件监听机制

微电机装配线的实时数据流,不仅包括 PLC 点位数据、产品测试数据以及节拍时间等定时更新的数据,还包括设备故障数据、不良品数据等不定时更新的数据,因此需要设计合理的事件监听模式。

事件的监听广播基于 Redis 的订阅发布机制实现。客户端在初始化时指定订阅的频道,当服务器端向该频道发布消息时,所有订阅该频道的客户端收到消息广播;同时,客户端触发绑定的事件,进行动态图表更新、报警邮件发送等操作。此外,Redis 还支持以模式匹配的方式订阅频道,客户端以通配符的形式订阅频道,所有满足订阅格式的频道将会被同时订阅,便于客户端对同类频道的批量订阅。

不定时事件的监听与广播机制,在应用中已得到了生产管理人员的认可。

3 刚体运动映射插件开发

实时仿真功能的实现,除了需要获取实时驱动数据,还需要在实时数据与设备运动之间建立映射关系,因此,本文设计了刚体运动映射定义插件,实现了高效、参数化、易维护的运动映射定义。

3.1 刚体运动参数化建模

建立刚体运动映射需要对刚体运动和映射关系进行参数化描述。根据微电机装配线的工艺流程和设备运动特征,将刚体运动划分为 3 类:简单运动、运动序列和机器人运动,并对其进行分类描述。

描述刚体运动的参数包括:(1)运动主体。即做刚体运动的几何物体;(2)描述运动主体位姿的位置量和角度量,统称为位姿量;(3)时间量。描述运动触发延迟时间和运动耗时;(4)主体结构。通过描述复杂运动主体的父子结构关系,确立位姿继承关系;(5)触发量描述的是驱动信号的点位信息,从而确立了运动与驱动信号的映射关系;(6)运动描述量为运动映射添加标注,便于后续的修改和维护。

3.2 数据驱动算法

在完成刚体运动的参数化建模后,数据驱动算法需要根据实时数据还原刚体运动。

数据驱动算法如图 4 所示。

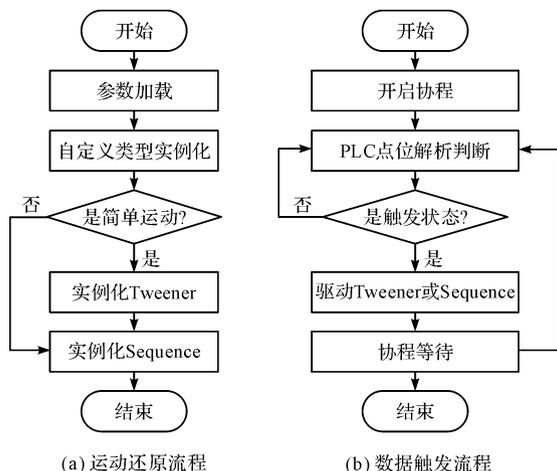


图 4 数据驱动算法

运动的还原是指由刚体参数化运动模型转化为 Unity 场景中的模型运动的过程。传统的模型运动控制采用直接修改模型的 Transform 属性值的方式,但是这种方式只适合简单运动的控制,针对复杂运动,需要编写额外的控制方法;且当被控制的模型过多时,存在管理困难的问题。因此,本研究利用 DoTween 插件完成模型的运动还原,将刚体运动实例化为 Tween 或 Sequence,再进行下一步的数据触发。

数据触发是指实时数据触发对应的刚体运动的过程。面对大批量的刚体运动实例,需要建立实时数据与刚体运动的映射关系。映射关系的建立选用字典结构,将所有的运动实例分类存储在数组中;同时为每个数组维护一个字典,以运动实例的触发 PLC 点位作为字典的 key 值,以运动实例的数组索引作为 key 值对应的元素值,从而实现映射关系的建立。

4 实时仿真系统的开发

实时仿真系统是由多个功能模块协同作用的整体,场景的渲染效果、交互界面的易用程度、其他辅助功能模块的实现效果,共同决定了系统的使用效果。系统的开发流程包括:模型的前处理、UI 系统的实现以及功能模块的实现。

4.1 工业三维模型前处理技术

由于 Unity 不支持绝大多数机械建模软件导出的模型格式,也缺少模型的简化与贴图功能,工业仿真系统开发之前,需要进行模型前处理。

首先,本研究将从机械建模软件以 STEP 的格式将模型导出,然后将模型导入 3ds Max 进行网格简化和纹理贴图处理,之后以 FBX 的格式从 3ds Max 导出模型,最后,FBX 模型导入 Unity 中,并对确立复杂运动模型的父子关系,即完成了模型的前处理过程。

4.2 基于 UGUI 的用户界面实现

UGUI 是基于 UI 框架的可视化组件,从 Unity4.6 版本开始被集成到 Unity 编辑器中。UGUI 使用 Canvas 作为控件集合的父物体和管理工具,Canvas 的 RenderMode 属性决定了子控件的渲染方式。此外,UGUI 会自动为场景添加 EventSystem 实例,用于处理系统输入、追踪射线投射以及发送事件。

基于 UGUI 开发的系统主界面如图 5 所示。

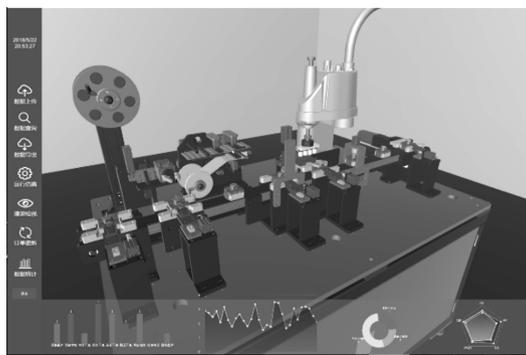


图 5 系统主界面

主界面包含功能区、实时仿真区和动态图表区。其中,功能区是基于 UGUI 组件开发的,主要包括数据导出、数据查询、漫游检视等功能的图形化按钮;实时仿真区显示微电机装配线的实时运行状态,用户可以切换观察角度,实现全方位检视;动态图表区以多种图表形式,动态显示微电机装配线的产能数据、节拍数据等关键生产数据。合理的功能分区和简明的界面设计保证了系统的易用性,也有效调动了企业用户的生产监控积极性。

4.3 动态图表功能

生产关键数据的动态图表显示是以图表的形式更加直观地反映生产关键数据的数值以及变化趋势,同时,用户可以通过点击图表查询到对应生产数据的详细信息,达成良好的交互体验。

动态图表功能使用 Graph and Chart 插件开发。该插件预设了柱状图、饼图、折线图等常用的图表,支持二维图表和三维图表,且每种图表均提供丰富的可配置属性和便捷的数据赋值接口。Graph and Chart 还支持图表元素交互,通过绑定数据查询方法和界面显示方法,可以实现细节数据的交互查询。

4.4 场景漫游及设备巡检功能

场景漫游功能允许用户自由地改变观察角度,实现全方位的生产实况观察,同时用户可以点击生产线上的设备,查询设备信息。企业用户通过对微电机装配线的漫游检视,快速建立起虚拟场景与现实场景之间的映射关系,达成虚实融合的应用效果。

场景漫游模块中,用户通过鼠标或键盘进行视角控制,系统获取了用户的输入值后,根据具体的输入方式,选择摄像机位姿的改变方式,实现视角的转换。同时,需要对摄像机进行局部坐标变换。视角旋转综合了局部坐标系和世界坐标系的转换,使视角控制方式更加灵活多样。

设备巡检功能基于 Unity 3D 的 Physics 组件和 Camera 组件开发,其实现原理如图 6 所示。

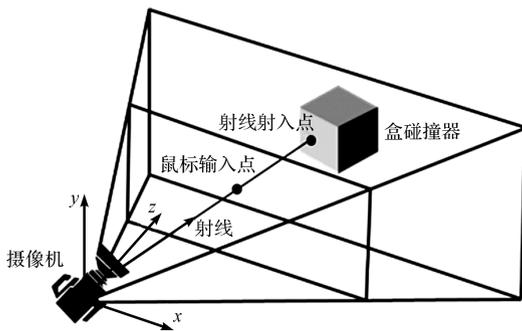


图6 设备巡检的实现原理

首先,本研究为被检视设备添加 RigidBody 组件和 Collider 组件;然后读取鼠标的输入点在世界坐标系下的坐标值,以摄像机坐标为起始点,构建一条经过鼠标输入点的射线;最后在 Update 方法中检测射线的返回值,当射线与 Collider 发生碰撞时,获取 Collider 所属的模型,并调用模型绑定的数据查询方法,在系统中显示设备信息,即实现了设备的巡检。

5 结束语

本文提出了一种基于内存数据库技术和运动映射参数化建模的工业实时仿真系统的开发方法;以微电机装配线为对象,开发了配套的实时仿真系统;现场测试结果表明:基于内存数据库技术和多任务采集技术的数据库服务器端能够满足工业实时仿真的驱动数据延时要求;实时仿真验证了使用所设计的插件进行交

互式刚体运动映射定义的可行性。

最终结合企业反馈表明,本研究所开发的系统具有仿真延时低、功能丰富、交互体验好的特点。

参考文献 (References):

- [1] 周 济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [2] 焦红硕, 鲁建厦. 智能工厂及其关键技术研究现状综述[J]. 机电工程, 2018, 35(12): 1249-1258.
- [3] FU Y, JIANG P. RFID based e-quality tracking in service-oriented manufacturing execution system[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2012, 25(5): 974-981.
- [4] 庄存波, 刘检华, 熊 辉, 等复杂产品装配现场动态实时可视化监控系统[J]. 计算机集成制造系统, 2017(6): 1264-1276.
- [5] CHAI J F, HU X M, QU H W, et al. Production line 3D visualization monitoring system design based on OpenGL[J]. **Advances in Manufacturing**, 2018, 6(1): 126-135.
- [6] 龚 文, 王庆丰, 冯 强. 基于 DirectX 的三维实时显示平台的实现[J]. 机床与液压, 2010, 38(15): 61-64.
- [7] TANG X Y, SHI J, CHEN L C, et al. Logistics Simulation and optimization design of one production line based on flexsim[J]. **Applied Mechanics & Materials**, 2013, 397-400: 2622-2625.
- [8] CHUNG Y, YU T L, WEN-C L, et al. Dynamic production control system for SME: implementation on plastic blow-moulding machine[J]. **International Journal of Manufacturing Research**, 2016, 11(3): 259-273.
- [9] 张 涛, 唐敦兵, 张泽群. 面向数字化车间的介入式三维实时监控系统[J]. 中国机械工程, 2018, 29(8): 990-999.
- [10] 顾 岩, 程免舫, 王 震. 基于 OPCUA 的 3D 实时监控系统设计及实现[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(11): 2767-2773.
- [11] 冉广鹏, 傅允淮. 基于 WinCl 和 ST-200PLC 的转轮除湿多点温湿度监测系统[J]. 轻工机械, 2017, 35(1): 57-60.
- [12] 张全贵, 李 鑫, 王 普. 基于 X3D 的三维用户界面组态引擎设计[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(6): 2472-2475.
- [13] 边娟娟. 基于 PLC 与 UCGS 的定量灌装控制系统设计与实现[J]. 包装与食品机械, 2018(3): 70-73.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

王 钰, 陈炳发, 丁力平, 等. 微电机装配线实时仿真系统的研究[J]. 机电工程, 2019, 36(7): 685-689.

WANG Yu, CHEN Bing-fa, DING Li-ping, et al. Real-time simulation system for micro-motor assembly line[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(7): 685-689.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>