

# 基于 Unity 的制造业自动化生产线数字孪生平台设计

林承志<sup>1</sup>, 黄 华<sup>2</sup>, 张仕祥<sup>2</sup>

(1. 福州职业技术学院 智能工程系, 福州 350108; 2. 同济大学 中德工程学院, 上海 201804)

**摘要:**为实现制造业自动化生产线的优化运营,设计了基于 Unity 的数字孪生平台。首先,利用 SolidWorks 软件进行三维建模,在 Unity 平台中按与物理生产线 1:1 的尺寸比例完成虚拟自动化生产线的搭建;其次,在 Unity 平台中建立工业机器人数学模型,利用 D-H 参数表,进行正、逆运动学求解,实现对工业机器人的运动控制;最后,基于 Snap7 协议实现西门子 PLC 与 Unity 平台的数据交互。结果表明,通过数字孪生平台,可以实现生产线全流程的可视化,从而能够更好地了解生产线的运行状态,及时发现问题和解决问题。

**关键词:**制造业;自动化生产线;Unity;数字孪生;PLC

**中图分类号:**TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2023)03-0038-06

**DOI:**10.16160/j.cnki.tsxyxb.2023.03.007

## Design of Digital Twin Platform for Automated Production Line Based on Unity

LIN Cheng-zhi<sup>1</sup>, HUANG Hua<sup>2</sup>, ZHANG Shi-xiang<sup>2</sup>

(1. Department of Intelligent Engineering, Fuzhou Polytechnic, Fuzhou 350108, China;  
2. CDHAW, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to optimize the operation of the automated production line in manufacturing industry, a digital twin platform based on Unity is designed. First, the SolidWorks software is used to complete 3D modeling, where the virtual automated production line is constructed on the Unity platform, 1:1 ratio with the physical production line. Then, the mathematical model of an industrial robot is established on the Unity platform. With its D-H parameter table, the forward and inverse kinematics are derived to realize the motion control of the robot. Finally, the data exchange between Siemens PLC and Unity platform is realized based on Snap7 protocol. The results show that the digital twin platform can visualize the whole process of the production line, which can help us better know its operation status, so as to find and solve the problems timely.

**Key Words:** manufacturing industry; automated production line; Unity; digital twins; PLC

## 0 引言

德国提出工业 4.0 后,我国发布了“中国制造 2025”,以支持工业领域新一代革命性技术

的研发与创新,推动制造业向智能化转型,并布局智能工厂,推进智能生产,加快第四次工业革命。在这样的背景下,制造业生产线加快了更

**作者简介:**林承志(1985—),男,福建福州人,讲师,硕士,研究方向为机器人仿真技术;

黄华(1992—),男,土家族,湖南永顺人,工程师,硕士,研究方向为工业数字化及智能化。

新换代的步伐,数字孪生技术对制造业生产线的智能化改造升级由此成为技术人员研究的热点<sup>[1-3]</sup>。数字孪生技术是融合了三维建模、仿真与优化、物联网与传感器、人工智能和虚拟现实等多种新兴技术在内的复合技术,其中,仿真技术作为创建和运行数字孪生的核心技术,是数字孪生实现数据交互与融合的基础。为了实现制造业自动化生产线的优化运营,构建合适的数字孪生平台是保证生产线正确设计及合理、高效使用的一种重要的技术手段<sup>[4]</sup>;以数字孪生技术对制造业生产线进行规划布局,可以使生产线系统快速迭代,也可以使企业根据市场需求及时调整生产计划,以应对当今激烈的市场竞争。

目前研究人员构建开发了多种形式的数字仿真或孪生平台,如任泽宇<sup>[5]</sup>利用西门子 PDPS 软件开发了一套立体仓储数字孪生系统,完成了工艺设计与虚拟调试;王曦鸣<sup>[6]</sup>利用 Robotstudio 软件搭建了巧克力装盒生产线仿真系统,实现了生产线的运动仿真和计算;张瑞成等<sup>[7]</sup>在 GENESIS64 组态软件中基于 Matlab 程序搭建了轧机主传动数字孪生系统,优化了轧机主传动系统的运行;许万荣等<sup>[8]</sup>基于 OpenGL 软件构建了消失模铸造生产线仿真系统;张晨麟<sup>[9]</sup>基于 Unity 软件搭建了智能制造车间数字孪生系统。

上述平台各有优缺点,其中,PDPS 软件仅侧重于工业逻辑控制;Robotstudio 软件是瑞士 ABB 公司开发的一款专门针对 ABB 工业机器人的仿真软件,无法兼容其他品牌的机器人;Matlab 软件具有强大的数据处理能力,但在图像显示方面存在不足;OpenGL 软件是一款开放的、兼容多种编程语言、跨平台的三维软件,但其程序结构复杂,开发工作量大、耗时长。而 Unity 是一个开源的开发平台,支持 C# 和 Javascript 编程语言,开发难度相对较小,且具有强大的人机交互功能。Unity 能够提供丰富的渲染效果,场景模型渲染后动画效果逼真生动,而且还支持 VR 增强效果。随着数字孪生技术的飞速发展,Unity 已应用于城市规划、旅

游、影视、工业等众多领域。

数字孪生技术为制造业实现数字化转型和智能化升级提供了一条重要途径,但是此技术在具体应用、模型构建以及数据连接等方面还不够成熟,在自动化生产线中的实践仍处于探索阶段<sup>[10-12]</sup>。因此,本文针对制造业一条自动化零件加工生产线,为优化运营,设计了基于 Unity 的数字孪生平台,即在 Unity 平台中搭建生产线,实现实物与模型的映射;利用 D-H 参数表对工业机器人进行数学分析,完成工业机器人的正、逆向运动学推导,并编写相应的脚本程序,以实现工业机器人的运动控制。

## 1 数字孪生平台总体框架

基于 Unity 的数字孪生平台总体框架如图 1 所示。制造业自动化生产线主要由工业机器人、生产线工控设备及工业控制核心设备 PLC 等组成,其中生产线工控设备包含数控机床、传送带、传感器、仓库架等。实现数字孪生,需要将物理生产线中的工业机器人及生产线工控设备映射到 Unity 平台上。首先利用 SolidWorks 软件对各个设备进行 3D 建模,再经过 3ds max 软件渲染处理,构建出各个设备的数字孪生模型,最后将数字孪生模型导入 Unity 平台,完成虚拟生产线的搭建。在 Unity 平台中先对工业机器人进行数学模型分析,再通过编写脚本程序实现对工业机器人的运动控制。通过西门子 PLC 完成物理生产线与 Unity 平台的数据交互,实现信号反馈与逻辑控制<sup>[13-14]</sup>。

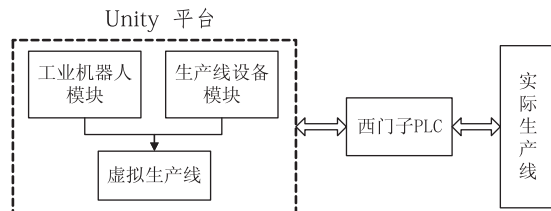


图1 基于 Unity 的数字孪生平台总体框架

## 2 系统设计

### 2.1 孪生模型建模

利用 SolidWorks 软件搭建的 3D 孪生模型与实物设备的尺寸比为 1:1,即完全按照实物尺寸绘制。在 SolidWorks 软件中基本单位是

mm, 而 Unity 中一个单位长度代表 1 m, 因此, 需要进行单位换算, 将整个模型等比例缩小 0.001 倍。

由于 SolidWorks 软件创建的数字孪生模型不能直接导入 Unity 平台中使用, 需要以 3ds max 软件作为中转站, 完成格式转换, 即将 SolidWorks 软件保存的 STEP 格式文件转换为 FBX 格式文件, 然后再导入 Unity 平台中, 转换过程如图 2 所示。

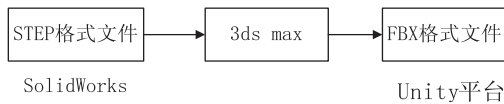


图 2 模型格式转换过程图

将生产线上的设备建立专用模型库, 以方便后期对设备模型进行高效管理, 实现对生产线的快速规划设计。在 Unity 平台的数字孪生模型中添加物理属性, 以表征实体设备各物理特征, 并设置数字孪生模型的刚体与碰撞检测器组件, 以判断孪生模型之间是否发生了碰撞。

## 2.2 工业机器人运动学分析

### 2.2.1 正向运动学分析

以库卡 KR6 R700 工业机器人为研究对象, 先对其进行正向运动学分析。在工业机器人的各连杆上建立坐标系<sup>[15-16]</sup>, 如图 3 所示。

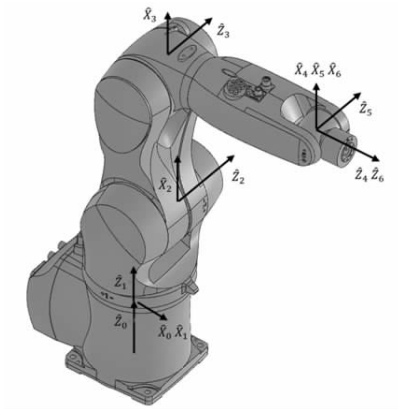


图 3 工业机器人连杆坐标系

用 D-H 参数表( $\alpha_{i-1}, a_{i-1}, d_i, \theta_i$ )来描述空间中工业机器人任意两关节轴的相对位置, 具体数据如表 1 所示。D-H 参数表中的参数说明如下: $\alpha_{i-1}$ 为从  $\hat{X}_{i-1}$  方向看  $\hat{Z}_{i-1}$  和  $\hat{Z}_i$  间的夹角; $a_{i-1}$ 为沿  $\hat{X}_{i-1}$  方向  $\hat{Z}_{i-1}$  和  $\hat{Z}_i$  间的距离( $a_i >$

0);  $d_i$  为沿  $\hat{Z}_i$  方向  $\hat{X}_{i-1}$  和  $\hat{X}_i$  间的距离; $\theta_i$  为从  $\hat{Z}_i$  方向看  $\hat{X}_{i-1}$  和  $\hat{X}_i$  间的夹角。

表 1 D-H 参数表

| $i$ | $\alpha_{i-1}/^\circ$ | $a_{i-1}/\text{mm}$ | $d_i/\text{mm}$ | $\theta_i$ |
|-----|-----------------------|---------------------|-----------------|------------|
| 1   | 0                     | 0                   | 0               | $\theta_1$ |
| 2   | -90                   | 25                  | 0               | $\theta_2$ |
| 3   | 0                     | 315                 | 0               | $\theta_3$ |
| 4   | -90                   | 35                  | 365             | $\theta_4$ |
| 5   | 90                    | 0                   | 0               | $\theta_5$ |
| 6   | -90                   | 0                   | 0               | $\theta_6$ |

将各参数代入标准齐次矩阵:

$${}_{i-1}^i T =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & a_{i-1} \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & a_{i-1} \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \circ \quad (1)$$

对式(1)进行连续变换, 得:

$${}_{WF}^{TF} T = {}_{WF}^0 T \cdot {}_0^1 T \cdot {}_1^2 T \cdot {}_2^3 T \cdot {}_3^4 T \cdot {}_4^5 T \cdot {}_5^6 T \cdot {}_6^TF T \circ \quad (2)$$

式中,  ${}_{WF}^{TF} T$ ,  ${}_{WF}^0 T$  分别是机械臂末端执行器、机械臂初级轴系的相对世界坐标;  ${}_{WF}^{TF} T$  是机械臂末端执行器相对机械臂末级轴系的 X-Y-Z 固定旋转角的齐次矩阵;  ${}_5^6 T$  是机械臂末级轴相对第 5 轴的 X-Y-Z 固定旋转角的齐次矩阵, 其他依此类推。

$$T(\gamma, \beta, \alpha, x, y, z) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma - \sin\alpha \cos\gamma & \cos\alpha \sin\beta \cos\gamma + \sin\alpha \sin\gamma & x \\ \sin\alpha \cos\beta & \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma + \cos\alpha \cos\gamma & \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - \cos\alpha \sin\gamma & y \\ -\sin\beta & \cos\beta \sin\gamma & \cos\beta \cos\gamma & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \circ \quad (3)$$

对  ${}_{WF}^{TF} T$  进行 X-Y-Z 固定旋转角的齐次矩阵的反算, 可得到机械臂末端执行器的六维坐标, 直接提取位置坐标, 剩余 X-Y-Z 固定旋转阵记作:

$$R(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \circ \quad (4)$$

若  $\beta \neq 90^\circ$ , 则:

$$\beta = \text{Atan2}(-R_{31}, \sqrt{R_{11}^2 + R_{21}^2}),$$

$-90^\circ < \beta < 90^\circ$ ;

$$\alpha = \text{Atan2}\left(\frac{R_{21}}{\cos\beta}, \frac{R_{11}}{\cos\beta}\right);$$

$$\gamma = \text{Atan2}\left(\frac{R_{32}}{\cos\beta}, \frac{R_{33}}{\cos\beta}\right)。$$

若  $\beta = 90^\circ$ , 则:

$$\beta = 90^\circ;$$

$$\alpha = 0^\circ;$$

$$\gamma = \text{Atan2}(R_{12}, R_{22})。$$

若  $\beta = -90^\circ$ , 则:

$$\beta = -90^\circ;$$

$$\alpha = 0^\circ;$$

$$\gamma = -\text{Atan2}(R_{12}, R_{22})。$$

以上完成了正向运动学求解分析, 通过给定工业机器人关节变量的数值就能确定机械臂末端执行器的位置和姿态。

### 2.2.2 逆向运动学分析

将机械臂驱动轴变换的齐次矩阵分解为前三轴和后三轴两部分:

$$\begin{aligned} {}^6_0\mathbf{T} &= {}^0_{WF}\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^{TF}_{WF}\mathbf{T} \cdot {}^{TF}_6\mathbf{T}^{-1} = {}^1_0\mathbf{T} \cdot {}^2_1\mathbf{T} \cdot {}^3_2\mathbf{T} \cdot \\ &{}^4_3\mathbf{T} \cdot {}^5_4\mathbf{T} \cdot {}^6_5\mathbf{T} = {}^3_0\mathbf{T} \cdot {}^6_3\mathbf{T}。 \end{aligned} \quad (5)$$

${}^6_0\mathbf{T}$  中的位置参数记作  ${}^6_0X, {}^6_0Y, {}^6_0Z$ , 即为图 3 中轴 4, 轴 5, 轴 6 坐标中心的数值。由于  $\theta_4 - \theta_6$  仅对轴 4, 轴 5, 轴 6 的空间角度有影响, 并不影响后三轴旋转轴线相交点的空间位置, 因此, 其由  $\theta_1 - \theta_3$  及机械臂的固定参数即可确定。 $\hat{X}_1 - \hat{X}_3$  所在平面的空间角度  $\theta_1$  不受  $\theta_2, \theta_3$  的影响, 且由  ${}^6_0Y, {}^6_0X$  确定。

$$\theta_1 = \text{Atan2}({}^6_0Y, {}^6_0X)。$$

在  $\hat{X}_1 - \hat{X}_3$  所在平面解算  $\theta_2, \theta_3$ :

$$\begin{cases} \sqrt{{}^6_0Y^2 + {}^6_0X^2} = a_1 + a_2 \sin\theta_2 + a_3 \sin\theta_3 + d_4 \cos\theta_3 \\ {}^6_0Z = a_2 \cos\theta_2 + a_3 \cos\theta_3 + d_4 \sin\theta_3 \end{cases}。 \quad (6)$$

由此求得  $\theta_2, \theta_3$ 。经过简单的三角变换可求得前三轴的角度  $\theta_1 - \theta_3$ , 将它们带入标准齐次矩阵, 得到  ${}^1_0\mathbf{T}, {}^2_1\mathbf{T}, {}^3_2\mathbf{T}$ , 并得:

$${}^6_3\mathbf{T} = {}^3_0\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_{WF}\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^{TF}_{WF}\mathbf{T} \cdot {}^{TF}_6\mathbf{T}^{-1}。 \quad (7)$$

后三轴的角度解算可以看作是  $Z-Y-Z$  欧拉角旋转阵的反解。因位置坐标无用, 剩余固定旋转阵记作:

$$\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}。 \quad (8)$$

若  $\beta \neq 0^\circ$ , 则:

$$\beta = \text{Atan2}(\sqrt{R_{31}^2 + R_{32}^2}, R_{33});$$

$$\alpha = \text{Atan2}\left(\frac{R_{23}}{\sin\beta}, \frac{R_{13}}{\sin\beta}\right);$$

$$\gamma = \text{Atan2}\left(\frac{R_{32}}{\sin\beta}, -\frac{R_{31}}{\sin\beta}\right)。$$

若  $\beta = 0^\circ$ , 则:

$$\beta = 0^\circ;$$

$$\alpha = 0^\circ;$$

$$\gamma = \text{Atan2}(-R_{12}, R_{11})。$$

若  $\beta = 180^\circ$ , 则:

$$\beta = 180^\circ;$$

$$\alpha = 0^\circ;$$

$$\gamma = \text{Atan2}(R_{12}, -R_{11})。$$

即可得到  $\theta_4 - \theta_6$ 。

以上完成了逆向运动学求解分析, 根据给定的机械臂末端执行器的位置和姿态即可反推出工业机器人关节变量的数值。

### 2.2.3 运动控制

利用前文推导出的工业机器人正、逆向运动学公式, 在 Unity 平台中编写相应的脚本程序即可实现工业机器人的仿真运动。工业机器人关节运动控制界面如图 4 所示, 控制界面中 A1—A6 边上的按键“+”或“-”可分别调节工业机器人六个关节轴转动  $+1^\circ$  或  $-1^\circ$ 。工业机器人的六个关节轴可以单独调节转动, 完成关节运动, 比如, 控制系统将工业机器人各关节调整到合适的位置和姿态, 使其机械臂末端执行器到达某一世界坐标点; 同时, 控制系统也可以根据给定的世界坐标, 将机械臂末端执行器自动调节运行到相应的位置和姿态, 完成逆向运动控制。

为了实现工业机器人机械臂六个关节的联动, 在 Unity 平台中将六个关节设置为基于组件的父子属性, 使六个关节构成父子关系, 当轴 1 父节点运动时, 轴 2 子节点会跟随轴 1 父节点运动, 并依此类推。



图 4 工业机器人关节运动控制界面

### 2.3 虚实数据交互

数字孪生技术重视物理世界和虚拟世界的连接,为了实现物理世界和虚拟世界的相互映射,本文利用西门子 PLC 作为桥梁,通过自动化生产线上的传感器,获取生产线设备上的信号,实现物理实体层设备数据的采集与传输,从而完成物理世界与虚拟世界的数据交互。

基于 Visual Studio 平台,采用 C# 调用 S7.Net 动态库的方式,实现西门子 PLC 与 Unity 平台的数据通信。数据交互程序时序流程如图 5 所示。

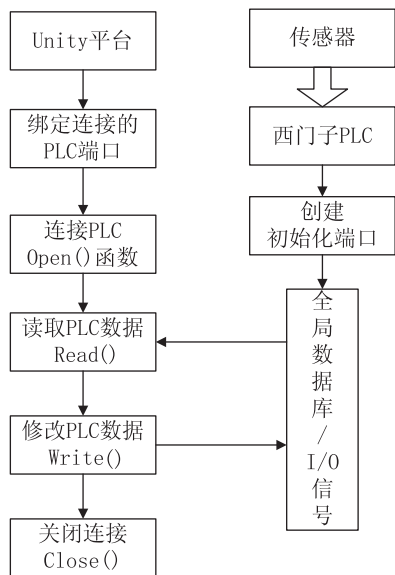


图 5 数据交互程序时序流程图

由图 5 可知,Unity 平台在通信中起主导作用,首先绑定 PLC 的 IP 地址和端口号,然后通过 Open 函数连接 PLC,等待 PLC 端返回连接请求,当返回连接正常标志位 IsConnected 置位,表示连接成功,此时 Unity 平台通过 Read 函数、Write 函数与 PLC 建立连接,用以

传输数据信息,实现物理生产线与数字孪生模型的数据交互。

通信协议为 Snap7 协议。Snap7 协议常用于工业控制设备之间的内部通信,具有兼容性好、实时性高、可拓展性强的特点,能够完全兼容当下主流西门子控制器和现有的现场总线技术,有利于制造业生产线的后期规划调整。

### 3 数字孪生平台调试

本文设计的数字孪生平台能够完全模拟物理自动化生产线的运行,完成整个流程的生产制造加工的仿真,所以可作为虚拟仿真平台独立运行。自动化生产线的总体布局如图 6 所示,其中,传送带负责传送待加工工件,两台数控机床分别对工件进行加工,两台库卡工业机器人分别安装在导轨上,机器人 1 的功能是从仓库架上抓取工件放置到工件盒中,机器人 2 的功能是从工件盒中抓取待加工工件分别送到两台数控机床上,待两台数控机床完成工件加工后,再将工件夹持至传送带上的工件盒中。

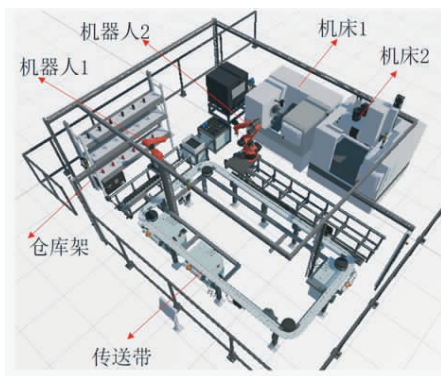


图 6 自动化生产线总体布局图

自动化生产线加工流程如图 7 所示。由图 7 可知,程序开始时控制系统先完成初始化,检测各设备是否处于原点状态,如果处于原点状态,传送带开始输送工件盒至抓取位置并进入等待状态;当传感器检测到工件盒到达抓取位置后,机器人 1 从仓库架上抓取工件放置到工件盒中,传送带开始输送工件盒至加工位置,然后进入等待状态;当传感器检测到工件盒到达加工位置后,机器人 2 从工件盒中抓取工件放置到数控机床 1 上进行加工,待数控机床 1 加



工完成后将已加工工件取下, 再将待加工工件放入, 数控机床 1 继续加工; 机器人 2 将从数控机床 1 中抓取的工件放置到数控机床 2 上再进行加工, 待数控机床 2 加工完成后将已加工工件取下, 再将待加工工件放入, 数控机床 2 继续加工; 机器人 2 将已二次加工的工件放入工件盒中, 传送带进行工件盒输送, 完成一个加工流程。

在基于 Unity 平台的虚拟系统调试过程中, 确定了虚拟平台与工业机器人输入、输出的握手信号, 如表 2 和表 3 所示。Unity 平台接入 PLC 设备, 读取 PLC 中的 I/O 变量信号, 替换虚拟调试的仿真信号, 完成生产线的整体调试。通过调试 PLC 输入、输出的不同信号, 观察物理世界与虚拟世界中工业机器人以及其他工业设备的工作状态, 确定虚拟生产线与工业机器人是否实现了同步运行, 以验证数字孪生平台的可靠性。

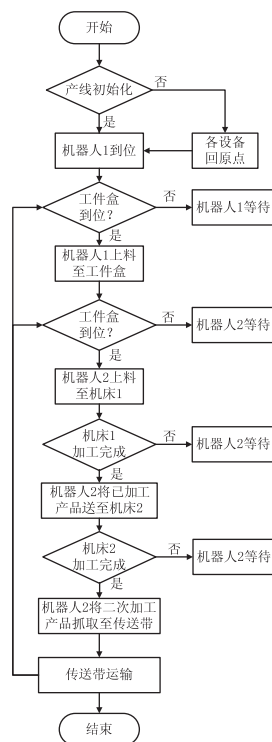


图 7 生产线加工流程图

表 2 PLC 与机器人 1(RB1)的握手信号

| PLC 输出 | RB1 输入 | 注释              | PLC 输入 | RB1 输出 | 注释       |
|--------|--------|-----------------|--------|--------|----------|
| Q0.0   | IN1    | 工具箱到位置 1        | I0.0   | OU1    | 从仓库架取走工件 |
| Q0.1   | IN2    | 有工件可抓取          | I0.1   | OU2    | 回原点      |
| Q0.2   | IN3    | 允许抓取到位置 1 的工件盒中 |        |        |          |

表 3 PLC 与机器人 2(RB2)的握手信号

| PLC 输出 | RB2 输入 | 注释              | PLC 输入 | RB2 输出 | 注释           |
|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------------|
| Q0.3   | IN4    | 工件盒到位置 2        | I0.2   | OU3    | 从工件盒取走工件     |
| Q0.4   | IN5    | 允许抓取到位置 2 的工件盒中 | I0.3   | OU4    | 请求进入机床 1     |
| Q0.5   | IN6    | 允许上料到机床 1       | I0.4   | OU5    | 进入机床 1 中禁止关门 |
| Q0.6   | IN7    | 要求搬出机床 1        | I0.5   | OU6    | 从机床 1 取料中    |
| Q0.7   | IN8    | 允许上料到机床 2       | I0.6   | OU7    | 已退出机床 1 启动加工 |
| Q1.0   | IN9    | 要求搬出机床 2        | I0.7   | OU8    | 请求进入机床 2     |
| Q1.1   | IN10   | 将工件放置到工件盒中      | I1.0   | OU9    | 进入机床 2 中禁止关门 |
|        |        |                 | I1.1   | OU10   | 从机床 2 取料中    |
|        |        |                 | I1.2   | OU11   | 已退出机床 2 启动加工 |

## 4 结语

本文基于 Unity 开发了制造业自动化生产线数字孪生平台, 对生产线设备进行了孪生建模, 建立了设备专业模型库, 完成了虚拟生产线的搭建。基于 Snap7 通信协议实现了西门子 PLC 与 Unity 平台的数据通信, 并完成了物理世界的工业机器人、数控机床、传送带等设备与

虚拟世界的数字孪生模型间的数据交互。此外, 本文针对工业机器人进行了正、逆运动学推导, 实现了虚拟仿真运动控制。

通过搭建数字孪生平台, 模拟了生产中制造加工的流程, 实现了生产线全流程的可视化, 从而能够更好地了解生产线的运行状态, 及时发现和解决实际运行中出现的问题。(下转第 84 页)

- [30] ANG J S, COLE R A, LIN J W. Agency costs and ownership structure[J]. The Journal of finance(New York), 2000(1): 81 - 106.
- [31] 辛清泉, 孔东民, 郝颖. 公司透明度与股价波动性[J]. 金融研究, 2014(10): 193 - 206.
- [32] DIMAGGIO P. The new institutionalisms: avenues of collaboration[J]. Journal of Institutional & Theoretical Economics, 1998, 154(4): 696 - 705.
- [33] 孔东民, 刘莎莎, 王亚男. 市场竞争、产权与政府补贴[J]. 经济研究, 2013, 48(2): 55 - 67.
- [34] 车德欣, 戴美媛, 吴非. 企业数字化转型对融资成本的影响与机制研究[J]. 金融监管研究, 2021(12): 56 - 74.

(责任编辑:李秀荣)

(上接第 43 页)

## 参考文献:

- [1] 张霖, 陆涵. 从建模仿真看数字孪生[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(5): 995 - 1007.
- [2] 田凌, 刘果, 刘思超. 数字孪生与生产线仿真技术研究[J]. 图学学报, 2021, 42(3): 349 - 358.
- [3] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1 - 15.
- [4] 施佳宏, 朱铭浩, 岳士超, 等. 面向生产线仿真的数字孪生逻辑模型构建方法[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(2): 442 - 454.
- [5] 任泽宇. 基于西门子 PDPS 的立体仓储数字孪生系统的设计与开发[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(8): 129 - 130.
- [6] 王曦鸣. 基于 Robotstudio 的巧克力装盒生产线仿真[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(5): 55 - 59.
- [7] 张瑞成, 李晨. 基于数字孪生技术的轧机主传动系统虚拟仿真研究[J]. 现代电子技术, 2021, 44(17): 157 - 161.
- [8] 许万荣, 樊自田, 周樵. 基于 OpenGL 的消失模铸造生产线设计的三维实现[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(1): 17 - 18.
- [9] 张晨麟. 基于 Unity 的数字孪生车间系统的设计与开发[D]. 上海: 同济大学, 2019.
- [10] 冯昊天, 王红军, 常城, 等. 基于数字孪生的柔性生产线状态感知[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(2): 17 - 23.
- [11] 王峻峰, 张玉帆, 邵瑶琪, 等. 面向生产性能数字孪生的仿真数据映射研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(10): 2470 - 2477.
- [12] 史秋雨. 工业机器人应用系统虚拟仿真技术的研究[D]. 上海: 上海第二工业大学, 2020.
- [13] WANG H J, WANG Z F. Research on PLC simulation teaching platform based on Unity[C]//2020 International Conference on Intelligent Design(ICID). Xi'an: IEEE Computer Society, 2020: 15 - 18.
- [14] 叶炯, 徐晓光, 郝旭耀, 等. 基于 Unity 3D 的 PLC 立体仓储仿真系统研究[J]. 井冈山大学学报, 2022, 43(3): 54 - 60.
- [15] 蔡自兴. 机器人学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2009: 66 - 72.
- [16] 宁青杰, 施立品, 唐兵, 等. 6DOF 焊接机器人运动学分析及仿真[J]. 机械设计与制造, 2022, 374(4): 246 - 251.

(责任编辑:李秀荣)