

基于数字孪生的移动机器人虚实交互系统

姜善英,解乃军,殷冬年,夏磊

(南京工程学院,江苏南京 211167)

摘要:针对当前数字孪生移动机器人虚实交互系统研究较少,数据传输缺乏安全保障等问题,设计了基于数字孪生的移动机器人虚实交互系统。首先对孪生模型进行了构建、优化与迁移;其次设计了物理实体与孪生虚体的数据交互方案,在数据传输过程中,采用 SHA-256 哈希加密算法保证数据传输的可靠性,为了提高数据的传输效率,使用 Deflate 压缩算法对消息数据轻量化,最终实现数据实时交互功能;最后以移动机器人为对象开发了虚实交互系统,验证了该系统的可行性。

关键词:数字孪生;移动机器人;虚实交互;SHA-256 哈希算法

中图分类号:TP227

文章编号:1000-0682(2025)02-0069-07

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.02.013

Virtual-physical interaction system for mobile robots based on digital twins

JIANG Shanying, XIE Naijun, YIN Dongnian, XIA Lei

(Nanjing Institute of Technology, Jiangsu Nanjing 211167, China)

Abstract: Research on virtual-physical interaction systems for mobile robots based on digital twins is currently limited, with issues such as insecure data transmission. To address this, a virtual-physical interaction system for mobile robots based on digital twins is designed. Firstly, digital twin models are constructed, optimized, and migrated. Secondly, a data exchange scheme between physical entities and digital twin counterparts is devised. During data transmission, the SHA-256 hash encryption algorithm is employed to ensure reliability. To enhance data transmission efficiency, the Deflate compression algorithm is utilized for lightweight messaging. Ultimately, real-time interactive functionality is achieved. Finally, a virtual-physical interaction system is developed targeting mobile robots, validating the feasibility of the system.

Keywords: digital twins; mobile robots; virtual-physical interaction; SHA-256 hash algorithm

0 引言

随着新一代信息技术的发展,机器人智能化技术不断提高,移动机器人被广泛应用于智能工厂、抢险救灾、煤矿开采等各个领域^[1],并逐渐成为一种代替人工执行任务的先进技术。虽然移动机器人智能化技术取得了很大的进步,但是对移动机器人设备远程监控与交互技术的研究却很少,数字孪生技术的出现为移动机器人远程监控与交互研究提供了新方案。

数字孪生技术最早由美国 Michael Grieve 教授首次提出^[2],自此各个国家都开始研究这项前沿技

术,2019 年北航陶飞教授首次提出数字孪生五维模型^[3],为我国数字孪生开发提供了方向。近年来,随着数字孪生及其依托的技术不断提高,如何将数字孪生技术应用在机器人领域引起了国内外学者的广泛关注。牛进鑫^[4]等通过引入基于数字孪生的建模方法提高孪生模型的逼真度,并实现模型的虚实同步映射,最终完成数字孪生机器人的虚实同步映射系统。Liu 等^[5]提出了一种远程监控系统,旨在实现对机械臂的运行轨迹的监测,将工人从危险的工作环境中解放出来。Zong 等^[6]提出了一种针对多机器人的监控系统,通过 MQTT 传输协议获取数据,模拟机器人在物理环境中的运动轨迹与碰撞检测。刘怡沛等^[7]针对空间狭小且环境恶劣的区域环境的监测设计了移动环境监测机器人系统,该系统采用蓝牙实现与远程监测平台的交互,虽然实

收稿日期:2024-07-30

第一作者:姜善英(1997—),男,江苏徐州人,硕士在读,研究方向为数字孪生和智能制造技术。

现了无线通信,但只能在一定的区域范围实现交互。文国军等^[8]为了实现工业机器人的虚实交互,开发了工业机器人虚实联动系统,通过 Unity3D 中搭建虚拟场景,使用 TCP/IP 协议的 SOCKET 通信方式,最终实现了工业机器人的虚实交互。

综上所述,经过数十年的发展,数字孪生与机器人融合技术已经取得了很大的发展,如:可以实现机器人的虚实同步映射;通过在虚拟环境中模拟物理实体的碰撞检测;工业机器人的虚实交互等。但是仍存在问题,如:更多的研究是基于以虚映实,对以虚控实的研究较少;研究者只关注到虚实两端的数据映射,并没有考虑数据传输过程中的安全性等。基于此,该文以移动机器人作为对象融合数字孪生技术,旨在实现具有远程以虚映实和以虚控实并保证消息数据传输安全功能的数字孪生移动机器人虚实交互系统。

1 数字孪生移动机器人系统构建

该文研究主要基于陶飞教授提出的五维模型构建数字孪生系统,主要包括物理实体、孪生虚体、应用服务、数据的连接和孪生数据^[9]。其中物理实体是机器人和控制器等硬件组成部分;孪生虚体为机器人孪生模型和虚拟环境等组成部分;应用服务主要通过 Unity3D 的 UI 人机交互界面提供;数据的连接为建立虚实两端数据传输的通道;孪生数据为物理实体的静态信息和动态信息。

孪生模型的构建是数字孪生系统中重要的一步。该文使用 SolidWorks 绘制移动机器人的三维模型,由于该软件与 Unity3D 软件的坐标及格式等方面并不相同,并且 SolidWorks 初绘模型存在冗余面片,容易在运行时造成渲染压力,影响机器人的虚实同步,因此为了保证在 Unity3D 中虚拟模型的运行流畅,减轻模型在运行时的渲染压力,通过使用 3ds MAX 软件对建模后的模型进行格式转换及去面片化处理^[10]。3ds MAX 可以提供更高质量的建模、材质编辑和渲染功能,使得孪生模型具有更精细的几何细节和更逼真的外观,建模流程如下图 1 所示。



图 1 建模流程图

依据以上建模流程,绘制的机器人三维模型及优化后导入 Unity3D 中的模型如图 2 所示。



图 2 移动机器人孪生模型构建

2 孪生数据通信方案

数据通信是连接移动机器人孪生虚体与物理实体的桥梁,也是数字孪生移动机器人虚实交互系统设计中最重要的一部分。为了全方位的映射物理实体的原型状态,需要采集机器人的各项数据并据此更新孪生模型。

2.1 数据的采集与通信

需要传输的数据类型分为静态数据和动态数据。动态数据主要包括移动机器人的实时位置数据、各关节的力矩、角度以及运行的速度等,是对物理模型当前运行状态的实时数据体现,因此对动态数据的采集尤其重要。为了使孪生模型能够真实反映当前物理实体机器人的运行状态,除了要保证数据的传输效率外,还需要保证被传输数据的完整性与可靠性。该文采用 MQTT 协议实现孪生虚体与物理实体之间的通信。MQTT 是一种轻量化、低带宽的消息传输协议,采用发布/订阅模型,通过消息代理可以将移动机器人的实时数据和状态信息发布到指定 Topic,实现数据的解耦和灵活分发^[11]。

该文采用阿里云的 ECS 云服务器作为数据流转平台,使用 EMQX 作为 MQTT 消息代理实现数据的订阅与发布。移动机器人物理端通过无线模块入网并通过 MQTT 协议与服务器建立通信连接。Unity3D 孪生端通过部署 MQTTnet 库,使用 C# 编程实现与服务器建立通信连接。通信架构如图 3 所示。

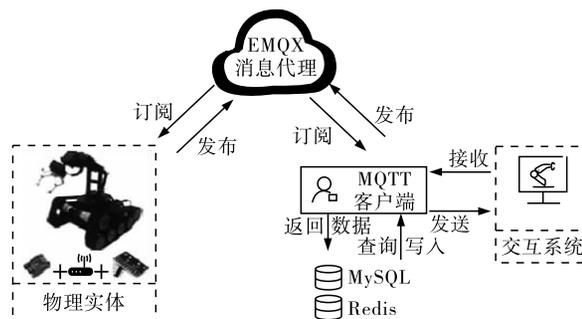


图 3 通信系统架构图

2.2 消息文本可靠性验证过程设计

数字孪生系统依赖于准确的数据反馈控制,一旦数据被窃取篡改,可能导致另一端机器人执行错误的指令,对系统的安全性和稳定性造成严重威胁。因此为了确保数据在传输过程中的完整性、可靠性,通过加密传输降低系统遭受恶意篡改或不良干扰的风险,从而提高系统的安全性。

(1) SHA-256 哈希算法

SHA-256(Secure Hash Algorithm 256-bit)^[12]是一种安全性很高的加密哈希函数,用于产生数据的数字签名。该算法通过将输入数据转换为256位固定长度的输出,以确保数据完整性和安全性。哈希系列算法中,MD5^[13]已经在2005年被破解,SHA系列的SHA-0、SHA-1也在2017年前被相继攻破。相比而言,SHA-2系列的加密算法迄今为止并未被发现存在安全漏洞,因此被应用于众多主流平台,而SHA-256就是SHA-2系列的一种^[14]。目前,SHA-256在数字证书、数据完整性验证、密码学安全等领域被广泛应用,成为很多安全协议和加密算法的基础。SHA-256哈希算法具有以下优势:

①强抗碰撞性:SHA-256生成的哈希值具有很高的随机性和抗碰撞能力;

②加密效率高且不可逆:SHA-256的计算速度相对较快,适用于大数据量和高效率的应用场景,此外该算法的加密方式不可逆,即无法通过密文反推原文信息,因此也将该种密文成为原消息的数字指纹;

③循环压缩:任意长度的原文都能经SHA-256运算后得到256位密文;

④抗修改性:即使对原文进行微小改动,输出的密文也会产生很大变化,使得数据的原始性和完整性得到保障。

(2) 消息加密过程设计

数字孪生移动机器人虚实交互系统中,存在着操作指令、运行状态信息等对可靠性要求较高的数据,一旦数据在传输过程中被篡改,将影响另一方设备的运行安全。在MQTT消息传输协议中,虽然可以通过设置QoS级别确保数据的安全交互,但是仍存在数据劫持的风险^[15]。为了提升MQTT消息数据传输安全,结构化信息标准促进组织(OASIS)提出使用SSL/TLS^[16]方式加密,但是该种方式通信开销大且普及率低^[17]。考虑到数字孪生移动机器人对数据传输实时性要求高以及数据量大等特点,该

文提出基于SHA-256哈希算法,使用消息数据加密验证方案,分别对MQTT消息的发送端和接收端进行加密和验证,该种加密方式不仅系统资源开销低,也保证了消息传输的安全性。

消息数据主要包含机器人静态信息数据、动态信息数据以及通过SHA-256算法加密后的密文组成。其中机器人静态信息由机器人型号RobotID等静态常量组成,机器人动态信息由机器人当前所处位置RobotPos、前进的方向RobotDir、速度RobotSp以及各关节运行角度JointAng等动态变量组成。消息数据加密过程如图4和图5所示。

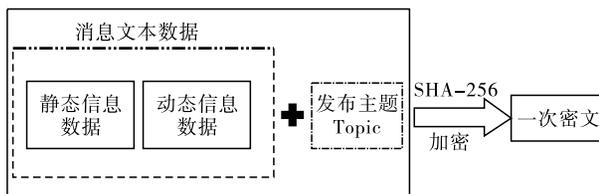


图4 消息数据加密

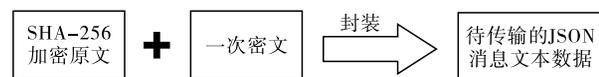


图5 消息文本加密封装示意图

消息加密的具体过程如下:

①拼接待加密的消息原文信息:待加密的原文信息主要由动态信息数据和静态信息数据组成的消息文本以及消息发布主题这几部分组成;

②将拼接好的待加密消息数据通过SHA-256加密算法进行加密,最终生成256位的一次加密密文;

③拼接待加密的原文信息和加密后的密文信息,并将其封装成JSON数据格式通过MQTT协议进行传输。

(3) 消息安全性验证过程设计

依据SHA-256算法的不可逆性、抗修改性以及相同的原文加密后总会输出相同哈希值的特点,设计加密消息验证的思想:将接收到的加密后的消息数据进行拆分,得到消息加密原文和一次密文两个部分,对加密原文中的消息数据与订阅主题进行拼接,执行二次加密操作得到二次加密密文,比较一次加密密文与二次加密密文是否相同,相同则为可信任消息数据,否则为不可信任的消息数据。具体过程如图6所示。

消息验证的具体步骤如下:

①将接收到的JSON消息数据解析得到加密原文和一次加密密文,由于孪生端与物理端消息发布

与订阅的主题不同,因此可以通过解析消息数据中发布主题 Topic 确定消息的来源。其次对于同一个消息而言,孪生端的发布主题即是物理端的订阅主题,反之物理端的发布主题也是孪生端的订阅主题;

②拆解析后的消息文本,将其分为一次密文和加密原文;

③将加密原文中的消息数据与订阅主题拼接,并将拼接后的数据使用 SHA - 256 加密算法加密,生成二次密文;

④比较一次密文与二次密文,若相同则消息安全,若不相同则该消息已被篡改,丢弃消息。

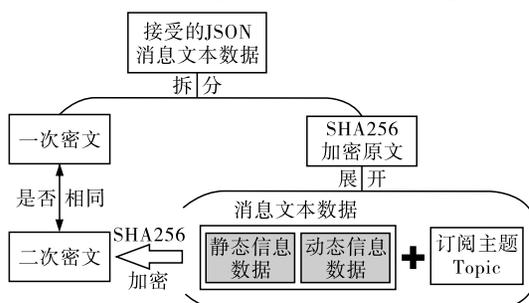


图6 消息安全性验证过程示意图

2.3 轻量化 MQTT 文本数据

虚实交互的实时性要求数据传输的实时性,为了准确映射虚实状态,需要在孪生体与物理实体之间频繁地传输大量的消息数据,通过对消息数据轻量化处理,可以进一步提升数据的传输效率和速度,

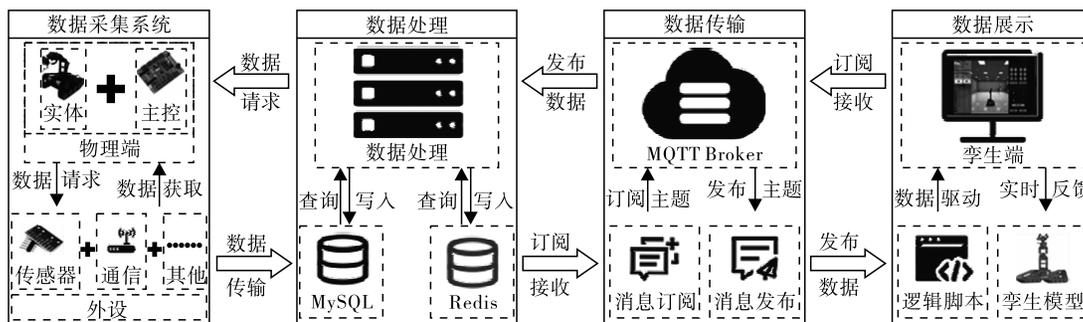


图8 数据实时交互处理架构图

数据交互处理架构主要分为数据采集系统、数据处理、数据传输以及数据展示 4 个部分。其中数据采集系统包含机器人本体和其它外设部分,主要对移动机器人状态信息数据的获取;数据处理部分主要执行数据加密、压缩、封装、解压和解析等任务并将数据存入 MySQL 和 Redis 数据库,其中 MySQL 数据库主要用于数据本地化,提供历史数据查询功能,Redis 具有高速读写功能,因此主要用于对外实时交互功能;数据传输部分通过部署于云服务器上

减少通信延迟,提高数据交互实时性。该文采用压缩速度快、资源性能占用较少的 Deflate 压缩算法^[18]实现对消息数据的压缩。

首先提取待分发的消息数据,然后利用 Deflate 压缩算法压缩并转换为适合在网络中传输的字节流数组。将压缩后的字节流数组封装至消息体中并分发至目标客户端。客户端将接收到的消息解压缩并进行二次加密验证,验证通过后将数据解析并据此更新另一端机器人的状态信息,最终实现消息数据安全传输。压缩流程如图 7 所示。

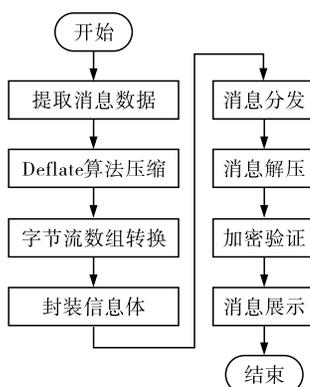


图7 Deflate 消息数据压缩流程图

2.4 数据交互方案设计

该文基于 MQTT 协议与云服务器实现物理端与孪生端的数据交互,为了保证数据的安全、平稳、高效的传输,设计了数据实时交互的方案框架如图 8 所示。

的 MQTT Broker,通过消息发布与订阅主题 Topic 进行数据的流转;数据展示部分位于孪生端,主要是通过编写逻辑脚本实现数据驱动模型,最终实现动态模型映射。

3 移动机器人数字孪生虚实交互系统验证

为了验证该文设计的虚实交互系统的可行性,该文基于 ARM 主控制器,使用 Unity3D 作为孪生端开发平台,采用 C#语言编写孪生模型驱动脚本,通

过在孪生开发平台中部署 MQTTnet 库与云服务器建立连接,最终实现移动机器人数字孪生虚实交互系统。

虚实交互系统主要可以分为以虚映实和以虚控实两个功能,交互界面如图9所示。



图9 孪生端交互界面

以虚映实的功能界面主要分为服务器连接模块、机器人状态监测模块、孪生模型和历史状态重现模块。系统启动后在连接模块中输入服务器的连接参数并点击连接,即可实现与服务器建立连接;孪生模型是实现以虚映实的关键部分,通过实时数据实现对孪生模型的驱动,以达到虚实同步的功能;虚拟化的场景设计更有助于提高沉浸式的体验感,在以虚映实阶段,通过键盘事件实现点击 W、S、A、D 可以实现虚拟场景漫游,达到无死角监控效果。

以虚控实的功能界面主要通过拉伸功能实现在主界面中的隐藏与显示。界面中包含机械臂控制模块、机器人位移模块和其它功能模块。机械臂控制功能主要是通过 UI 面板为机械臂每个关节设置对应的按钮并通过 C#编程实现绑定点击事件,可以更加灵活、精准地控制机器人各关节的运行;机器人位移功能通过 UI 面板中的向上、向下、左右旋转按钮实现移动机器人按照一定速度向目标方向移动。

3.1 虚实交互功能测试

以虚映实和以虚控实的主要的功能验证如下:

(1)以虚映实:通过数据采集系统采集物理端移动机器人的实时状态信息,并对信息数据处理后通过云服务器实现数据流转,孪生端对接收的数据进行校验、解析等处理后,逻辑脚本将根据解析数据驱动孪生模型,此时观察孪生端移动机器人是否与实体机器人的运行状态相同;(2)以虚控实:通过操纵 UI 面板上的控制功能按钮,观察实体机器人的运行状

态是否与孪生体的运行状态保持一致。具体步骤如下:

①在 UI 控制面板中输入云服务器连接参数并点击连接按钮,连接成功后即通过消息的发布与订阅机制建立消息传输通道进行数据传输。

②物理端机器人将状态信息数据经无线模块 MQTT 协议发布至云服务器,并通过消息代理服务器转发至订阅该主题的孪生端,观察孪生端模型的运行状态与物理端机器人运行状态是否一致,通过键盘和鼠标事件实现场景漫游等功能。

③通过点击孪生端控制面板中的功能按钮,实现对孪生端机器人的动作控制,观察物理端机器人运行状态是否与孪生端机器人运行一致。

通过上述实验步骤,在系统验证的同一时刻下截取的孪生虚体与物理实体的运行状态如图 10 和图 11 所示。

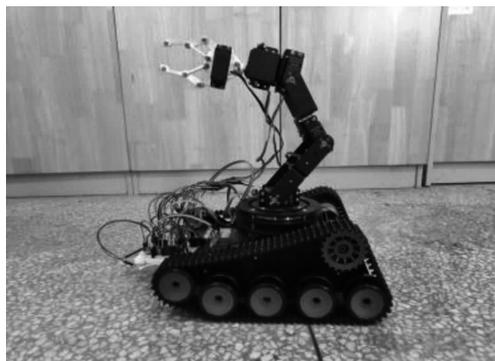


图10 物理机器人状态



图 11 孪生机器人状态

通过测试可以验证该次设计的数字孪生移动机器人虚实交互系统可以实现以虚映实、以虚控实的功能。整个系统具有实时性高、数字化程度高,良好的虚拟环境和逼真的孪生模型提高了沉浸式的虚实交互体验。

3.2 历史重现功能测试

在控制面板的历史数据重现模块中输入时间段并点击确认,系统会据此为条件查询本地化数据,点击确认后截取某一时刻下的控制面板的状态监测数据与数据库中的存储数据作比较,据此判断历史状态重现功能的可靠性。如下表 1 为控制面板中机器人的状态信息,表 2 为数据库的存储信息。

表 1 数据库中存储的各轴角度(°)

轴一	轴二	轴三	轴四	轴五	轴六
6.857	-7.986	15.352	45.351	-23.361	8.537
6.857	-7.973	15.352	45.351	-23.361	8.537
6.857	-7.986	15.352	45.351	-23.348	8.537
6.857	-7.986	15.352	45.338	-23.361	8.537
6.857	-7.986	15.352	45.351	-23.361	8.524
6.844	-7.986	15.352	45.351	-23.361	8.537

表 2 监测面板中的各轴角度(°)

J1	J2	J3	J4	J5	J6
6.857	-7.986	15.352	45.351	-23.361	8.537
6.857	-7.973	15.352	45.351	-23.361	8.537
6.857	-7.986	15.352	45.351	-23.348	8.537
6.857	-7.986	15.352	45.338	-23.361	8.537
6.857	-7.986	15.352	45.351	-23.361	8.524
6.844	-7.986	15.352	45.351	-23.361	8.537

由上表可以看出,同一个时刻下在控制面板监测的状态信息数据与该时刻下存储的数据一致,说

明了数据解析的正确性,进而保证了虚实交互的一致性,因此历史状态重现功能可行。

4 结论

该文基于 MQTT 消息传输协议设计并实现了数字孪生移动机器人虚实交互系统,主要完成了以下几个任务:

(1) 移动机器人孪生模型的绘制与迁移;

(2) 设计基于 MQTT 协议的数据安全与轻量化传输模式:①采用 SHA - 256 哈希算法保证数据传输的可靠性、完整性;②采用 Defalte 压缩算法实现对消息数据的轻量化,保证消息传输的实时性;

(3) 设计了系统的数据交互方案,使用 MySQL 作为本地化数据库,Redis 作为实时交互数据库,不仅保证了数据传输的实时性,也实现了数据的本地化存储,为历史状态重现功能提供了可能;

(4) 完成了整个系统的功能测试。基于数字孪生移动机器人的虚实交互系统设计虽然完成了目标功能设计,但是仍需从以下几个方面进行完善:①除孪生模型之外的虚拟环境,并不是对移动机器人周围真实环境的映射,后续应研究如何动态创建移动机器人周围了孪生环境映射,以达到更加真实的孪生交互系统;②对数据的利用率不够,后面应引入数据分析、人工智能等技术,实现对机器人的故障诊断等功能,提高移动机器人的智能化程度。

参考文献:

[1] 杨萌. 移动机器人的应用现状及发展趋势分析[J]. 玩具世界, 2023(05):9 - 11.
 [2] Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through

