

接触网检修机器人数字孪生 系统设计与实现

摘要：由于川藏线低温、缺氧，人工维修工作难以进行，本项目通过 isaacsim 搭建数字孪生平台，与机械臂联动进行数字孪生操作来维修损坏的接触网。在 Isaacsim 中对接触网维修过程进行仿真，并通过 VR 技术进入 Isaacsim 虚拟世界纠正维修过程中发生的错误，虚拟维修过程完成后，通过 rviz 与真机联动，进行现实世界接触网维修。此数字孪生系统的实现可帮助高原地区恶劣天气的情况下轻松完成接触网维修任务。

关键词：数字孪生 机械臂
Isaacsim yolov5 VR

引言

随着社会和经济的不断发展，电气化技术也在不断进步，接触网是电气化铁路中向电力机车提供动力的关键设备，其可靠性直接关系到整个铁路运输系统的安全性和效率^[1]。在部

分高原地区，接触网人工维修受低温、缺氧等恶劣环境影响，尤其在夜间严重威胁维修人员生命安全以及维修效率。王佳鑫指出，高原地区的海拔较高，地形起伏不平，空气稀薄，气压偏低，气温常年寒冷。在这种环境下，即使是白天的常规工作，也难以安排专门人员进行每日巡检。此外，常年积雪的覆盖使巡检工作变得更加棘手，而普通的养护和维修设备在进入高原后，其工作效率也大幅下降^[2]。在这种情况下，寻找新的、有效的维护手段成为了当务之急。虚拟仿真技术在接触网维护领域的应用，为解决这个问题提供了新的思路。Isaacsim 在机器人仿真领域的先进功能，为接触网维护提供了更多的可能性。同时，与机器人相关的技术在近几十年里得到了巨大的发展。机器人技术是工业 4.0 的一项重要技术，它在制造领域提供了广泛的能力工业，机器人技术的发展得到支持，与计算机科学技术

的发展成正比^[3]。虚拟制造和数字孪生已经成为现代工业领域的革命性创新，有潜力彻底改变行业计划、运行和优化其运营的方式。数字孪生技术生成动态、实时的物理实体数字复制，而虚拟制造利用数字模拟。由于具有以前前未闻的准确性和效率，这些进步允许企业可视化、评估和管理他们的制造流程^[4]。

虚拟仿真软件的应用显著降低了企业的运营成本。在实际的实验室运行中，通常需要消耗大量的实验材料。这些费用长期累积，最终会形成一笔不容小觑的开销。采用虚拟仿真实验系统，几乎无需实际消耗任何实验材料，从而有效控制了成本。虚拟仿真软件在教学中的应用，较传统维修教学模式，同样显著降低了人力成本^[5]。

数字孪生技术将虚拟性与现实性进行有效地结合，增加了研究的直观性和形象性，可以实现在不依赖实物的情况下进行实验。近年来，数字孪

生技术已应用于不同领域，并提出了一些典型的数字孪生解决方案来解决复杂的系统问题，如果将数字孪生应用到机械臂上，对于我国未来虚拟控制的应用推广和制造业、工业等领域的不断发展都有巨大帮助^[6]。本技术是通过 Isaacsim 来搭建了一个数字孪生平台，数字孪生平台为机械臂维修接触网带来了显著的优势。该平台利用实时数据监测与虚拟仿真技术，实现了对机械臂及其接触网运行状态的精准掌握。这不仅能够有效预测高原地区恶劣环境潜在的故障，还能优化维修策略，从而降低维护成本。同时，数字孪生平台显著提升了维修的效率与准确性，确保了生产过程的持续性与安全性。同时 Isaacsim 作为一款机器人仿真软件，有着其强大的功能和独特的优势。

NVIDIA Omniverse Isaacsim 是专为 NVIDIA Omniverse 平台设计的机器人仿真工具包。Isaacsim 能够创

建虚拟机器人环境并进行实验。该平台可模拟多种传感器的数据,如 RGB-D 摄像机、激光雷达和惯性测量单元 (IMU) 等,广泛应用于领域随机化、地面实况标注、图像分割及边界框标记等多项计算机视觉技术^[7]。对比 Gazebo 仿真软件,Isaacsim 具有可扩展性强和高度兼容性的特点。它支持多种机器人模型和环境库,可以与现有的物理框架集成,以模拟逼真的物理效果,这使得 Isaacsim 能够适用于更广泛的场景和需求。同时 Isaacsim 通过 NVIDIA 的 GPU 技术,能够实现照片级的仿真画面,这为用户提供了更加逼真的虚拟环境。相比之下,Gazebo 虽然也提供高质量的图形渲染,但在细节和真实感上可能稍逊一筹。而且 Isaacsim 提供了一个简单的 ROS 桥接器,能将 ROS 与 Isaacsim 连接起来,结合 ROS,能让 Isaacsim 更好地实现它的各项功能,例如 rviz,作为 ROS 的一个 3D 可视化工具,它提供了一个

用于显示传感器数据、状态估计、规划轨迹和其他机器人信息的窗口,ROS 可以将 rviz 与 Isaacsim 进行集成,用户可以更加直观地查看和调试 Isaacsim 中的机器人模型和环境,提高开发效率。此外,Omniverse 拥有 AR、VR 和多 GPU 渲染等新功能,并集成了基础设施、工业孪生应用程序与 BentleySystems 和 Esri 的软件。作为一款企业级的沉浸式串流框架,它使用户能够以互动的方式将 Omniverse 的体验流式传输到他们的移动 AR 和 VR 设备上。它还可以插入任何人工智能模式、任何框架,以及我们在现实世界中做的所有事情。可以将它插入所有的自主模式并具有视觉保真度。

研究目标

本技术的目标是在高海拔的恶劣环境下,通过虚拟仿真技术锁定接触网的工作点和工作目标,确保仿真过程能够真实可靠地模拟实际应用。

本技术旨在推动接触网维护技术的创新与发展，提高维护工作的效率和安全性，为我国高海拔地区接触网的维护提供有力的技术支持。同时，也希望通过本研究，为虚拟仿真技术在接触网维护领域的应用提供有益的参考和启示。

本技术的创新解决方案如下：

(1) 首先，在 Isaacsim 模拟环境中为检修车配备了激光雷达传感器。可以更准确地定位接触网上的螺丝等部件，并利用摄像头对其进行详细检查，从而有效地监测螺丝是否出现松动现象。

(2) 利用 yolov5 算法和手眼标定技术，实现了对机械爪的精准控制，使其能够使用合适的工具维修松动的螺丝等部件。这一技术的应用，大大提高了维修工作的准确性和效率。图 4 是我们在 yolo 模型中对载入的 1000 张各种各样的螺丝（如十字螺丝、一字螺丝）进行识别训练的部分结果展

示。

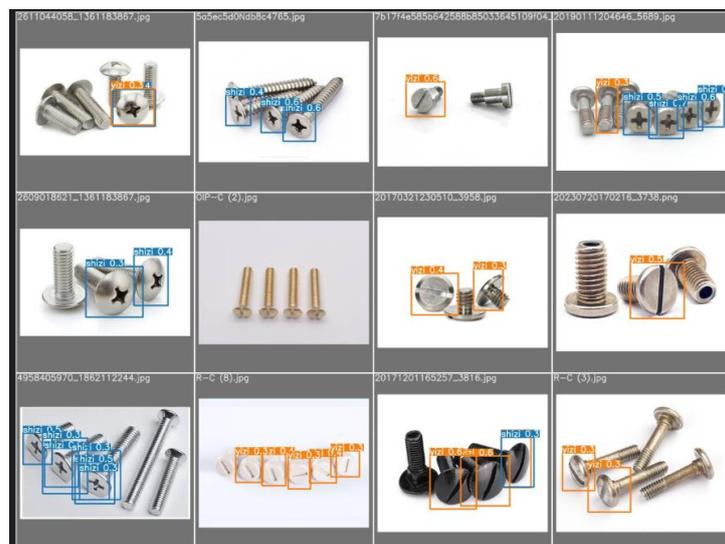


图 1 yolo 模型识别训练

(3) 通过 Isaacsim 搭建了一个数字孪生平台。Isaacsim 具有与真实世界相似的物理特性，使得机械臂在模拟环境中的运动能够映射到真实世界中。这一平台的建立，为接触网维护提供了更为真实和可靠的模拟环境。图 2 展示了我们在 Isaacsim 中建立的机械臂模型和模拟接触网模型，这是我们从 urdf 模型导入得到，在仿真过程中，机械臂会对模拟接触网进行检查。图 3 为实体机械臂在模拟接触网的场景，在数字孪生过程中，实体机

械臂通过接收虚拟端 Jason 文件，从而与 Isaacsim 中的机械臂同步运动。



(a) 机械臂模型



(b) 机械臂和接触网模型

图 2 Isaacsim 中搭建的模型



图 3 机械臂和接触网实体模型

(4) 引入了虚拟现实(VR)技术,使操作者能够人为地进入虚拟世界,模拟并纠正机械臂在维修过程中可能出现的错误。这一技术的应用,不仅能够提高维修工作的安全性,还能够有效提升操作者的培训效果。

研究方法

本技术首先通过 Isaacsim 软件导入机械臂、巡检车以及接触网环境的 urdf 格式文件,将 Isaacsim 自带深度相机与机械臂连接为一体,并在

巡检车上添加 Isaacsim 自带雷达。使用 YOLOv5 模型训练接触网上存在的各种零件及维修工具（如十字螺丝、十字螺丝刀、一字螺丝、一字螺丝刀），通过手眼标定使摄像头能在机械臂上部进行视觉动作，手眼标定公式及示意图如下：

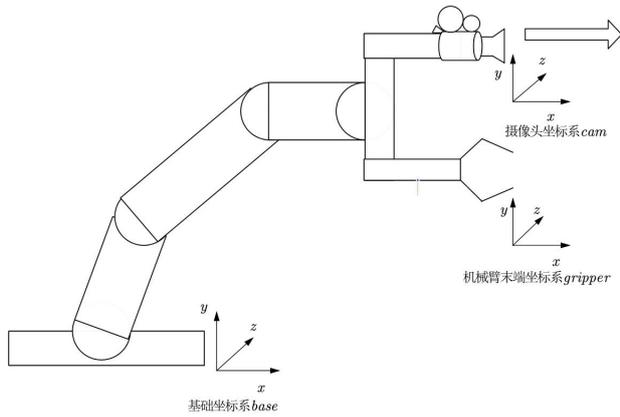


图 4 手眼标定坐标系分布的示意图

$${}_{base}T_{target} = {}_{target}T_{cam} \times {}_{cam}T_{gripper} \times {}_{gripper}T_{base} \quad (1)$$

手眼标定工作：

第一步：将标定板置于固定位置不动。

第二步：移动机械臂使相机可以清晰

完整拍到标定板，记录此时机械臂位姿，并拍摄照片。

第三步：重复第二步十次以上，在标定过程中，标定板与基础坐标系的位姿关系 ${}_{gripper}T_{base}$ 保持不变。同理，在标定过程中相机与机械臂末端的位姿关系保持 ${}_{cam}T_{gripper}$ 保持不变。

故可对 ① 进行变换：

$${}_{base}T_{target} = {}_{target}T_{cam} \times {}_{cam}T_{gripper} \times {}_{gripper}T_{base} \quad (2)$$

$${}_{base}T_{target} = {}_{target}T_{cam} \times {}_{cam}T_{gripper} \times {}_{gripper}T_{base} \quad (3)$$

由于

$${}_{base}T_{target} = {}_{target}T_{base}$$

故可得到下式：

$${}_{target}T_{cam} \times {}_{cam}T_{gripper} \times {}_{gripper}T_{base} = {}_{target}T_{base} \times {}_{gripper}T_{base} \quad (4)$$

可得：

$${}_{gripper}^{base}T_2^{-1} \times {}_{cam}^{gripper}T \times {}_{gripper}^{base}T_1 = {}_{target}^{cam}T \quad (5)$$

接下来利用先前拍照获得的多组数据即可求出 ${}_{cam}^{gripper}T$ ，再将 ${}_{cam}^{gripper}T$ 带回 ① 式即可获得每张照片对应的 ${}_{target}^{base}T$ 。至此，手眼标定的工作完成。

本项目通过在 unity3d 导入 PICOSDK,使用串流线连接电脑与 PICO 头显,串流授权后,带上 PICO 眼镜即可在头显中同步显示 unity3d 画面,在 Isaacsim 中下载 unity omniverse connector 连接器,使 unity3d 与 Isaacsim 画面同步,达到人为进入 Isaacsim 虚拟世界目的。

研究结果与讨论

最终通过导入 urdf 在 Isaacsim 中建立机械臂、巡检车以及接触网虚拟环境,通过 Isaacsim 成功进行虚拟仿真,最后连接真机,与 rviz 相连,使其运动路径与虚拟仿真中的机械臂一致,并通过运行视觉 yolov5 代码与

深度相机相连,进行实时检测,并开启巡检小车雷达扫描周围环境。

以往的接触网智能维修机器人由一个控制主体及多个与之相连的机械臂组成,具备动态实时监测的功能,工作可靠性高,检测效率出色,并且对柔性网故障的判定更为准确,处理的实时性也显著增强^[9]。对比此接触网智能维修机器人本数字孪生系统通过虚拟仿真先行进行维修,避免不必要的错误,减少人工成本以及耗材,并增加维修的准确性,在夜间维修通过雷达可快速检测到接触网方位,在面对高原极端或恶劣天气时,依然可以高效维修。基于传统 ros 机器人,Isaacsim 是独立于 ros 系统的,即可通过 rosbridge 连接 ros 系统,也可使用 Isaacsim 内部 api 控制机械臂^[10]。

Isaacsim 虽然可以模拟绝大部分现实世界环境,但是面对流体动力学的细微变化以及复杂的光照影响,

Isaacsim 的仿真维修相比现实世界可能出现误差。

未来研究将着重于提升机械臂在虚拟环境中进行任务规划的能力，覆盖从巡检、清洁到调试检修和修剪修整等全面的维修步骤，实现这些步骤的自动规划和优化。结合仿真数据，我们将开发智能算法，以精准地进行故障诊断和预测，为机械臂提供科学的维修建议和决策支持。同时，我们将深入研究机械臂在虚拟环境中进行自主维修的能力，包括自动更换零部件、调整参数等高级操作，从而显著降低对人工干预的依赖。如此不仅能提高维修效率，还可以增强工作安全性。在整个研究过程中，我们将持续收集和分析仿真过程中产生的数据，以全面评估机械臂的维修性能和效率。这些数据将为我们优化设计和算法提供宝贵的数据支持。基于这些仿真数据，我们将开发更为先进的优化算法，以改进机械臂的结构、控制系

统和维修策略，进而提升其整体性能和可靠性。除此之外，我们还将增强虚拟现实（VR）技术在此系统中的应用。通过 VR 技术，我们可以模拟各种复杂的现实维修环境，特别是在出现不利天气条件时，如大风、雨雪等，对维修过程造成的影响。这将使我们能够在虚拟环境中进行预演和训练，为现实世界的维修工作做好充分准备，确保在真实环境中能够高效、安全地完成维修任务。

结论

本项目通过 solidworks 建立模型，使用 urdf 插件将 stl 文件转化为 urdf 文件（部分手写），导入 Isaacsim 中，加入 Isaacsim 自带深度相机以及雷达，通过 omnigraph 与机械臂建立通讯，并运行 YOLOv5 代码控制深度相机进行实时识别，计算相机坐标实现手眼标定，运行 rviz 进行 moviet 轨迹规划后，与真机相连进行数字孪生操作，并使 Isaacsim 与

unity3D 连接, 使用 VR 技术纠正维修过程错误。针对接触网属于露天供电装置, 需要承受包括风吹、日晒、雨淋、雷电、雪雾和冰雪覆盖在内的各种高原地区存在的自然条件的影响^[11]。此数字孪生系统将会大大减少接触网维修事故, 并保障接触网维修工人在高原地区维修的生命安全。

接触网智能维修机器人的未来展望是相当广阔的。随着技术的不断进步, 特别是在计算机视觉和机器学习领域的发展, 巡检机器人的性能和功能得到了显著提升。这些机器人的应用领域正不断拓展, 市场需求也在持续增长。以智能巡检机器人为例, 其在电力、石油化工和轨道交通等行业的应用愈发普及。同时, 随着传感器技术、智能控制技术、数据挖掘技术与人工智能技术的深度融合, 这些机器人的功能和应用也在不断得到增强与丰富。

总的来说, 接触网智能维修机器

人的未来是充满希望的。随着技术的不断进步和应用的不断拓展, 这些机器人将在提高工作效率、降低成本、增强安全性等方面发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1]石光宇. 电气化铁路接触网日常维修[J]. 文摘版:工程技术, 2016, 000(007):121-121.
- [2]王佳鑫. 浅析高原铁路线路养护维修设备[J]. 科技与创新, 2016(16):90-90.
- [3]Mohd J , Abid H , Pratap R S , et al. Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation[J]. Cognitive Robotics, 2021, 158-75.
- [4]Mohsen A , Gokhan B C . Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities[J]. Decision

- Analytics Journal, 2023, 6.
- [5] 赵福祥. 虚拟仿真实验在教学中的成本优势的分析. 西江文艺·下半月, 2015(06).
- [6] 郭海祥, 朱玲, 姜健男. 基于 Unity3D 的数字孪生机械臂抓取系统研究[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2024:1-7.
- [7] 姚鑫. 智慧物流分拣平台视觉感知技术研究[D], 2022.
- [8] 刘国超, 李少春, 吴阳. ROS 在机器人工程中的应用[J]. 无线互联科技, 2022, 19(22):75-77.
- [9] 一种接触网智能维护机器人及其工作方法, 中铁建电气化局集团运营管理有限公司, 2020-9.
- [10] 屈力刚, 高凯, 邢宇飞, 张丹雅. 基于 ROS 的机械臂运动规划研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(22):43-47.
- [11] 高建瓴. 恶劣气候条件下接触网事故分析及预防[J]. 内蒙古煤炭经济, 2013(8):92-9297.
- [12] 马楠, 张华峰. 一种接触网智能维护机器人及其工作方法:CN202010542450.9[P]. CN111682447A[2024-08-22].

作者信息

朱子清 (2004-), 男, 西南交通大学, 本科在读, 电子信息工程, 2383554404@qq.com

陈楚涵 (2004-), 男, 西南交通大学, 本科在读, 功率半导体器件, 893364987@qq.com

贾豫川 (2004-), 女, 西南交通大学, 本科在读, 机械设计制造及其自动化, 2769191979@qq.com

梁珂宁 (2004-), 男, 西南交通大学, 本科在读, 电力系统及其自动化, 6468422@qq.com

刘潇 (2003-), 男, 西南交通大学, 本科在读, 电力系统及其自动化, 1906621067@qq.com