

基于 UE 的水下机器人动态仿真平台设计与实现

王昆仑¹, 汪明¹, 杜晓彬¹, 赵千川², 郑学汉¹, 高鹤^{1,3}

(1. 山东建筑大学 信息与电气工程学院, 济南 250101; 2. 清华大学 自动化系, 北京 100084;
3. 山东正晨科技股份有限公司, 济南 250101)

摘要: 水下机器人在设计和研制时需要经过大量的测试, 利用测试数据从而完善设计和研制; 然而在江河湖海等水域中的测试, 尤其是极端环境下的水域测试, 成本高、周期长、危险性大, 这给水下机器人研制带来了挑战, 仿真成为应对这一挑战的可行途径; 目前多数的仿真平台对于仿真环境的设计较为简单, 缺乏在保证模拟真实性的条件下构建大型复杂场景的能力。为了解决仿真平台环境建模能力的不足, 提高仿真效果的可视化程度, 文章采用虚幻引擎 (UE)、AirSim 和分布式仿真算法平台 (DASP) 相结合的方案, 设计并实现了一种应用于水下机器人的动态交互仿真平台, 利用该平台对仿生机器鱼轨迹跟踪进行了 LQR 控制测试; 仿真结果表明该仿真平台在交互性、真实性、可视化和仿真效果等方面表现出较强的优势。

关键词: 水下机器人; 仿真平台; 虚幻引擎; AirSim; DASP

Design and Implementation of Dynamic Simulation Platform for Underwater Vehicle Based on UE

WANG Kunlun¹, WANG Ming¹, DU Xiaobin¹, ZHAO Qianchuan², ZHENG Xuehan¹, GAO He^{1,3}

(1. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;
2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Shandong Zhengchen Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: The process of designing and developing underwater robots necessitates extensive testing, wherein test data is utilized to enhance the design and development. Nevertheless, the process of conducting tests in aquatic environments, including rivers, lakes, and oceans, particularly under harsh conditions, entails substantial expenses, prolonged durations, and inherent risks. These factors pose significant obstacles to the advancement of underwater robotics. Simulation has emerged as a feasible approach to tackle this difficulty. Currently, the majority of simulation platforms exhibit a very simplistic design in terms of their simulation environment, so lacking the capability to construct extensive and intricate sceneries while simultaneously preserving the fidelity of the simulation. This study proposes a solution that integrates unreal engine (UE), AirSim, and distributed simulation algorithm platform (DASP) to address the limitations in environment modeling and enhance the visualization of simulation effects. The objective is to develop a water-based simulation system. The development of a dynamic and interactive simulation platform designed specifically for robots is being explored. The present platform was utilized for the purpose of conducting studies on trajectory tracking of bionic robotic fish using LQR control algorithm. The findings of the simulation study demonstrate that the simulation platform possesses notable strengths in terms of interactivity, authenticity, visualization, and simulation effects.

Keywords: underwater vehicle; simulation platform; UE; AirSim; DASP

0 引言

随着新的全球海洋发展浪潮, 对水下机器人的需求急剧上升。水下机器人在军事、科学勘探、输油管道、渔业、海洋水产养殖、潜水娱乐等领域具有广阔的前景^[1]。然而, 水下环境的不确定性使得水下机器人的测试成为一项重大挑战, 特别是对于海上测试, 成本昂贵, 不方便, 并存在

安全隐患^[2]。因此, 搭建一个虚拟环境进行仿真测试, 以测试研究结果是否接近目标, 最后再进行物理机器人的试验验证, 这个过程就显得尤为重要。

近年来, 许多机器人研究团队都基于研究的机器人构建了相应的仿真环境, 并通过一些机器人仿真平台进行性能评估^[3]。在通用的机器人仿真平台中, 最著名的是由开源机器人基金会开发并用于 DARPA 机器人挑战赛^[4]的 Ga-

收稿日期: 2023-03-12; 修回日期: 2023-03-18。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62073196, U1806204)。

作者简介: 王昆仑(1997-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 汪明(1976-), 男, 教授, 博士生导师。

引用格式: 王昆仑, 汪明, 杜晓彬, 等. 基于 UE 的水下机器人动态仿真平台设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 231-236.

zebo 仿真平台^[5]。其他流行的开源机器人模拟器如 Webots^[6], CoppeliaSim^[7], RoboDK^[8]等。一些机器人研究者在此基础上做了进一步地开发利用,例如, Yoon 等人提出通过机器人操作系统 (ROS) 整合机器人的传感器, 并利用具有物理引擎的 Gazebo 仿真器构建了机器人的模型和工作环境^[9]。Yan 等人利用 ROS 和 Gazebo 的虚拟仿真平台, 研究了时滞离散时间下的多智能体系统 (MAS) 的编队控制问题^[10]。Tursynbek 等人提出了一种在 CoppeliaSim 中对并联机械手臂进行建模和仿真的新方法, 并应用于球形并联机械手臂 (SPM) 的性能测试和优化^[11]。Western 等人开发了一款用于行星探索的滚动机器人, 并通过 CoppeliaSim 构建仿真模型和环境, 来确定在火星表面的实际条件下, 风力对机器人控制的影响^[12]。Kumar 等人在多机器人目标轨迹规划与控制研究中, 基于 Webots 和 Matlab 搭建仿真环境进行了先验研究^[13]。Aslan 等人在 Webots 中使用 3D 模型进行了仿真测试, 并验证了真实环境测试中获得的结果与仿真结果具有并行性^[14]。此外, Farley 等人近期的一项研究中对 CoppeliaSim, Gazebo 和 Webots 等机器人仿真平台做了定性分析和定量分析, 评估了不同仿真平台在模拟中的准确性^[15]。然而, 随着虚拟现实 (VR) 技术的兴起, 上述仿真平台的缺点也显现出来, 既其在环境渲染和可视化方面还有待提高。

通常情况下, 真实环境是非常复杂的, 具有各种各样的特征。如果仿真平台不利于构建大型复杂场景, 则会大大延长开发时间^[16]。而 VR 技术可以让用户身临其境地感受到虚拟世界, 其作为一种新型的人机交互技术, 逐渐在各个领域中得到广泛的应用。其中, 在机器人研究领域, 研究人员可以模拟机器人的运动和环境变化, 快速验证机器人的算法和控制策略, 降低机器人研发的成本和风险。而虚幻引擎作为虚拟现实技术引擎中的佼佼者, 凭借其逼真的视觉渲染水平和支持动态物理模拟的效果从众多虚拟引擎中脱颖而出。在无人驾驶领域功能较为全面的仿真平台之一——AirSim, 就是基于虚幻引擎开发的。AirSim 为用户提供了丰富的界面, 用户可以通过接口直接检索传感器数据并控制无人机, 可以方便地进行机器人控制、视觉等算法的开发和验证。例如, Ma 等人设计了一种基于 AirSim、ROS 和 PX4 的 SITL 仿真环境, 并进行了四轴飞行器避障的仿真测试^[17]。Shimada 等人也通过 AirSim 平台进行无人机避障的仿真研究, 利用 AirSim 提供的单目相机生成的深度图像与实验结果进行对比, 来评估其所提出的方法的误差和准确性^[18]。党陈晨等人基于 AirSim 仿真平台, 通过对四旋翼无人机跟踪圆形期望轨迹进行了仿真与分析^[19]。朱博顺等人则以 AirSim 仿真平台为基础设计了无人机蜂群的仿真模型和模拟环境, 进而对无人机蜂群的侦查搜索策略进行了分析^[20]。采用 UE 和 AirSim 作为仿真平台的大多数机器人研究者的研究对象都是聚焦于天空和陆地, 在水下机器人领域进行开发研究的相对较少。而虚幻引擎这种适合构建大型复杂场景的开发引擎, 刚好满足了非结构化

的水下场景搭建的需求。

本文基于虚幻引擎 (UE) 构建了一个模拟真实海洋环境的仿真场景, 通过结合 AirSim 和分布式算法仿真平台 (DASP) 提供的控制接口, 以应用于水下机器人动态交互试验的仿真研究。水下机器人动态交互试验环境的构建将进一步开展水下机器人实验环境的测试数据与场景生成方法研究提供强有力的支撑。并在此基础上进一步的攻克在水域场景建模、水下通信建模、地图融合、水中生物建模、数据集生成、测试场景与任务自动生成等方面的技术问题。

1 动态交互平台方案设计

水下机器人动态交互试验环境研究与开发旨在为水下机器人提供动态交互虚拟仿真试验系统平台, 解决水域场景建模、试验场景驱动、智能算法试验数据自动生成、动态任务驱动的试验场景优化、试验任务等效加速等难题, 为水下机器人试验环境的测试数据与场景生成方法研究提供强有力的支撑。该项目拟采用 Unreal Engine + AirSim + DASP 来搭建, 具体方案结构如图 1 所示。

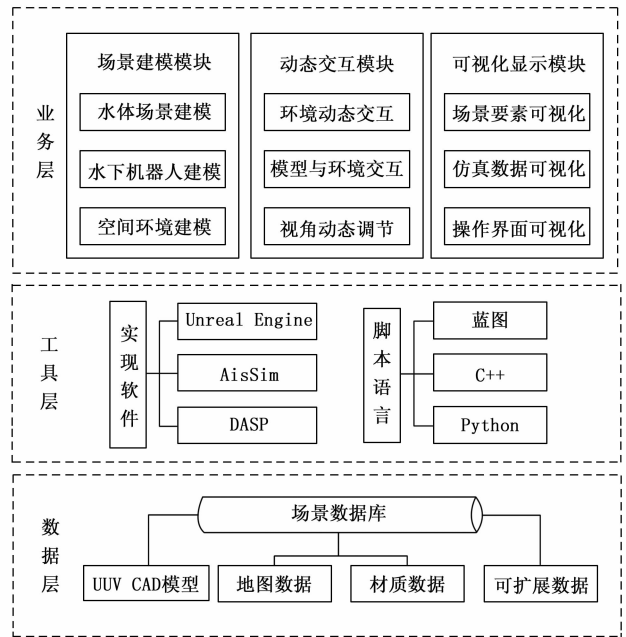


图 1 系统总体结构图

在水下机器人动态试验环境中, 要解决的技术难题还包括以下几个方面:

- 1) 水体模型的建立。需要考虑水体的材质、深度、流速、温度、盐度等特性, 同时需要考虑海底地形、海草、海藻、珊瑚等水下生物的分布情况。在建立水体模型时, 还需要考虑光影效果的模拟, 以及浪花、海浪等自然现象的模拟。
- 2) 水下机器人模型的建立需要考虑到其结构和性能的细节, 以及与水体、障碍物等的相互交互。在建立水下机器人模型时, 需要考虑到其受水动力、浮力等特性, 同时还需要考虑到水下机器人与水体、障碍物等的交互作用, 以便更好地模拟实际水下环境下的运动场景。

3) 场景的生成及数据可视化。在场景生成过程中, 需要考虑场景中的地形、水下物体、水流、气泡等元素的生成, 同时还需要考虑场景中的数据可视化, 以便更好地观察和分析场景中的数据。

4) 场景要素的分析及传感器感知与测量。在场景要素分析过程中, 需要对场景中的各种元素进行分类和统计, 以便更好地进行数据分析。同时, 需要考虑传感器的感知和测量, 以便更好地获取场景中的数据。

5) 水下机器人控制策略实现及其与虚拟系统的数据集生成与可视化展示。在控制策略实现过程中, 需要考虑到水下机器人的运动控制、路径规划、轨迹跟踪、避障等问题, 同时还需要将其与虚拟系统的数据集生成和可视化展示相结合, 以便更好地进行数据分析和场景模拟。

由图 1 可知, 本设计方案涉及到解决数据库和数据共享的问题, 同时需要处理 UE 和 DASP、AirSim 等数据交换接口的问题。此外, 还需要解决业务层面的问题, 例如水体展示、水下机器人的动态交互、场景生成以及数据可视化等问题。其中, 如图 2 所示, 水下机器人的可视化实现需要经历需求分析、三维建模、后期合成、交互可视化开发等多个阶段, 才能完成从设计到发布的整个流程。

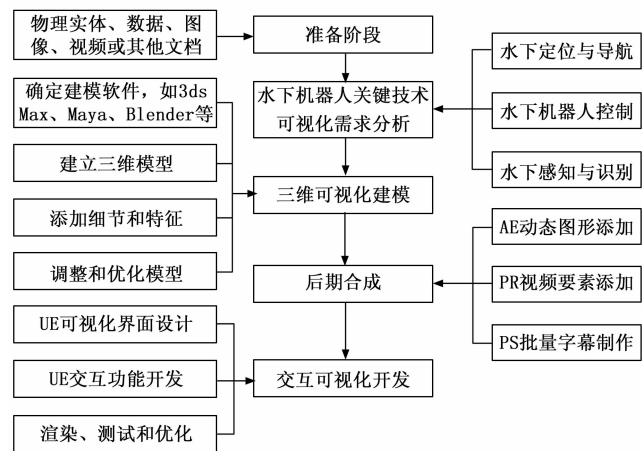


图 2 水下机器人关键技术的可视化实现

2 水域场景建模

为了确保水下机器人在真实环境中的可行性和可靠性, 需要在自然水域环境中进行试验和测试。这种测试通常需要投入大量的人力、物力和财力, 以获取大量的实验数据集。然而, 在自然水域环境中进行测试还存在着一些困难和限制, 比如可能遭遇不利的天气和海洋环境, 或者需要承担昂贵的设备维护成本和风险。与之相比, 虚拟仿真系统则提供了一种更加便捷、高效和安全的测试方式。利用虚拟仿真系统, 可以快速生成各种复杂的水下环境场景, 对无人机进行多次重复测试, 并对其自主性、可靠性、安全性和智能性等方面进行全面评估。此外, 虚拟仿真系统还可以帮助测试人员发现并解决潜在的问题, 减少试验过程中的误差和风险。综合利用自然水域环境测试和虚拟仿真测试的优势, 可以大大提高水下机器人测试的效率和准

确性。同时, 测试结果还可以为后续的研究和应用提供重要的参考和支持。如今, 结合自然场景测试和虚拟仿真测试, 采用虚拟仿真进行场景生成和测试加速的方法, 已成为智能系统和技术测试验证的重要技术路线和手段。

将自然数据集和虚拟仿真数据集结合起来, 最终构建完备的场景库可以有效提高水下机器人测试的效率, 降低测试成本。在虚拟仿真环境中, 水下机器人可以依托自然数据集获得的场景要素及分类等先验信息, 生成尽可能多的测试场景, 其中包括极端场景, 形成虚拟仿真数据集。这些仿真数据集与自然数据集一起使用, 根据等效加速测试相关理论, 生成适合不同水下机器人的测试任务和测试场景, 从而实现虚实结合的对水下机器人安全性、可靠性和智能性等方面的测试和评价。

1) 水体生成及其渲染: 水下机器人动态交互试验系统需要首先建立水域模型。自然界的水体有河流、湖泊和海洋等水体。因此需要在虚拟仿真系统中建立水体模型。自然界的水体因其类型不同, 从而呈现不同的特征属性。在颜色方面, 对于不同区域的水呈现不同的颜色, 河水一般呈浅绿色, 湖水一般呈蓝色, 而海水一般呈深蓝色。在流速方面, 河流由于它是内陆的条带状水域, 其中的水流动较快; 海洋是面状的水域, 海水是相对静止或较缓慢流动的; 湖是内陆的面状或片状的水域, 湖水较缓慢地流动。不同的水体, 不同的场景对水下机器人带来的挑战不同。因此, 需要在虚拟仿真环境中建立海洋、湖泊、江河与岛屿等模型, 并且提供诸多参数的修改功能。比如, 可以调节和显现河流各段的深度、宽度和流速, 以及海洋与湖泊上波浪的波长、振幅、方向和坡度。所建立的水体中的流体模拟可以让水下机器人与水体实现交互。流体还需要对地形做出反应, 例如对于河流流入、沙滩、礁石等浪花和流谱。

2) 光源及其交互: 在虚拟仿真系统中, 需要建立白天和黑夜对于水体的影响。需要建立太阳和月亮等光源对于水体的交互影响。综合考虑天空大气、天空光照和定向光源交互的积雾组件, 编写与渲染写实或风格化的天空、云彩和其他大气雾效果。大气层可以接收来自云朵的体积阴影, 从而实时更新来反映日夜变化的光影效果。建立光影在水面倒影机制, 需要实现水体倒影的效果, 控制好物体与水交互产生的反射、散射。

3) 水体与地图的动态交互: 所建立的水体模型还需要与地图进行交互, 实时提供水下机器人的地理位置数据, 不仅能处理这些数据, 还能有物理、有模拟, 能和其它系统进行动态交互。

4) 水下环境的动态响应: 潜入水下, 看到的地形能够自动修改形状, 从而适应水体系统。在海平面以下, 能看到水下的效果。水下的浮力随着深度在变化, 可以及时反馈到水下机器人上, 为试验和测试评价提供一个接近真实水域环境的场景。

5) 水中生物建模: 河流、湖泊和海洋中有生物存在,

例如各种鱼类、水草、珊瑚各种船只等,通过建模实现场景再现,满足各种水下机器人的试验场景要求。

实现的水域场景如图 3 所示,环境模型来源于虚幻引擎商店的 Oceanology 插件。



(a) 水面场景



(b) 水下场景

图 3 水域场景演示图

3 虚拟仿真系统的水下机器人模型

3.1 水下机器人模型建模

为了在虚拟仿真系统中实现水下机器人的应用,采用一种基于 3 Ds MAX 和虚幻引擎的建模方法。首先,使用 3 Ds MAX 工具建立水下机器人的三维模型,包括机体、推进器等部件。然后,将模型导入到虚幻引擎中,进一步进行建模、纹理贴图、光照调整等操作,以实现更加真实的水下机器人模拟效果。

在建立模型的基础上,还研究了动作捕捉装置、动作捕捉交互模块、VR 模块、核心数据处理模块等方面的内容,以实现水下机器人模型的交互功能和虚拟现实体验。通过动作捕捉技术,可以将水下机器人的运动轨迹和动作记录下来,并将其应用于虚拟仿真系统中,以实现更加真实的模拟效果。同时,VR 模块可以提供更加沉浸式的交互体验,让用户感受到水下机器人的真实感。

为了实现通用方法,建立一套核心数据处理模块,包括数据传输、处理、分析等功能,以支持水下机器人模型的各种交互和控制操作。通过这种方法,可以实现水下机器人模型的通用化和标准化,提高虚拟仿真系统的效率和可靠性。

3.2 虚拟场景感知与识别

水域场景感知是水下机器人移动和操作的前提。水下机器人在真实自然环境中感知环境的传感器主要有光学传感器、声呐传感器和压强传感器等类型。虽然光学传感器受水下光线较弱、分布不均匀以及浑浊度等因素影响,导致图像模糊,但诸多研究工作通过人工光照补偿、图像增强算法等手段提高了图像质量。声呐传感器利用声波对水下目标进行探测、定位和通信,已成为一种水下应用最广

泛的环境感知传感器。为了完成复杂水下环境感知和地图构建,水下机器人通常同时搭载声呐传感器和其它传感器,共同完成测绘和感知目标。受洋流、风浪的影响,水下机器人会产生随机不确定的漂移,这为完成任务带来了诸多困难。而在虚拟仿真系统中,水下机器人要正确地识别不重复场景,同样不是一个十分简单的任务。

虚拟仿真系统中,水下机器人需要感知所处的环境,它可以通过摄像头、声呐传感器、雷达阵列等感知周围环境;然后描述周围环境,进一步去识别和理解所处环境,从而做出正确的判断。因此,不同的场景描述方法,所带来的效果也是不同的。通常而言,图像数据库、地图点的拓扑信息和度量信息、路标点的几何信息一起构成了对场景数据的描述。人类之所以具有强大的场景认知能力并不主要在于具有更强的感官,而是更高效的利用有限的信息并合理地加以推测,例如根据空间连续性假设可以正确地还原被遮挡的墙体等。为使水下机器人具有类似功能需要建立感知信息的结构化表达,可根据视觉特征、空间连续性等对传感信息进行聚类、无人机标注得到稀疏化的表达,然后通过仿人推理过程实现场景重构。

通过渐进增强的方式对全局环境进行建模,这是一种新的解决思路。水下机器人在作业区域内通过局部场景的拼接不断更新全局地图,存储为高分辨率点阵形式。首先,针对生物、移动水下机器人等动态物体采用硬度场来描述。位置越不常发生改变的物体对应的点具有较大的硬度,动态物体的硬度用概率表示。因此,根据硬度场描述的水域环境模型不仅能描述静止物体,还能在线更新物体的动态度,并给出统计意义上的描述。在此基础上,当水下机器人在工作区域内沿任意路径运动时,它根据探测到的障碍信息更新点阵地图,从而随着时间的推移不断强化对全局环境的认知,包括地图的增量式延拓、物体相对位置增强式更新。

4 虚拟仿真试验及其可视化研究

4.1 虚拟测试实现

虚拟测试系统可采用 Unreal Engine+AirSim+DASP 来实现。完成水下机器人的虚拟仿真系统中的测试试验,需要打通虚幻引擎 UE 与 AirSim 以及 DASP 之间的接口。虚幻引擎实现可视化仿真,数据交互通过 AirSim, DASP 实现分布式算法及数据展示等。AirSim 是微软公司开发的基于虚幻引擎的一个开源的跨平台仿真器,它可以用于无人机、无人机车等机器人的物理和视觉仿真。需要确定水下机器人动态交互仿真系统的交互数据类型、结构和模式等,并在此基础上开发用户界面。利用 AirSim 提供的 API 接口,通过编程实现数据读取、天气控制、水下机器人控制等,同时可采用深度学习、计算机视觉、强化学习等人工智能相关的算法,实现水下机器人不同场景的应用。DASP 则用于分布式算法实现,便于多智能体的测试和仿真。

4.2 交互可视化设计与开发

在将水下机器人模型导入虚幻引擎后, 需要进行一系列场景设置, 以确保场景的真实性和完整性。首先需要设定天气环境, 虚幻引擎自带场景模板, 可根据实际需要快速设定适合的天气条件。同时需要设置模型的碰撞效果, 以防止水下机器人在交互漫游中出现穿模现象, 影响真实性。虚幻引擎的可视化编程模块蓝图也是实现交互可视化的关键工具之一。蓝图模块可以通过拖拽、连接等方式, 设计和开发系统界面、漫游方式、功能模块等, 具有良好的可读性和易用性。

除了以上基本设置外, 还需要进行更细致的场景搭建, 例如根据实际需求设置水下设施、海底地形、生物等场景元素。这些元素的设置可以利用虚幻引擎 UE 的编辑器进行调整和细化。

在搭建完整的场景后, 需要进行测试以验证系统的稳定性和可行性。在测试过程中, 可以利用虚幻引擎 UE 的漫游方式进行交互式测试, 观察水下机器人的表现和反应情况, 并记录测试数据, 为后续优化和改进提供参考。

此外, 在场景交互模块中, 还需要考虑水下无人机与场景中的障碍物、海洋生物等的相互作用。为了模拟真实环境中的水流、海浪等自然因素对水下机器人的影响, 可以使用虚幻引擎中的物理引擎进行模拟。这样可以更真实地模拟水下无人机在不同环境中的表现, 提高实验的可靠性。

对于场景数据库的建立, 需要考虑到水下环境的复杂性和多样性。在建立场景数据库时, 需要收集和整理相关的水下环境数据, 包括水深、水温、水质、潮汐、水流等信息, 以及各种海洋生物的生态环境数据。这些数据需要通过多种方式获取, 例如测量、探测、摄像等技术。在建立场景数据库时, 需要将 these 数据进行整合和标准化, 建立一个完整的、具有可扩展性的数据库。

在使用虚幻引擎进行水下机器人交互可视化时, 还需要考虑到数据可视化的问题。数据可视化可以通过各种方式实现, 例如图表、动画、虚拟现实等。在水下机器人交互可视化中, 可以通过图表等方式来展示机器人传感器获取到的各种数据, 例如水温、水深、水质等。同时, 也可以通过动画等方式来展示机器人在水下环境中的运动轨迹、操作过程等。而虚拟现实技术可以使用户更加身临其境地体验水下环境, 从而更好地理解水下机器人的工作原理和特点。

5 仿生机器鱼跟踪游动实例

本实例将使用前文设计的水下机器人动态仿真平台, 对仿生机器鱼跟踪直线、圆形曲线、四叶草曲线进行仿真试验。使用线性二次型调节器 (LQR) 作为控制器来模拟水下机器人的轨迹跟踪问题, 换言之是模拟一个连续系统的状态量跟踪一个期望轨迹。然而, 在实际应用中的运动轨迹都是由一个个离散点组成的离散轨迹, 因此先对 LQR 控制器进行离散化, 得到一个离散线性二次型调节器控

制器。

将水下机器人的位置和速度设为状态量: $\mathbf{x} = [\mathbf{p}, \mathbf{v}]^T$, 将加速度设为输入量: $\mathbf{u} = \mathbf{a}$, 则离散控制系统的状态空间方程可以表示为:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (1)$$

$$\text{其中: } \mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} p_x(k) \\ p_y(k) \\ v_x(k) \\ v_y(k) \end{bmatrix}, \mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} a_x(k) \\ a_y(k) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ dt & 0 \\ 0 & dt \end{bmatrix}.$$

离散 LQR 控制器的控制策略的是尽可能地使得仿生机器鱼跟踪目标轨迹的状态误差足够小, 同时保持控制量的输入也尽可能小, 以此来保证控制的稳定性。因此, 定义如下目标函数:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=k_0}^{\infty} \mathbf{x}^T(k) \mathbf{Q} \mathbf{x}(k) + \mathbf{u}^T(k) \mathbf{R} \mathbf{u}(k) \quad (2)$$

式中, \mathbf{Q} 是一个半正定矩阵, 约束系统的状态成本, \mathbf{R} 是一个正定矩阵, 约束系统的输入成本。根据 LQR 理论, 将控制律设为 $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t)$ 可以得到最优响应。为使得控制系统趋于稳定, 设计一个常量矩阵 \mathbf{P} , 可以得到最优状态反馈矩阵 \mathbf{K} :

$$\mathbf{K} = (\mathbf{R} + \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \quad (3)$$

式中, \mathbf{P} 为 Riccati 代数微分方程的解:

$$\mathbf{P} = -\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{B} (\mathbf{R} + \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{Q} \quad (4)$$

令 $\mathbf{Q} = \text{diag}(5, 5, 5, 5)$, $\mathbf{R} = \text{diag}(0.5, 0.5)$, 仿真实验效果如图 4 所示。

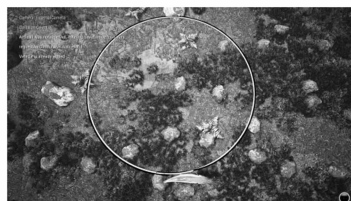
图 4 中目标轨迹为白色, 跟踪轨迹为黑色。从图中可以看出, LQR 控制器跟踪直线和无角度突变的圆形曲线轨迹时效果较好, 在跟踪有角度突变的四叶草曲线轨迹时, 由于控制器的滞后性, 跟踪轨迹发生了明显得偏移。本实例设计的 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} 矩阵参数具有一般性, 可以通过调节 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} 矩阵的参数对控制器的跟踪效果进行优化。

6 结束语

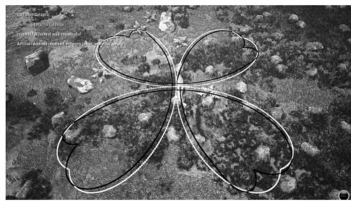
本文提出了一种水下机器人动态交互测试的仿真平台设计与开发的方案。该方案结合了虚拟现实技术中的 Unreal Engine、AirSim 和 DASP, 为水下机器人开发测试提供了一种新的解决方案。本文对仿真平台的方案设计、场景建模、三维模型构建、可视化开发以及虚拟仿真实现进行了详细介绍, 使得读者能够清晰了解平台的实现过程。特别地, 本文针对平台进行了 LQR 控制仿生机器鱼跟踪目标轨迹的实验, 对平台的可视化和仿真有效性进行了实例效果展示。通过本文的研究, 我们可以看到该仿真平台在交互性、真实性、可视化和仿真效果等方面表现出较高的优势, 为水下机器人的开发测试提供了一种高效、精准、可



(a) 直线轨迹



(b) 圆形曲线轨迹



(c) 四叶草曲线轨迹

图 4 仿生机器鱼跟踪游动实例

靠的解决方案。未来,该平台还可以在海洋环境监测、海洋资源开发等领域得到更广泛的应用。

参考文献:

- [1] AVILASH S, DWIVEDY S K, ROBI P S. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 181: 145 - 160.
- [2] LIU W J, BAI K, HE X M, et al. FishGym: a high-performance physics-based simulation framework for underwater robot learning [C] // 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2022: 6268 - 6275.
- [3] HUANG X. Design and implementation of intelligent robot experimental platform based on virtual simulation technology [C] // 2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), 2022: 377 - 381.
- [4] KROTKOV E, HACKETT D, JACKEL L, et al. The DARPA robotics challenge finals; Results and perspectives [J]. *Journal of Field Robotics*, 2017, 34 (2): 229 - 240.
- [5] KOENIG N, HOWARD A. Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator [C] // 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. 04CH37566), 2004, 3: 2149 - 2154.
- [6] MICHEL O. Webots TM: Professional mobile robot simulation [J]. *Journal of Advanced Robotics Systems*, 2004, 1 (1): 39 - 42.
- [7] ROHMER E, SINGH S P N, FREESE M. V-REP: a versatile

and scalable robot simulation framework [C] // 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013: 1321 - 1326.

- [8] MONTAQIM A. Offline programming software for industrial robots from RoboDK offers hundreds of virtual industrial robots from top robotics companies [N]. *Robotic and Automation News*, 2015.
- [9] YOON D, LIN M, YOON J, et al. Research on the robot platform construction method based on the simulation [C] // 2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE), 2019: 413 - 416.
- [10] YAN Z W, HAN L, LI X D, et al. Event-Triggered formation control for time-delayed discrete-time multi-agent system applied to multi-UAV formation flying [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2023, 360 (5): 3677 - 3699.
- [11] TURSUNBEK I, SHINTEMIROV A. Modeling and simulation of spherical parallel manipulators in CoppeliaSim (V-REP) Robot simulator software [C] // 2020 International Conference "Nonlinearity, Information and Robotics" (NIR), 2020.
- [12] WESTERN A, HAGHSHENAS-JARYANI M, HASSANALI M. Golden wheel spider-inspired rolling robots for planetary exploration [J]. *Acta Astronautica*, 2023, 204: 34 - 48.
- [13] KUMAR S, PARHI D R. Multi-target trajectory planning and control technique for autonomous navigation of multiple robots [J]. *ISA Transactions*, 2023: 15 - 26.
- [14] ASLAN E, ARSERIM M A. Development of push-recovery control system for humanoid robots using deep reinforcement learning [J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2023, 102167.
- [15] FARLEY A, WANG J, MARSHALL J A. How to pick a mobile robot simulator: a quantitative comparison of CoppeliaSim, Gazebo, MORSE and Webots with a focus on accuracy of motion [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2022, 120, 102629.
- [16] PENG X B, ANDRYCHOWICZ M, ZAREMBA W, et al. Sim-to-real transfer of robotic control with dynamics randomization [C] // 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2018: 3803 - 3810.
- [17] MA C X, ZHOU Y, LI Z Q. A new simulation environment based on airsims, ROS, and PX4 for quadcopter aircrafts [C] // 2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), 2022: 486 - 490.
- [18] SHIMADA T, NISHIKAWA H, KONG X B, et al. Pix2Pix-based monocular depth estimation for drones with optical flow on AirSim [J]. *Sensors*, 2022, 22 (6): 2097.
- [19] 党陈晨, 郑凯东. 基于 AirSim 平台的无人机轨迹跟踪仿真 [J]. *信息技术与信息化*, 2022, 271 (10): 91 - 94.
- [20] 朱博顺, 王成钢, 井田, 等. 基于 AirSim 平台的无人机蜂群侦察搜索仿真与分析 [J]. *计算机应用*, 2021, 41 (S1): 196 - 201.