

港口数字孪生系统水域环境建模与可视化关键技术研究

管月¹, 李阳东^{1,2*}, 喻朝智¹

(1.上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2.上海市河口海洋测绘工程技术研究中心, 上海 201306)

摘 要: 着眼于数字孪生技术在港口管理领域的创新应用,深入探讨了海洋港口数字孪生的核心技术即海面波浪仿真、水下雾效果仿真以及潮汐变化仿真。研究过程中,首先利用3D Studio Max软件精心构建模型,并在Unity3D平台上成功搭建出完整的码头数字模型,实现了从现实物理世界到虚拟数字空间的精确映射与实时反馈。构建的海洋港口数字孪生系统具备多维感知能力与高效协同特性,旨在加深人类对海洋的认知,提高对海洋的持续监测能力,并以可持续的方式促进海洋与港口资源的科学管理与利用。

关键词: 数字孪生;港口管理;海洋信息化;三维场景;Unity3D

中图分类号:U691⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-0239(2024)06-0082-07

0 引言

数字孪生是指通过将现实环境中的物理实体一一映射到虚拟空间,实现对物理实体的实时、全方位的描述和仿真,完成对物理实体的监控、诊断、预测和决策。随着信息化、数字化社会的持续推进,数字孪生逐渐成为社会各界关注的热点。数字孪生技术最初起源于航天军工领域,但近年来已经逐步向智能制造、智慧城市等行业发展,它能实现机理描述、异常诊断、风险预测、决策辅助等应用,正成为推动企业数字化转型和数字经济发展的的重要工具。

港口是国家重要的基础设施和综合交通运输体系的重要枢纽,亦是国际贸易和区域经济合作的重要节点。近年来,港口正在从自动化向智能化、智慧化方向发展。为促进智慧港口建设的智能化发展,在加快我国交通运输体系的建设进程中,国家政策也长期对港口行业进行大力支持。2022年9月,交通运输部印发《交通运输领域新型基础设施建设行动方案(2021—2025年)》,将智慧港口建设

列为主要任务,要求港口管理单位配合社会各界推进港口自动化建设。在港口信息化建设方面,国外通过人工智能、船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)以及云计算等大数据手段开展港口信息平台建设,提升了港口的现代化水平。国内港口的信息化平台建设也处于飞速发展阶段^[1]。当前港口信息化主要由虚拟现实融合驱动,将信息物理系统作为结构框架,采用物联网、大数据、云计算和人工智能等新信息技术,协调车辆、船舶、货物、港口和人员5个基本要素,实现智能监控、智能决策和自动装卸,进而提供高安全、高效率和高质量的现代物流服务。例如,在港口管理服务方面,WANG等^[2]、PAGANO等^[3]利用数字化服务对港口提出建议并实现信息化。黄骅港煤炭码头则利用虚拟现实技术构建了港口管理系统^[4]。在物流调度业务方面,HOFMANN等^[5]、李飞等^[6]均提出采用基于数字孪生的方法全面提升港口数字化水平。另外,有不少研究关注于港口设备系统的数字孪生系统,如基于视觉化工具库(Visualization Toolkit, VTK)渲染引擎搭建起重机数字孪生平

收稿日期:2023-12-12。

作者简介:管月(1998-),女,硕士,主要从事海洋信息化方面的研究。E-mail: yueguan0107@163.com

*通信作者:李阳东(1977-),男,副教授,博士,主要从事卫星海洋学、海洋地理信息系统和海岸带环境水动力学模拟等方面研究。E-mail: ydli@shou.edu.cn

台^[7]、集装箱码头数字孪生系统^[8]和客货滚装港口数字孪生系统^[9]等。

目前在海洋数字孪生应用最为活跃的领域——港口数字孪生方面,大部分研究仅针对如何提高港口的管理服务、物流效率、设备系统运行能力等进行,数字孪生主要围绕陆域的车、船、货、港、人5大要素展开,而对港口水域环境的建模与可视化的关注较少。然而对在地理上既涉及陆域又涉及海域的港口而言,其海域环境的数字孪生亦不可忽略。

因此,本文重点研究港口数字孪生系统水域环境的建模与可视化方面的关键技术,包括海面波浪仿真技术、水下雾效果仿真技术和潮汐变化仿真技术。在此基础上,进一步利用Unity3D对港口进行三维建模,实现港口以及附近海域环境信息的可视化,并开发出相应的数字孪生港口案例应用,进一步为海洋数字孪生技术研究提供支撑。

1 关键技术研究及难点解决

1.1 海面波浪仿真

海面波浪即海浪是一种主要由风引起的海水波动现象。由于产生海浪的风力和方向会随着时间的空间而变化,因此海浪被认为是一个随机过程^[10]。海浪的建模和渲染已在电影、游戏、数字海洋和虚拟战场环境等领域得以广泛应用。海浪本身具有实时性、动态性、多变性、多维性和模糊边界等特征^[11],这使得基于真实海洋环境的波浪仿真研究相对不够成熟。随着图形处理硬件(Graphics

Processing Unit, GPU)技术的快速发展,增加海浪的真实感并实现海浪的快速绘制是一个亟需解决且可行的问题,尤其是在模拟船舶等水面运动物体与海面双向相互作用的大型海洋场景方面显得尤为重要^[12]。

对海浪进行建模,首先可在场景中根据海域的大小按比例创建海平面,并将其定位于合适的位置,然后进行海面渲染。海面渲染主要考虑海浪、平面反射、高光反射、折射等效果(见图1),具体通过海浪模拟、增加光照效果、添加反射与折射、边界处理等步骤实现。

①海浪模拟

海浪模拟是用叠加多个正弦波的方法^[13]模拟海面受风影响产生的波浪。海浪建模需要用光照和顶点变换来体现,最简单的海浪模拟波形公式一般采用:

$$y = A \sin(\omega x + \varphi) + k \quad (1)$$

式中: y 为波的顶点高度; A 为振幅,表示水平面一波峰的高度; $(\omega x + \varphi)$ 为相位,反映变量 y 所处的状态; φ 为初相,即 $x = 0$ 时的相位,在坐标系中表现为图像的左右移动; k 为偏距,在坐标系中表现为图像的上移或下移; ω 为角频率,控制正弦周期(单位弧度内震动的次数), ω 值越大波长 L 越小,两者关系为 $\omega = \frac{2\pi}{L}$,波长 L 为波的周期,也是波峰和相邻波峰之间的距离。

通过改变式(1)中各个参数可以修改波的基本形状,但是这个波是静止的,并不随着时间的推移

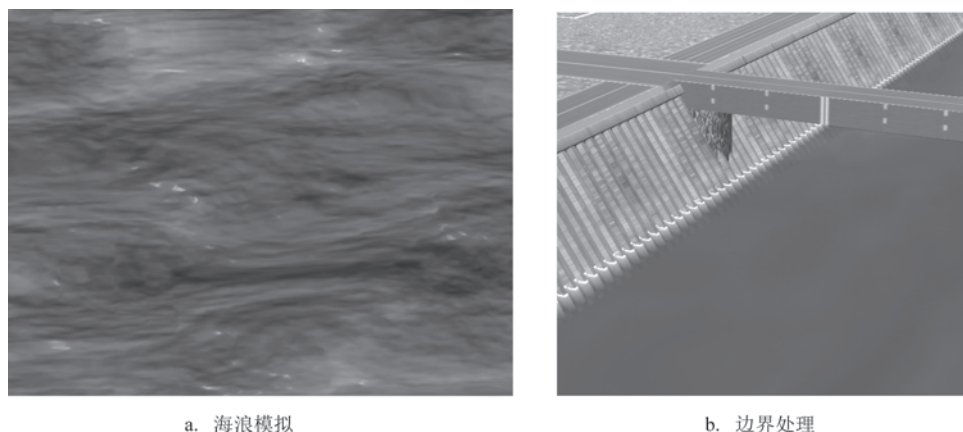


图1 海浪仿真
Fig.1 Wave simulation

而运动。若要控制波的运动,需要添加时间参数 t 和速度参数 s 。一般使用相位常数 φ 来表示速度,公式为:

$$\varphi = s \times \frac{2\pi}{L} = s\omega \quad (2)$$

采用下式模拟海浪:

$$y = A\sin(\omega x + t\varphi) + k \quad (3)$$

实际上海浪属于复杂波,即可看成是由若个正弦波叠加形成,可采用下式进行模拟:

$$y = \sum A_i \sin(\omega_i x + t\varphi_i) \quad (4)$$

式中: i 表示正弦波的下标。由于海浪是不规则的,为使结果更加真实,可以在上述模拟的海浪中增加噪声,使扰动更多。

②增加光照效果

光照模型是图形真实感渲染的基础。为增加海浪渲染的真实感,可以添加光照并让海面与光进行交互。这里的交互主要是指海面对阳光和灯光的反射,可以通过法线贴图移动进而实现光照效果。具体可先计算出从切线空间到世界空间的变换矩阵,然后采样出法线贴图上的法线向量,通过一定的计算将法线向量从切线空间变换到世界空间并添加扰动(这样可以体现出一直在变化的光照),再计算光照颜色。计算光照颜色主要采用PHONG^[14]光照模型,它是20世纪70年代出现的一种渲染逼真图像的方法,用于模拟光与表面的交互。该模型由3种反射光组成,分别是环境光、漫反射光、镜面反射光,通过分别计算出这3种光并叠加,可得到最终的光照颜色。

考虑光照的同时还要考虑阴影。阴影可以通过抓取阴影贴图并采样来实现暴露在环境光中模型的阴影效果。因为物体表面不平整,所以当光线穿过透明物体时,光线没有发生平行折射而出现漫反射,投影表面会出现光子分散即焦散。仿真时要实现焦散效果,可通过添加贴图和扰动,同时为使效果更符合实际,可通过调整参数让波浪越高的地方亮度越高。

③添加反射与折射

当光线传播到海平面上,一部分光线会发生反射,另一部分则折射到水底再传播回摄像机。从海

平面与摄像机的距离来看,光线在离海平面较近的地方折射较强,反之则反射较强。从呈现结果看,表现为近处透明度小,远处透明度高,场景越远颜色越深。具体实现时可将顶点的投影坐标转化为UV坐标,对折射和反射贴图进行采样,使用菲涅尔反射^[15]并调整折射(水底的光)和反射(水上的光)的比例,产生逼真的水面光影效果。

④边界处理

这里的边界是指海洋与陆地的分界线。三维场景中的边界效果是根据海面和陆地的深度差决定的,两者交界处深度差最小,离岸边越远则深度差越大。处理时可通过颜色对比来体现,具体为深度差越小,颜色越暗,而水深越大,则越接近白色。实现方法是使用深度图直接检测出交界边缘,通过采样得到深度值,计算深度偏移并线性插值计算水的颜色,深度偏移越大,水的颜色越深;再根据泡沫的偏移计算泡沫颜色,偏移值表示泡沫的浓度,偏移值越大,泡沫的颜色越浓,这样便能产生水边海浪泡沫的效果。

1.2 水下雾效果仿真

对于海洋水体而言,水下雾效果主要表现在两个方面:一是从水面以下观察水下物体时,物体离摄像机越远越模糊,随着距离的加大,物体越来越不清晰,最终彻底融入背景中;或者从水面以下向水面以上进行观察时,太阳在摄像机视角范围内会出现体积光的效果。二是从水面以上观察水下物体时,摄像机视角内的物体由近到远会逐渐模糊,直至看不清。

水下雾效果仿真的具体实现是判断摄像机位置,当摄像机沉没到水面以下时,进行水下后期处理,打开雾效,切换到水下材质,处理材质会屏蔽场景中不在水下的部分来创建部分水下视图,从而使从水面进入水下的过渡更加自然。

实现雾效果有很多数学模型,在Unity中有3种模式^[16]:

①线性模式(Linear),有fogStartDistance(start)和fogEndDistance(end)两个可调参数。雾从start到end越来越浓,end之后为最大浓度,计算方法为 $\frac{\text{end} - |\text{dist}|}{\text{end} - \text{start}}$,dist表示当前要渲染的片元距离摄像机

的距离;start表示一个特定的距离值,如果片元与摄像机的距离小于start,雾化因子表示为1;end表示一个特定的距离值,如果片元与摄像机的距离超过end,雾化因子为0。

②指数模式(Exponential),有1个可调参数即fogDensity,取值范围为0~1,表示雾的浓度,计算方法为 $e^{-\text{density}|\text{dist}|}$,其中density为浓度,dist为相机距离。

③指数平方模式(Exponential Square),有1个可调参数即fogDensity,值越大表示雾越浓,计算方法为 $e^{-(\text{density} \times \text{dist})^2}$,其中density为浓度,dist为相机距离。

由于现实世界的雾不完全是线性变化的,若希望模拟出更真实的雾,可采用指数模式,其非线性的计算公式通常可以取得比线性公式更好的效果。此外,在场景中使用雾不但可以增强真实感,特定情况下还能优化性能。如当物体离摄像机足够远时,由于雾足够浓导致看不到物体,这时就不必对物体着色进行详细计算,从而可大大提高渲染效率。本文实现的水下雾效果如图2所示。



图2 水下雾效果

Fig.2 Underwater fog effect

1.3 潮汐变化仿真

潮汐是指由天体(主要是月球和太阳)引力引起的海水周期性反复运动。潮汐会引起海洋和港湾口的水位变化,并产生振荡的潮汐流。潮汐变化仿真可以通过一定的时间间隔获取实测潮位或预报潮位,并将其反映在海平面高度上。如真实潮位数据无法获取,在有港口区域站点高低潮位数据时,可以采用文献[17]的方法计算预报潮位。具体计算过程为:通过埃尔米特三次插值方法^[18]对港口区域高低潮数据进行插值得到近似的逐时潮位;使用最小二乘法^[19]对逐时潮位进行调和分析,求解分

潮调和常数;根据调和常数进行潮汐预报。

2 港口数字孪生系统案例

在相关关键技术研究的基础上,利用Unity3D引擎建立了一个港口数字孪生系统。系统对港口的陆域和海域环境及相关设施进行可视化,并实现港口业务流程模拟、海平面潮汐变化预测、场景交互等功能。系统开发主要涉及三维建模、场景搭建、模型渲染和动画脚本编写等工作。

2.1 三维建模

①港口设施类建模

船舶:根据装载货物创建不同的船舶模型,如普通货船、集装箱船、沙石船等,例如货轮的三维模型制作见图3。

岸桥:岸桥建模分为主体、伸缩的绳索和抓取的钩子3部分。主体部分根据集装箱摆放位置移动,绳索可以根据脚本控制进行伸缩,抓取的钩子设置碰撞组件来抓取集装箱。

塔吊:塔吊建模方式与岸桥相同,但形状不同,它是在堆场区域将集装箱一个个装载到车辆上或者从车辆上卸下集装箱摆放到指定区域,根据脚本控制可以自由选取特定位置的集装箱。

集装箱:集装箱具有不同的种类和尺寸,根据现实需要,构建不同类型的集装箱,在港口区域用机械设备进行装卸搬运,通过船舶、卡车等多种方式进行运输。

车辆:构建不同类型的车辆,如搬运集装箱的卡车、进行来回巡逻的车等。

关卡:停车场设置关卡模型,车辆通过关卡进出停车场。

码头:码头是港湾内供停船时装卸货物的建筑,构建顺岸式码头,即码头前沿线与自然岸线平行,将船舶模型停靠在码头,方便车辆装卸货物。

其他:包括道路、房屋、监控探头、环境监测设备、潮位仪等。

建模主要采用3D Studio Max软件,这是由Autodesk公司开发的一款三维建模、渲染和动画软件,建模方式主要方式采用Polygon(多边形)建模,通过点、线和面进行构建与修改。这种建模方式的

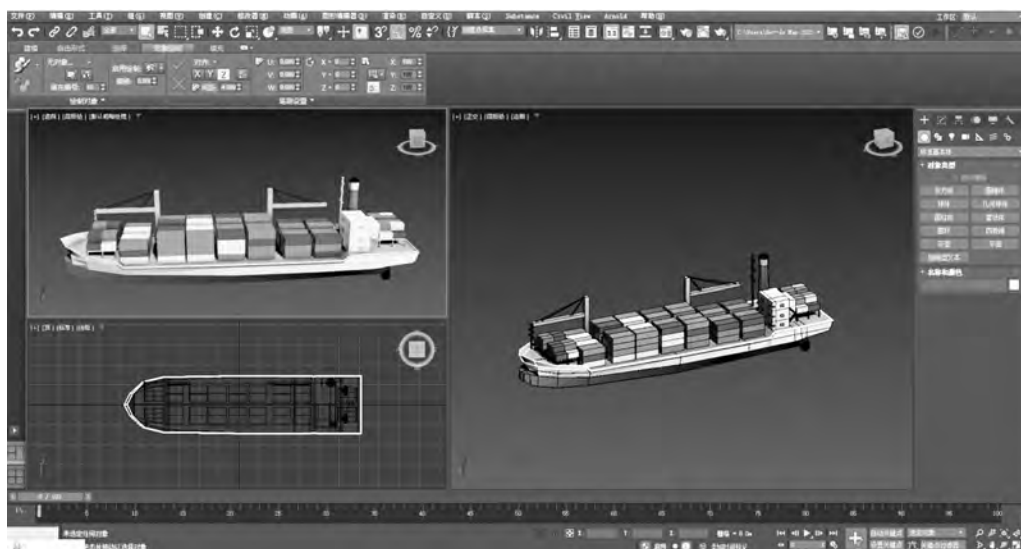


图3 货轮的三维模型

Fig.3 A three-dimensional model of freighter

优点是模型布线容易控制,可以在模型上进行任意修改,且建模数据量小,容易操作。在构建物体的三维模型时,参照物体的实际大小,按1:1比例构建三维模型。

②港口海域环境建模

地形地貌:港口区域的地形地貌包括陆地地形和海底地形两部分。建模一般可先获得地形数据,然后通过处理得到数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),再生成高度图并导入 Unity3D,这样可快速构建地形模型。为得到更真实的地貌效果,还要在陆域地形上贴上遥感影像图,并构建必要的关键地物。

水体环境(水体、波浪等):利用海浪模拟、潮汐变化等关键技术构造出整体的水域环境,实现整个港口水域与陆域的衔接,完成整个海域场景的三维构建。

2.2 Unity 场景搭建

三维模型构建好后,便可以根据目标集装箱码头的布局,在 Unity3D 软件中搭建 1:1 比例的码头三维数字化场景。步骤如下:

①在陆域场景中,对设备、道路、建筑等模型进行材质渲染,使其具有真实的外观效果;

②在海域场景中,新建平面,将模拟海面波浪材质渲染在平面上,以此模拟海平面;

③水下雾效果实现。将开启雾效果的脚本绑定在摄像机上,当摄像机进入水下时开启雾效果,离开水面后则关闭;

④潮汐变化仿真。利用前述潮汐预报方法获得潮位并通过脚本动态绑定在海平面上,以实现海平面随潮位的变化;

⑤模拟天空背景。通过 Unity3D 自带的天空盒插件来模拟天空,使港口虚拟三维场景与真实港口具有相似的视觉效果。

当港口虚拟三维场景搭建完毕后,进行动画开发,挂载 C# 脚本,控制模型的移动。部分关键动画如下:

①车辆动画。可分为 4 个方面:1)码头装货作业。车辆从停车场到堆场装载集装箱,前往码头卸载,循环往复,待船装满,车辆返回停车场;2)码头卸货作业。车辆从停车场到码头装载集装箱,前往堆场卸载,循环往复,待船卸货完成,车辆返回停车场;3)转运作业。由车辆将需要的集装箱从一个堆场向另一个堆场转运;4)巡逻。车辆在道路上按规定的线路来回移动。

②设备动画。设备包括塔吊、岸桥和起重机,分别在堆场和码头运行和平移,按顺序夹取集装箱并运送装载到车辆上,或从车辆上夹取卸载集装箱并按顺序摆放到对应堆场或者船舶甲板位置。

③海平面动态变化动画。为了实现真实的海

水潮涨潮落,分不同时间间隔定时触发海平面位置更新事件。当该事件触发时,根据对应时刻计算潮位并用于海平面位置的更新,从而模拟海水真实的涨潮和落潮。

④场景交互动画。用户可以使用鼠标、键盘等在虚拟场景中自主进行缩放、平移、旋转等操作,具体实现是将编写交互的脚本挂载到摄像机

上,用户可按照规定操作,观察更多的港口码头细节。

关键动画开发好后,就可以根据港口实际业务流程进行进一步的流程开发,以模拟真实的作业场景(如港口船舶的装卸货场景,内陆与港口之间的集疏运场景等)动画。实际作业场景由业务数据进行驱动。构建的港口三维场景见图4。



图4 港口三维场景

Fig.4 A three-dimensional scene of the port

3 结论

本文首先对港口数字孪生系统开发中的海面波浪仿真、水下雾效果仿真和潮汐变化仿真等关键技术进行了研究,然后在Unity3D引擎上实现了一个港口数字孪生系统案例。该案例采用3D Studio Max按1:1比例针对港口设施和地形环境的三维模型进行模型构建,并以此搭建港口区域的三维场景,真实地还原港口实际场景和作业过程。通过该系统,用户可方便快捷地了解港口整体情况,为高效、可靠地管理运行港口作业提供有力保障。

参考文献:

- [1] 李效明, 钱文军. 数字孪生技术在港口信息化建设中的运用[J]. 中国水运, 2022(4): 48-51.
- LI X M, QIAN W J. Application of digital twin technology in port information construction[J]. China Water Transport, 2022(4): 48-51.
- [2] WANG K, HU Q Q, ZHOU M J, et al. Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports[J]. Case Studies on Transport Policy, 2021, 9(3): 1298-1312.
- [3] PAGANO P, ANTONELLI S, TARDO A. C-Ports: a proposal for a comprehensive standardization and implementation plan of digital services offered by the "Port of the Future" [J]. Computers in

Industry, 2022, 134: 103556.

- [4] 苏志国. 黄骅港煤炭码头三维可视化管理系统研究[J]. 黑龙江科技信息, 2014(34): 122-124.
- SU Z G. Study on 3D visualization management system of Huanghua port coal terminal[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2014(34): 122-124.
- [5] HOFMANN W, BRANDING F. Implementation of an IoT- and cloud-based digital twin for real-time decision support in port operations[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(13): 2104-2109.
- [6] 李飞, 彭捷, 布少聪, 等. 数智算法驱动的集装箱码头数字孪生业务可视化运营[J]. 港口科技, 2022(10): 9-17.
- LI F, PENG J, BU S C, et al. Visualization operation of container terminal digital twin business driven by digital algorithm[J]. Port Science & Technology, 2022(10): 9-17.
- [7] 张氢, 江伟哲, 秦仙蓉, 等. 基于VTK可视化引擎技术的港口起重机械数字孪生系统研究及应用[J]. 起重运输机械, 2020(17): 69-74.
- ZHANG Q, JIANG W Z, QIN X R, et al. Research and application of port crane digital twin system based on VTK visualization engine technology[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2020 (17): 69-74.
- [8] 陈培, 刘超, 蔡黄河. 基于Unity 3D的集装箱码头数字孪生系统设计[J]. 港口科技, 2021(7): 8-10.
- CHEN P, LIU C, CAI H H. Design of container terminal digital twin system based on Unity 3D[J]. Port Science & Technology, 2021(7): 8-10.
- [9] 魏世桥, 王东魁, 张煜, 等. 客货滚装港口数字孪生智慧运作模式

- [J]. 港口装卸, 2020(1): 41-45.
- WEI S Q, WANG D K, ZHANG Y, et al. Digital twin intelligent operation mode of the passenger-cargo RORO port[J]. Port Operation, 2020(1): 41-45.
- [10] 施伟, 侯海平. 三维随机海浪模拟研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2006(4): 410-413.
- SHI W, HOU H P. Study on simulation of 3-D random waves[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2006(4): 410-413.
- [11] 李波. 复杂环境下的海面实时建模与仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- LI B. Research on ocean surface modeling and simulation in complex environment in real-time[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [12] 刘磊, 丁剑飞, 李飞, 等. 大规模海浪交互模拟[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(12): 117-121.
- LIU L, DING J F, LI F, et al. Simulation of the large-scale ocean scenes with interacting objects[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(12): 117-121.
- [13] 孙默涵. 基于 N-S 物理模型的高真实感海浪三维可视化研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.
- SUN M H. Research on 3D visualization of high realistic ocean waves based on N-S physical model[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [14] PHONG B T. Illumination for computer generated pictures[J]. Communications of the ACM, 1975, 18(6): 311-317.
- [15] 刘淑婉. 三维海洋场景模拟技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- LIU S W. Research on 3D ocean scene simulation technology[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [16] 吴亚峰, 于复兴, 索依娜. H5 和 WebGL 3D 开发实战详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- WU Y F, YU F X, SUO Y N. Detailed explanation of H5 and WebGL 3D development in practice[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2017.
- [17] 李阳东, 李仁虎, 常亮. 基于高、低潮的潮汐调和常数提取及潮汐预报[J]. 海洋湖沼通报, 2020(2): 55-63.
- LI Y D, LI R H, CHANG L. Tidal harmonic constants extraction and tidal prediction based on high and low tidal waters[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(2): 55-63.
- [18] 王莹辉. 高低潮数据的潮汐分析及预报方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- WANG Y H. Study on tidal analysis and forecasting methods of high and low tide data[D]. Nanjing: Hohai University, 2008.
- [19] 黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.
- HUANG Z K, HUANG L. Tidal theory and calculation[M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2005.

Research on key technologies for modeling and visualization of water environment in Port Digital Twin System

GUAN Yue¹, LI Yangdong^{1,2*}, YU Chaozhi¹

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Estuarine and Oceanographic Mapping, Shanghai 201306, China)

Abstract: This paper focuses on the innovative application of digital twin technology in port management, delving into the core technologies of marine port digital twinning: simulation of sea surface waves, underwater fog effects, and tidal variations. In the research process, model was carefully constructed using 3D Studio Max software, and then a complete digital model of the dock was successfully built on the Unity3D platform, achieving precise mapping from the real physical world to the virtual digital space and providing real-time feedback. The target is to build a marine port digital twinning system with multidimensional perception and efficient collaborative characteristics, aimed at deepening human understanding of the ocean, enhancing continuous monitoring capabilities, and promoting the scientific management and sustainable use of marine and port resources.

Key words: digital twin; port management; marine information technology; 3D scene; Unity3D