

1-8-2019

Development of Interactive Simulation of Dive and Underwater Operation Process of Jiaolong

Xiaoxi Zhang

Key Laboratory of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Yin Yong

Key Laboratory of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Mincang Liang

Key Laboratory of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Development of Interactive Simulation of Dive and Underwater Operation Process of Jiaolong

Abstract

Abstract: In order to solve the problems of difficult implementation and high safety risk in the practical training of deep submarine work at present, the simulation system of *dive and underwater operation process of jiaolong* is designed based on the virtual reality technology, which is not limited by time and place. The 3D modeling technology is used to construct the 3D model of the key structures such as the *jiaolong* and the mother ship. A mathematical model of A frame motion is established to simulate the motion process. Human-computer interaction and roaming are achieved by using 3D interactive technology, virtual roaming technology and collision detection technology; *From the prospective of users' experience, actual dive and underwater operation process are simulated to realize the maneuvering interactive function.* The test results show that the simulation system basically meets the training needs of the manned deep submersible at present.

Keywords

jiaolong, Unity3D, virtual reality, interaction

Recommended Citation

Zhang Xiaoxi, Yin Yong, Liang Mincang. Development of Interactive Simulation of Dive and Underwater Operation Process of Jiaolong[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7): 2715-2721.

蛟龙号下潜及水下作业过程的交互仿真开发

张晓曦, 尹勇, 梁民仓

(大连海事大学航海动态仿真和控制交通部重点实验室, 大连 116026)

摘要: 为解决当前从事深潜工作的实操训练存在实施难、安全风险大等问题, 基于虚拟现实技术设计不受时间和地点限制的蛟龙号下潜及水下作业过程的仿真系统。运用三维建模技术构建蛟龙号、支持母船等关键结构的三维模型; 建立 A 型架的运动数学模型, 模拟其运动过程; 结合三维交互技术、虚拟漫游技术以及碰撞检测技术实现人机交互与漫游; 从用户体验角度出发, 对实际的下潜及水下作业过程进行仿真实现操纵交互功能。经测试, 该仿真系统基本满足目前对载人深潜器潜航员的训练需求。

关键词: 蛟龙号; Unity3D; 虚拟现实; 交互

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 07-2715-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807035

Development of Interactive Simulation of Dive and Underwater Operation Process of Jiaolong

Zhang Xiaoxi, Yin Yong, Liang Mincang

(Key Laboratory of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to solve the problems of difficult implementation and high safety risk in the practical training of deep submarine work at present, the simulation system of *dive and underwater operation process of jiaolong* is designed based on the virtual reality technology, which is not limited by time and place. The 3D modeling technology is used to construct the 3D model of the key structures such as the *jiaolong* and the mother ship. A mathematical model of A frame motion is established to simulate the motion process. Human-computer interaction and roaming are achieved by using 3D interactive technology, virtual roaming technology and collision detection technology; *From the prospective of users' experience, actual dive and underwater operation process are simulated to realize the maneuvering interactive function.* The test results show that the simulation system basically meets the training needs of the manned deep submersible at present.

Keywords: jiaolong; Unity3D; virtual reality; interaction

引言

深潜技术是进行深海资源勘探及开发的必要手段, 其完整系统主要由深潜器, 工作母船和陆上

基地组成^[1]。由于水下环境的不可预知及深潜作业的危险性, 操作人员所进行的水下作业是一种复杂且安全性难以保证的过程, 因此对其进行大量的综合训练是保证作业效率的前提。目前, 对从事相关深潜工作的潜航员大多采用实物教学, 存在培训的成本高、效率低、风险大且实操难以实施等问题。目前, 有众多学者将研究的重点放在了建立深潜器的运动模型及其仿真方面。谢俊元, 马岭等建立了



收稿日期: 2017-07-24 修回日期: 2017-11-26;
基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201505017-4), 中央高校基本科研业务费(3132016310), 交通青年科技英才项目(36260401);
作者简介: 张晓曦(1994-), 女, 辽宁鞍山, 硕士生, 研究方向为虚拟现实、航海仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2715 •

载人深潜器的六自由度数学模型并对其典型运动轨迹和姿态进行了仿真计算^[2]；高霓，王卓等人有效地利用三维仿真软件编程开发出水下机器人的三维视景仿真系统，同时对机器人的运动信息、周围环境、声呐及摄像等传感信息进行了仿真开发^[3]；李玉东，胡大斌，陈勇等人设计开发了仿真平台的控制系统实时界面，对潜艇运动控制方程进行了解算，并在仿真平台上进行模拟实验^[4]；大连海事大学梁民仓基于虚拟现实技术开发了深潜器收放操作的仿真系统，初步实现了人机交互^[5]。然而该系统并未考虑深潜器水下作业的过程，功能不够完善，在一定程度上限制了该系统进行虚拟训练的使用范围。国内外主流的深潜模拟器制造厂商和科研机构，都有比较成熟的全功能大型载人深潜操纵训练模拟器，该种模拟器虽可以用于操作人员的培训，但是其本身存在进行培训和练习的时间、场地受限的问题。针对这一问题，将我国第一台载人深潜器——“蛟龙号”作为仿真对象，根据其实际尺寸，开发 PC 版的具有高度沉浸感的“蛟龙号”下潜及水下作业过程的三维交互仿真平台，迎合航海仿真系统朝着小型化、移动化的发展方向。真实地模拟深潜器下潜及水下作业过程，使潜航员在大量的模拟作业中积累相关经验，提高培训效率、缩短培训周期并保证深海作业训练的安全性^[6]。同时，在仿真系统的设计时，充分利用 Unity3D 引擎多平台发布的特点，使其可以在 Windows、iPhone、Android 等多个主流平台上运行，大大降低硬件设备的成本同时又可作为桌面版的仿真平台提高培训效率。因此本文在对 A 型架的运动模型进行研究的基础上，基于虚拟现实技术，实现蛟龙号下潜及水下作业过程仿真的开发，对提高深潜器操作人员的培训效率和保障水下作业的安全性有一定的意义。

1 仿真系统的关键技术

1.1 三维建模技术

在本系统中，根据真实情况下载人深潜器——

“蛟龙号”的实际尺寸，采用 3D Studio Max 场景建模工具完成“蛟龙号”及其搭载机械手的三维模型创建工作。使用 3dsMax 建模的主要建模方法包括：多边形建模、面片建模以及 NURBS 建模等，根据不同的应用领域以及模型方法的难易程度选择合适的建模方式。本文主要采用多边形建模完成模型的创建工作。三维模型的建立过程主要分为：基础模型的制作、模型的优化工作以及模型的 UV 展开及渲染。

在基础模型的制作中，主要包括资料的收集与整理，制定相应的模型以及命名规则，并调整多边形网格中的顶点、边、多边形面等对象，使其贴近模型的外观；在模型的优化过程中不仅需要确保模型的最优性还要兼顾系统运行时的帧率要求，模型的优化过程主要包括：将相同材质的模型进行合并，合理的分布模型密度避免出现两个面片间距过近的问题，并删除不可见的面片等；在模型的 UV 展开及渲染中，主要为模型指定材质，运用纹理贴图的静态烘焙技术，渲染模型的光照和阴影效果。并对其进行 UV 展开操作。最后，进行模型整合，完成三维模型的建造工作^[7]。

1.2 A 型架的运动模型

A 型架是蛟龙号下潜过程的关键部分，根据三维空间中的几何变换原理^[8]，其运动过程可通过平移和旋转实现，A 型架的模型简化结构图如图 1 所示。

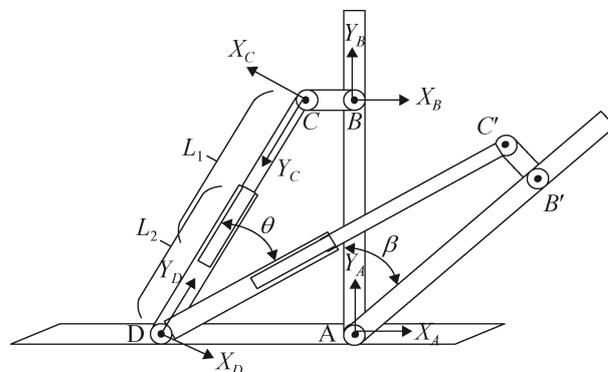


图 1 A 型架模型的简化结构图

Fig. 1 Simplified structural diagram of A-frame swing

A 型架的整体是以 A 点为中心进行转动的, 转动过程中点 D 位置不变且保持模型 Y 轴朝向 C 点, C 点围绕 A 点进行旋转且模型 Y 轴朝向 D 点, 所以只需要实时计算出 C 点的位置, 并根据 CD 两点连线的方向设定 L_1 、 L_2 段模型的朝向即可保证模型旋转的同步性。设 A 点进行旋转时的变换矩阵为 S_A (公式(1)), C 点到 A 点的平移矩阵为 T_C (公式(2))

$$S_A = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_A & -y_A & -z_A & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: β 为 A 型架整体绕 A 点的旋转角度; $(x_A, y_A, z_A, 1)$ 为 A 点坐标。

C 点绕 A 点旋转的合变换矩阵如公式(3)所示

$$M = T_C \cdot S_A \cdot (-T_C) \quad (3)$$

则有: $(x_{C'}, y_{C'}, z_{C'}, 1) = (x_C, y_C, z_C, 1) \cdot M$ (4)

通过公式(4)可得到 C 点经过平移、旋转再平移之后的位置。其中: (x_C, y_C, z_C) 为 C 点未旋转前坐标, $(x_{C'}, y_{C'}, z_{C'})$ 为 C 点旋转后坐标。

A 型架主体旋转后液压杆 L_1 和 L_2 段的旋转角度为 θ , 根据向量的内积和向量的模长, 该夹角的求解如下:

$$\theta = \arccos(\overline{DC} \cdot \overline{DC'} / (|\overline{DC}| \cdot |\overline{DC'}|)) \quad (5)$$

式中: \overline{DC} 和 $\overline{DC'}$ 分别为 A 型架旋转 β 角度前后液压杆 L_1 和 L_2 段的朝向向量。

根据以上运动过程分析, 根据 A 型架整体绕 A 点的旋转角度, 求取 C 点经过平移, 旋转再平移的位置, 可确定 L_1 , L_2 段自身旋转角度, 即可确保运动的同步性。

1.3 三维场景交互技术

三维场景交互技术中包括两个关键的技术, 分

别为: 碰撞检测技术和虚拟漫游技术。碰撞检测是指检查三维场景中的物体间是否发生接触或重叠的一种方式, 是保证虚拟系统真实感的必要条件。在本文的开发平台中, 常用的碰撞检测方法包括: 包围盒碰撞检测、触发器碰撞检测以及光线追踪碰撞检测等。本文碰撞检测技术采用层次包围盒的方法^[3], 根据“蛟龙号”深潜器的特点综合运用 Unity 引擎中的碰撞检测组件: 球型碰撞检测组件 (Sphere Collider)、方盒碰撞检测组件 (Box Collider) 和网格碰撞检测组件 (Mesh-Collider), 对于只需进行粗略碰撞检测的物体, 通常运用球型碰撞检测组件和方盒碰撞检测组件, 而对于需要进行精细碰撞检测的物体, 在该模型上添加根据三维网格生成的网格碰撞器。使用网格碰撞器进行的碰撞具有无死角的优点, 但是存在耗费计算机资源的问题, 在场景中大量使用会存在画面卡顿的现象。在添加相应的碰撞检测组建后, 绑定包含碰撞检测函数的脚本实现碰撞检测并控制碰撞后的行为。

场景漫游功能主要分为第一人称视角漫游和第三人称视角漫游。在本三维仿真系统的虚拟漫游中, 主要利用第一人称视角和第三人称视角相结合的方式(均以自动寻路为主), 即以第一人称操作三维虚拟设备的同时操作人员还可以通过辅助窗口观察其他视角的画面。

第一人称视角是通过鼠标传入的变换量不断地更新摄像机的变换矩阵, 实时的计算出摄像机以及观察点的三维坐标。第三人称视角与第一人称视角的不同点在于, 摄像机以及观察点的三维坐标需要通过虚拟力算法确定。即: 观察目标与角色分离, 令观察目标实时跟随角色, 将角色作为引力点, 吸引摄像机实时跟随。摄像机自身位置如公式(6)所示:

$$X_{\text{cam}} = d_{\text{follow}} \frac{X_{\text{att}} - X_{\text{tar}}}{\|X_{\text{att}} - X_{\text{tar}}\|} M_{\text{rot}} + X_{\text{tar}} \quad (6)$$

式中: d_{follow} 为摄像机与角色保持的距离; M_{rot} 为旋转矩阵。

2 仿真系统的设计

2.1 总体设计方案

图2所示为蛟龙号操纵仿真系统的总体开发流程图。

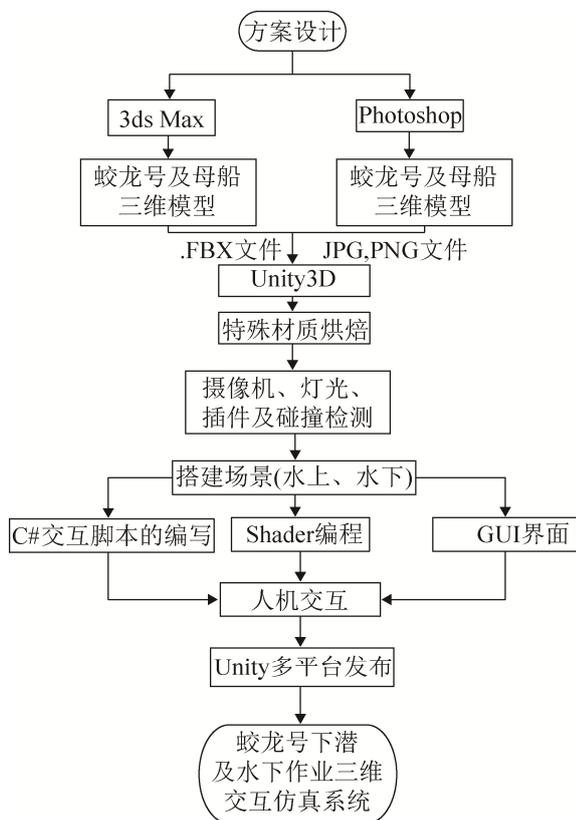


图2 系统开发流程图

Fig. 2 System development flow chart

根据该系统开发流程图，总体设计方案细节如下：

(1) 本系统的开发首先采用 3Dmax 建模工具创建蛟龙号及支持母船的三维模型，利用 PhotoShop 对处理好的结构图片进行纹理贴图，完成材质球的制作。

(2) 对需要进行人机交互的结构进行分离，使其成为独立的模型，便于操作；而对不需要进行人机交互的模型进行三角面优化，同时进行渲染烘焙生成最终的纹理贴图^[9]。

(3) 将处理好的模型保存为.FBX 格式文件导入到 Unity3D 中，在三维交互场景中还需添加摄

像机、灯光等，对于水下作业部分还需添加海水，水下气泡等插件并利用 Shader 编程渲染出雾的效果完成场景的搭建，最后通过编写 C#脚本以及设置碰撞检测实现蛟龙号下潜及机械手水下作业的过程仿真。

(4) 为增强用户体验效果，提高操作灵活性，通过添加 GUI 组件，使其在主界面上显示各个功能模块及其实现的控制面板，帮助操作人员快速熟悉仿真系统功能，并实施仿真系统的操作。

(5) 最终通过 Unity3D 的跨平台功能将蛟龙号下潜及水下作业仿真系统发布成多个版本，达到真正跨平台使用的目的。

2.2 用户体验设计

用户体验设计包括信息架构、内容文本、视觉设计、交互设计等^[10]。开发蛟龙号下潜及水下作业操作仿真系统不仅要充分考虑到该系统功能的完整性也要考虑到该系统的可操作性。系统的灵活性决定了仿真系统的使用效率，所以本系统在充分考虑用户使用需求的基础上，增加了提示信息功能，视角切换功能以及三维导航功能。

2.2.1 提示信息功能

考虑到该仿真系统一方面可以使相关工作人员熟悉相应设备以及深潜器下潜及水下作业的操作过程，另一方面也可以作为我国深潜技术的教育平台，起到教学宣传的作用。所以，在仿真系统中增加信息提示功能起到对仿真系统相关操作并不熟悉的用户的提示作用。为提高培训的效率，当通过三维场景漫游功能导航到仿真平台的某一部分时，该系统将在鼠标悬停位置的下方自动给出部位的名称；用户在操作三维仿真系统时，通过鼠标点击相应模型，系统会自动将该设备的操作注意事项，相应模型的详细信息以及具体交互方式显示在该区域，提示用户如何实现正确的操作，如图3所示。



图 3 提示信息功能

Fig. 3 Prompt information function

2.2.2 视角切换功能

在仿真系统中增加视角切换功能可提高操作的灵活性, 在真实的训练过程中, 培训人员经常需要关注不同的区域。为解决这一问题, 本系统在人机交互界面中增加辅助窗口的设计, 可以显示除了操作者当前视角之外的其他视角。同时, 该系统识别出训练人员当前的操作后, 也可在辅助窗口中显示详细的操作区域, 以便培训人员对其有较直观的了解。

此外, 通过 GUI 界面上视角切换子菜单项的选择可实现第一人称视角和上帝视角间的切换。选择第一人称视角, 当虚拟人(蛙人)运动时, 该视角会随之运动, 提高仿真系统的用户沉浸感, 如图 4 所示; 选择上帝视角, 通过键盘以及鼠标滚轮的同时操作可在仿真系统中进行空中的任意漫游。同时, 通过点击相应的操作菜单可使摄像机瞬间移动到指定位置并以适当的视角将要操作的三维模型显示出来。



图 4 蛙人视角

Fig. 4 From the perspective of frogman

2.2.3 三维导航功能

对于不熟悉船舶内部结构及具体位置的用户群, 在该系统中增加三维导航窗口不仅可以解决在船舶漫游过程的定位时间长的问题, 同时也可以便于用户在庞大的仿真场景中以更高的效率熟悉船舶的部件, 对船舶结构有一个直观的认识。该仿真系统将三维导航窗口设计在窗口的右上角, 窗口中的模型为蛟龙号及支持母船的三维模型优化后的简模。通过鼠标点击三维导航窗口中的主要设备及其位置点, 可在庞大的场景中迅速定位到指定区域, 如图 5 所示。



图 5 三维导航功能

Fig. 5 Three dimensional navigation function

3 仿真系统的实现

3.1 下潜过程仿真实现

蛟龙号下潜过程的仿真主要包括 A 型架的运动, 缆绳的放出以及虚拟人动画等。根据上文研究的 A 型架运动模型实现 A 型架旋转过程的模拟; 根据三维变换中的伸缩变换实现缆绳放出过程的模拟; 将骨骼绑定在创建好的虚拟人三维模型上, 可利用三维动画制作技术设计出虚拟人行走、弯腰、奔跑、蹲下的角色动画。

大多数的角色动画是通过将骨骼的关节角度旋转到一个固定值实现的。即: 通过父节点的旋转角度来决定端关节的位置, 通过这样的方式, 根据此链条上各关节的旋转角度和相对位移确定处于末端的节点位置。在实际应用中, 广泛使用的是上述过程的逆过程, 即给定末端节点的位置, 反向求解得到节点链上其他所有节点的合理

位置。这种方法被称为反向动力学(IK),本文中,虚拟人的动作模拟采用反向动力学的方法。

将利用上述方法创建的关键帧动画导入到Unity3D中进行分割,通过编辑脚本模拟真实状态下操作人员的关键动作实现虚拟人动画。

A型架的运动以及缆绳的放出是通过位于仿真系统左侧部分的级联菜单进行控制的,一级目录使用图标形式,摆放于主界面的左侧部分,不用时可收起。同时可以通过点击鼠标实现与面板按钮间的交互。在蛟龙号下潜的仿真过程中,虚拟人动画主要实现了对主吊挂钩人员挂钩过程的模拟、对摇曳缆挂钩操作的模拟、对蛙人布放橡皮艇的模拟以及对蛟龙号下水后蛙人摘、挂钩操作的模拟。其中蛙人摘钩操作如图6所示。



图6 蛙人摘钩操作

Fig. 6 Hook removal operation by frogman

3.2 水下作业过程仿真实现

蛟龙号的水下作业过程采用前端搭载的机械手装置实现,其机械手各关节部分的运动原理为三维空间的旋转变换,根据不同的旋转变换矩阵完成机械手各关节运动过程的模拟。

在蛟龙号水下作业的三维交互设计中,碰撞检测是其中的关键部分,是保障三维仿真系统真实感的必要条件,精确的碰撞检测对于提高虚拟仿真系统的真实程度、增强虚拟环境的沉浸感,有着至关重要的作用,合理的设置碰撞检测可以避免出现物体穿透或重叠等现象。通过在Unity3D引擎中通过编写包含碰撞检测函数的C#脚本实现相应的碰撞检测以及碰撞检测后的行为仿真,具体表现为:当机械手末端执行器检测到物体时,将物体作为其子物体随机械手运动(如图

7所示);当物体检测到载物台时,可脱离其与机械手的“父子关系”设定,即将物体放下。

同时,可以通过粒子系统连续、高效地发射大量的简单运动粒子来进行深海环境中热液喷发过程的模拟。具体步骤为:(1)首先确定待模拟的对象,然后分析物体的运动规律,最后初始化模拟对象的粒子数,生命值、位置、速度、加速度等信息。(2)通过为选择好的纹理大小搭配合适的色彩,来绘制粒子当前的状态。(3)更新所有粒子信息,为下次绘制做准备。

在水下作业过程的仿真中,也增加了视角切换功能,使用者可以在整体视角与机械臂视角之间切换,既可以观察蛟龙号的水下下潜过程,也可以仔细观察机械臂的作业过程。



图7 机械手水下作业过程

Fig. 7 Underwater operation process of manipulator

3.3 系统质量分析

本文开发完成的蛟龙号下潜及水下作业过程的仿真训练系统经过了大量测试和完善。下面分别从以下4个方面对系统的质量进行分析:

(1) 仿真系统的灵活性:操作人员登录系统时,该系统提供了调整窗口大小的若干选项,来解决窗口大小与显示器的适应问题;操作人员进行训练时,可在第一人称和第三人称漫游之间随意切换,在增加视角切换功能的同时,还可通过三维导航窗口进行快速定位。

(2) 仿真系统的可移植性:本系统利用Unity3D作为训练系统的开发引擎,该开发工具可以利用其强大的跨平台功能,方便地将程序发布到不同的平台上。同时,该系统采用简洁的C#语

言进行脚本的编辑, 对于不同的操作系统, 具有开发效率高、可移植性强的特点。

(3) 仿真系统的广泛性: 该载人潜水器下潜及水下作业的训练系统选取蛟龙号作为研究对象。虽然不同载人潜水器在结构和布局上都有不同的特点, 但是, 其下潜及水下作业的流程基本相似, 同时, 对于船舶上多种关键设备的操作方法也有值得借鉴的地方。所以, 该培训系统同样适用于载人潜水器的操作人员培训, 广泛性较好。

(4) 仿真系统的实时性: 由于初期所创建的蛟龙号以及支持母船的三维实体模型具有非常高的面数, 这导致了测试过程中系统运行画面的帧数达不到要求。为对蛟龙号下潜及水下作业过程进行逼真地模拟, 后期采用了动态加载模型技术和 LOD 技术, 提高了系统加载的实时性。目前画面的帧数可达到 60 帧左右, 但在计算机的配置上存在一定的要求, 目前需要具有 i5 处理器、8 GB 内存和 GT730 显卡及更高配置的计算机提供支持。

4 结论

本文基于虚拟现实技术设计并开发了蛟龙号下潜及水下作业交互仿真系统, 分析了蛟龙号下潜时 A 型架的运动过程, 模拟了蛟龙号下潜及水下作业过程, 实现了仿真系统的人机交互。该仿真系统界面友好、性能稳定, 使用效果良好, 基本可以满足使用仿真系统训练深潜操作人员的要求, 对于用户深海操作的虚拟培训具有一定的实用价值。由于该系统中的水下作业过程本着对真实情况下机械手运动的仿真再现和快速开发的原则, 并未对机械手的运动模型进行深入研究, 后续可在仿真系统中进一步研究机械手的运动数学模型, 以便其末端执行器可更符合实物的运动并到达指定的位置, 提升仿真系统的真实感。

参考文献:

- [1] 方亮, 袁书明, 杜红松. 潜艇操纵模拟器综述[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(1): 141-143.
- [2] 谢俊元, 马岭, 胡震. 载人深潜器运动操纵模拟[J]. 中国造船, 2006, 47(2): 62-69.
- [3] 高霓, 王卓. 智能水下机器人视景仿真实验平台研究[J]. 船海工程, 2009, 38(5): 58-60.
- [4] 李玉东, 胡大斌, 陈勇, 等. 潜艇操纵控制系统仿真平台设计与实现[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(5): 123-127.
- [5] 梁民仓. 基于虚拟现实技术的深潜器收放操作仿真[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [6] Dong Xiaoyan. Research on the Virtual Reality Training Simulation Technology Based on Key Technology of Physical Simulation[J]. Advanced Materials Research (S1662-8985), 2013, 79(35): 1208-1213.
- [7] 王德龙, 任鸿翔, 朱耀辉. 基于三维虚拟船舶的驾驶员实操训练平台开发[J]. 船海工程, 2017, 46(6): 191-195.
- [8] Schneider P, Eberly D H. Geometric tools for computer graphics[M]. Burlington, Massachusetts: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [9] 吴亚峰, 于复兴. Unity3D 游戏开发技术详解与典型案例分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [10] 符斌, 任鸿翔, 李小涛. 触控式航海模拟机器人交互系统优化设计[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(6): 110-114.