

# 实现沉浸式教学与互动智慧实训平台虚拟仿真系统的 教改应用研究

黄志坚<sup>1,\*</sup>, 吴贤坤<sup>2</sup>, 经程辉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海海事大学商船学院智能控制与计算实验室, 上海, 中国

<sup>2</sup>上海立达学院数据科学学院, 上海, 中国

\*通讯作者

**【摘要】**船用分油机拆装是轮机专业的核心实验。为克服传统实物拆装和实操过程的诸多缺点, 基于拉普拉斯算子的深度神经网络 NeRF 算法, 快速建立高精度的分油机本体及其各零部件 3D 模型; 采用 Unity 3D 引擎功能, C#编写情景脚本, 开发出船用分油机虚拟拆装系统。具有模型精度高、沉浸式体验与互动智慧操作等特点。将其作为实物拆装的补充, 虚实结合、线上线下、课内课外混合进行教改。实践表明, 不仅使学生更好地掌握分油机功能原理、结构及拆装操作, 还提高对前后序课程的知识衔接及应用能力, 增强了实验和课堂教学效果。

**【关键词】**分油机; 虚拟拆装; 实验教改; 三维模型; 神经辐射场 (NeRF)

**【基金项目】**中国高等教育学会 2023 年度高等教育科学研究规划课题; 项目名称: 实现沉浸式教学与互动智慧实训平台虚拟仿真系统的教改应用研究 (编号: 23SZH0401)

## 1. 引言

随着技术的发展, 轮机专业学生对虚拟仿真系统的需求在迅速增长。如分油机拆装, 不仅需要一定的实验条件, 而且智慧互动困难, 甚至因操作失误可能受伤。相比之下, 采用虚拟仿真系统已成为克服各种局限、培养现代海洋工程人才的重要途径。其关键是建立高度逼真的 3D 设备及场景模型。传统方法对建模人员要求较高, 且耗时较长。随着深度学习的发展, 采用深度学习高效构建高质量虚拟 3D 模型显得尤为必要。特别是 2021 年 Mildenhall 等提出的神经辐射场 (Neural Radiance Fields, NeRF) 方法[1]。其仅使用二维图像输入, 即可对 3D 场景进行高质量的重建[2,3], 逐渐成为主要发展方向。因此, 开发分油机拆装的沉浸式智能交互仿真系统, 将有助于学生掌握分油机系统的功能原理、结构和拆装操作等, 并提高分析和解决问题的能力。

## 2. 基于 NeRF 的分油机三维虚拟重建

NeRF 的工作过程主要由两部分组成: 3D 重建和体素渲染。其核心是将连续场景表示为 3D 位置坐标点  $(x, y, z)$  以及 2D 视点方向  $(\theta, \phi)$ , 通过深度神经网络用作输入和输出, 以获得颜色  $(c)$ 、体素密度  $\sigma$ 。在三维图形学中, 观察方向可通过两个角度参数定义: 1) 方位角  $\theta$ : 表示观察方向在 xy 平面内的投影与 x 轴的夹角, 范围通常为  $0\sim 360^\circ$ ; 2) 仰角  $\phi$ : 表示观察方向与 xy 平面的夹角, 范围通常为  $-90\sim 90^\circ$ 。

这里采用位置信息编码方式, 以解决直接将三维坐标点位置  $(x, y, z)$  和二维视角方向  $(\theta, \phi)$  作为 NeRF 网络输入, 导致渲染分辨率较低的问题; 并将输入映射到高频, 以获得坐标编码  $\gamma(x)$  和方向编码  $\gamma(d)$ 。其中, 高频映射函数  $\gamma(p)$  以正余弦周期函数表示如下:

$$\gamma(p) = \left( \sin(2^0 \pi p), \cos(2^0 \pi p), \dots, \sin(2^{L-1} \pi p), \cos(2^{L-1} \pi p) \right) \quad (1)$$

其中:  $\gamma(\cdot)$  为分别应用于  $x$  中的每一个坐标值和  $d$  中的每一个方向值;  $P$  为函数输入部分;  $L$  为高维空间信息。

并以积分方式, 表示渲染图上的颜色  $C(r)$  如下:

$$C(r) = \int_{t_n}^{t'} T(t) \sigma(r(t)) c(r(t), d(t)) dt \quad (2)$$

其中:  $T(t)$  是从  $t_n \sim t$  沿相机射线的累计透射率;  $\sigma(r(t))$  是射线  $r$  上采样点的体素密度。计算如下:

$$T(t) = \exp\left(-\int_{t_n}^t \sigma(r(t)) dt\right) \quad (3)$$

将射线的积分区间  $[t_n, t_f]$  均分  $N$  等分, 再在每个小区间内随机采样。然后将式 (2) 中  $C(r)$  的简化为:

$$\hat{C}(r) = \sum_{i=1}^N T_i (1 - \exp(-\sigma_i \delta_i)) c_i \quad (4)$$

其中:  $T_i$  为累计透射率;  $\sigma_i$  为采样点  $i$  处的体素密度;  $\delta_i$  为采样点  $i$  到临近采样点间的距离。

具体实现上, NeRF 采用 12 层全连接深

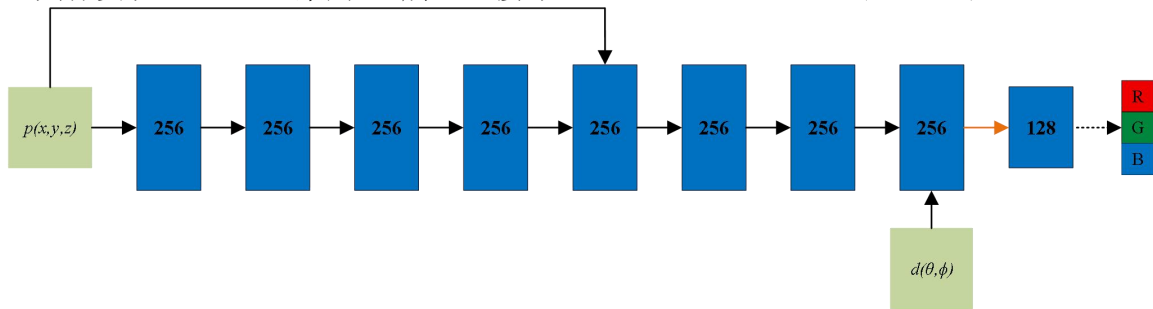


图 1. NeRF 算法的深度神经网络结构

本算法基于 Python 编写, 并在配备 GPU 的服务器上运行。实验环境配置如下表 1 所示。

表 1. 实验环境的配置信息

实验环境	配置参数
GPU	两块 NVIDIA 1080Ti
CPU	Intel CORE i7-7700, 主频4.2G
内存/显存	16G/32G
操作系统	Ubuntu 16.04
编译器	Pycharm
Python版本	Python 3.9
CUDA版本	CUDA 9.0及其配套的CUDNN

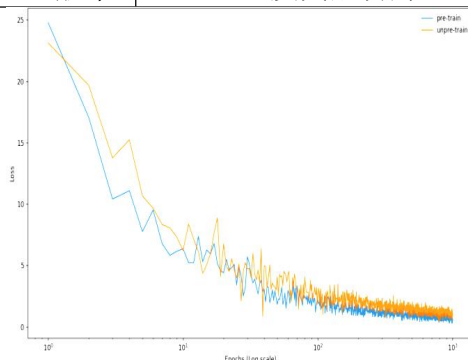


图 2. NeRF 深度神经网络在表 3 参数下, 预训练与未预训练学习时的损失函数收敛过程

在 NeRF 的学习和训练过程中, 超参数的选择至关重要, 具体设置如表 2 所示。本文利用拉普拉斯算子[5]对测试图像进行边缘检测, 基于 NeRF 算法的即时神经图形基元

度神经网络, 如图 1 所示[4]。绿色模块三维坐标  $(x, y, z)$  输入空间位置的信号, 通过 8 个完全连接的 256 通道蓝色 ReLU 函数激活层传输, 还包括输入到第五层的跳跃连接。橙色箭头为没有激活函数的层, 虚线箭头为由 Sigmoid 函数激活的层。NeRF 输出体素密度  $\rho$ , 并与输入观测方向位置编码连接的 256 维特征向量  $(\theta, \phi)$ , 输入到 128 通道的全连接 ReLU 功能层处理。最后, Sigmoid 激活函数输出颜色  $(r, g, b)$ , 由方向  $(\theta, \phi)$  的光线观察到, 在空间位置  $(x, y, z)$  处。

(Instant-NGP) 进行三维重建[6]。使得 NeRF 的训练和渲染过程, 加快了几个数量级。在此设置下, NeRF 深度神经网络学习的损失函数收敛过程, 如图 2 所示。

表 2. 实验参数的设置

超参数	参数值
初始学习率	0.1
batch size	4096
Epoch	10
$\epsilon$	1e-8
$\gamma$	8
$\beta_1$	0.9
$\beta_2$	0.999

### 3. 维虚拟拆装的实现

这里以轮机专业典型拆装课程的船用分油机系统为例, 选型与教材相同的 ALFA-LAVAL P605 船用分油机, 基于实际拆装过程, 利用仿真和虚拟现实技术, 对相应设备、拆装工具及拆装过程 1:1 建模, 映射真实教学场景。

#### 3.1 功能设计

沉浸式分油机虚拟拆装系统, 应提供演示、练习、考试三种模式。智能交互则包括 3D 自动演示, 语音、文字和动画的实时智能引导与说明、智能分析、评价等。在演示模式下, 可自动播放亦可手动播放; 由系统演示分离盘、分离筒和立轴等部件的拆装全过程, 了解设备的组成、结构及装配关系。在

练习模式下，操作步骤有提示功能，学生通过键鼠操作，与系统进行交互，从而执行部件的拆装。在考试模式下，出题者可对考试内容、时间、是否有提示等内容进行设置，由学生通过键鼠操作，与系统进行交互，系统在后台自动记录操作情况，并进行实时评分[7,8]。

### 3.2 开发流程

虚拟拆装平台采用 NeRF、Unity3D、VC#等软件开发。整个开发流程可分为数据集的制作、3D模型的构建、虚拟拆装软件设计三个阶段。首先，采集视频和图片，建立数据集；其次，在 NeRF 中建立分油机 3D 模型，并进行体素渲染和优化；再次，整理模型、清除未引用的资源，将模型导出为.FBX

格式文件；然后，将构建的分油机 3D 模型导入 Unity3D 开发平台，设计虚拟拆装功能的软件；最后，通过 VC#实现场景漫游。具体设计流程如图 3 所示。部分分油机虚拟拆装仿真系统演示和练习的动画，如图 4 所示。

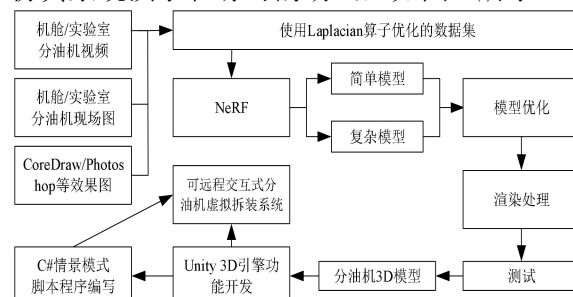


图 3.分油机虚拟拆装系统 3D 可视化仿真设计流程图



图 4.分油机虚拟拆装仿真系统演示和练习的动画功能

### 3.3 性能指标

在配备 17 CPU、8GB RAM 和 4GB GPU 的计算机上，场景以 1920\*1080 分辨率打开，没有观察到错误或错位。场景的帧率超过 30 FPS，没有丢帧，帧率波动保持在±2 FPS 以内。任何场景的加载和切换不超过 5 秒。可

选择有窗/无窗界面；在图像质量和响应速度之间，可进行 Fantastic / Beautiful / Good / Simple / Fast / Fastest 等 5 档选择[7,8]。

## 4.实验教改应用与效果

### 4.1 智能评估效果和可靠性

表 3.各分组的评分结果

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A 组人工	62	86	74	66	65	71	70	61	85	67	76	82	86	82	70	64	72	81	78	84
B 组智能	85	77	83	88	83	98	81	79	85	90	82	86	84	85	93	85	88	90	89	81
B 组人工	80	78	87	87	83	92	83	76	81	89	83	87	80	83	90	86	85	92	87	85

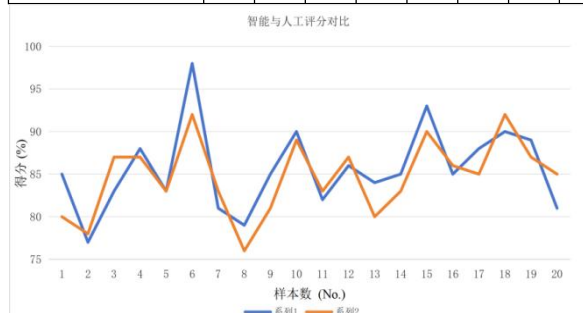


图 5. B 组学生智能评估得分和人工评估得分对比的折线图

为验证本平台智能评估的可靠性和准确

度，开展对比实验。即从选课的两个班级各随机邀请 20 名学生，分别记为 A、B 组；A 进行实物拆装教学和人工考核；B 组进行虚拟拆装教学以及智能和人工考核。结果如表 3 所示。B 组的智能和人工评估得分对比，如图 5 所示。可看出两组数据间差异很小，存在很强的一致性趋势，表明该平台智能评分方法的可靠性，能用于实际考核[9]。A 组平均得分 74.1，B 组蓝色和棕色的智能和人工考核平均得分 85.6、84.7。A、B 组学生近 10 分差值，说明经过虚拟拆装教学的 B 组学生，

其拆装水平明显高于实物拆装教学的 A 组学生。

#### 4.2 平台使用调查及评价分析

针对本虚拟平台，执行所有软件功能并进行记录。着重从软件功能的完整性，场景的体验感，交互的智慧性和准确性，响应的延迟情况、运行和操作的稳定性，智能评分性能，还有平台 BUG 等情况，进行分类测试和分析。测试情况汇总，如表 4 所示，表明本平台各项测试指标的性能，均实现或达到可用水平。针对传统虚拟拆装软件，其沉静感与智慧交互不足，本平台在沉静感体验与智慧交互上，也均有一定的反映和提升。

最后，对使用过虚拟拆装软件的学生，进行问卷调查。问卷内容主要包括软件的科学性和使用难度、使用舒适度、学生接受程度等，问卷均采用量化指标。其中，关于科学性：完全不合理得 0 分，个别不合理得 1 分，基本合理得 2 分，完全合理得 3 分。如图 6 左边所示，为调查结果数据生成的柱状图。总体而言，绝大多数使用软件的学生，认为本虚拟拆卸软件的科学性是合理的。关于使用难度、使用舒适度、学生接受程度：很难 0 分，比较难 1 分，比较容易 2 分，很容易 3 分，如图 6 右边所示。参与使用的绝大多数学生，能较好地体验本虚拟拆装软件；

但也有少数学生不能熟练使用本软件的各项功能，这也提示可进一步完善本虚拟拆装软件，并加强演示功能。

表 4.测试情况汇总

测试编号	测试内容	测试结果
1	分油机分离盘拆装操作的功能	实现
2	分油机分离筒拆装操作的功能	实现
3	分油机立轴拆装操作的功能	实现
4	常用工作的提醒与使用	正常
5	专用工具的提醒与使用	正常
6	虚拟仿真平台运行的稳定性	稳定
7	3D 场景刷新有无延迟	无
8	智慧语音交互	良好
9	智慧高亮提示	均有
10	智能评分与人工评分对比	一致

#### 4.3 教改应用

本虚拟拆装平台最重要的作用，就是实现船用分油机的虚拟拆装功能，满足学院学生和教师的教学需求，并结合以下 4 方面，进行教改应用探索[10]：1) 增强后续与先修课程间的衔接；2) 虚拟软件拆装；3) 增强创新能力的实验设计；4) 智能考核及成绩公平一致。针对教改应用，进行了软件使用效果的调查，包括：教学效果、兴趣和认同、学习的主动性、以及创造性思维等。从结果数据的分析可看出，虚拟拆装教学取得明显效果。具体下所示：

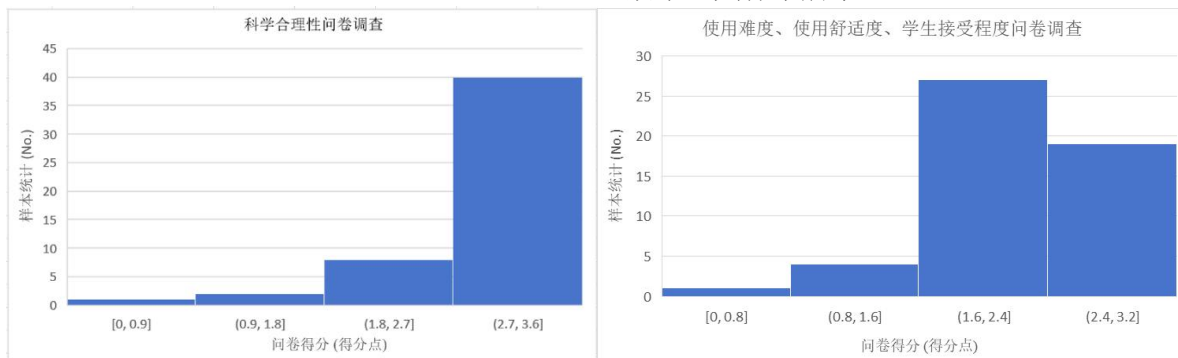


图 6.船用分油机虚拟拆装软件的科学合理性(左)和使用难易程度等(右)的调查

#### 4.4 教改效果

1) 教学效果：采用本虚拟软件，对比采用实物进行分油机拆装授课，其效果如图 7 所示。可看出采用虚拟拆装软件教学后，考查成绩的优秀率大幅提升，突破了正态分布。这主要得益于虚拟拆装软件能引起学生们的兴趣，保证学生的安全，并且可随时练习，无限重复进行，使得实训时间明显增多。不少学生练到熟能生巧，甚至能在十几分钟内完成。

2) 兴趣和认同：95%的受访者表示喜欢

虚拟拆装的教学方法和氛围。在学习过程中，不仅提高动手能力，在软件智能评级认课时，增强学习的兴趣和信心。

3) 主观能动性：出于对虚拟 3D 软件的兴趣，学习的主观能动性有显著提高。在课前预习、课中学习和课后练习等环节，基本上都能发挥自主性参与其中。

4) 创造性思维：虚拟拆装教学的实施，形成了活跃的讨论和交流氛围，在碰撞中产生了智慧的火花，从而产生超越传统教学的创造性思维。

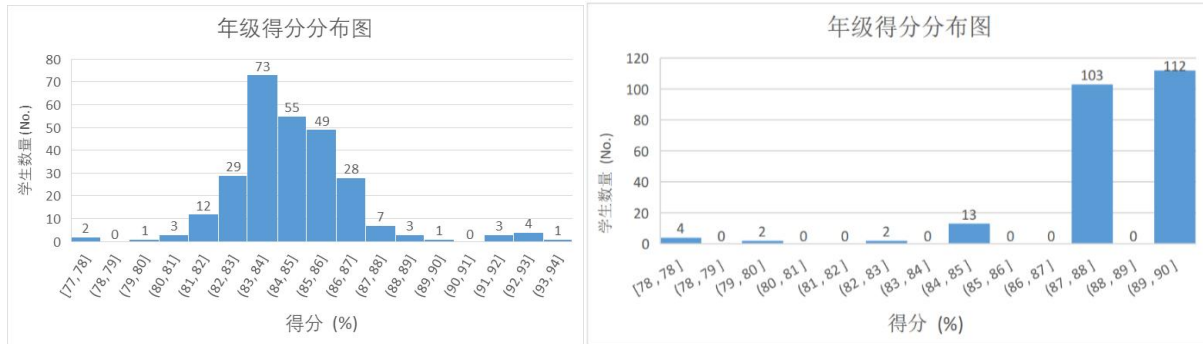


图 7.采用虚拟拆装软件教学前后的实际考查成绩对比情况

### 5.结束语

本文探讨了“分油机拆装实验”课程中虚拟与现实相结合的教改方法。开发的系统可用于沉浸式的分油机虚拟拆装演示、智慧交互练习和考试等，有利于改善实训和理论教学条件、改革教学方法、提高教学水平。有望节约教学成本，增加教学设计性、趣味性、创新性等。结果表明，虚拟拆装软件在“分油机拆装实验”的教改中取得了良好的效果，提高了学生对分油机拆装的掌握；极大增强了学生的兴趣和创新思维，培养了他们对课程目标的掌握和未来工作的专业能力。

### 参考文献

- [1] Barron J T, Mildenhall B, Tancik M, Hedman P, Martin-Brualla R, Srinivasan P P. Mip-nerf: A multiscale representation for antialiasing neural radiance fields. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. IEEE, 2021: 5855-5864.
- [2] Xu Q, Xu Z, Philip J, Bi S, Shu Z, Sunkavalli K, Neumann U. Point-nerf: Point-based neural radiance fields. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2022: 5438-5448.
- [3] Wang P, Liu Y, Chen Z, Liu L, Liu Z, Komura T, Theobalt C, Wang W. F2 -NeRF: Fast Neural Radiance Field Training with Free Camera Trajectories. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2023: 4150-4159.
- [4] 王源锋.基于深度学习的 NeRF 图像三维重建方法研究[D].东北林业大学, 2024.
- [5] 杜旋, 黄勇, 董惠良, 等.基于神经辐射场算法的混合现实三维重建技术[J].机电工程, 2024, (10): 1759-1767.
- [6] Müller T, Evans A, Schied C, Keller A. Instant neural graphics primitives with a multiresolution hash encoding. Computer Vision and Pattern Recognition, 2022, 2(1):59-89.
- [7] 王冰.基于 HoloLens 船舶辅机虚拟拆装平台研究[D].武汉理工大学, 2019.
- [8] 郑光洪.船用空气压缩机虚拟拆装平台开发[J].天津航海, 2023, (2): 55-60.
- [9] 朱近赤, 谢迎春, 刘贵杰.基于虚实结合的“柴油机拆装实验”课程教学改革初探[J].黑龙江教育: 理论与实践, 2023, (10): 70-72.
- [10] 梁恩胜, 刘文科, 惠节.基于“混合式教学”的船舶分油机信息化教学设计[J].中国教育信息化, 2016, (24): 30-32.