

6-20-2023

Research and Development of Immersive Aero-engine Scene Simulation System

Shun Yao

1. Institute for Aero Engine, Tsinghua University, Beijing 100083, China, peteryao@mail.tsinghua.edu.cn

Zhongzhi Hu

1. Institute for Aero Engine, Tsinghua University, Beijing 100083, China

Wenyu Cao

1. Institute for Aero Engine, Tsinghua University, Beijing 100083, China

Jiali Yang

1. Institute for Aero Engine, Tsinghua University, Beijing 100083, China, yangjiali@tsinghua.edu.cn

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.

Research and Development of Immersive Aero-engine Scene Simulation System

Abstract

The research and development of aero-engines has the characteristics of high precision and interdiscipline. In order to reduce communication costs and to display the engine structure and the state of semi-physical simulator, by applying virtual reality technology, *an immersive scene simulation system is built*. By studying CAD data lightweight technology and physics-based real-time rendering technology, *a rendering optimization method for similar object dynamic batching is proposed*, which effectively improves the rendering frame rate. A dynamic parallax adjustment algorithm is proposed to solve the problem of dizziness when having a close look to stereoscopic images. The system achieves the strong immersion, high fluency, and high precision visual effects. The relevant technology can be applied to the engine immersive review, virtual training and other scenarios, and can provide technical support and reference for the application of virtual reality technology in manufacturing field.

Keywords

virtual reality, scene simulation, virtual assembly, Unity, digital twin, stereo imaging

Recommended Citation

Scene Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1395-1404. Scene Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1395-1404.

沉浸式航空发动机视景系统的设计与实现

姚舜, 胡忠志, 曹文宇, 杨佳利*

(清华大学 航空发动机研究院, 北京 100083)

摘要: 航空发动机的研发具有精密度高、跨学科的特点, 为减少沟通成本、直观展示发动机结构及半物理仿真机运行状态, 应用虚拟现实技术, 搭建了一套沉浸式视景仿真系统。通过研究 CAD 数据轻量化技术、基于物理的实时渲染技术, 提出了一种相似对象动态合批的渲染优化方法, 有效提高了渲染帧率; 提出一种动态视差调整算法, 解决了近距离观看立体画面时出现的眩晕问题。该系统实现了沉浸感强、流畅度高、精度高的视景效果, 相关技术可应用于发动机沉浸式评审、虚拟培训等场景, 为虚拟现实技术应用于制造领域提供技术支撑和参考。

关键词: 虚拟现实; 视景仿真; 虚拟装配; Unity; 数字孪生; 立体成像

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)06-1395-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0208

引用格式: 姚舜, 胡忠志, 曹文宇, 等. 沉浸式航空发动机视景系统的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(6): 1395-1404.

Reference format: Yao Shun, Hu Zhongzhi, Cao Wenyu, et al. Research and Development of Immersive Aero-engine Scene Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1395-1404.

Research and Development of Immersive Aero-engine Scene Simulation System

Yao Shun, Hu Zhongzhi, Cao Wenyu, Yang Jiali*

(Institute for Aero Engine, Tsinghua University, Beijing 100083, China)

Abstract: The research and development of aero-engines has the characteristics of high precision and interdiscipline. In order to reduce communication costs and to display the engine structure and the state of semi-physical simulator, by applying virtual reality technology, an immersive scene simulation system is built. By studying CAD data lightweight technology and physics-based real-time rendering technology, a rendering optimization method for similar object dynamic batching is proposed, which effectively improves the rendering frame rate. A dynamic parallax adjustment algorithm is proposed to solve the problem of dizziness when having a close look to stereoscopic images. The system achieves the strong immersion, high fluency, and high precision visual effects. The relevant technology can be applied to the engine immersive review, virtual training and other scenarios, and can provide technical support and reference for the application of virtual reality technology in manufacturing field.

Keywords: virtual reality; scene simulation; virtual assembly; Unity; digital twin; stereo imaging

0 引言

航空发动机的研发是一项耗资巨大、变量参

数多的系统工程, 保证设备可靠、人员安全是优先考虑的因素。虚拟现实技术是仿真技术的一个

收稿日期: 2022-03-11 修回日期: 2022-05-20

基金项目: 清华大学自主科研计划(20214180061)

第一作者: 姚舜(1993-), 男, 硕士生, 研究方向为虚拟现实、视景仿真技术。E-mail: peteryao@mail.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 杨佳利(1988-), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为航空发动机分布式、多电化控制技术, 鲁棒加减速控制。

E-mail: yangjiali@tsinghua.edu.cn

重要发展方向,指由计算机构建虚拟化的环境,通过视觉、听觉、触觉等方面进行模拟,使操作者有身临其境的体验。在商品的设计、计划和原型阶段,虚拟现实技术具备高效、高性价比的优势^[1]。在航空航天领域,凭借成本低、仿真度高的特点已被广泛应用^[2]。

2021年罗·罗公司借助数字模型为美国空军演示其发动机和换装模式的优势,赢得B-52轰炸机发动机替换合同^[3]。国内学者魏士松等^[4]借助桌面虚拟现实设备开发了一套航天器虚拟维修训练系统,通过X-Mind思维导图及SQL数据库管理、编辑装配规则;沈景风等^[5]搭建了航空发动机半物理仿真试车系统,利用三维视景系统(CAVE)实现试车数据3D实时可视化;施新宇等^[6]通过对真实的涡喷六航空发动机进行测量,在3DS MAX中重建模型,基于Unity建立一款该发动机的虚拟实验平台。上述研究中,对航空发动机在虚拟环境下的装配、展示、人机交互均有了探讨和实现,但对于画面的逼真度、立体显示带来的晕眩问题却鲜有探讨。判断VR仿真系统是否实用,逼真度是重要的评价指标之一^[7]。

本文以Unity为开发平台,使用C#为主要开发语言,基于立体显示设备、动作捕捉设备开发了一款虚拟现实航空发动机视景仿真系统,实时

展示航空发动机试车阶段内部运行情况,并使用动捕设备和三维模型交互。为提升虚拟现实环境的沉浸感,对CAD结构轻量化、模型优化、立体显示等技术上均进行改进和测试,最终得到画面逼真、运行流畅的视觉效果,为后续进一步研发装配、教学内容提供有利的基础。

1 系统总体设计

为了对仿真机的结构设计进行沉浸式评审,实时展示发动机数字点火、试车过程中的各项性能参数,建立了一套视景仿真评审系统。该系统需支持多人沉浸式体验、流畅渲染高精度工业模型,支持实时参数通讯及动作捕捉功能,为用户提供逼真、自然的操作体验。

本系统设计分为数据输入部分、显示部分和视景软件部分,总体设计如图1所示。输入部分包括带有仿真运算功能的操控台、基于红外基站的动作捕捉设备;软件部分包括3DS MAX虚拟场景建模、发动机整机CAD轻量化处理、Unity高清渲染管线配置、C#动捕数据解析、仿真机数据解析代码、着色器代码等;显示部分包含Power Wall主动立体显示屏,立体信号发射器、主动快门眼镜、渲染服务器、图像信号拼接器。

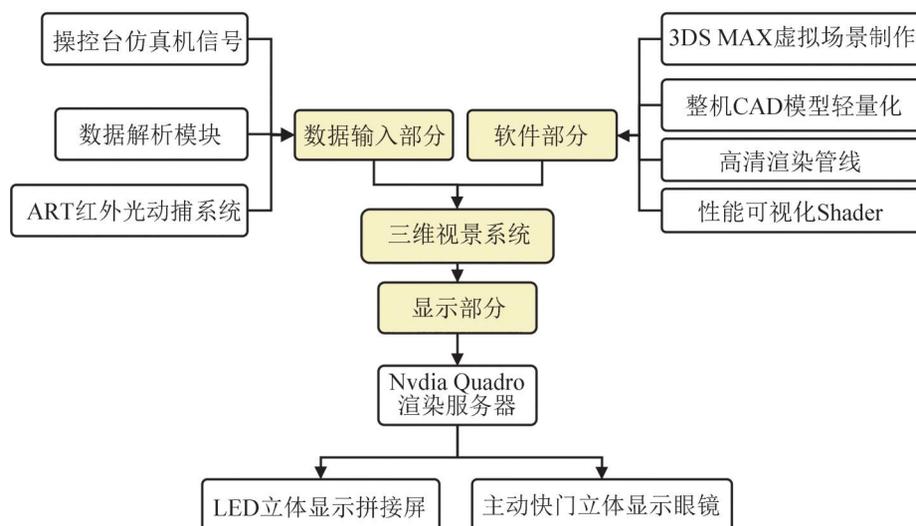


图1 展示系统整体设计

Fig. 1 Design of display system

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

2 系统软件设计

2.1 CAD轻量化及虚拟场景制作

(1) CAD模型轻量化: 工业产品在设计阶段通常采用CAD模型, CAD模型是利用精确的数学参数表达模型的几何信息, 此类信息显示时需要耗费大量时间, 不适用于实时交互。目前开发视景内容的主流做法是将CAD模型转化成三角面片模型(Mesh), 其优点在于处理简单、计算量小。现有的图形硬件大多支持三角形绘制的加速, 因此, 需要对CAD模型进行三角面片化处理^[8]。本系统使用Pixyz Studio对模型进行初步轻量化处理。

发动机模型导入后, 利用Tessellation(镶嵌细分)算法生成近似网格。该算法提供2项参数: Max Sag(最大弦线)控制曲面的贴合程度, 如图2所示, Sag值越小, 产生的三角面越多, 更接近CAD曲面; 参数Max Angle(最大角度)则定义相邻多边形法线夹角的最大值, Angle值越小, 在小型部件上产生的三角面越多。经测试, 当Max Sag设为0.2 mm, Max Angle设为1°时, 能达到精确的细分效果, 整机面数控制约在1千万。处理后的模型大小为398 MB, 相比于原CAD文件3.38 GB, 文件大小缩减约89%。

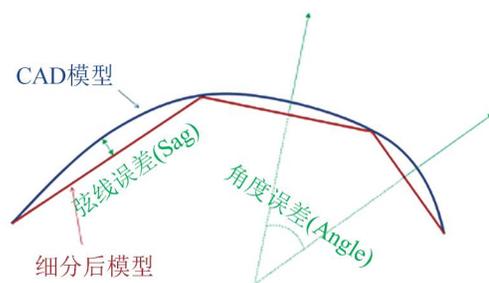


图2 镶嵌细分参数说明

Fig. 2 Parameter description of tessellation

(2) 模型切割及层级管理: 曲面细分处理后的发动机模型以FBX格式导出, 进入3DS MAX进行后续处理。当前模型还存在大量二维线条、辅助对象, 这些对象最终不需要显示。在3DS

MAX的场景面板下, 选择过滤实体对象可以进行快速筛选。发动机外壳剖切效果, 使用多边形编辑工具下的切割平面, 借助吸附工具, 可实现按精确角度切割, 界面如图3所示。使用层级管理工具, 将剩余模型分为管路、机匣、核心机、剖切、特效5层, 便于后续动画制作、场景管理。

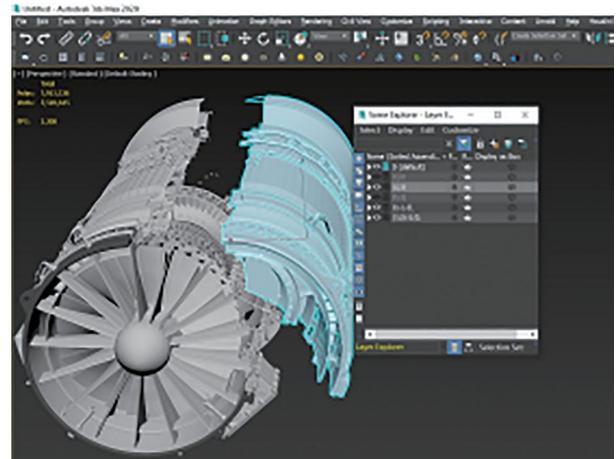


图3 3DS MAX层级管理

Fig. 3 Hierarchical management in 3DS MAX

2.2 动态合批以实现性能优化

针对高精度模型的展示需求, 通常使用LOD (level of detail)技术来实现性能优化。即预先准备多套精度不同的模型, 根据相机的距离显示高模或低模, 通常运用于虚拟展厅、室外战场等大空间项目中。本文展示的航空发动机整机并不涉及大范围移动, 若使用LOD方法, 则会观察到明显的模型替换现象, 不满足沉浸感需求。另一种性能优化的思路是减少Draw Call, Draw Call是指渲染运行过程中, 由CPU向GPU发布的命令^[9]。在总面数相同的情况下, 零散的小模型会比单一模型产生更多的Draw Call, CPU要花更多时间准备渲染命令, 造成帧率下降。因此, 对模型进行塌陷, 能有效提高帧率。在测试中, 对全部12 665个部件进行塌陷后, Draw Call明显下降, 同时帧率由34.5提升至270, 如表1所示。

表1 模型优化与Draw Call、帧率的关系
Table 1 Relationship between model optimization and draw call and frame rate

处理方法	模型总数	Draw Call 数	平均帧率/ (帧/s)
未经塌陷	12 665	42 311	34.5
全部塌陷	1	294	270.0

根据实验,模型塌陷的方法能显著提高渲染帧率。但本文中的发动机模型包含转子、作动机构等活动部件,采用整体塌陷的方式会导致部件无法活动、拆装。因此,提出了基于相似对象的动态合批方法,实现了减少Draw Call并支持部件独立活动的效果。将整机模型与世界坐标 X 轴对齐,编写程序遍历所有部件的Mesh Renderer 组件并计算AABB包围盒(axis-aligned bounding box);记录各部件的包围盒中心、 Z 轴向的最大值与最小值,由于AABB包围盒具有轴对齐特征,根据包围盒中心 Z 轴坐标对所处相同平面的对象分组;比较组内对象的材质、定点数、包围盒体积等参数,确定出可以塌陷的相似对象,按照“Prt+中心点位置+最小点坐标 Z 值”的格式命名新组,在程序运行时使用Mesh.Combine()方法进行动态合批,如图4所示。

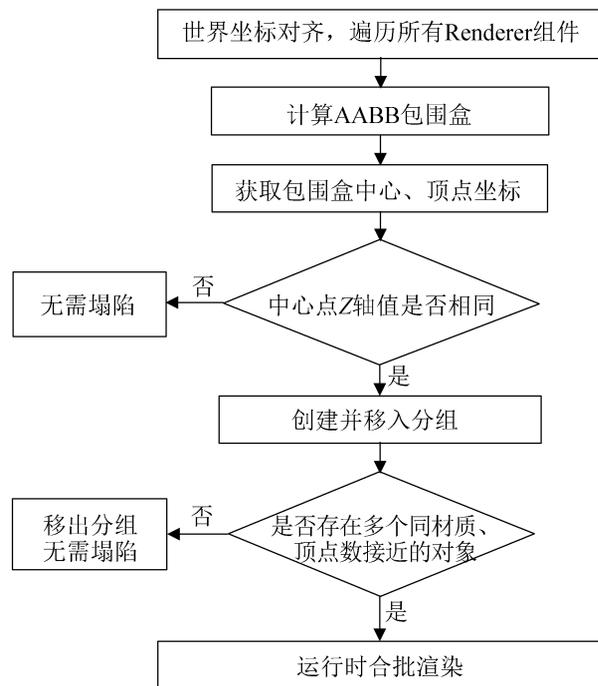


图4 基于相似对象的动态合批方法
Fig. 4 Dynamic batching of similar objects

相比于传统合批方式,该方法节约了大量人工筛选的时间,在本文的发动机案例中能够快速识别出发动机由阵列命令产生的叶片、螺母等相似对象,执行动态合批后,平均帧率由34.5提升至155。此外,由于采用动态合批方式,当用户需要单独拆装特定叶片时,程序可基于交互行为加载原始模型,兼顾了性能优化和灵活性。

2.3 基于物理的渲染技术及高清渲染管线应用

(1) 在传统工业视景项目中,视觉效果和材质的真实度往往不被重视,但随着计算机实时渲染能力的增强和虚拟现实用户对沉浸感需求的提升,提升渲染品质也成了重要需求。在图形学领域,基于物理的渲染(physically based rendering, PBR)是一大主流,也是目前计算机图形学的研究热点^[10]。PBR指使用物理原理和微平面理论建模的着色、光照模型,并使用现实中测量的表面参数来准确表达真实世界材质的渲染概念。

Unity于2014年发布5.0版本,其中一项更新就是将PBR技术引入引擎中并作为内置的渲染方案。Unity提供了方便的PBR材质定义接口,将物体表面属性分为基础色、金属度、光滑度、法线、环境光遮蔽等多个维度进行描述,开发者通过贴图的方式进行赋值。以某部件采用的碳纤维材质为例,如图5所示,需为材质提供多张贴图,用于描述金属度、遮蔽信息、光滑度、法线信息,最终可以在不增加面数的前提下使模型看起来更富有细节。

(2) 高清渲染管线(high definition render pipeline, HDRP)是Unity引入的新渲染管线,面向高性能显卡的计算平台,能够提供更好的光照质量和性能,具备Volume、Decal等特性以及光线追踪功能。升级项目为HDRP的步骤:打开Unity的Package Manger工具,安装HD Render Pipeline资源包(本文使用Unity2019.4 LTS版+HDRP 7.53)。在Graphics中,指定HDRP配置文件即可完成管

线配置。HDRP下使用的Shader与旧渲染管线并不通用,画面中若出现洋红色的错误提示,则需要对材质进行升级。

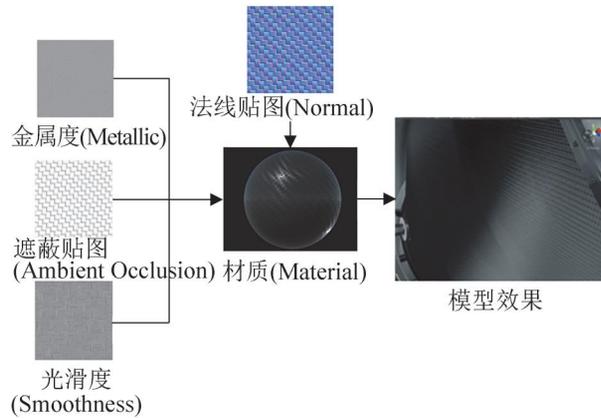


图5 碳纤维材质的制作

Fig. 5 Making of carbon fiber material

光照方面, HDRP采用物理单位带来更精确的控制。虚拟试车台放置了28个光源,在初始阶段为每个光源都配置了灯光组件,经测试,过多的灯光会带来极大的性能开销,且在模型边缘出现块状错误,如图6(a)所示。优化方法:同一面墙体上的灯光使用大面积Aera Light代替,原灯具模型使用自发光材质,设置为不参与全局光计算。经调整,最终灯光总数为8,统一采用Lumen为单位,强度在300~900之间,在整体亮度相同的情况下,解决了渲染错误和帧率过低的问题,图6(b)为灯光优化后的场景。



(a) 模型边缘出现错误

(b) 调整灯光后的场景

图6 优化光照方案

Fig. 6 Optimization lighting scheme

反射方面,由于航空发动机主要材料为金属,反射很大程度影响整体质感,因此,需要采用合理的反射方案。Unity提供了多种反射处理技术:

屏幕空间反射(screen space reflection, SSR)、反射探针技术、实时光线追踪技术等。这些反射技术在性能和呈现效果上各有优势,其中,SSR借助深度缓存、颜色缓存计算反射信息,效果较好,但该技术受限于屏幕空间信息,只有本身在屏幕上可见的对象才会被反射,在特定的角度下会出现反射不完整现象;反射探针技术类似于虚拟相机,在空间中设立一个点,抓取周围的画面并保存进纹理中作为反射信息的来源,该技术需要布置多个探头、提升纹理分辨率、开启实时刷新才能保证整个场景反射正确,对性能影响也很大。经过调整,项目最终采用整体SSR+局部使用反射探头的方案,达到了良好的反射效果也兼顾了性能开销,如图7所示。



(a) 默认Sky Box反射

(b) SSR+反射探头效果

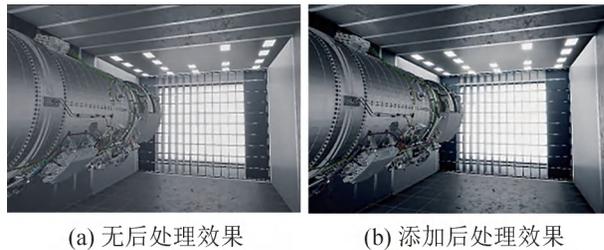
图7 不同反射方式的效果

Fig. 7 Effects of different reflection modes

光线追踪技术(Real time Ray tracing)在过去被广泛地应用于影视行业,随着显卡性能的提升,NVIDIA公司在新一代显卡中引入光追单元^[11],实时的光追效果也开始被应用。Unity于2019.3版本开始支持光线追踪技术。在系统测试阶段,采用光线追踪代替传统SSR反射方案时,确实能弥补SSR无法反射屏幕外对象的缺陷,但遇到场景运行帧率严重下降、噪点增加、升级至DX12后不支持立体显示等问题,考虑到该功能依然处于预览阶段(Preview),本文暂不采用光线追踪作为反射方案。

(3)后处理步骤,在画面最终渲染之前,Unity允许开发者对场景的曝光度、色彩、景深等进行修改,该步骤称为后处理(Post-Processing)。Unity使用Volume系统对后处理效果进行管理。在场景中新建Volume对象,在对应的Inspector面板中,将

mode 设为 global，在 Profile 中选择或新建一个 Volume 配置文件，添加所需的 Override。本文主要使用“Lift, Gamma, Gain”对画面色彩进行调整，“Exposure”调整曝光度，“Bloom”为自发光对象添加辉光效果，“ambient Occlusion”则为场景中边缘、拐角处添加后期阴影，使画面看起来细节更加丰富。几项后处理的测试及对应效果如图8所示。

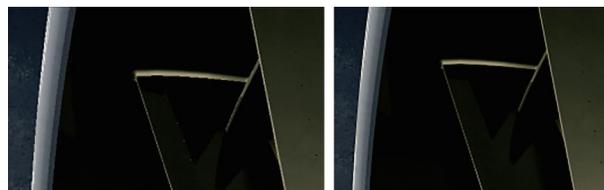


(a) 无后处理效果 (b) 添加后处理效果

图8 后处理效果对比

Fig. 8 Comparison of post-processing effect

(4) 抗锯齿方案，渲染流程中，三维模型经过栅格化呈现在屏幕像素上，模型的边缘会显得不连续，看起来有锯齿。本系统采用 HDRP 提供的 TAA(temporal anti-aliasing)^[12] 算法进行抗锯齿。TAA 抗锯齿技术利用的是历史帧缓存，将过去已经渲染好的画面作为着色样本，相比 MSAA (multi-sample anti-aliasing) 直接多倍增加渲染精度的方法。TAA 采用的是现有的缓存数据，并不会显著增加计算量，仅当有高速运动、对比强烈的边缘时会出现残影现象，通过调节抗锯齿强度，能够将抵消上述问题，并带来良好的视觉效果。如图9所示，采用 TAA 抗锯齿算法后画面锯齿明显减少。操作步骤为选中场景主相机，在 Inspector 面板，General 分类下，抗锯齿列表中选择 Temporal anti-aliasing，并将强度设定为 0.3。



(a) 默认算法 (b) TAA 算法

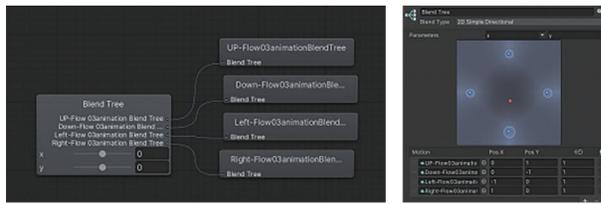
图9 采用 TAA 抗锯齿算法

Fig. 9 TAA anti-aliasing algorithm

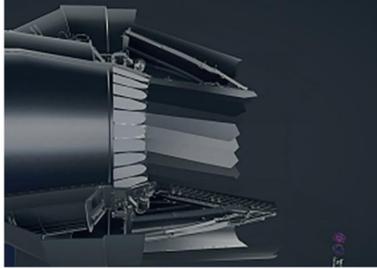
2.4 C#代码实现数据解析、动作捕捉接入

(1) 仿真机和视景软件之间通过以太网进行数据传输。通讯协议中定义了 120 个参数，包含发动机试车过程中的温度、压力、转速、供油量等，视景软件通过 C# 撰写 Socket 客户端实现这些数据的接收、解析。其中“Client.cs”为客户端脚本，用于定义接收端口、开启数据接收线程、根据协议分割字段等功能。“EngineState.cs”脚本实现单例模式，管理解析后的数据，方便其他对象获取发动机当前状态，例如，功能脚本可以获取该实例对象后，通过“_EngineState.Oil”得到当前供油数值。

(2) 实现模型变换功能。改变模型状态的方法有 2 种：第 1 种方法以风扇旋转为例，在脚本 Update 函数中调用 Transform.Rotate 方法，将低压涡轮转速*缩放系数*Time.DeltaTime 作为参数驱动风扇旋转，其中，参数 Time.DeltaTime 为上一帧间隔时间，该系数能确保在不同配置的电脑上转速一致；第 2 种方法适用于可调部件，以模式选择阀(mode selection valve, MSV)为例，提前录制该部件的“开”“关”2 种状态并记录在 Animator 动画组件中。运行时，调用方法 Animator.Play (progress)，其中参数 progress 为 0~1 之间的浮点数，0 代表关闭，1 代表全开，中间值为半开状态，由系统作插值处理并显示。以上方法适用于简单的线性动画，本系统中的矢量推力喷管有 2 个维度的变化参数，分别为 X、Y，无法通过单一方向的插值实现偏转。通过使用 Blend Tree 解决，将 4 段动画融合，通过传入的二维向量计算各动画的权重，实现喷管在 2D 方向上的偏转，Blend Tree 界面如图 10(a)所示，图 10(b)为实际运行中尾喷管偏移效果。



(a) Unity Blend Tree 界面



(b) 矢量喷管偏移

图 10 使用 Blend Tree 实现矢量喷管功能
Fig. 10 Vector nozzle offset function by using Blend Tree

(3) ART 动作捕捉设备通过 Dtrack2 对设备进行追踪、校准。Dtrack2 同样使用以太网将测量数据转发给其他客户端, 打开“Settings-Out Put”面板可配置接收端 IP 和端口, 或选择广播模式。在 Unity 中撰写 C# 客户端进行信息解析, 根据传输协议, 每行数据需按照特定格式进行分割。以手势交互为例, 解析得到的数据格式:

$$[ID, QU, LR, NF]$$

$$[S_x, S_y, S_z][b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8]$$

$$[S'_x, S'_y, S'_z][b'_0, b'_1, b'_2, b'_3, b'_4, b'_5, b'_6, b'_7, b'_8]$$

式中: ID 为手部 ID 号; QU 为追踪质量; LR 为左右手数值, 0 为左, 1 为右; NF 为识别到的手指数目; S_i 为手背位置; b_i 为以旋转矩阵的方式表示手背朝向; S'_i 、 b'_i 为指尖关节的位置、方向, f 为手指编号, 取值 0~4。旋转矩阵在 Unity 中无法直接赋值, 需转化为四元数形式, 声明名为“Rotation3x3”的类, 用于存放旋转矩阵 M_0 。通过“Matrix To Unity Quaternion”方法对数据进行处理, 将得到的参数更新到手部骨骼, 即可连续更新手部姿态。矩阵 M_0 到四元数 Q_0 的处理方法如下:

$$M_0 = \begin{bmatrix} b_0 & b_3 & b_6 \\ b_1 & b_4 & b_7 \\ b_2 & b_5 & b_8 \end{bmatrix}$$

$$t = \begin{cases} 0.5 / \sqrt{(1 + b_0 - b_4 - b_8)}, & \text{if } (b_8 < 0) \cap (b_4 < b_0) \\ 0.5 / \sqrt{(1 - b_0 + b_4 - b_8)}, & \text{if } (b_8 < 0) \cap (b_4 > b_0) \\ 0.5 / \sqrt{(1 - b_0 - b_4 + b_8)}, & \text{if } (b_8 > 0) \cap (b_4 < b_0) \\ 0.5 / \sqrt{(1 + b_0 + b_4 + b_8)}, & \text{if } (b_8 < 0) \cap (b_4 > b_0) \end{cases}$$

$$Q_0 = \begin{cases} t(1 + b_0 - b_4 - b_8), t(b_2 + b_6), t(b_3 + b_1), t(b_7 - b_5), & \text{if } (b_8 < 0) \cap (b_4 < b_0) \\ t(b_3 + b_1), t(b_7 + b_5), t(1 + b_0 - b_4 - b_8), t(b_2 - b_6), & \text{if } (b_8 < 0) \cap (b_4 > b_0) \\ t(b_2 + b_6), t(1 + b_0 - b_4 - b_8), t(b_7 + b_5), t(b_3 - b_1), & \text{if } (b_8 > 0) \cap (b_4 < b_0) \\ t(b_7 - b_5), t(b_3 - b_1), t(b_2 - b_6), t(1 + b_0 - b_4 - b_8), & \text{if } (b_8 > 0) \cap (b_4 > b_0) \end{cases}$$

2.5 实现性能可视化, 流速可视化

(1) 通过编写 Shader(着色器)实现温度可视化。Shader 是一串代码, 可对渲染流程编程, 将输入的 Mesh(网格)和贴图等信息组合作用, 达到特定的渲染效果。发动机视景系统需要将各涵道中气流、温度可视化, 需通过编写自定义 Shader 实现参数与颜色、贴图纹理坐标(UV)参数之间的关联。实现过程为: 声明温度变量和 Gradient(颜色渐变), 将温度参数从 200~2 200 映射到 0~1 之间, 所得数值传入 Gradient 采样得到当前温度对应的颜色值。设定 4 个温度颜色点, 调整 UV 改变颜色位置, 使用 Sin 函数使颜色向两侧平滑衰减, 乘以 Pow 数值可控制衰减范围, 最终将计算结果相加, 实现平滑过渡的温度可视化效果。图 11 展示了该 Shader 在编辑器面板下的配置界面和场景内效果, 通过暴露参数, 可实时调整透明度、颜色、着色位置。

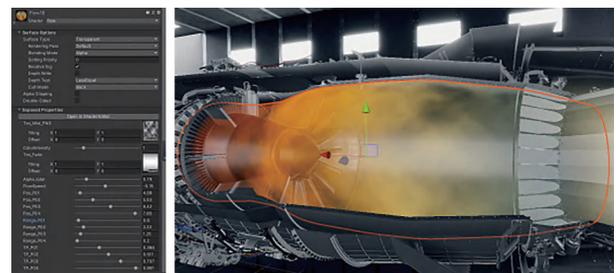


图 11 编写 Shader 代码实现自定义材质
Fig. 11 Shader coding to realize custom materials

(2) 调整UV实现气体流动效果。本系统中的涵道展示、流速可视化均通过改变UV方法实现。在3DS MAX中,依据涵道形状制作空气流动模型,使用Unwrap UVW工具编辑模型UV信息,利用投影工具使UV沿XZ平面平铺。编写Shader代码,将模型UV坐标和时间、仿真机流速参数关联,可实现纹理沿特定方向流动。更进一步,制作燃烧室内部火焰时,在对应Shader中增加顶点偏移的代码,使火焰有轻微抖动效果。

(3) 发动机喷口火焰使用Unity内置的粒子系统(Particle System)实现,本文通过撰写C#代码,将粒子大小、运动速度、生命周期与发动机出口温度、加力状态参数相关联,实现了控制喷口火焰效果。

3 系统硬件设计

3.1 立体显示技术及缓解眩晕问题

为支持多人协同设计、评审,本文使用大屏作为显示终端。由于传统2D显示器缺乏深度信息,在呈现CAD设计结构时会限制用户对三维信息的理解,甚至产生误解,因此,应用了立体显示技术。Power Wall显示设备由LED立体显示屏、信号发生器和快门眼镜组成,采用主动快门原理实现立体效果,如图12所示。LED显示屏快速交替显示左右眼视差画面,立体信号发射器发射同步时钟信号,眼镜接收信号后,改变左右液晶器件通电状态实现通光、阻光,观众会依据视差画面感知立体效果。主动快门技术相比偏振式3D显示技术,不会损失画面分辨率、设备维护成本低且不存在串扰率等问题^[13]。



图12 Power Wall显示设备的主要组成部件
Fig. 12 Main components of Power Wall

立体显示可能会造成用户视觉疲劳甚至晕眩。本文产生晕眩的主要原因是由用户感知的立体信息

不一致造成的。在观察物体时,人眼通过双目视差(Binocular disparity)、双目汇聚(Convergence)、眼部对焦(Focus)3种信息判断远近。例如,靠近观察对象时,两眼看到的画面差别变大,双目视线向中间汇聚,同时睫状肌收缩使对焦平面靠近^[14]。然而,本文的双目视差画面由虚拟相机生成,如图13所示。当虚拟相机漫游至发动机内部观察细小结构时,虚视距为 D_1 ,双目汇聚角度为 Δ_1 。现实空间中,用户会对焦至现实中的屏幕,距离为 D_2 ,双目汇聚角度为 Δ_2 。因此,当 D_1 和 D_2 差距较大时,人眼无法调整双目汇聚得到重合的画面,从而感到晕眩甚至看到画面重影。

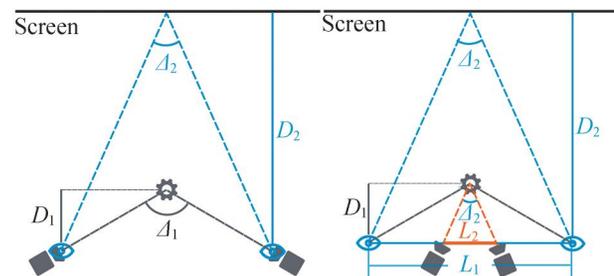


图13 虚拟相机和现实观察位置差异导致晕眩问题
Fig. 13 Difference between virtual camera and real observation position leads to dizziness

本文提出了动态视差调整算法,通过实时改变虚拟相机瞳距来弥补汇聚角度问题。在程序中设定左右眼相机偏移为 L_1 (65 mm),运行时根据虚拟相机、用户及屏幕距离位置关系,缩短偏移值为 L_2 ,以此来缩小视差,保证用户在不增大汇聚角 Δ_2 的同时能看到重合的画面。 L_2 的计算式为

$$L_2 = D_1 / D_2 \times L_1$$

式中: D_2 为用户头部到屏幕距离,通过解析动画捕捉数据实时获取。

3.2 ART动作捕捉套件

ART动作捕捉套件由法国ART公司推出,采用目前主流的追踪技术——外向内追踪技术(outside-in tracking),依靠红外基站进行追踪定位,具备精度高、延迟低的特点^[15]。本套件采用的是1台系统控制器+8个红外基站方案,配

有交互手柄、头部追踪器、数据手套, 均支持六自由度(6DOF)捕捉。软件方面, 通过名为Dtrack2的工具实现设备校准管理。图14为ART动捕设备。



图14 ART-动捕套件
Fig. 14 ART-motion capture kits

3.3 渲染服务器

航空发动机模型复杂, 视景软件需满足1 000万以上三角面片的流畅响应, 因此, 渲染服务器需具备强大的图形处理能力。本文采用了NVIDIA Quadro RTX8000专业显卡, 拥有4 608个CUDA核心及48 GB DDR6显示专用内存, 支持3D Vision技术, 为高分辨率、高精度的实时渲染提供保障。处理器及存储方面, 选用了Intel Xeon Gold 6226R CPU、64 GB DDR4内存及512 GB固态硬盘, 满足运行要求。

3.4 仿真机操控台

仿真机操控台是用户操作、监视仿真机运行的一套硬件设备, 如图15所示。由半物理仿真机、上位机界面、油门控制杆、推力矢量摇杆组成。仿真机通过虚拟控制器, 实现发动机起动、点火、加力燃烧等全状态模拟, 通过以太网将发动机参数实时发送至视景仿真系统。

4 仿真应用测试

本文的设计方法与成果已应用于“数字发动机展示系统”的项目建设中, 当前实现了3种模式: 展示模式、试车模式和评审模式。其中, 展示模式根据预设镜头、语音自动讲解, 用于展示发动机采用的先进技术、设计理念; 试车模式以仿真机信号为输入信息, 在剖切视角下实时展示



图15 仿真机操控台
Fig. 15 Simulator console

发动机运行、各部件工作状态; 评审模式利用动捕设备追踪观看者视角, 利用手柄或数据手套实现部件抓取等其他交互功能。

图16(a)为某型号航空发动机在本系统试车模式下的三维视景, 该系统真实地展现了试车环境, 完整展现了仿真测试起动、慢车、加力燃烧、变换涵道等过程。开启主动立体显示功能后, 现场观众将观看到沉浸立体画面, 效果如图16(b)所示。



(a) 试车过程 (b) 立体效果
图16 视景仿真系统整体效果
Fig. 16 Overall effect of scene simulation system

该系统实现了流畅、细节精确的航空发动机整机渲染效果: 刷新率 ≥ 38 帧/s(立体模式)或70 帧/s(非立体模式); 分辨率为3 840 像素 \times 1 890 像素, 总渲染面数为1 500万以上, 操控台响应时间小于0.1 s。

5 结论

本文设计并实现了一套航空发动机三维视景系统, 针对传统工业视景方案在展示大面数CAD结构不流畅、沉浸感不佳等问题, 提出了一种相

似对象动态合批的渲染优化方法,有效提升渲染效率的同时能够支持部件独立拆装。针对立体显示造成的对焦不适应问题,应用了动态视差调整算法,大幅改善了近距离观察部件时的晕眩问题。

经测试,该系统在实现信息可视化、精确还原结构样机的基础上,采用基于物理的渲染技术、高清渲染管线实现了高还原度、高清晰度且运行流畅的立体画面,使多用户在沉浸式环境下协同评审,有效提高沟通效率。下一步,将研究基于头戴式显示设备的混合现实技术、无线数据串流技术,组建大空间多人沉浸式协同设计系统。

参考文献:

- [1] Al-Ahmari A M, Abidi M H, Ahmad A, et al. Development of a Virtual Manufacturing Assembly Simulation System[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(3): 1687814016639824.
- [2] 李钰. VR在航空领域发展的前景分析[J]. *现代雷达*, 2021, 43(9): 107-108.
Li Yu. Prospect Analysis of VR Development in Aviation Field[J]. *Modern Radar*, 2021, 43(9): 107-108.
- [3] Tirpak J A. Rolls-royce Digitally Modeled Wing and Pylon with Engine to Win B-52 Contract[EB/OL]. (2021-10-07) [2022-03-01]. <https://www.airandspaceforces.com/rolls-royce-digitally-modeled-entire-wing-pylon-to-win-b-52-engine-contract/>.
- [4] 魏士松,周正东,章栩苓,等.基于桌面虚拟现实技术的航天器虚拟维修训练系统[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(6): 1358-1363.
Wei Shisong, Zhou Zhengdong, Zhang Xuling, et al. Virtual Training System for Spacecraft Maintenance Based on Desktop Virtual Reality[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(6): 1358-1363.
- [5] 沈景凤,李初蕾,武殿梁,等.航空发动机半物理仿真试车系统的设计研究[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(5): 808-816.
Shen Jingfeng, Li Chulei, Wu Dianliang, et al. Design and Research on Semi-physical Simulation Test System of Aero Engine[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(5): 808-816.
- [6] 施新宇,邱峰,石承玉,等.基于VR的涡喷六航空发动机虚拟实验平台的设计与制作[J]. *电脑知识与技术*, 2020, 16(1): 251-252, 256.
Shi Xinyu, Qiu Feng, Shi Chengyu, et al. Design and Manufacture of Virtual Experimental Platform of Turbojet-six Aeroengine Based on VR[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2020, 16(1): 251-252, 256.
- [7] 周前祥,曲战胜.航天虚拟现实仿真技术的研究进展[J]. *科技导报*, 1998(10): 35-38.
Zhou Qianxiang, Qu Zhansheng. Progress in the Research of Simulation Techniques in the Space Virtual Reality[J]. *Science & Technology Review*, 1998(10): 35-38.
- [8] 万毕乐,刘检华,宁汝新,等.面向虚拟装配的CAD模型转换接口的研究与实现[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(2): 391-394.
Wan Bile, Liu Jianhua, Ning Ruxin, et al. Research and Realization on CAD Model Transformation Interface for Virtual Assembly[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(2): 391-394.
- [9] 冯乐乐. Unity Shader入门精要[M].北京:人民邮电出版社,2016.
Feng Lele. Introduction to Unity Shader[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016.
- [10] 胡炳扬.基于物理的表面材质和介质外观渲染技术研究[D].南京:南京大学,2020.
Hu Bingyang. Research on Physical Based Surface Material and Participating Medium Appearance Rendering[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [11] NVIDIA Corporation. Real-Time Ray Tracing[EB/OL]. [2022-03-01]. <https://developer.nvidia.com/rtx/ray-tracing>.
- [12] Unity Technologies. Antialiasing in the High Definition Render Pipeline[EB/OL]. [2022-03-01]. <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.render-pipelines.high-definition@14.0/manual/Anti-Aliasing.html>.
- [13] 张盼盼.数字影院3D技术及发展趋势[J]. *现代电影技术*, 2021(10): 37-42.
Zhang Panpan. Development Trend of Digital Cinema and 3D Technology[J]. *Advanced Motion Picture Technology*, 2021(10): 37-42.
- [14] Geng J. Three-dimensional Display Technologies[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(4): 456-535.
- [15] 范丽亚,侯守明,张克发,等.2020年扩展现实(XR)热点回眸[J]. *科技导报*, 2021, 39(1): 220-232.
Fan Liya, Hou Shouming, Zhang Kefa, et al. Review on the Hot Spots of Extended Reality(XR) in 2020[J]. *Science & Technology Review*, 2021, 39(1): 220-232.