

doi: 10.7690/bgzd.2016.08.018

某飞行模拟器视景系统的设计与实现

邓晴莺^{1,2}, 李国翬¹, 王宝奇², 姚建铨¹

(1. 天津大学天津开发区奥金高新技术有限公司, 天津 300072;

2. 北京摩诘创新科技股份有限公司, 北京 100000)

摘要: 针对飞行模拟器视景系统实时性要求高, 视场角较大, 场景覆盖范围较大, 逼真度高等特点, 基于某直升机飞行模拟器研制任务的特定需求, 设计该模拟器视景系统。对显示系统、多通道网络结构、视景仿真软件以及视景数据库进行设计和实现, 并对其中的关键技术如成像球幕加工技术、多通道同步和融合技术等进行了深入研究。实际使用效果表明: 该系统能满足研制的相关要求, 显示效果逼真, 受到飞行员的认可和好评。

关键词: 视景系统; 飞行模拟; Creator; VegaPrime; 球幕

中图分类号: T391.9 **文献标志码:** A

Design and Implementation of Certain Type Flight Simulator Visual System

Deng Qingying^{1,2}, Li Guohui¹, Wang Baoqi², Yao Jianquan¹

(1. TEDA OrKing Hi-Tech CO. LTD, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Beijing Moreget Creative Technology CO. LTD., Beijing 100000, China)

Abstract: Aiming at high real-time requirement, large field of view, large scene coverage and realistic imaging effect of flight simulator visual system. Based on requirement of specific requirements of certain type helicopter flight simulator research, designed its simulator visual system. The display system, multi-channel network structure, visual simulation software and scene database are designed and realized, and some key technologies such as dome processing technology, multi-channel communication synchronization and blending were deeply researched. Results indicate that system meets research requirement, achieves high-quality of visual effect and receive high praise from the pilots.

Keywords: visual system; flight simulator; Creator; VegaPrime; dome

0 引言

随着计算机性能的大幅度提高, 以及地景图像技术、图形绘制技术、投影等相关技术的发展, 虚拟现实渐渐成为建模与仿真技术的关键^[1]。飞行模拟器作为虚拟现实技术的应用, 集成了视景系统、座舱系统、飞行仿真系统、飞机仿真系统、主控系统、音响系统、教员控制系统、动感系统、配电和辅助系统等。飞行模拟器能够把飞行员在空中操作真实飞机时所能看到的、听到的、感觉到的飞机姿态、飞机运动、仪表指示、环境变化、周围声音以及驱动力感等逼真地反映给飞行员, 给飞行员提供视听触动的感觉^[2]。

飞行模拟器可以让飞行员的训练不受气候、地形地域和环境的限制, 可以针对飞行特情进行训练, 大大提高了训练的安全性, 并降低了训练费用。以我军某型号的飞机为例, 该机购置费 2.5 亿元, 飞行小时训练费用为 23 万元左右。飞行模拟器购置费 5 000 万元, 每小时训练飞行费用为 3 200 元。只有实际飞行小时训练费用的 1/70。各国在飞行模拟器

上的投入都非常大, 我国也逐步加大了对飞行模拟器的研制投入力度^[3]。

视景系统是飞行模拟器的重要组成部分, 给飞行员提供有效的视觉信息, 其图形生成和显示质量直接影响飞行仿真的逼真性和飞行训练效果。它随着计算机硬件、显示技术、图形图像技术的发展而不断发展, 其中如光学成像技术、非线性失真校正技术、图形加速绘制、特效模拟、同步技术、碰撞检测等都是相关领域的研究热点^[4-8]。笔者针对某飞行模拟器的研制任务, 结合飞行模拟器视景系统的特点, 论述整个飞行模拟器视景系统的设计和实现, 并对其中关键技术进行介绍。

1 某飞行模拟器视景系统基本分析

飞行模拟器视景系统主要用来模拟飞行仿真时座舱外的真实景象, 为飞行员提供飞行视觉环境, 结合运动系统的动感、操纵负荷的触感以及音响系统的听觉, 从而营造一个逼真的虚拟飞行环境。

视景系统接收飞行仿真软件传来的位姿数据和教员台的控制指令, 实时更新视点位置, 同时渲染

收稿日期: 2016-04-29; 修回日期: 2016-06-03

基金项目: 2014AA7052002

作者简介: 邓晴莺(1980—), 女, 湖南人, 博士, 从事计算机系统结构、飞行模拟器设计研究。

出显示的场景，与模拟器其他系统的接口关系如图 1 所示。

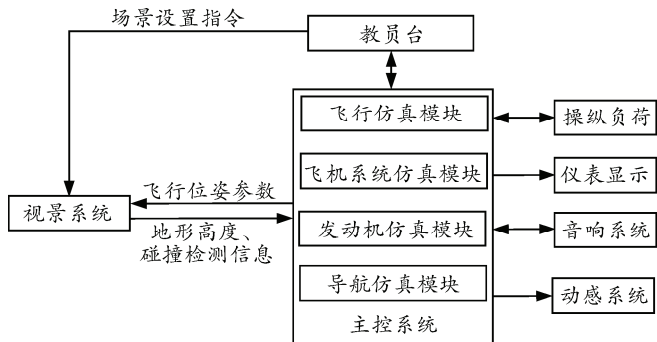


图 1 视景系统与模拟器各分系统接口关系

考虑对飞行模拟器仿真逼真程度的要求，针对模拟的直升机对象，体现到视景系统的功能和性能主要满足：

- 1) 实时显示与模拟直升机姿态和真实场景；
- 2) 模拟雨、雪、能见度等自然环境以及机场和灯光，并能从教员台进行设置；
- 3) 可以实现碰撞检测；
- 4) 系统显示刷新率保持 60 帧/s；
- 5) 系统响应延迟应不大于 120 ms；
- 6) 系统水平视场角不小于 170°，垂直视场角不小于 70°。

2 系统设计和实现

为了完成上述指标，笔者针对某直升机模拟器视景系统具体的功能和性能要求进行详细设计和实现，下面分别针对显示系统、多通道网络结构、视景仿真软件以及视景数据库 4 个方面进行介绍。

2.1 显示系统

飞行模拟器主要有实像和虚像 2 种不同的显示方式，针对直升机对垂直视场要求较大的特点，笔者采用实像显示的方式。根据物理学定义，实像是由实际光线汇合在一起所成的影像。实像显示系统一般光路比较简单，直接通过投影设备将图像投射到显示屏上，但较虚像缺乏立体感和纵深感。目前比较常见的实像显示方式有平面窗口式、球形幕显示、模拟球视景显示系统 3 种类型。

平面窗口式显示系统是实像显示系统中最简单的一种，直接把图像投在显示屏上，基本没有立体感和纵深感。常采用的显示屏有显示器、电视机、投影屏等。这种类型的显示系统一般用于熟悉飞机基本操作的练习器、大型飞行仿真系统的对手席上。

球形幕实像显示系统是比较常见的一种显示方

式，在我国自行研制的许多大型歼击机、直升机的飞行模拟器及飞行指挥训练模拟器上都采用了这种显示系统，技术已经非常成熟。该类型的显示系统使用涂有某种特殊光学涂料的大直径球形幕作投影屏，可以有效地解决实像显示缺乏立体感和纵深感的问题，而且球形屏幕直径越大，显示图像的立体感和纵深感就越强。对目标的投影显示有 2 种方式：一种是将目标和背景分别投影；另一种是利用图像处理技术，将目标图像融合到背景中再进行投影显示。由于投影屏幕为曲面，图像畸变大，需要选用畸变调整功能强的投影器作为投影设备。

模拟球视景显示系统，是近几年发展起来的一种新型显示系统。它一般由树脂背投屏、固定支架、投影仪及其他附属设备组成，将多块平面树脂背投屏拼接构成一个完整的空间立体结构，通过投影设备以背投方式将图像投射到该立体结构的各面上，是 CAVE 系统的变形。

针对直升机模拟器的研制特点和经费预算，采用球幕显示方式，具体设计如下。

2.1.1 球幕结构

考虑到动感系统对系统质量和转动惯量的限制，采用 3 m 半径实像球幕显示系统，该系统由如下部分组成：成像球幕、球幕上盖、球幕入口、投影仪平台和支架，其外观组成形式如图 2 所示。

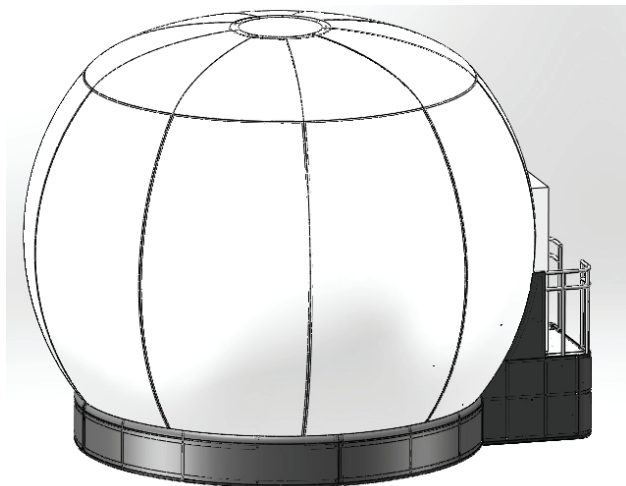


图 2 球幕结构

成像球幕的有效视场为水平 180°(±90°)，垂直 80°(下 40°，上 40°)。为保证有效视场的要求，将成像球幕设计成水平 200°(±100°)，并且在赤道位置处达到水平 200°(±100°)时垂直切下。成像幕共计 9 块，每块 40°，相互间法兰接触定位，螺栓连接。顶部设顶盖。球幕内外为光面，外部涂象牙

白色漆，内部喷涂增益涂料。

投影仪平台是为投影器提供安装、调试、维修平台，位于球幕的后舱部分，其上安装投影仪支架，支架采用一体化设计，防止在运动过程中变形。

2.1.2 光路设计

为了达到系统视场的范围的要求，需要多台投影仪共同投影。投影仪的图像投放位置很多，为了满足系统要求，每个投影仪的投放距离要求相同。综合考虑视场角、投放距离、投影仪数目的要求，显示系统采用球幕正投，6 台投影器分上下两排安放的方式。投影仪布局如图 3 所示。

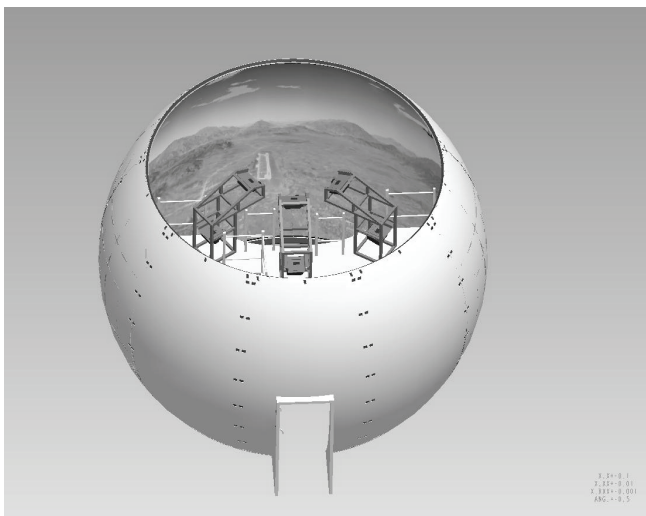


图 3 投影仪布局

为满足系统对亮度、分辨率以及均匀性的指标要求，考虑球幕特点以及座舱对光路的遮挡，综合设计了球幕增益、投影仪的摆放位置和投影仪性能指标，以使其最终能满足系统总体指标要求。

2.2 多通道网络结构

由于系统设计的水平视场角为 180°，垂直视场角为 80°，从保证投影图像亮度和分辨率以及满足场景运算实时性出发，将整个视景图像分配到 6 个渲染通道来完成。

多通道视景系统网络结构通常有内部广播和管理节点调度 2 种机制。设计增加 1 台作为视景控制节点，其他 6 台作为渲染节点，该 7 台计算机组成一个小的局域网的广播机制。视景控制节点负责与模拟器其他分系统通信，并由其驱动和控制渲染节点，并实现渲染节点的画面同步。图形渲染计算机完成地形数据库可视化渲染，亮度融合及边缘变形等功能。其网络结构如图 4 所示。

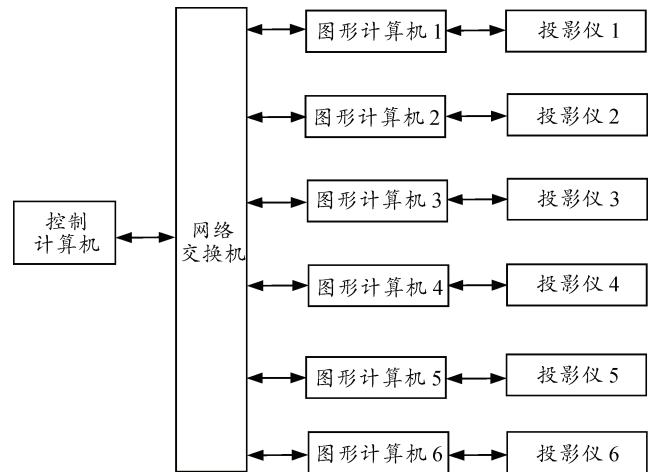


图 4 网络结构

考虑到系统的可靠性、可维护性以及高效性，系统计算机采用通用的货架产品，并采用市场上成熟的高端图形卡。

2.3 视景仿真软件

视景仿真软件是视景系统的核心，主要实现指令的输入和响应、场景驱动与渲染、地景库的管理和动态调度、环境以及特效模拟、碰撞检测等。

该系统软件包含亮度融合及边缘变形软件、视景驱动软件 Vega Prime 5.0 等。基本实现参数如表 1 所示。

表 1 视景计算机系统基本参数

序号	参数名称	条件	数值
1	图像更新率	—	60 Hz
2	传输延迟	从视景接口缓存取到新数据到图像显示出来	不大于 80 ms
3	每通道图像分辨率	—	1 400 × 1 050
4	每通道多边形（最多）	渲染、纹理、阴影处理、抗混迭的、滤镜效果、雾化、光照处理后多边形	300 000
5	纹理水平	全彩色图片纹理	基本/详细
6	纹理类型	地理特性与类型	RGB/RGBA
7	静态模型	固定、可重定位并且主控计算机确定的模型	10
8	抗混叠	—	8×8
9	多层纹理 (LODs)	地形 固定模型 活动模型	3 3 3
10	时间管理	具有黎明、白天、黄昏、夜间一天之内连续时间变化功能	

2.4 视景数据库

视景数据库由专用的视景图像建模工具 creator 和 terravista 制作。针对系统需求，先进行地形空间场景、三维目标和各种特殊效果的建模工作，然后将采集到的真实纹理照片和卫星照片通过扫描仪进行数字化处理，最后输入到计算机中进行纹理处理

和纹理应用,形成具有真实纹理的全三维模型。在成像计算机上用 VP 实时图像开发软件进行场景组织,完成配置文件的生成,然后通过 VegaPrime 和 OpenGL 在 VC 环境下编程实现程序各模块功能,完成视景仿真程序的开发。系统运行时,程序使用 ACF 配置文件,接收飞行仿真程序的信息和教员台指令,实时构建视点相关场景,动态加载地景库,提供系统所需的渲染图像并输出给显示系统,从而实现系统的完整功能。其显示效果如图 5 所示。



图 5 视景显示效果

3 关键技术

3.1 成像球幕面形经度控制技术

成像球幕面形经度控制技术用于确保成像球幕面形符合高精度指标要求。由于实像显示系统是投影设备直接将图像投射到成像球幕上,如果成像球幕的面形曲率不一致将会造成显示图像的扭曲变形;因此,在研制的过程中首要解决的是成像球幕的面形精度。由于成像球幕是由模具糊制而成,要控制直径达 6 m 多,厚度达 50 mm 的球带面形精度是非常困难的。为了解决这个问题,将每个单元成像球幕块分解为内蒙皮(成像幕)、外蒙皮(外观面)和中间夹层 3 部分。

内、外蒙皮均使用模具制作而成,内、外蒙皮从模具中取出到达到稳定状态时,尺寸会发生收缩变化,其比值成为收缩率。为保证最终产品的精度需将收缩率反向加到模具上,即将模具的型腔放大 $\chi(1+\text{收缩率})$ 倍。这样就可以减小产品因收缩而带来的误差。产品的材料、大小、形状及加工环境对收缩率都有一定的影响。因为内、外蒙皮采用的是复合材料,所以其收缩率很难确定,通过测量以前的实际生产中采用同样配比的复合材料所生产出来的产品的实际尺寸,得出一个收缩率,以此作为参考

收缩率。使用 MOLDFLOW 软件模拟本次产品的成形过程,得出一个理论收缩率。通过对 2 个产品的形状、大小的对比,结合参考收缩率与理论收缩率最终得出一个较为可靠的实用收缩率的范围,从而最大限度地减小内、外蒙皮因收缩而带来的误差,以确保其高精度要求。

中间夹层则采用 20 mm 厚的玻璃布板组成田字形筋骨,并在中空区域贴敷玻璃钢蜂窝以加强成像球幕的强度。在贴敷玻璃钢蜂窝前需先将玻璃钢蜂窝做浸胶处理,待胶干玻璃钢蜂窝结构固定后再贴敷在中间夹层田字形筋骨中空区域。

3.2 成像球幕拼接处接缝处理技术

由于成像球幕是由 9 块单独的球瓣拼接而成,所以拼接处的接缝处理是至关重要的。将接缝处理分两步,首先在拼接时保证接缝大小的均匀性,不可出现大的波动;随后在所有球瓣内表面四周预留宽 20 mm,深 0.5 mm 的凹槽,待球幕拼装完成后,再用预浸玻璃布和环氧树脂填上并打磨至与内表面齐平,既可以将接缝处理掉又可以避免成像球幕长期使用后在拼接处出现裂纹。

3.3 成像球幕喷涂光学涂料技术

实像显示系统是通过投影设备直接将图像投射到显示幕上,其立体感和纵深感不强,为使成像球幕成像清晰且加大其立体感和纵深感,需在成像球幕上喷涂某种特殊的光学涂料。此光学涂料需在无尘、密闭的空间内喷涂。

3.4 多通道同步技术

由于采用 6 个成像通道,多个通道画面的同步显得尤为重要,直接影响系统性能。本系统主要采用软件来实现主、从机之间的协调控制,从而保证帧同步。

渲染节点接收到控制节点的数据包,待数据渲染完成后,发送给控制节点渲染完成信息;控制节点在接到所有渲染节点回应信息后,才进行下一步工作,从而保证了几个通道运行的同步。

3.5 多通道融合软件

当多通道投影到显示介质时,多通道显示拼接带来通道间图像重叠,必然会存在一个边缘图像融合问题。采用边缘融合的技术,使得相邻通道重叠部分亮度线性减弱,从而使得整幅画面亮度一致。设计投影机位置时,优化了图像的相互匹配位置;

同时采用软融合的方法,使得拼接区域平滑,提高图像质量。融合软件安装于渲染计算机中,利用显卡的渲染周期与屏幕刷新周期的时间间隙,进行自动几何校正和自动生成融合区的计算,减少了硬件成本,做到 0 延时。

4 结束语

笔者研究了直升机模拟器视景系统的特点,对其显示系统、多通道网络结构、视景仿真软件、视景数据库等的设计进行了描述,对其中的关键技术进行了研究,并完成了产品的工程实现。

实际使用效果表明:该系统能充分满足该模拟器研制的指标要求,为飞行员产生身临其境的交互式仿真环境,具有较高的逼真度和可信度,有较好的应用价值。下一步,笔者将对碳素成像幕、激光投影器、多台计算机渲染一个显示通道、新的视景计算机架构等方面对视景系统做进一步研究。

(上接第 74 页)

- [7] 曹登高,徐浩军,胡良谋. 基于 RBF 网络的航空装备维修保障能力评估[J]. 航空计算技术, 2006, 36(5): 92-94.
- [8] 邓力,马登武,吴明辉. 复杂装备维修方式决策方法研究[J]. 航空维修与工程, 2013(4): 48-51.
- [9] 崔建国,林泽力,陈希成,等. 飞机液压系统健康状态综合评估技术研究[J]. 控制工程, 2014(3): 32.
- [10] 刘志勇,荣丽卿,高军. 面向健康管理的维修方案确定方法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(4): 113-116.

参考文献:

- [1] 李伯虎,柴旭东,朱文海,等. 现代建模与仿真技术发展中的几个焦点[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1871-1878.
- [2] 王行仁. 建模与仿真技术的若干问题探讨[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1896-1897.
- [3] 张立民,滕建辅. 飞行模拟器视景仿真系统设计与关键技术[D]. 天津: 天津大学电子信息工程学院.
- [4] 吴晓君,王昌金. 基于 Creator/Vega 的战场飞行视景系统的实时仿真[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(9): 2297-2300.
- [5] 李京伟,张利萍. 基于虚拟现实技术的飞行视景仿真[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(7): 1935-1937.
- [6] 龚少华,沈为群,宋子善. 基于 PC 机的实时视景仿真系统的研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(4): 118-121.
- [7] 谢广辉,魏少宁. 飞行模拟器视景系统发展现状和趋势[J]. 航天医学与医学工程, 2003, 16(3): 223-226.
- [8] 张燕燕,黄其涛,韩俊伟,等. 飞行模拟器视景系统的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2009(6): 3662-3667.
- [11] 赵培仲,魏华凯,戴京涛,等. 飞机战伤抢修的备件需求研究[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(8): 12-14.
- [12] 魏德才,张净敏,李闯,等. 基于模糊贴近度和熵权的航空装备维修安全综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(2): 107-111.
- [13] 施红,王强. 基于熵权的集对分析模型在航空维修安全评价中应用[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(10): 274-278.
- [14] 骆博,钟斌. 警用装备综合保障效能的熵权-双基点法评估[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(7): 97-99.