

用于阵形控制的无人机编队飞行仿真平台设计与实现

李文皓, 张珩

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)



摘要: 设计了一种模块化结构的无人机编队飞行仿真实验平台。根据阵形控制的模拟需求, 将仿真平台进行功能化模块构建, 并通过内集方式予以集成。仿真平台结合时序驱动机制、虚拟现实技术、记录与回放技术以及数据分析与重载软件, 使得仿真数据具有时序性、可视性、可记录及重绘性, 操作人员具有高度的参与性, 各模拟模块可以根据不同的研究成果进行更改、升级和替代。经过多次仿真实验, 该仿真平台运行稳定可靠、占用系统资源小, 为无人机编队飞行的研究提供了预验证性的工具, 为今后的仿真系统设计提供了一个参考。

关键词: 无人机编队飞行; 仿真平台; 模块化; 虚拟现实; 数据重载

中图分类号: V279 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2009) 03-0691-04

Simulation Platform Design and Realization for Unmanned Aerial Vehicle Formation Control

LI Wen-hao, ZHANG Heng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A modular structure platform for unmanned aerial vehicle formation control simulation and test was designed. According to the simulation demands of formation control, the simulation platform by functional modules was constructed and using interior database to integrate. The platform unions time-sequence actuation mechanism, virtual reality technology, record and replay technology, data analysis and reload software, and makes the simulation data to be Time-Succession, visible, recordable and enable to redraw, and brings high participant operation to operator, enables each simulation module be renewable and exchangeable. During numbers of simulation experimentation, the simulation platform runs stably and steady, high quality timeliness with low lever resource consume, and the platform offers a pre-validate tool for research of UAV formation flight control, and gives reference and experience to further simulation system design.

Key words: UAV formation flight; simulation platform; modulation; VR; data reload

引言

无人机编队通过多无人机的协作飞行将使其系统的综合效能和任务执行时的冗余性能得到大幅提升, 正成为无人机及其应用技术发展的研究新热点, 目前在其航迹任务规划、阵形编排控制、信息交互处理、以及具体实现验证等多个方面已经开展了广泛的研究^[1]。随着研究的深入, 设定的环境和编队模型的相异性, 对验证研究理论的方法和手段带来了更大的难度, 由于实体验证需要完备的工程设计, 大量的验证工作耗时, 以及昂贵的实验仪器和物质消耗, 因此虚拟仿真验证作为一种灵活、低耗的验证方法适合于大多数的理论性预研研究^[2-5]。

目前的国外已经开展用于无人机编队飞行的虚拟仿真实验平台设计与实现方面的研究^[6-8], 其中[6]建立了基于MATLAB-Simulink的飞行仿真系统, 能够在给定的条件下对无人机的导航控制和行为进行推算仿真, 能通过仿真结束后的飞行轨迹进行分析, 但是其不能实时的提供直观的仿真虚拟环境, 也不能在中途施加即时的飞行指令; 在[7]中建立了一套多行动装置的可视化仿真系统, 可以演示模拟多个行

动装置的行为, 但仿真过程中不能施加控制指令。本文将根据无人机编队阵形控制研究的需求特点, 通过虚拟现实技术, 结合MFC、OpenGL、MATLAB和MilkShape 3D设计并实现一种模块化的无人机编队飞行仿真实验平台, 使其仿真数据具有时序性、可视性、可记录以及可重绘性。

1 无人机编队飞行仿真平台设计

1.1 功能需求分析

无人机编队阵形控制包括单机控制、阵形保持控制^[9]、链路通信控制、避撞控制以及阵形变化控制等, 为了验证这一系列的控制方法的综合效果, 仿真平台必须能够具有以下几点模拟功能:

1. 编队中各无人机的飞行运动学动力学^[10]模拟;
2. 编队中各无人机控制器输入输出模拟;
3. 编队气动耦合影响^[11]及外部环境干扰模拟;
4. 无人机编队阵形保持控制器输入输出模拟;
5. 无人机编队避撞控制器输入输出模拟;
6. 无人机编队阵形变化控制器输入输出模拟;
7. 地面站控制干预模拟;

在生成上述模拟数据的前提下, 为了直观形象的体现模拟飞行过程, 并且能够对模飞数据进行深度的分析和比较, 仿真平台应当具备以下几个技术:

收稿日期: 2007-07-03

修回日期: 2007-10-17

作者简介: 李文皓(1983-), 男, 湖南岳阳人, 博士生, 研究方向为无人机编队飞行控制与仿真; 张珩(1961-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博导, 研究方向为编队飞行理论、飞行器控制与操作。

1. 数据实时可视化技术;
2. 记录与回放技术;
3. 数据分析和重载技术;

此外,为使得系统具有良好的扩展性,以验证不断深化的研究成果,在设计系统时应当充分采用模块化、独立化以及通用化接口设计。

1.2 系统构架设计

通过上述功能分析以及技术要求,以模块化设计思想为指导,将无人机编队飞行仿真实验平台分解为计算模拟、人机交互和后台处理三个部分,其整体构架如图 1 所示。

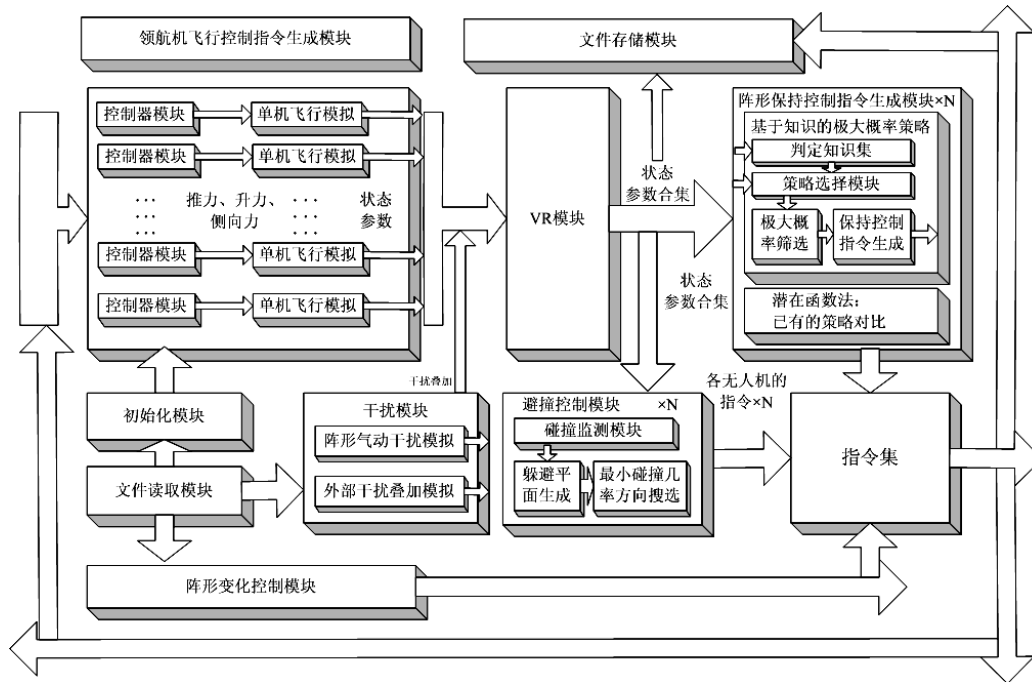


图 1 无人机编队仿真实验平台组成结构图

计算模拟部分包括:

- 1) 控制器模块: 模拟单机控制器行为, 输入为期望状态指令, 输出为控制力和控制力矩;
- 2) 无人机飞行动力学运动学模块: 模拟单机飞行行为, 输入为控制力和外加干扰, 输出为无人机在综合力和力矩下的飞行状态变化;
- 3) 阵形保持控制模块: 模拟在保持阵形控制时的信息调度和指令的生成, 输入为阵形中各无人机的状态, 输出为阵形保持的状态指令;
- 4) 避撞控制模块: 模拟当引发避撞规避控制时的指令生成, 输入为阵形中各无人机的状态, 输出规避路径的状态指令;
- 5) 干扰模块: 模拟产生在飞行过程中各无人机受到的编队气动影响和外加的气动干扰;
- 6) 阵形变化控制模块: 模拟当进行阵形改变时产生的无人机指令, 输入为期望阵形和当前阵形状态, 输出为阵形变化的飞行路径的状态指令;
- 7) 领航机飞行轨迹控制模块: 模拟地面站的干预行为, 可以通过即时的输入期望轨迹对无人机编队的飞行轨迹命令进行干预;

对于由 N 架无人机组成的编队, 上述 a—f 模块将各生

成 N 个独立模块, 以充分的模拟各个无人机相互独立的控制处理和飞行行为, 设计标准化输入输出的接口, 在实验前可以更改或载入不同核心算法, 以验证各种拟算法的模拟或控制效果。

人机交互部分包括:

- 8) VR 可视化模块: 创建区域视窗并将各无人机飞行的状态实时的反映于虚拟 3D 场景中, 使得实验者能够形象化的了解到当前的无人机编队飞行的各种状态; 输入为对应当前时刻的飞行对应状态, 输出为场景渲染图形图像;
- 9) 文件读取模块: 将各种状态, 参数, 设定等通过文件表的方式读入到系统中, 可以更改或者创建不同的文件表改变系统的设置;
- 10) 界面交互模块: 方便实验者干预实验的进程, 可以通过界面完成各种干预操作, 包括更改期望阵形、生成领航机轨迹、更改当前飞行状态、变更控制参量、调整虚拟场景视点视角以及变更干扰水平等;
- 后台处理部分包括:
 - 11) 文件存储模块: 将实时生成的模飞数据按时序存储;
 - 12) 录像模块: 将虚拟飞行的 3D 模拟图像和界面操作过程录制, 以便日后对比和分析;
 - 13) 数据分析软件: 将存储后的模飞数据按分析需求进

行再处理, 针对具体的验证方向对数据进行提取、转换和绘制, 以便通过分析得出验证结论

整个无人机编队飞行仿真实验平台由上述三大部分共 13 类模块组成, 各模块之间的组织和调用流程如图 2 所示:

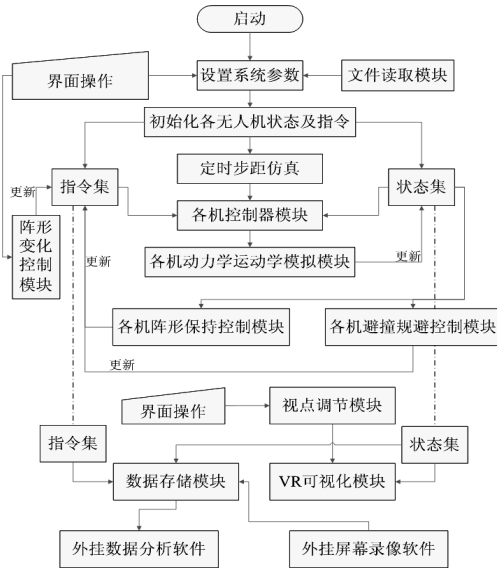


图 2 无人机编队仿真实验模块调用流程图

2 无人机编队飞行仿真平台实现

2.1 界面实现

无人机编队飞行仿真实验平台的人机界面如图 3 所示, 充分考虑人机工程学, 将界面分为操作区和监视区, 靠右的竖条区域为操作区, 其中包括平台启动、编队飞行各参数的设定、环境参数设定、飞行轨迹制定视点调节以及各种控制器功能选项等, 涵盖了所有的干预功能; 监视区包括数值监视和虚拟 3D 监视, 飞行过程中的模拟数据将实时的以数值和 3D 场景展现, 虚拟 3D 监视分为 3 个视框, 左边的大视框监视实际飞行的数据, 右上视框监视期望指令产生的数据, 右下视框监视人为设定的目标数据, 通过上述数值和三个视框的监视, 操作者可以从多角度, 多感官的实时了解当

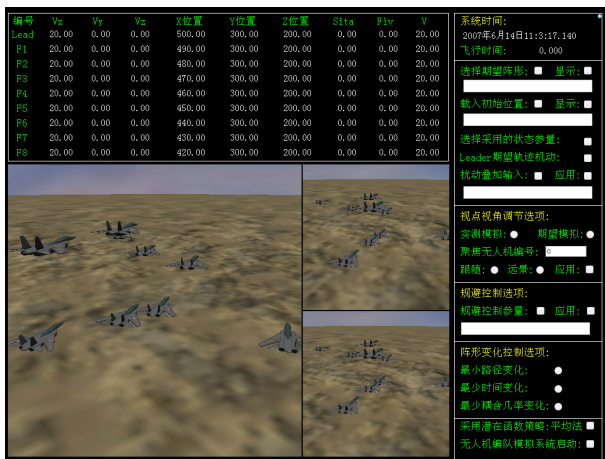


图 3 无人机编队仿真实验平台运行界面图

前的编队飞行状态, 为操作者提供第一手的判断资料。

2.2 VR3D 虚拟场景实现

由于纯以 Opendgl 语句实现场景和无人机模型代码量巨大, 也不利于针对于不同的无人机尺寸模型的修改, 为此, 采取的方法为先通过在外部的 3D 设计软件 MilkShape 3D 上构造模型, 通过编写模型读入模块^[12]将其映射至场景中, 而后由 Opendgl 驱动将模型在场景中以对应的飞行状态显示。由于 MilkShape 3D 的视图化建模和方便强大的建模功能支持, 大大简化了开发的复杂程度, 而且针对不同的无人机模型可以进行相应修改, 使得建立模型与仿真平台互相独立, 增大了仿真平台的扩容性和模型的可移植性。此外, 通过设定可变跟随和随机全景视点, 使得可以从多角度、大跨度、多尺度的观察虚拟场景, 为操作员的感官认知带来有力支撑。其模型制作和场景多视点观察效果如图 4 所示:

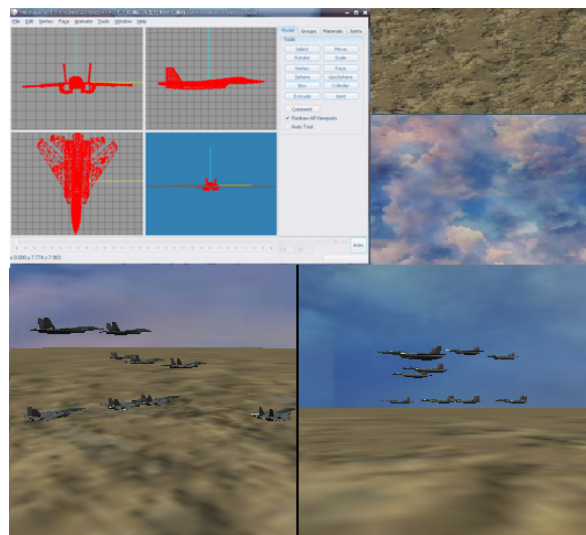


图 4 无人机模型制作和场景多视点观察效果图

2.3 模块化与集成实现

为了使得仿真系统具备较强的可拓展性, 其各模拟计算均设计为通用性接口模块, 内部嵌入处理或者控制算法, 并制作成 dll 文件使得各模块内部与运行系统相互独立, 在不断深入的研究中可以离线的修改对应模块算法而无需对仿真系统内部进行升级, 当出现错误或者异常时可通过检查各模块的输入输出迅速予以定位和修复。

无人机编队飞行仿真平台的内部模块既相互独立又存在着较强的数据交互性耦合, 为在独立性的条件下完成耦合性的数据交互, 采用时序信息集合的方法, 设立了状态集和指令集。在状态集内, 对各机均创建了子状态集, 其中除了各机自身的飞行状态外还包括: 当前时间标签、可获取的编队信息位置标识、以及查询权限索引等, 各无人机的编队保持控制、碰撞控制以及阵形变化控制器通过各自的索引权限在状态集中获取状态信息, 以模拟在编队飞行过程中各无人机之间的交互式处理模式和各无人机相互独立的飞行控制

过程。当控制器输出指令后，将指令集刷新，经过飞行控制器和动力学运动学模拟后推算至下一时刻的各机飞行状态并更新状态集，完成一次模拟轮回，通过间歇式的时序驱动仿真平台不断进行模拟回路，使得仿真具有较高的实时性。

2.4 数据分析软件实现

数据包括飞行数据和图像数据，数据分析软件包括数据存储和数据分析。为保证系统的运行效率和实时性，在记录数据的过程中应当尽量少占用系统资源，为此，录像数据通过外挂录像软件 Camtasia 记录为 AVI 格式，飞行数据则以二进制存储为 txt 文件形式。当进行回放分析时，图像数据可由任意支持 AVI 格式的播放器打开，通过查询右上角的飞行时间可以观察到任意时刻的图像；飞行数据的再处理通过自行研发的数据分析软件完成，该软件结合 MFC 与 MATLAB 引擎将飞行数据进行二次处理，首先采用文件映射的方法减小大数据文件的读取时间，将存储的二进制飞行数据读入并按类别分割后存储为若干子文件，随后按界面操作将对应数据由对应子文件中读取，进行相应加权、做差、转换以及系列函数处理后调用 MATLAB 绘图引擎将处理后的数据进行绘制以便定量分析。该分析软件可以按要求绘制多机或单机的平面和 3 维飞行轨迹曲线、各机各状态参量随时间的变化曲线、所有或指定若干无人机的指定状态之间的耦合曲线等 200 多种曲线图，并且可以按分析需要进行功能拓展，为实验后的反复校验和全面深入的分析提供了针对性的技术支持。数据分析软件运行效果如图 5 所示：

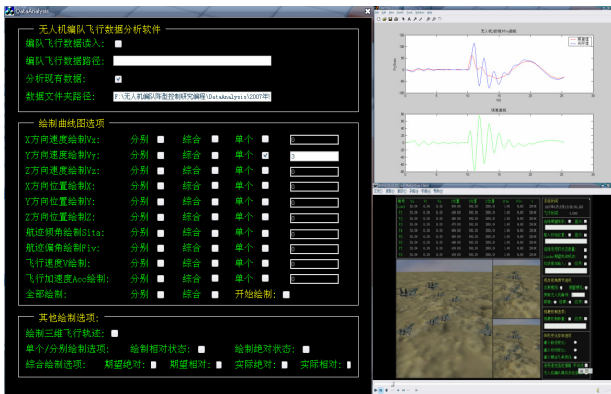


图 5 数据分析软件运行效果图

3 仿真实验平台性能测试

为验证仿真实验平台的稳定性和实时性，进行了近 40 次的飞行实验测试，测试平台如表 1:

表 1 测试平台配置列表

CPU	AMD 4200+ Double Cue
内存	DDR2 1024M 800MHz
显卡	Nvidia 7900GS 512M
操作系统	Windows Xp Home
软件版本	VC++ 6.0, MATLAB6.5, MilkShape 3D 1.7.5, Camtasia 1.0

测试结果表明：该仿真平台运行稳定可靠、占用系统资源较小、具有较高的实时性。具体参数如表 2:

表 2 仿真平台测试结果

平均仿真时间	36 分 27 秒
平均飞行数据量	36.90M
平均录像数据量	721.59M
仿真数据刷新率	10 帧/秒
VR 帧数	5 帧/秒
系统资源占用度	Cpu: 31% 内存: 30M
平均重绘图线	47 幅

4 结论

随着无人机编队飞行研究的深入，使得综合验证各控制理念的需求日趋重要和迫切，本文通过可替换的模块化设计、实时的 VR 场景更新以及视点调节、多元的数据记录和分析方法，使得在充分模拟无人机编队飞行的飞行状态条件下，能够给与实验者深刻的沉浸感和参与感，为数据的定性和定量分析提供有力支撑。该仿真实验平台为无人机编队飞行的研究提供了一个预研性的实验工具，同时也为今后的仿真实验系统的设计与实现提供了经验参考。

参考文献:

- [1] 李文皓, 张珩. 无人机编队飞行技术的研究现状与展望[J]. 飞行力学, 2007, 25(1): 9-11.
- [2] 张金生. 激光制导武器仿真系统的分布式程序设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1): 44-47.
- [3] 黄先祥, 马长林, 高钦和, 等. 大型装置起竖系统协同仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1): 1-2.
- [4] 苟新禹, 胡明明, 魏瑞轩. 虚拟微型扑翼飞行器建模仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 2877-2880.
- [5] 陈鹏宇, 朱玉鹏, 王宏强, 等. 侦察信息融合处理仿真系统的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 2936-2939.
- [6] Unnikrishnan Suraj. Reactionary automatic envelope protection for autonomous unmanned aerial vehicles [C]// AAIA Atmospheric Flight Mechanics Conference, Reston, VA 20191, United States. USA: AAIA, 2004. Aug 16-1
- [7] Rasmussen S J, Chandler P R. MultiUAV: a multiple UAV simulation for investigation of cooperative control [C]// Simulation Conference ISBN: 0-7803-7614-5. Wright-Patterson AFB, USA: 2002, Winter, 1: 869-877.
- [8] Castillo-Effen Mauricio. Modeling and visualization of multiple autonomous heterogeneous vehicles [J]. IEEE (S1062-922X), 2005, 3: 2001-2007.
- [9] 李文皓, 张珩. 分布式多无人机编队飞行的阵形保持策略[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(20): 4765-4768.
- [10] 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社 (ISBN: 7-81077-638-X), 2005.
- [11] 柳永, 吴密翠. 密集编队气动耦合效应分析[J]. 飞行力学, 2001, 19(2): 12-16.
- [12] Richard S Wright. Benjamin OpenGL 超级宝典[M]. 徐波译. 北京: 人民邮电出版社 (ISBN: 7-115-13720-X), 2005.