

12-12-2019

Low-cost Hardware-in-the-loop Flight Simulation System

Chuanyan Tian

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

Junzhao Hu

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

Jikui Liu

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

Qianlong Yang

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, 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.

Low-cost Hardware-in-the-loop Flight Simulation System

Abstract

Abstract: Hardware-in-the-loop simulation is an effective way and experimental method to evaluate and verify the performance of the aircraft system. To satisfy the requirements of real-time, scalability, high reliability simulation of a certain aircraft control system, *a new design of low-cost hardware-in-the-loop real-time scene simulation system consisted of IPC, DSP, three-axis turntable, steering engine and visual simulation computer was put forward*. Real-time simulation system software composed by flight control simulation module, aircraft movement simulation module and scene simulation module was implemented, and *it resolved the difficulties in real-time, data synchronization, multiple node communication of simulation system*. Comparison with flight test results shows that the simulation system satisfied the requirements in real-time and reliability, and it is valuable for aircraft design and research.

Keywords

hardware-in-the-loop simulation, aircraft, real-time, scene simulation, data synchronization

Recommended Citation

Tian Chuanyan, Hu Junzhao, Liu Jikui, Yang Qianlong. Low-cost Hardware-in-the-loop Flight Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(6): 1123-1127.

一种低成本的半实物飞行仿真系统

田传艳, 胡军照, 刘继奎, 杨黔龙

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 半实物仿真是飞行器系统评估与验证的有效技术途径和实验方法。针对某飞行器控制系统实时性、可扩展、高可靠性仿真的需要, 给出了由工控机、数字信号处理器、三轴转台、舵机和视景仿真机组成的低成本半实物实时视景仿真系统设计, 完成了由飞控仿真模块、运动仿真模块和视景仿真模块等组成的仿真系统软件开发, 解决了仿真系统的实时性、数据同步、多结点通信等问题。和飞行试验的对比结果表明, 该仿真系统满足了仿真实时性和可靠性要求, 对于飞行器研制具有重要的应用价值。

关键词: 半实物仿真; 飞行器; 实时性; 视景仿真; 数据同步

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 06-1123-05

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0191

Low-cost Hardware-in-the-loop Flight Simulation System

Tian Chuanyan, Hu Junzhao, Liu Jikui, Yang Qianlong

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Hardware-in-the-loop simulation is an effective way and experimental method to evaluate and verify the performance of the aircraft system. To satisfy the requirements of real-time, scalability, high reliability simulation of a certain aircraft control system, a new design of low-cost hardware-in-the-loop real-time scene simulation system consisted of IPC, DSP, three-axis turntable, steering engine and visual simulation computer was put forward. Real-time simulation system software composed by flight control simulation module, aircraft movement simulation module and scene simulation module was implemented, and it resolved the difficulties in real-time, data synchronization, multiple node communication of simulation system. Comparison with flight test results shows that the simulation system satisfied the requirements in real-time and reliability, and it is valuable for aircraft design and research.

Keywords: hardware-in-the-loop simulation; aircraft; real-time; scene simulation; data synchronization

引言

半实物仿真技术是飞行器系统评估与验证的一种有效技术途径和实验方法^[1-3], 被广泛应用于飞行器设计与制造过程中。由半实物仿真模型复杂

及系统高实时要求, 一般需要基于专业半实物仿真机开展。专业仿真机及其配套操作系统存在购置成本高、可扩展性差、维护不方便等问题, 而且只有部分大型研究机构配备了这种实验平台, 主要应用于大型飞行器的参数调整及定型。

近年来, 随着高精度打击武器的快速发展, 试验型靶标等小型飞行器的研制和开发需求越来越多, 研制周期要求越来越短。在这种情况下, 迫切需要一种低成本、易扩展的半实物仿真系统为小型



收稿日期: 2017-05-09

修回日期: 2017-09-07;

基金项目: 国防基金(210901);

作者简介: 田传艳(1980-), 女, 山东菏泽, 硕士, 助理研究员, 研究方向为飞行器系统仿真等; 胡军照(1981-), 男, 陕西西安, 硕士, 助理研究员, 研究方向为制导与控制系统等。

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

• 1123 •

飞行器研制提供实验支撑, 本文设计并建立了一种由工控机、数字信号处理器(DSP)、三轴转台、舵机和视景仿真机组成的低成本半实物飞行仿真系统。

1 系统构建

随着计算机及相关技术的快速发展, 工控机和 DSP 芯片的性能及信息处理能力得到大幅提升, 基于工控机和 DSP 构建低成本半实物飞行仿真系统

成为可能。本文以三台工控机和一个 DSP 芯片, 配合舵机组件、惯导装置、三轴转台等设备, 构建了半实物飞行仿真系统, 如图 1 所示。

图 1 中, 仿真计算机、视景仿真计算机、数据分析计算机均采用工作在 Windows 操作系统下的研华 610L 工控机, 飞控计算机采用 TI 公司 C6000 系列 DSP 芯片, 系统与专业仿真系统相比, 如表 1 所示。

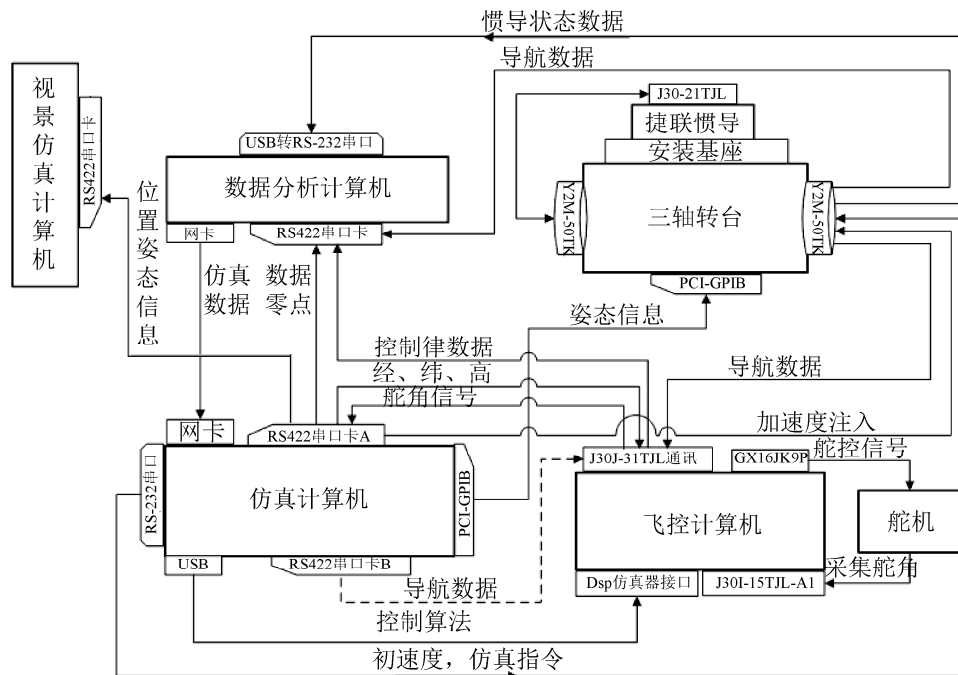


图 1 半实物仿真系统硬件结构及原理图

Fig. 1 Hardware structure and principle of HILS

表 1 仿真系统特性对比图

Tab. 1 Characteristic comparison chart

特性系统	建立的仿真系统	专业仿真系统
成本	<15 万	>50 万
实时性	1 ms	1 ms
视景仿真	具备	无
建设周期	<3 个月	>6 个月
维护性	易维护	专业人员维护

2 系统软件设计

半实物仿真系统软件是整个仿真系统的核心, 承担着飞行器运动学和动力学计算、控制律计算、

三维视景仿真、仿真进程及数据管理、人机交互、设备间通信等功能。针对系统的多功能和易扩展需求, 系统软件采用分布式层级架构方法设计, 划分为 4 个独立模块(飞控仿真、飞行器运动仿真、视景仿真、数据分析)和 4 个层次(界面层、处理层、管理层、通讯层), 如图 2 所示, 其中, 系统软件中飞控仿真、飞行器运动仿真、视景仿真、数据分析模块分别运行在飞控计算机、仿真计算机、视景仿真机、数据分析计算机上, 模块之间通过通信层接口联接。

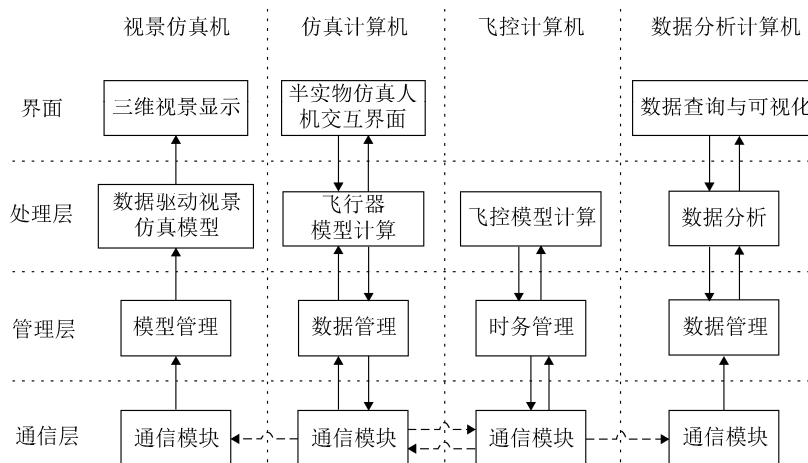


图 2 半实物仿真系统软件架构图
Fig. 2 Software architecture of HILS

2.1 飞控仿真模块

飞控仿真模块作为飞行器的飞行控制核心, 完成飞行器控制律计算、火控对接、挂飞与投放、飞行器综合测试等功能, 同时还集成了电源并网以及驱动舵机电源开关等功能。

飞控仿真模块结构分为 3 层: 处理层、管理层、通信层, 如图 2 所示。处理层主要完成控制律计算和组合导航解算, 管理层完成包括模块初始化、设备自检、上电引导等时序任务, 通信层实现总线通信、串口通讯等功能。

2.2 飞行器运动仿真模块

飞行器运动仿真模块承担了飞行器运动学和动力学计算、环境参数设置、仿真时序控制以及仿真回路规模设置等重要功能, 是半实物仿真系统软件的重要组成部分。

飞行器半实物仿真是时间约束非常强的过程, 要求仿真系统能够在确定的时间内执行计算并对外部的事件做出快速响应^[4], 但是, 由于 Windows 线程调度的不确定性, 单纯的 Windows 操作系统难以满足飞行器半实物仿真实时性要求。为了满足仿真系统的实时性和可靠性要求, 重点开展了以下 3 方面的研究工作。

2.2.1 精确定时

在 Windows 操作系统下, 提供了多种定时器

API 函数, 理论上能获得最小 1ms 的定时精度, 但是由于线程调度的不确定性, 长时间定时结果发现单步误差和累积误差较大。为了提高 Windows 系统定时的精确性与可靠性, 本文采用硬件扩展方法, 通过引入 PCI-8554 定时板卡控制并产生高精度时钟信号。该板卡的时钟频率为 8 MHz, 可以产生时间间隔为 125 ns 的时钟信号。

2.2.2 数据同步

飞行器半实物仿真系统硬件涉及到仿真计算机、视景仿真机、飞控计算机、舵机、转台、惯导等多个参试实物, 在半实物仿真过程中, 各个参试设备之间需要进行大量的数据交互, 易出现数据丢帧、错帧等数据不同步的问题。大量的数据分析表明, 造成数据同步问题的因素比较复杂, 其中由半实物仿真系统中各结点的时钟不同步引入的时序混乱是主要原因。

本文提出在各结点设置一个同步接口, 在响应控制输入前会等待一个时钟信号, 从而达到与仿真系统总控制计算机(仿真计算机)的数据同步。

仿真计算机通过使用 PCI-8554 定时板卡提供的 1 ms 定时中断向其它参试结点发出时钟同步信号。参试结点接收到同步信号后, 开始执行工作线程里的相关内容, 确保整个系统的数据同步和时序一致性。

与无同步接口的异步仿真系统相比, 同步仿真

系统可以实现更复杂的仿真操作模式。

2.2.3 多线程串口通信

根据飞行器系统半实物仿真功能要求,系统中各结点之间需要进行频繁的数据与指令交互。多线程通信具有效率高、编程简单等优点^[5],本文采用了多线程定时串口通信方法处理系统内部数据/指令的 I/O 等事件。

为提高数据/指令传输的可靠性和完整性,在多线程通信中采取线程同步的方法,其工作流程为:首先初始化串口,开启串口监测工作线程 Thread_R,监测到串口接收到数据/指令事件等,就以消息方式通知主线程,激发消息处理函数进行数据处理;对于数据/指令的发送,首先创建新的线程 Thread_S,然后利用设置的定时中断激活写线程,最后通过串口发送数据/指令至其它结点。

2.3 视景仿真模块

飞行器视景仿真通过对构建的虚拟场景的控制和模型的六自由度实时驱动达到模拟显示真实飞行场景的目的。视景仿真模块主要由模型设计、场景配置(ACF 文件)和应用程序开发三部分组成,核心是应用程序开发。

视景仿真的开发工具从底层工具层开发到高级应用开发有多种选择^[6-7],从与现有软件的兼容性以及后期应用程序发布问题考虑,本文选用 Vega Prime,并针对视景仿真的交互性特点,设计了基于 MFC 的 Vega Prime 视景仿真模块,工作流程主要分为初始化、仿真循环和结束。

1) 初始化:主要包括初始化场景图、初始化 VP 模型接口以及对所需的类实体的初始化等。

2) 仿真循环:根据接收到的飞行器六自由度信息(x, y, z, h, p, r)变换飞行器位置姿态,并实时绘制视景仿真场景。飞行器运动仿真模块六自由度信息发送频率可达 200 f/s,满足 30 f/s 的图像刷新频率。

3) 结束:即调用 shutdown()函数,完成一些内存释放、终止异步线程后退出仿真系统。

3 半实物仿真实验与分析

利用本文建立的半实物仿真系统,完成了某飞行器半实物仿真实验,仿真效果如下:

3.1 实时性参数

半实物仿真系统中仿真实时性直接影响着仿真时序控制和整个仿真结果的置信度。通常,实时性可以用单步仿真耗时 Δt 参数来表征,该参数定义为从仿真计算机开始飞行器运动仿真计算到舵机反馈发送回仿真计算机的时间间隔。

在半实物仿真实验中,以飞行器某条组合拉偏航迹($Ma=0.66$, $x=1500$ m, $H=5\ 000$ m, $Z=300$ m, $\delta_{gxq}=1^\circ$, $\delta_{gxh}=3.5^\circ$, $\delta_{gy}=1.5^\circ$, $\delta_{gz}=1.5^\circ$, $V_f=40$ m/s, $\theta=-3^\circ$, $\varphi=-4^\circ$)为初始仿真条件,仿真计算机、飞控计算机、转台、惯导、舵机、视景仿真机、数据分析计算机等参试实物组成仿真闭环回路,记录仿真过程中单步耗时结果,统计分析结果如图 3 所示。

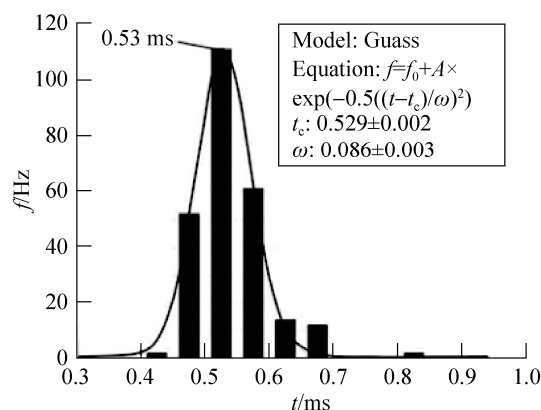


图 3 带转台半实物仿真单步耗时直方图
Fig. 3 Time-consuming histogram of single step

由图 3 可以看出:该半实物仿真系统单步仿真耗时 Δt 在 0.4~0.95 ms 范围内,严格小于 1 ms,均值为 0.53 ms。该结果表明:建立的半实物飞行仿真系统可以满足仿真步长为 1 ms 的半实物仿真要求。

3.2 视景仿真

为从不同角度和方位观察飞行器,视景仿真模块中创建了 far, follow, near 等多个通道,并定义了对应的观察者。三通道视景仿真效果见图 4。

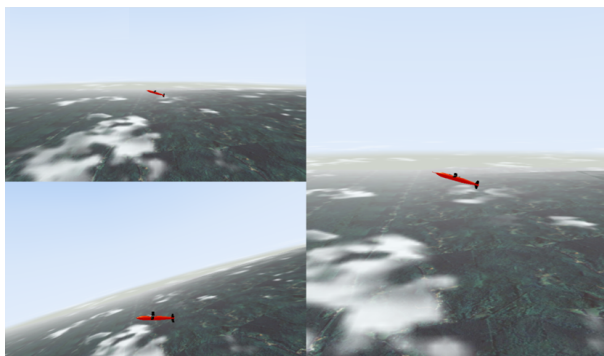


图 4 多通道视景仿真

Fig. 4 Multi-channel scene simulation

视景仿真结果表明,在飞行器运动仿真的过程中驱动视景仿真模块,实时以三维图像的形式显示半实物仿真过程,可以为飞控系统的设计及验证评估提供更直观更易理解的姿态与轨迹图像,改善了只用曲线显示,仿真结果不直观的状况。

3.3 系统验证和分析

飞行器半实物仿真将参试设备按照图 1 连接,完成了包括不同的发射条件、气动参数、风干扰、等效舵干扰等情况下的半实物仿真,仿真实验结果与飞行试验结果对比,验证了所建立的半实物仿真系统的可靠性和实用性。飞行航迹对比结果见图 5。

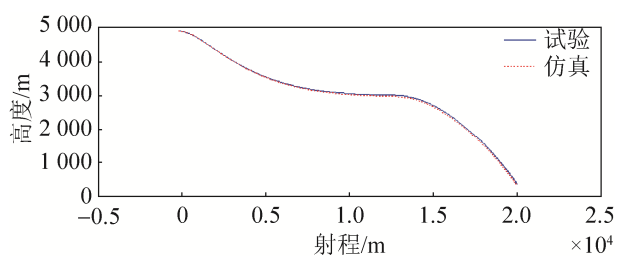


图 5 半实物仿真航迹与飞行试验航迹对比

Fig. 5 Contrast figure between HILS track and flight test track

从图 5 中可以看出半实物仿真结果与飞行试验结果相吻合,表明所建立的半实物仿真系统满足了半实物飞行仿真的需要。

4 结论

本文针对小型飞行器低成本半实物仿真的需要,设计了一种基于工控机、DSP 的半实物飞行仿真系统。该系统已成功应用于某飞行器半实物仿真

实验,实现了飞行器复杂环境下的半实物仿真与三维视景显示,降低了同类半实物仿真系统开发成本,可为飞行器控制律模型的设计、仿真、分析、演示和验证提供平台和依据。

参考文献:

- [1] Dolega B, Rogalski T. The new conception of the laboratory testing of the FBW control system for small aircraft[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology (S0002-2667), 2004, 76(3): 293-298.
- [2] Vishnu Kumar, Hanmaro Yong, Dugki Min, et al. Auto landing control for small scale unmanned helicopter with flight gear and HILS[C]. 5th International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology. South Korea: IEEE, 2010.
- [3] 常晓飞, 符文星, 闫杰. 基于 RT-LAB 的某型导弹半实物仿真系统设计[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18): 5720-5723.
Chang Xiaofei, Fu Wenxing, Yan Jie. Design of Missile Hardware-in-the-loop Simulation System Based on RT-LAB[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(18): 5720-5723.
- [4] 单家元, 孟秀云, 丁艳. 半实物仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 60-67.
Shan Jiayuan, Meng Xiuyun, Ding Yan. Semi-physical Simulation[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2005: 60-67.
- [5] 沈满德, 吴周桥, 李德骏. 多线程技术在破片参数测量系统中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(5): 119-122.
Shen Mande, Wu Zhouqiao, Li Dejun. Application of Multithread Technology in Fragment's Parameter Measurement System[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(5): 119-122.
- [6] 刘卫东, 高立娥, 康凤举, 等. 可视化与视景仿真技术[M]. 陕西: 西北工业大学出版社, 2012: 34-92.
Liu Weidong, Gao Li'e, Kang Fengju, et al. Visualization and visual simulation technology[M]. Shaanxi: Northwestern Polytechnical University Press, 2012: 34-92.
- [7] 吴华兴, 康凤举, 郭庆, 等. 基于 vsTasker 和 Vega Prime 的无人机攻击过程仿真[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(10): 2497-2502.
Wu Huaxing, Kang Fengju, Guo Qing, et al. Simulation of Attacking Progress for UCAV Based on vsTasker and Vega Prime[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(10): 2497-2502.