

文章编号:1001-5078(2024)08-1208-08

· 激光应用技术 ·

## 低成本激光制导的半实物仿真系统设计与实现

张红梅<sup>1,2</sup>, 周杰鑫<sup>1</sup>, 许 谨<sup>3</sup>, 孟光磊<sup>1,2</sup>

(1. 沈阳航空航天大学 自动化学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 空战系统技术航空科技重点实验室, 辽宁 沈阳 110000;

3. 沈阳航空航天大学 人工智能学院, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:**提出了一种激光制导半实物仿真系统。系统由软件仿真子系统、硬件在环仿真子系统和视景仿真子系统构成。软件仿真子系统基于 Simulink 建立了制导飞行器的运动学、动力学模型和目标的运动模型,可以完成制导飞行器的内环姿态控制和外环制导的数字仿真。硬件在环仿真子系统由工控机分别控制激光制导单元和目标模拟单元,实现制导飞行器制导的激光导引。应用基于高斯光斑的拟合改进算法提高四象限探测器对目标位置的检测精度。Simulink 通过 UDP 通讯与 LabView 进行数据交互。使用 AC3D 建立了制导飞行器与目标的三维物理模型,基于 FlightGear 实现了制导飞行器和目标的联合仿真,构建了视景仿真子系统。仿真实验表明,该系统不但能够完成制导飞行器的飞行姿态控制和制导律的研究,而且能实时实现三维视景显示。

**关键词:**制导系统仿真;硬件在环;FlightGear;LabView;matlab

中图分类号:TJ765.4;TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.08.005

## A low-cost hardware-in-the-loop design and implementation for laser guidance simulation system

ZHANG Hong-mei<sup>1,2</sup>, ZHOU Jie-xin<sup>1</sup>, XU Jin<sup>3</sup>, MENG Guang-lei<sup>1,2</sup>

(1. School of Automation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Aviation Science and Technology Key Laboratory of Air Combat System Technology, Shenyang 110000, China;

3. School of Artificial Intelligence, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In this paper, a laser guidance hardware-in-the-loop simulation system is proposed, which consists of a software simulation subsystem, a hardware-in-the-loop simulation subsystem, and a visual simulation subsystem. The software simulation subsystem establishes the kinematics and dynamics model of the guided aircraft and the motion model of the target based on Simulink, which can complete the digital simulation inner-loop attitude control and outer-loop guidance of the guided vehicle. The hardware-in-the-loop simulation subsystem is controlled by an industrial computer to control the laser guidance unit and the target simulation unit respectively, to realize the laser guidance for guided aircraft guidance. An improved fitting algorithm based on Gaussian spot is applied to improve the detection accuracy of the four-quadrant detector. Simulink communicates with LabView via UDP communication protocols. The three-dimensional physical model of the guided aircraft and the target is built with AC3D, and the co-simulation of the guided aircraft and target is achieved based on FlightGear, and the view simulation subsystem is constructed. Simulation experi-

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 62373261)资助。

作者简介:张红梅(1973-),女,博士,副教授,主要研究方向为飞行器姿态控制与轨迹优化。E-mail: zhanghongmei@sau.edu.cn

通讯作者:周杰鑫(1999-),男,硕士研究生,主要研究方向为导航指导与控制。E-mail: zhoujiexin957@outlook.com

收稿日期:2023-10-30;修订日期:2023-12-29

ments show that the system is not only capable of completing the study of the flight attitude control and guidance law of the guided vehicle, but also realizing the three-dimensional visual display in real time.

**Keywords:** guidance system simulation; hardware-in-the-loop; FlightGear; LabView; matlab

## 1 引言

制导飞行器是一种可以指定攻击目标,依靠制导系统来控制飞行轨迹、甚至追踪目标动向的飞行器。其结构复杂,性能先进,价格也更加昂贵。由于其造价过高且只能一次性使用,因此不能大量地使用靶试的方法来进行试验<sup>[1]</sup>。

制导仿真系统为制导飞行器的研发提供了大量的帮助。仿真系统提供了可重构、可扩展、模块化的仿真能力<sup>[2]</sup>,提高了制导仿真的通用性。半实物仿真技术在制导系统中具有巨大的促进作用,将制导仿真的过程更具形象化、具体化,将研究成本进一步缩小,使研究结果更具真实性<sup>[3-5]</sup>。

美国在 20 世纪 60 年代末期开展对半实物仿真技术的研究。针对制导武器的研究开发需求,建立了相应的仿真实验室(ASC)<sup>[6]</sup>。20 世纪 80 年代左右,我国逐步开始建立了一大批比较完整的半实物仿真实验室,半实物仿真技术在国内的高校和研究机构中得到飞速的发展。空军第二航空学院建成的精确制导仿真实验室,具有一套柔性的仿真系统,开展了对图像制导系统的半实物仿真试验和仿真测试。该仿真测试系统能够在仿真过程中及时发现飞行器制导系统在软、硬件设计上存在的问题和不足,从而提高图像制导的跟踪精度和抗干扰能力<sup>[7]</sup>。国防科技大学在末制导半实物仿真方向开展了相关研究,设计了相关的半实物仿真实验系统,提高了末制导参数的精确度<sup>[8]</sup>。以上半实物仿真系统都存在造价成本过高的问题。

为了解决大学本科教学中制导仿真设备成本高的问题,本文模拟激光导引头设计了激光制导的半实物仿真系统,并且应用视景仿真技术将跟踪或者拦截仿真过程三维实时地呈现出来。本文给出了激光制导半实物仿真系统整体方案,对各子系统进行了具体设计。改进了四象限探测器的目标检测算法,开展了仿真试验验证,最后总结了系统性能,论述了创新性。

## 2 激光制导仿真系统总体设计

激光制导半实物仿真系统如图 1 所示,包括软件仿真子系统、硬件在环仿真子系统和 FlightGear

视景仿真子系统。

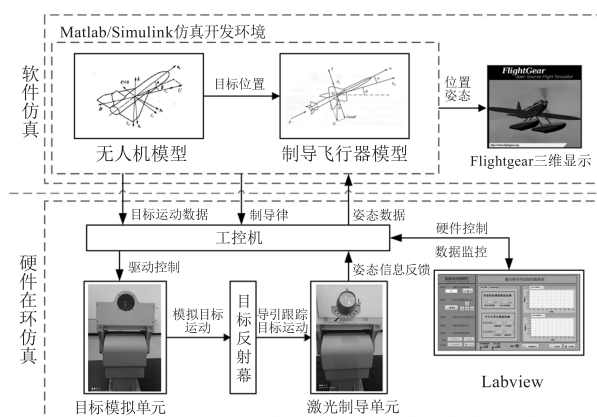


图 1 激光制导半实物仿真系统总体构成

Fig. 1 The overall composition of the laser-guided hardware-in-the-loop simulation system

软件仿真子系统包括无人机和制导飞行器 Simulink 运动方程组及制导律设计。硬件在环仿真子系统通过 LabView 程序控制目标模拟分系统和激光制导分系统的姿态运动,在目标反射幕上进行模拟跟踪制导目标,并进行姿态信息采集反馈回工控机。视景仿真子系统由 FlightGear 软件、制导飞行器的几何模型、目标的几何模型组成。本文利用 CATIA 软件建立制导飞行器及目标的三维几何模型,并通过 AC3D 软件对模型进行配置后将其导入到 FlightGear。

硬件在环仿真子系统通过数据通讯模块接收由软件仿真子系统目标的仿真数据。目标模拟单元模拟目标的姿态和位置,激光制导单元进行搜索、跟踪和拦截,并将制导飞行器姿态数据反馈给软件仿真子系统。制导飞行器的飞行数据进行处理后,传输给 FlightGear 视景仿真子系统,实现了实时显示<sup>[9]</sup>。

## 3 软件仿真子系统

激光制导单元检测某时刻目标的运动和位置,通过制导律形成制导飞行器的俯仰通道过载命令和滚转角命令。两个指令和目标检测信息作用于制导飞行器的自动驾驶仪,自动驾驶仪相应产生舵偏角命令,控制制导飞行器稳定准确的飞行<sup>[10]</sup>。舵偏命令作用于舵机,经过处理,可以控制制导飞行器在空中的姿态和位置,这样激光制导单元不断测量出新的目标视线角速度,控制制导飞行器飞行,直到击中

目标。制导飞行器制导仿真方框图如图 2 所示。

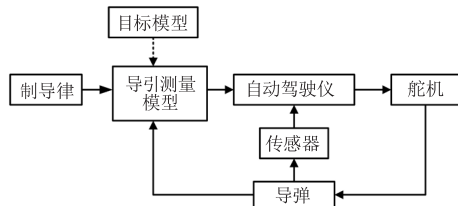


图 2 制导数学仿真框图

Fig. 2 Guided mathematical simulation block diagram

根据制导飞行器 6 自由度数学方程,应用 Simulink 建立制导飞行器运动方程组仿真模型,并对其复杂的模块进行系统的封装。Simulink 仿真模型的总体结构如图 3 所示。

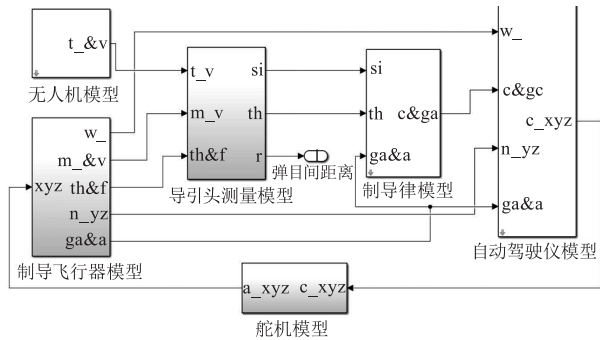


图 3 软件仿真 Simulink 子系统封装

Fig. 3 Software simulation simulink model mask

### 4 硬件在环仿真子系统

#### 4.1 硬件系统构成

硬件在环仿真子系统主要由工控机、目标模拟单元和激光制导单元组成,如图 4 所示。工控机基于 LabView 上位机程序控制目标模拟单元和激光制导单元。LabView 发送目标运动信息(运动速度方向和方向)给目标模拟单元实现目标在目标反射屏上的运动。LabView 上位机程序根据串口传回的目标检测信息,经过制导律控制云台运动,实现目标跟踪模拟。整套硬件仿真设备成本为 9 万元。

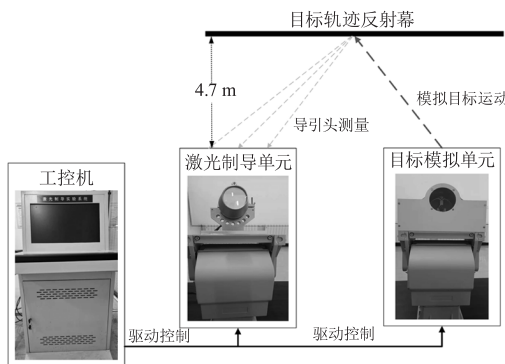


图 4 制导仿真硬件平台示意图

Fig. 4 Guidance simulation hardware platform diagram

工控机通过 PelcoD 通讯协议(主从协议)控制两个运动单元。工控机是主从协议的主节点,从节点是激光制导单元和目标模拟单元。工控机通过 UDP 通信协议与 Simulink 软件进行通信链接,实现仿真数据的实时交互。

目标模拟单元包括激光照射器和目标反射幕两部分,激光照射器为该单元主要部分,可以实现方位及俯仰两个方向的旋转。窗口内下部安装了 1.06 μm 波长的激光照射器,上部安装可见光的指示灯,用于指示当前激光照射方位。云台的方位角及俯仰最小角速度为 0.5 °/s。

激光制导单元由导引头和云台组成。导引头的激光光学系统的主要功能是收集、汇聚目标反射的激光回波。光学系统采用四象限探测器。如图 5 所示,光斑被四个象限分为 A, B, C, D 四个部分。以四象限探测器中心为坐标原点,半径为 R,入射光斑中心为 O,半径 ρ,与 X 轴夹角 θ。E<sub>x</sub>, E<sub>y</sub> 分别表示偏移量(误差信号), I 表示相应象限输出的电流, P 表示相应象限中的光能量<sup>[11]</sup>。

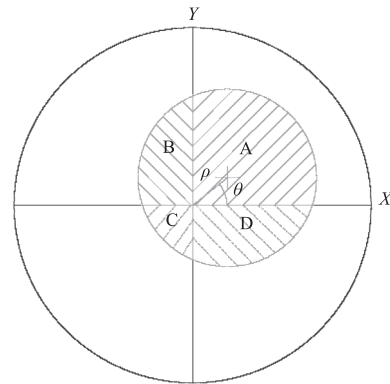


图 5 四象限探测器光斑示意图

Fig. 5 Four quadrant detector light spot schematic diagram

为了解决目标近距下视场角增大的问题,在四象限探测器前面,放置激光准直系统,以实现一定反射距离条件下形成平行入射的光束。如图 6 所示。

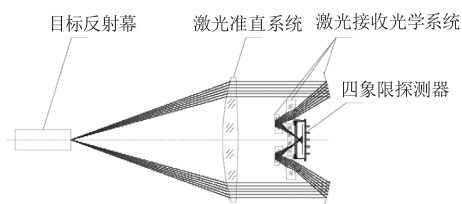


图 6 激光制导模拟原理图

Fig. 6 Laser guidance simulation schematic

激光在目标反射幕上的反射点位于准直系统的

焦面处,激光束经准直后成平行光束出射,以此模拟无穷远目标的激光回波。平行光束入射到激光接收光学系统,经其会聚到四象限探测器的光敏面上,形成大小约为光敏面半径的激光光斑,为后续信息处理系统提供输入量,以实现激光制导<sup>[12]</sup>。系统设计时光学系统与准直系统均集成于导引头内,使系统外观更简洁。云台是承载导引头调转的平台,其控制精度、最大调转能力、调转角度范围等需满足系统指标相关要求。

#### 4.2 位置检测算法

由光电探测原理可知,四象限探测器每个象限输出的电信号(电流)强弱与该象限探测器光敏面接收到的光能量一致<sup>[13]</sup>,可近似表示为式(1)和式(2):

$$E_x = \frac{(I_a + I_d) - (I_b + I_c)}{(I_a + I_b + I_c + I_d)} = \frac{(P_a + P_d) - (P_b + P_c)}{(P_a + P_b + P_c + P_d)} \quad (1)$$

$$E_y = \frac{(I_a + I_b) - (I_d + I_c)}{(I_a + I_b + I_c + I_d)} = \frac{(P_a + P_b) - (P_d + P_c)}{(P_a + P_b + P_c + P_d)} \quad (2)$$

由于光斑散发的光能量近似是高斯分布的,应用 Gauss Infinite Integral(GII)拟合改进算法对光斑位置的解算进行优化,提高定位精度<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{\text{erf}^{-1}(E_x)}{\sqrt{2}} \times \omega \times \lambda(\omega, R, d) \\ \Delta y = \frac{\text{erf}^{-1}(E_y)}{\sqrt{2}} \times \omega \times \lambda(\omega, R, d) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\omega$  为高斯光斑的光斑半径;  $\lambda$  为补偿因子;光敏半径为  $R$ ;  $d$  为死区宽度。补偿因子受  $\omega$  和  $d$  影响,且光斑半径  $\omega$  越大,死区宽度  $d$  越小,补偿因子  $\lambda$  在数值上越大。

通过四象限探测器测量出由激光束的光斑位置变化,得到光斑的两个方向的偏移量,从而来确定光斑中心位置:

$$\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (4)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad (5)$$

得出像点中心的坐标后,即可根据系统设计的失调角与视线角速度的对应关系,生成进动目标角速度,控制云台随动。

#### 4.3 LabView 软件设计

LabView 采用 UDP 通讯协议设计通讯模块,该模块主要用来完成 LabView 与 Matlab/Simulink 的通讯与数据传输<sup>[15]</sup>。设计 LabView 程序实现控制硬件设备实现以下功能:

(1) 云台控制:云台装载设备的电源,调整激光照射的方位初始位置。驱动云台旋转到指定的角度,并使四象限探测器捕获目标。

(2) 导引头工作控制:控制导引头捕获目标并将采集到的四象限信息通过通信接口传输给计算机,对导引头反馈的信息进行解算,经过制导算法处理后控制导引头云台跟随目标移动,实现激光制导的过程。

(3) 制导数据监控:对导引头云台产生的相关数据进行存储及显示,显示四象限探测器检测计算的  $X, Y$  轴的偏移量,并生成曲线图。实时显示运算生成的云台  $X, Y$  轴运动角速度数据和姿态角数据。

(4) 转台复位功能:令云台回到上电自检后的初始位置状态,复位后可重新进行目标瞄准和跟踪也可以退出程序。LabView 面板如图 7 所示。

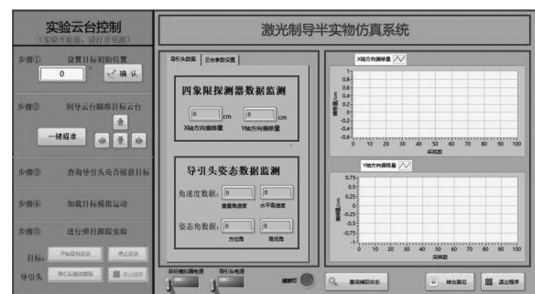


图 7 LabView 面板设计图

Fig. 7 LabView panel design diagram

#### 5 FlightGear 视景仿真子系统

FlightGear 是一个开源飞行模拟器,作为飞行仿真可视化引擎在科学研究中被广泛使用。对于多个飞行器的联合飞行视景仿真,为了实现同步的飞行仿真,制导飞行器与目标都需要单独对应一个 FlightGear。同时,两个 FlightGear 之间还要进行 UDP 通信以告知对应的位置信息。其系统框架如图 8 所示。

为了实现目标和制导飞行器联合仿真,需要更改 bat 文件的内容。通过 'multiplay' 命令设置通信端口,实现两个 FlightGear 之间的通信。

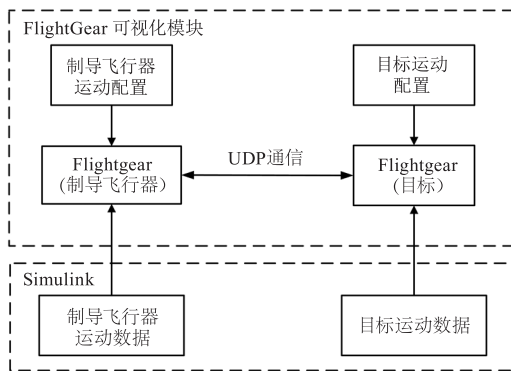


图 8 视景联合仿真系统框图

Fig. 8 Block diagram of a visual co-simulation system

### 5.1 制导飞行器及目标的几何模型建立

视景仿真系统显示制导飞行器的飞行姿态与轨迹,因此制导飞行器的几何模型直接影响仿真的显示效果<sup>[16-17]</sup>。采用 CATIA 软件对弹体和目标进行建模,并使用 AC3D 软件进行定义相关元素。由于在 FlightGear 中使用对象名称来控制对象完成指定的动作,所以在 AC3D 中需要为每个对象设置对象名称。制导飞行器几何模型和目标几何模型分别如图 9 和图 10 所示。

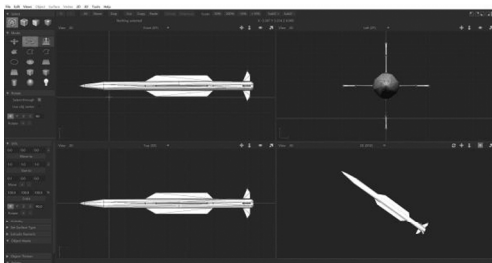


图 9 制导飞行器的三维视图

Fig. 9 Guided aircraft 3D structure diagram

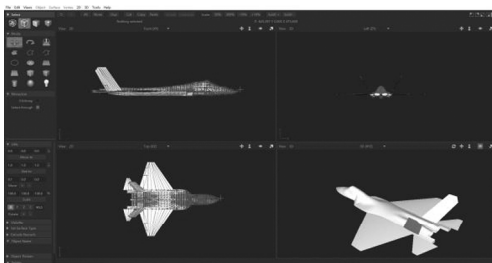


图 10 目标的三维视图

Fig. 10 Target 3D structure diagram

### 5.2 位置姿态数据处理

由于硬件在环仿真子系统反馈回的数据为制导飞行器制导过程中制导飞行器和目标的姿态角度信息,仅靠高低角和方位角的角度信息无法生成完整的飞行运动。所以通过 Simulink 仿真软件对制导飞

行器和目标的初始相对空间位置和各自飞行速度信息进行增补,结合硬件设备反馈的姿态角数据生成完整的制导飞行器制导数据。

由于 FlightGear 使用测地学坐标系定位飞行器的位置。测地学坐标系使用经度、纬度来表示物体的空间位置。Simulink 仿真软件采用发射坐标系进行运算。发射坐标系以发射点为原点,用来描述弹体相对于发射点的运动,并确定弹体质心相对于发射点的位置与姿态。所以需要仿真数据进行坐标系的数据转换<sup>[18]</sup>。

### 5.3 制导飞行器与目标模型驱动设置

FlightGear 软件内部集成了多个子单元,这些子单元相互协同,共同完成无人机的视景显示。声音子单元可以模拟制导飞行器飞行和环境的聲音。控制器子单元对 Simulink 发送来的数据进行实时解算并进行坐标系的转换,再控制制导飞行器实现与 Simulink 的同步。同时,FlightGear 在硬件和软件上拥有系统的可拓展性,可以在多个平台之间移植<sup>[19-20]</sup>。

XML 文件相当于 FlightGear 软件生成的主函数,每一个 XML 文件分别定义一部分配置。

在 FlightGear 中通过 XML 文件将制导飞行器模型映射至场景中,并在 Simulink 中运行控制模型,把飞行数据打包后通过 GEN FG RUN 模块发送至 FlightGear 仿真软件,就实现了制导飞行器模型的驱动<sup>[21]</sup>。

## 6 半实物仿真系统的实现

软件仿真子系统通过 UDP 数据通讯与硬件在环仿真子系统联接,将目标的运动数据及制导律输送到硬件仿真子系统。硬件仿真子系统将激光制导单元的制导数据反馈回软件仿真子系统。最后通过数据转换将制导飞行器的姿态及位置结果在 FlightGear 视景仿真子系统进行实时显示。

图 11 中,可见光十字光标代表激光照射器发射的模拟目标。圆点光标表示制导飞行器的跟踪位置。由图 11 可以看出,激光制导单元可以直观地实现制导跟踪。

图 12 为半实物仿真系统中 LabView 实验界面,能够实现硬件控制和数据监控。

制导仿真实验中,目标模拟单元和激光制导单元间隔 0.5 m,并与目标反射幕相距 4.7 m。在 Infi-

nite integral 拟合改进(GII)算法下制导跟踪效果图如图 13、14 所示。

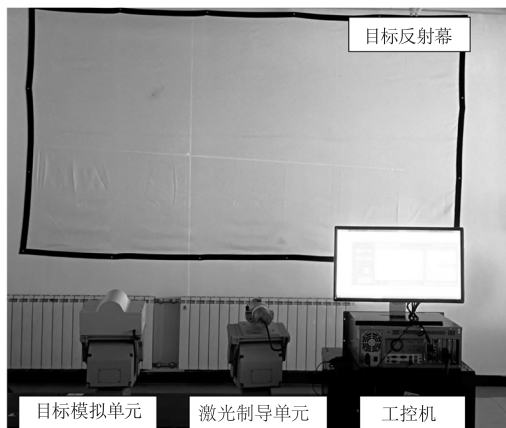


图 11 激光制导半实物仿真系统实验图  
Fig. 11 Experimental diagram of laser guidance hardware-in-the-loop simulation system

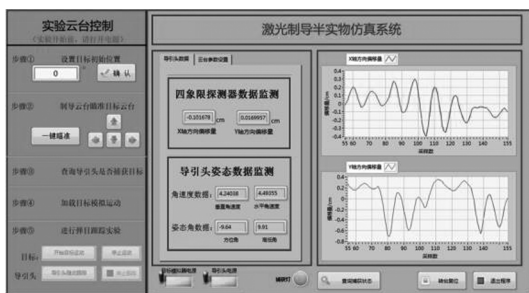


图 12 LabView 实验界面  
Fig. 12 LabView experimental interface

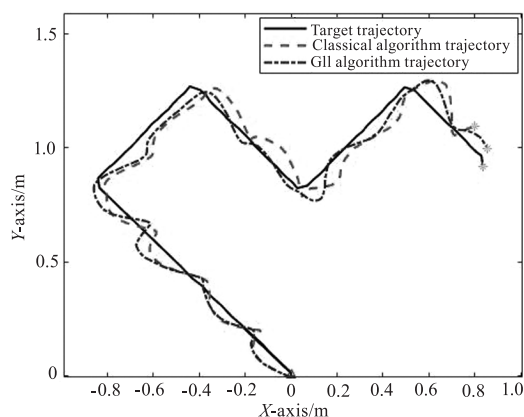


图 13 不同位置检测算法下目标轨迹  
Fig. 13 Target trajectories under different position detection algorithms

如图 13 和图 14 所示,GII 算法比常规算法的跟踪效果更好。常规位置检测算法下的制导跟踪误差为 3.8 % ,GII 算法的制导跟踪距离误差为 2.5 % 。应用 GII 算法制导跟踪系统的跟踪精度提高了 1.3 % 。

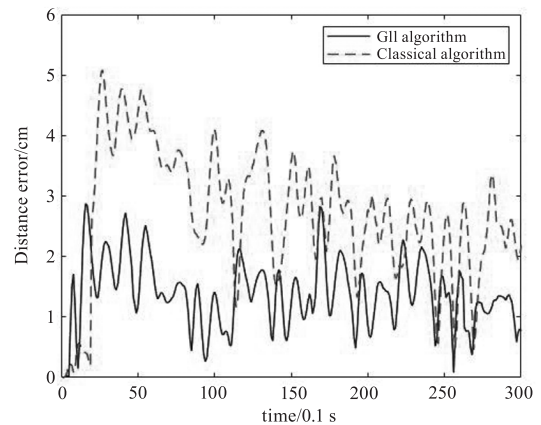


图 14 不同位置检测算法下目标跟踪误差曲线  
Fig. 14 Curves of target tracking errors under different position detection algorithms

图 15 为视景仿真子系统的初始阶段,制导飞行器处于初始发射阶段,目标按照计划飞行。图 16 为制导飞行器命中目标,视景仿真结束。

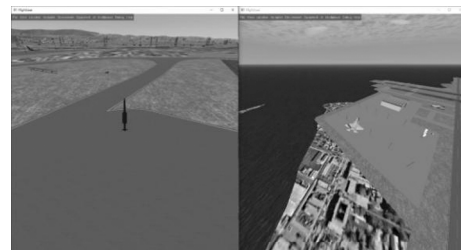


图 15 FlightGear 下初始准备图  
Fig. 15 Initial preparation diagram under FlightGear



图 16 FlightGear 下拦截命中目标图  
Fig. 16 Diagram of interception hit target under FlightGear

实验结果表明,激光制导半实物仿真能够实现激光制导仿真,并将实验数据进行监控,同时视景仿真能精确地显示制导飞行器制导飞行过程中姿态与轨迹的变化,与目标实现双机交互,直观地实现了目标拦截。

### 7 结论

本文设计了一套低成本激光制导的半实物仿真系统。激光准直系统提高了四象限探测器的视场角,解决了短距离模拟跟踪制导问题。首次将 GII

位置检测算法应用到制导仿真设备,提高了制导跟踪精度。最后,在 FlightGear 中建立了某型目标和制导飞行器的几何模型,实现了制导飞行器和目标无人机的同步仿真。该实验系统中,激光制导单元硬件在环,既可以进行软件仿真也可以进行硬件在环实验。同时,基于工控机上位机软件,可对导引和目标检测算法进行二次开发,满足制导系统的相关性能指标测试要求。

### 参考文献:

- [1] Liang H, Wang J, Wang Y, et al. Optimal guidance against active defense ballistic missiles via differential game strategies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(3): 978-989.
- [2] Tian J, Neng X, Zhang S, et al. Integrated guidance and control for missile with narrow field-of-view strapdown seeker[J]. ISA transactions, 2020, 106:124-137.
- [3] Huang Ruisong, Li Haifeng, Liu Jin, et al. Status and development analysis of hardware-in-loop simulation technologies for the aircraft[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(9):1763-1774. (in Chinese)  
黄瑞松, 李海凤, 刘金, 等. 飞行器半实物仿真技术现状与发展趋势分析[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(9): 1763-1774.
- [4] Ergan S, Zou Z, Bernardes S D, et al. Developing an integrated platform to enable hardware-in-the-loop for synchronous VR, traffic simulation and sensor interactions [J]. Advanced Engineering Informatics, 2022, 51:101476.
- [5] Cai G, Chen B, Lee T, et al. Design and implementation of a hardware-in-the-loop simulation system for small-scale UAV helicopters [C]//2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics. IEEE, 2008:29-34.
- [6] Fan Shipeng, Xu Ping, Wu Guang, et al. An overview of hardware-in-the-loop simulation technique for precision-guided tactical weapon [J]. Aerospace Control, 2016, 34(3):66-72. (in Chinese)  
范世鹏, 徐平, 吴广, 等. 精确制导战术武器半实物仿真技术综述[J]. 航天控制, 2016, 34(3):66-72.
- [7] Gu Feng, Zhao Yu, Feng Yu, et al. Key technology in hardware in the loop simulation system design of image guiding[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004, (S8):296-299. (in Chinese)  
谷峰, 赵昱, 冯禹, 等. 图像制导半实物仿真系统设计中的关键技术[J]. 弹箭与制导学报, 2004, (S8):296-299.
- [8] Zhang Maohua, Ma Jianjun, Zheng Zhiqiang. Landing condition analysis of a loss-of-thrust UAV based on adjoint method [C]//2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE, 2017:6486-6491.
- [9] Sun J, Li B, Wen C Y, et al. Design and implementation of a real-time hardware-in-the-loop testing platform for a dual-rotor tail-sitter unmanned aerial vehicle [J]. Mechatronics, 2018, 56:1-15.
- [10] Zhang L, Wei C, Rong W, et al. Fixed-time adaptive model reference sliding mode control for an air-to-ground missile[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(5): 1268-1280.
- [11] Wang Zhizhe, Chen Yongguo, Chen Si, et al. Testing method of four-quadrant photodetectors [J]. China Measurement & Test, 2019, 45(2):1-6. (in Chinese)  
王之哲, 陈勇国, 陈思, 等. 四象限探测器测试方法 [J]. 中国测试, 2019, 45(2):1-6.
- [12] Zheng Jianfeng. Optical design based on four quadrant detector in laser seeker [J]. Optical Technique, 2023, 49(1):11-16. (in Chinese)  
郑建锋. 激光导引头中基于四象限探测器的光学设计 [J]. 光学技术, 2023, 49(1):11-16.
- [13] Wang Xuangang, Wang Shiming, Chen Dandan, et al. Design of laser tracking system with quadrant detector [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(4):432-436. (in Chinese)  
王选钢, 王仕明, 陈丹丹, 等. 采用四象限探测器的激光跟踪系统设计 [J]. 激光与红外, 2017, 47(4):432-436.
- [14] Gou Yepeng, Liu Xing, Liu Qiang, et al. A four-quadrant detector spot position detection algorithm based on Infinite integral algorithm [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(9): 1249-1256. (in Chinese)  
苟晔鹏, 刘星, 刘强, 等. 基于 Infinite integral 的四象限探测器光斑位置检测算法 [J]. 激光与红外, 2021, 51(9):1249-1256.
- [15] Sánchez-Alvarez A, Luna-Moreno D, Hernández-Morales J A, et al. Control of stepper motor rotary stages applied to optical sensing technique using LabView [J]. Optik, 2018, 164:65-71.
- [16] Wang Y, Zhang S, Yin P, et al. Flight control experimental platform of transport aircraft based on flight gear/matlab [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC2019).

- Springer Singapore,2020:1193 – 1204.
- [17] Qi J,Liu J,Zhao B,et al. Visual simulation system design of soft-wing UAV based on FlightGear[C]//2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE,2014:1188 – 1192.
- [18] Huang Jinyang,Xin Changfan, Ma Yunjian, et al. Missile flight attitude and trajectory visualization system using Matlab/Flight Gear[J]. Navigation and Control,2016,15(6):28 – 32. (in Chinese)  
黄金阳,辛长范,马云建,等. 基于 Matlab/FlightGear 的导弹飞行姿态与轨迹可视化系统[J]. 导航与控制,2016,15(6):28 – 32.
- [19] Todić I,Kuzmanović V. Hardware in the loop simulation for homing missiles [J]. Materials Today: Proceedings, 2019,12:514 – 520.
- [20] Yang Shanshan, Wang Biao. Flight control experimental platform based on FlightGear simulator[J]. Research and Exploration in Laboratory,2017,36(7):113 – 117. (in Chinese)  
杨姗姗,王彪. 基于 FlightGear 的三维可视化飞行控制仿真实验平台的设计[J]. 实验室研究与探索,2017,36(7):113 – 117.
- [21] Wang Yue, Chen Yihang. Design of flight simulation teaching experiments based on FlightGear[J]. Experimental Technology and Management, 2016,33(10):130 – 134. (in Chinese)  
王岳,陈忆杭. 基于 FlightGear 的飞行仿真教学实验设计[J]. 实验技术与管理,2016,33(10):130 – 134.