

doi: 10.7690/bgzd.2022.04.016

某高炮武器虚拟试验方法

蔡昌鹏¹, 薛百文¹, 杨臻¹, 曹广群¹, 兰芥², 门延武²

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 中国兵器装备研究院, 北京 102200)

摘要: 针对传统的试验方法存在成本高、周期长、影响因素多等不足, 提出一种高炮武器虚拟试验方法。介绍该方法的试验原理, 给出该试验的系统组成, 建立虚拟试验真值计算模型, 并提出试验思路。试验验证结果表明: 通过某高炮武器火控系统的靶场试验与虚拟试验对比分析, 证明该方法的可行性。

关键词: 火控系统; 虚拟试验; 真值模型; Unity 3D; 动态精度

中图分类号: TJ35 **文献标志码:** A

Virtual Test Method of Certain Anti-aircraft Gun Weapon

Cai Changpeng¹, Xue Baiwen¹, Yang Zhen¹, Cao Guangqun¹, Lan Jie², Men Yanwu²

(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. China South Industry Academy, Beijing 102200, China)

Abstract: Aiming at the disadvantages of high cost, long time cycle and many influencing factors in the traditional test method, a virtual test method for anti-aircraft gun weapon was proposed. The test principle of the method is introduced, the system composition of the test is given, the virtual test true value calculation model is established, and the test idea is put forward. The test results show that the method is feasible by comparing the range test and virtual test of the fire control system of an anti-aircraft gun weapon.

Keywords: fire control system; virtual test; true value model; unity 3D; dynamic accuracy

0 引言

目前, 国内高炮武器火控系统动态跟踪精度的测试方法主要是动态飞行试验, 在进行试验时通常以航模作为目标靶机。随着现在目标速度的提升, 试验周期长、成本高、场地占用大, 大大延长了武器的研制周期。

国内对动态飞行试验的模拟已经有了初步研究, 在数学模型的建立以及系统的构成均开展了一些工作。丁天宝等^[1]运用投影系统将模拟目标投影在球幕上, 并建立了目标真值数学模型及稳定试验摇摆量真值数学模型; 葛承堃等^[2]提出了基于抽样的虚拟射击方法, 给出了虚拟射击试验的数据流分析; 韦国军等^[3]提出了一种改进的高炮火控系统射击精度试验方法, 并通过靶场试验验证, 结果表明新方法与靶场试验具备良好的一致性; 李昭^[4]实现了对高炮系统服务目标过程的视景仿真系统的设计, 为建立可视化效能评估平台提供了参考依据。当前应用较多的主要为球幕试验, 但球幕试验占用场地大、搭建成本高、球幕分辨率低^[5-7], 未能较好地解决成本及测试精度问题。

通过为虚拟目标添加航路, 可以近乎实现与真

实目标相同的效果, 使得高炮武器火控系统的视场与捕捉真实目标的视场基本相同, 进而通过虚拟试验测试高炮武器的动态跟踪精度, 可以节省成本, 缩短试验周期, 增强试验的安全性。

1 试验方法原理

视景仿真技术是计算机仿真技术的一个重要分支, 主要包括仿真环境制作和仿真驱动, 通过基于模型、纹理、特效、场景等设计构造近乎真实的仿真环境, 开展场景驱动、模型调动处理、分布交互、地形处理等一系列仿真驱动事件, 进而达到逼近现实的仿真效果^[8-9]。

笔者提出一种基于视景仿真技术的高炮武器虚拟试验方法, 试验原理: 航路生成系统基于视景仿真技术生成虚拟作战目标与作战场景, 输出目标航路参数传递给综合控制系统, 目标动态模拟平台根据传递的参数进行转动, 输出转动数据至仿真评估系统; 被试火控系统对作战场景显示器的虚拟目标进行捕捉, 输出试验值至仿真评估系统; 仿真评估系统针对输入的目标航路参数及平台转动数据综合仿真计算, 得到目标真值, 经误差分析及数据

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-01-26

作者简介: 蔡昌鹏(1998—), 男, 山西人, 硕士, 从事仿真试验技术研究。E-mail: 1766421073@qq.com。

处理^[10]后得到被试火控系统的动态跟踪精度。虚拟试验方法原理如图 1 所示。

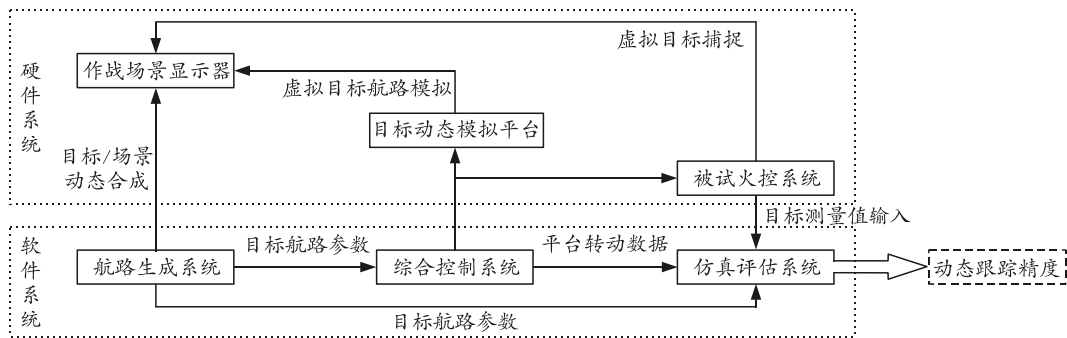


图 1 虚拟试验方法原理

整个试验系统占地面积小、硬件少、可重复试验、测试精度高，较之传统的靶场试验与球幕试验具备更低的成本与更好的可操作性，以及更接近作战的目标特征，可依据被试火控系统的性质任意选择来袭目标与场景环境，经由仿真评估系统即可实现对被试火控系统的高精度评估。

2 试验系统组成

高炮武器虚拟试验系统由软件系统和硬件系统组成。硬件系统主要包括目标动态模拟装置、作战场景显示器和被试火控系统；软件系统主要包括航线生成系统、综合控制系统和仿真评估系统。硬件系统组成如图 2 所示。

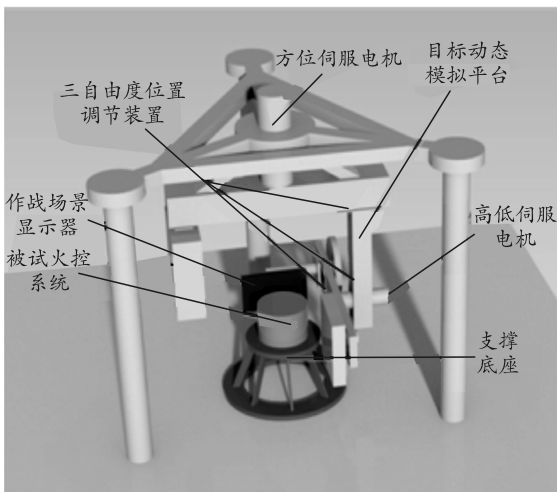


图 2 高炮武器虚拟试验系统硬件系统

目标动态模拟装置由高精度方位伺服电机、高精度高低伺服电机、三自由度位置调节装置和配重块等机构构成，三自由度位置调节装置与配重块用于调节系统的平衡，使得电机的转动负载减小，同时也可通过导轨实现对作战场景显示器位置的调节，使得作战场景显示器的中心对准被测火控系统横纵轴几何交点的标志点。作战场景显示器用于模

拟不同来袭目标在不同作战场景下的运动。

航线生成系统主要为被测火控系统提供目标源，包含 3D 建模、典型目标航路呈现、战场环境搭建及可视化界面开发。通过 3D MAX 等 3D 建模软件实现不同来袭目标的建模，通过 Unity 3D 等 3D 开发引擎搭建不同作战场景并赋予虚拟目标运动特性，通过 C#与 Matlab 联合编程实现典型航路数据计算与虚拟目标的驱动，同时实现可视化界面的开发。将不同来袭目标、不同作战来袭场景和不同目标航路动态合成，即可实现对真实作战场景的再现。

综合控制系统主要控制目标动态模拟平台转动与被试火控系统捕捉模拟目标。综合控制系统接收航线生成系统的典型航路数据，并控制目标动态模拟平台转动，同时输出目标动态模拟平台的方位角高低角参数。

仿真评估系统主要进行数据处理及误差分析。仿真评估系统接收航线生成系统的典型航路数据及综合控制系统的目标动态模拟平台的转动数据，将二者数据经由真值计算模型进行计算，得到目标位置的真值；接受被试火控系统跟踪虚拟目标得到的试验值，经由误差分析及计算得到被试火控系统的动态跟踪精度。

3 虚拟试验真值计算模型

由于虚拟试验中的目标为显示在显示器上的虚拟目标，真值无法直接测得，故需要建立起虚拟试验真值计算模型。在 Unity 3D 中导入典型航路数据参数后，驱动虚拟目标中心依照航路飞行，由计算机中的一些预设的 3 维空间的数据转换成屏幕上可被人眼观测到的显示在屏幕上的 2 维图像，被称为渲染^[11]。在 Unity 3D 中渲染的坐标空间变换过程如图 3 所示。

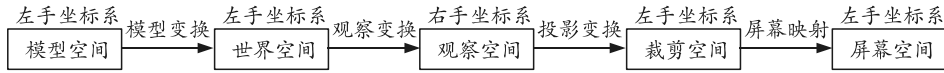


图 3 渲染过程坐标空间变换过程

虚拟目标在模型空间按典型航路数据运动，某一时刻的坐标值为 (x_0, y_0, z_0) ，由于坐标变换中包含平移变换，需将其扩展到齐次坐标系下，得

$$R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： α 为绕 x 轴的旋转角； β 为绕 y 轴的旋转角；

到的坐标值为 $(x_0, y_0, z_0, 1)$ ，模型空间至世界空间的变换可视为 3 维空间的坐标系变换，左手坐标系下旋转矩阵为：

γ 为绕 z 轴的旋转角。模型变换矩阵为：

$$M_{\text{model}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & m_x \\ 0 & 1 & 0 & m_y \\ 0 & 0 & 1 & m_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_x(\theta_x)R_y(\theta_y)R_z(\theta_z) \begin{bmatrix} n_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： (m_x, m_y, m_z) 为在进行模型变换时 Unity 3D 的 Transform 组件的 Position 值； $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 为 Rotation 值； (n_x, n_y, n_z) 为 Scale 值。

观察世界依据 OpenGL 传统选用右手坐标系，需进行坐标转换，转换方法为对 z 取反，观察变换矩阵为：

$$M_{\text{view}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & -1 & -p_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} R_x(\phi_x)R_y(\phi_y)R_z(\phi_z) \begin{bmatrix} q_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： (p_x, p_y, p_z) 为在进行观察变换时 Transform 组件的 Position 值； (ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z) 为 Rotation 值； (q_x, q_y, q_z) 为 Scale 值。

投影变换主要分为正交投影和透视投影 2 种类型，透视投影是对人眼看世界的模拟，具备更高的真实感^[12]，投影变换矩阵为：

$$M_{\text{proj}} = \begin{bmatrix} \cot(\eta_{\text{fov}}/2)/\eta_{\text{ap}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cot(\eta_{\text{fov}}/2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (\eta_{\text{far}} + \eta_{\text{near}})/(\eta_{\text{far}} - \eta_{\text{near}}) & -(2 \cdot \eta_{\text{far}} \cdot \eta_{\text{near}})/(\eta_{\text{far}} - \eta_{\text{near}}) \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： η_{fov} 为在进行投影变换时 Camera 组件的 Field of View 值； η_{near} 为 Clipping Planes 的 Near 值； η_{far} 为 Far 值； η_{ap} 为 Aspect 值。

式中： λ_{width} 为屏幕的像素宽度； λ_{height} 为屏幕的像素高度。

经投影变换后的坐标值 (x_1, y_1, z_1, w_1) 为：

$$[x_1 \ y_1 \ z_1 \ w_1]^T = M_{\text{proj}} M_{\text{view}} M_{\text{model}} [x_0 \ y_0 \ z_0 \ 1]^T \quad (5)$$

模拟目标被映射在屏幕后，由被测火控系统观测并跟瞄，坐标系 $O'XY'$ 为屏幕坐标系，坐标系 $OXYZ$ 为被测火控系统坐标系，虚拟试验真值计算方法如图 4 所示。

屏幕映射过程首先依据标准齐次除法将坐标值转换为归一化的设备坐标，其次根据变换后的坐标值来映射输出窗口对应的像素坐标，屏幕映射后的坐标值 (x', y') 为：

故虚拟试验被试火控系统高低角真值 β_0 及高低角真值 ε_0 可由下式求出：

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x_1 \cdot \lambda_{\text{width}}}{2 \cdot w_1} + \frac{\lambda_{\text{width}}}{2} \\ y' &= \frac{y_1 \cdot \lambda_{\text{height}}}{2 \cdot w_1} + \frac{\lambda_{\text{height}}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= \arctan \frac{2x' - \lambda_{\text{width}}}{\sqrt{4l_m^2 + (2y' - \lambda_{\text{height}})^2}} \\ \varepsilon_0 &= \arctan \frac{-2y' + \lambda_{\text{height}}}{2l_m} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

动态跟踪精度试验数据处理及误差分析方法前人已做了大量的研究^[13-16]，形成了成熟的方法。

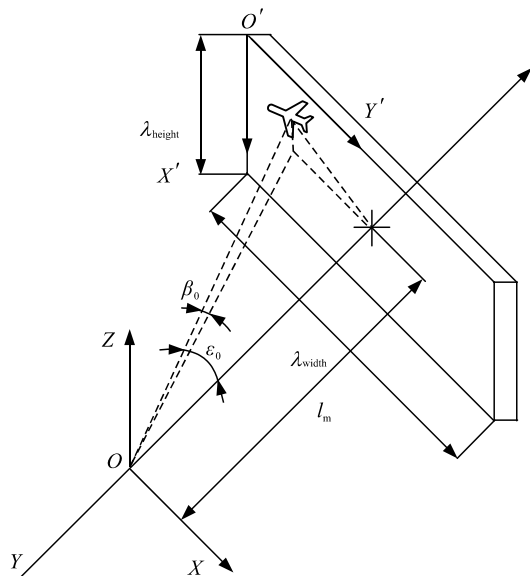


图 4 虚拟试验真值计算方法

4 试验方法验证

某高炮火控系统的动态跟踪精度试验场地布局如图 5 所示，在作战场景显示器上生成虚拟目标，并为虚拟目标选择场景并注入航迹，同时目标动态模拟平台转动，某高炮武器火控系统跟踪并瞄准，输出被试火控系统的试验值。依据上节虚拟试验真值计算模型计算真值，得到被试火控系统的动态跟踪精度。某高炮火控系统的靶场试验与模拟试验对比试验结果如表 1 所示，对试验数据进行无量纲化处理，可以更直观地分析数据。



图 5 虚拟试验现场布局

表 1 靶场试验与虚拟试验误差对比

诸元	系统误差		均方差	
	靶场试验	模拟试验	靶场试验	模拟试验
方位角	1	0.977	1	0.971
高低角	1	0.960	1	0.956

试验结果表明，某高炮火控系统动态跟踪精度虚拟试验与靶场试验结果相对误差在 5% 以内，该

试验方法有效可行，虚拟试验真值计算模型合理，可以实现对某高炮武器火控系统的动态跟踪精度进行有效评估。

5 结论

相较于传统的靶场试验，笔者提出的高炮武器虚拟试验方法具备更低的成本，且试验周期短，不受天气条件影响；相较于球幕试验，该方法具备更小的场地与更高的精度。对某高炮火控系统动态跟踪精度试验结果表明：该试验方法构思合理，与靶场试验结果相对误差较小，真值计算模型正确，对缩短高炮武器的研制周期有一定的应用价值，同时也为当前的靶场试验模式转变提出了一种新思路。

参考文献：

- [1] 丁天宝, 杨东, 何朝, 等. 防空武器模拟动态飞行试验方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(3): 408-413.
- [2] 葛承堃, 朱元昌, 邸彦强, 等. 高炮武器系统虚拟射击试验方法[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(5): 157-159, 163.
- [3] 韦国军, 黄广利, 夏明革. 高炮火控系统射击精度虚拟试验方法[J]. 军械工程学院学报, 2015, 27(2): 25-29.
- [4] 李昭. 基于可视化仿真的高炮武器系统效能评估技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [5] BENKO H, WILSON A D. Multi-point interactions with immersive omnidirectional visualizations in a dome[M]. ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, 2010: 19-28.
- [6] DANIEC K, PAWEL I, KAROL J, et al. Prototyping the Autonomous Flight Algorithms Using the Prepar3D Simulator[M]. Vision Based Systems for UAV Applications, 2013: 5-13.
- [7] KANAZAWA M, HAMASAKI K, NISHIGAKI J, et al. Picture quality in dome theaters[J]. Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers, 2012, 66(1): 30-38.
- [8] 李宇. 分布式虚拟战场视景仿真系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [9] DOBASHI Y, IWASAKI K, YUE Y H, et al. Visual simulation of clouds[J]. Visual Informatics, 2017, 1(1): 1-8.
- [10] 钱政. 测试误差分析与数据处理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 110-123.
- [11] FLETCHER D. 3D math primer for graphics and game development[M]. Britain: A K Peters/CRC Press, 2011: 57-80.
- [12] PÉREZ M, RUEDA S, ORDUÑA J M. Geometry-based methods for general non-planar perspective projections on curved displays[J]. Journal of Supercomputing, 2019, 75(3): 1241-1255.

[13] 欧阳中辉, 赵均伟, 董桂旭. 基于正交多项式拟合的火控系统动态精度检验[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(1): 189-192.

[14] 赵立阳, 常天庆, 戴文君, 等. 智能化坦克火控系统结构设计及其关键技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020,

41(7): 9-13.

[15] 周文佳. 火控组网效能提升研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.

[16] 冯元伟, 冷述振, 李本任. 基于动态跟踪数据的舰炮射击精度仿真[J]. 弹道学报, 2007, 19(1): 27-29.

 (上接第 63 页)

综合模型准确率来看, ResNet-50-Res 具有较高的准确率, 但延迟高, 吞吐量较低, 若提高图像分辨率则延迟与吞吐量弱化更厉害, 不利于后期开展目标自动检测与跟踪等应用。相对来说 ResNet-18 准确率稍低, 但延迟最低, 吞吐量大。ResNet-34、ResNet-34-Res、ResNet-50-Res 模型的准确率、延迟、吞吐量相对适中, 可在实际使用时根据具体情况选用。

4 结束语

笔者提出一种基于深度学习的空中侦察取证目标分类方案, 经软硬件协同设计后在 ZCU104 开发评估板上验证。该方案可选用多个基于 ResNet 系列的模型, 均具有较高的准确率和吞吐量, 可根据不同的延迟需求灵活选配不同的模型方案。

参考文献:

[1] 张龙, 田野, 李博骁. 应急快速抵近侦察监视技术发展现状与思考[J]. 兵工自动化, 2020, 39(6): 10-15.

[2] 万敏, 侯妍, 王乾. 面向海战场的天基侦察监视能力及关键技术[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(9): 17-20.

[3] 央视今日亚洲. 新闻观察 z: 美日对华抵近侦察动用哪些装备 [EB/OL]. (2017-05-29)[2021-06-21]. https://www.sohu.com/a/144479560_441013.

[4] 刘文飞. 边缘计算设备中神经网络适配及其手写体识别[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.

[5] 高蕾, 符永铨, 李东升, 等. 我国人工智能核心硬件

发展战略研究[J/OL]. 中国工程科学: 1-8[2021-06-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4421.G3.20210615.1143.024.html>.

[6] 吴翔, 钟雨轩, 岳琪琪, 等. 基于深度学习的尺度自适应海面目标跟踪算法[J]. 水下无人系统学报, 2020, 28(6): 618-625.

[7] 江波, 屈若镔, 李彦冬, 等. 基于深度学习的无人机航拍目标检测研究综述[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 137-151.

[8] 李祥霞, 吉晓慧, 李彬. 细粒度图像分类的深度学习方法[J/OL]. 计算机科学与探索: 1-14[2021-06-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5602.TP.20210603.1655.009.html>.

[9] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition[J]. arXiv preprint arXiv: 1409.1556, 2014.

[10] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016: 770-778.

[11] CHRISTIAN S, LIU W, JIA Y Q, et al. Going deeper with convolutions[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015: 1-9.

[12] 江绪庆. Zynq UltraScale+MPSoc 的嵌入式最小系统开发[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2019, 19(1): 26-29.

[13] 知乎. CNN 模型所需的计算力(flops)和参数(parameters)数量是怎么计算的?[EB/OL]. (2019-04-19)[2021-06-21]. <https://www.zhihu.com/question/65305385>.

[14] 张超. P-R 曲线与模型评估问题研究[J]. 现代信息科技, 2020, 31(4): 23-24, 27.