

基于 Simulink 与 Unity3D 的制导弹药 弹道可视化仿真

谭哲卿, 辛长范, 阚 煌, 高 鑫, 史铭姗

(中北大学 机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 针对制导弹药的弹道可视化仿真中, 观察视角单一, 场景搭建简陋, 无法模拟战场环境下制导弹药在攻击中的动态过程等问题, 提出一种制导弹药弹道可视化模型的搭建方法; 以某型激光制导弹药为对象, 基于 Simulink 与 Unity3D 软件建立了联合仿真模型, 采用 Matlab/Simulink 软件构建六自由度弹道仿真模型, 采用 Unity3D 搭建包括制导弹药、目标和战场环境在内的三维场景, 采用 UDP 通信协议将 Simulink 中的仿真数据传输到 Unity3D 中, 提出一种数值可视化技术, 能同时观察制导弹药的飞行姿态和仿真数值结果, 实现制导弹药在战场环境下的弹道可视化仿真; 将制导弹药参数加载到仿真模型中, 对不同状态的目标进行了模拟攻击实验, 实验结果显示, 该仿真模型能够多视角、全方位地显示制导弹药的飞行姿态、弹道和过载情况, 对于需要修改参数以逼近实战条件下的攻击过程, 每次修正都能立刻通过可视化平台查看和验证修改结果; 该可视化仿真模型为制导弹药的可视化仿真提供了便利的方法, 对制导弹药的设计和作战使用具有一定的参考作用。

关键词: 制导弹药; Simulink; 六自由度弹道; 可视化仿真; Unity3D

Visual Simulation of Guided Munition Trajectory Based on Simulink and Unity3D

TAN Zheqing, XIN Changfan, KAN Huang, GAO Xin, SHI Mingshan

(College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In the visual simulation of guided munitions trajectory, the observation Angle is relatively single, the scene construction is relatively simple, unable to simulate the dynamic process of guided munitions in the battlefield environment, a visual model of guided munition trajectory is proposed. Taking a certain type of Laser-guided munition as the object, establishes a co-simulation model based on Simulink and Unity3D software, uses Matlab/Simulink software to build a 6-DOF ballistic simulation model, uses Unity3D to build a three-dimensional scene including guided munition, target and battlefield environment. Using UDP communication protocol, simulation data in Simulink was transmitted to Unity3D, and a numerical visualization technology was proposed, which could simultaneously observe the flight attitude and simulation numerical results of guided munitions, and realize the visual simulation of ballistic trajectory of guided munitions in the battlefield environment. The parameters of the guided ammunition are loaded into the simulation model, and the simulated attack experiments are carried out on targets with different states. The experimental results show that the simulation model can display the flight attitude, trajectory and overload of the guided ammunition from multiple perspectives and in all directions. With each correction, the results can be immediately viewed and verified through the visual platform. The visual simulation model provides a convenient method for visual simulation of guided munitions, and has a certain reference role for the design and operational use of guided munitions.

Keywords: guided munition; Simulink; 6-DOF trajectory; visual simulation; Unity3D

0 引言

制导弹药一直是各国重点研究对象, 为了节省实验经费, 尽可能减少实弹射击次数, 研发过程中需要进行大量的仿真实验, 其中弹道仿真是研究制导弹药控制系统的重要手段^[1-3]。早期常用的弹道仿真多为数值仿真^[4-6], 研究人

员只能使用数值计算结果绘制二维的曲线来判断制导系统的性能。后来出现了比较直观的图形仿真, 其使用数值计算结果给图形仿真提供真实的仿真数据。但是在弹道可视化研究中, 常用的图形仿真方法较为简单, 弹药与目标的三维模型比较简陋, 作战场景设置得比较理想, 大多

收稿日期: 2023-09-08; 修回日期: 2023-10-25。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62003314)。

作者简介: 谭哲卿(1997-), 男, 硕士研究生。

引用格式: 谭哲卿, 辛长范, 阚 煌, 等. 基于 Simulink 与 Unity3D 的制导弹药弹道可视化仿真[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(4): 293-299.

只能观察制导弹药的飞行姿态,难以展现实战条件下制导弹药从发射到命中目标的全过程。

文献 [7-10] 在 Simulink 平台上搭建了制导弹药的六自由度弹道仿真模型并对可视化进行了一定研究,其使用的 VRML、Vega Prime 软件开发难度高、开发周期长、仅能表现出制导弹药飞行中的姿态,无法对战场环境进行模拟,文献 [11] 使用的 MBVC 平台虽能简单地表现战场环境,但场景搭建复杂、画面与现实世界差距较大。文献 [12-13] 使用了 FlightGear、OpenGL 作为可视化平台,但搭建过程复杂且缺少弹道的数值仿真部分。文献 [14-17] 虽然都使用了 Unity3D 进行可视化仿真,但其中文献 [14] 完全没有数值计算过程,仅仅是单纯的视景呈现。文献 [15-16] 的仿真模型部分较为简单,且文章中未体现数值仿真的计算过程,使仿真的真实度打了一定折扣。文献 [17] 虽然有较为细致的数值计算过程,但其通过 TXT 文件将数值计算结果传递给 Unity3D,总体仿真步骤较多,过程较为繁琐。

为弥补以上不足,本文选择 Unity3D 软件作为可视化平台,该软件是一款结合了图形、物理、音频、网络等多方面引擎的专业开发平台,从发布至今已有十余年历史,它的底层架构成熟、平台的稳定性高,成熟的案例较多、开发相对简单、开发周期短,图形技术先进、显示画面生动。本文选择的数值计算平台是在制导弹药弹道仿真中常用的 Matlab/Simulink 软件,文献 [18-19] 均进行了详细的研究分析。将 Simulink 和 Unity3D 结合起来的联合仿真模型能得到准确的数值仿真结果^[20],也能多视角全方位的观察制导弹药的飞行姿态和弹道,从而较为逼真的展现战场环境下制导弹药的运动和对目标的探测和打击过程。

1 可视化系统的开发

本文的联合仿真系统包括 Simulink 软件中的制导弹药弹道仿真模型和 Unity3D 软件中的可视化窗口,前者包括描述制导弹药运动的六自由度动力学和运动学方程组,使用 Simulink 编程工具将方程组搭建为图形化的弹道仿真模型,搭建过程中使用 Simulink 自带的图形化用户接口,能够快速、准确地搭建仿真模型,且能保证仿真算法的可靠性^[21]。可视化部分由 Unity3D 软件、制导弹药和目标的三维模型、真实世界的高程数据和卫星地图、驱动模型运动的脚本文件组成。Unity3D 支持 fbx、obj、dxf 等多种格式的三维模型,用户可以根据需要添加弹药或目标的模型。本文使用 AutoCAD 建立制导弹药和目标的三维模型,对模型进行格式转换后再导入到 Unity3D 中。在 Unity3D 中使用真实世界的高程数据和卫星地图可以搭建出基于真实数据的三维场景模型,增添了可视化仿真的真实性。

Unity3D 中的功能主要由脚本文件实现,脚本支持 JavaScript、C#、Boo 三种语言。本文中的脚本文件主要由 C# 语言写成,除了使用 UDP 通信协议处理 Matlab/Simulink 端发送来的仿真数据,还可以实现三维模型的移动、摄

像机的移动、特效展现等功能。整个系统的架构如图 1 所示。

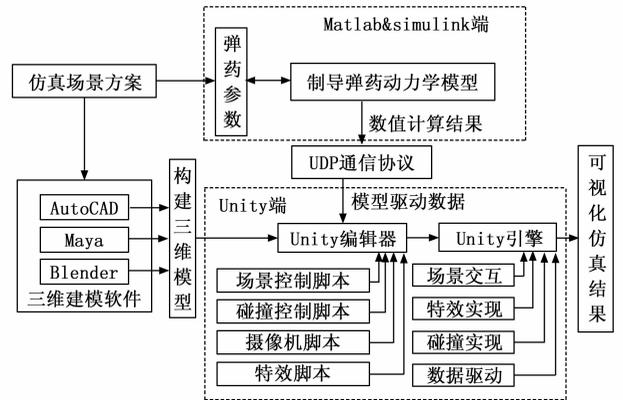


图 1 可视化平台整体架构

本文在研究制导弹药六自由度弹道可视化仿真的基础上,创造性地加入一种数值可视化技术,在显示制导弹药弹道的同时,也能实时显示制导弹药在飞行过程中所受到的过载。

2 Unity3D 可视化关键技术

2.1 数学和三维模型的建立

2.1.1 六自由度弹道仿真模型

在 Simulink 中搭建数值仿真时,为了方便修改和调试参数,常常将一个庞大且复杂的系统分成多个子模块,并构建出各模块之间清晰的输入输出关系,再将各个子模块连接并封装起来,从而建立起一个完整的 Simulink 仿真系统。制导弹药的六自由度弹道仿真模型由 4 个子模块构成,分别是弹体运动学与动力学模块、气动力模块、制导模块和目标运动模块。

弹体动力学与运动学模块用于解算制导弹药在飞行过程中受到的力,力矩与运动相关参数之间的关系。为了设计稳定的姿态控制系统,需设立关于制导弹药的六自由度运动学和动力学模型^[22]。

气动力模块用于制导弹药的气动特性仿真,首先根据运动参数计算纵向与横向的气动力系数和气动力矩系数,再根据气动力和气动力矩公式计算轴向力、径向力、侧向力、俯仰力矩、偏航力矩和滚转力矩。具体计算公式取自此文^[23]。

本文使用 Missile Datcom 计算该型制导弹药的气动参数,该软件能够根据飞行器的条件参数进行经验数据的拟合并选取公式计算气动系数和导数。将该弹的外形参数输入 Missile Datcom,即可得到带有气动系数、静导数、动导数和操纵系数的“for006.dat”的输出文件。在 Matlab 中使用命令“datcomimport”即可将 Datcom 计算结果导入 Matlab 工作区中以备使用。在仿真过程中将动力学与运动学模块计算出来的飞行状态参数和舵偏角导入到气动力模块即可得到该状态下制导弹药受到的空气动力。

制导模块分为导引头子模块与自动驾驶仪子模块, 导引头子模块根据目标和弹体之间的相对位置, 计算出弹目距离和视线高低角、方位角等信息, 再根据特定的导引规律形成过载指令信号输出给自动驾驶仪模块。自动驾驶仪模块根据制导系统输出的指令, 通过一定的控制规律输出舵机控制信号使舵面发生偏转, 从而产生改变导弹姿态所需要的力和力矩^[24]。

目标的运动模块在整个系统中用于模拟目标的运动状态, 各模块的结构如图 2 所示。

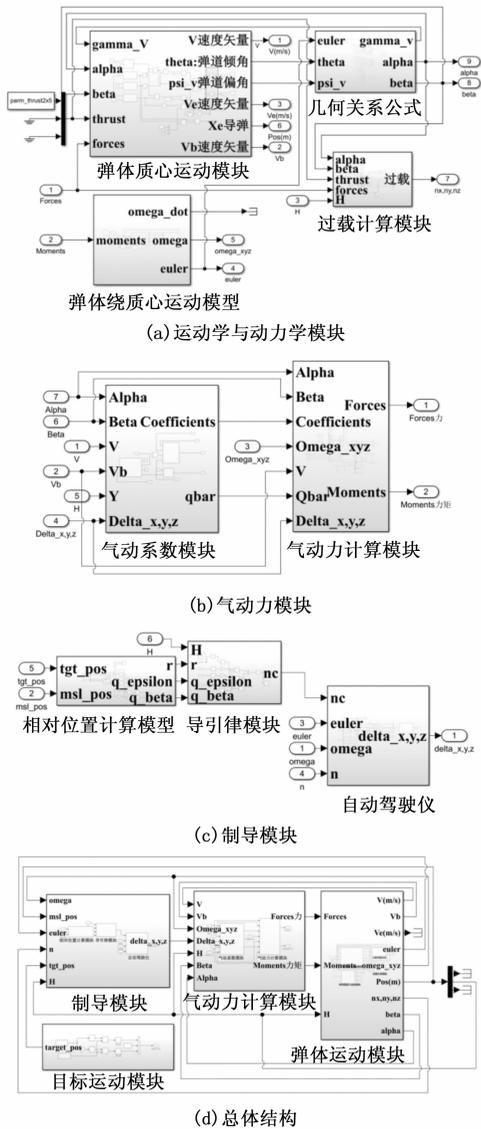


图 2 六自由度弹道 Simulink 模型

2.1.2 目标与制导弹药建模

Unity3D 引擎中使用的模型一般先在 AutoCAD、3DMax 等专业三维建模软件中搭建好再导入到 Unity3D 中使用, Unity3D 自身的建模功能比较简陋, 较难完成复杂模型的搭建。本文使用某型火箭弹和某型装甲车作为弹药和

目标模型, 先在 AutoCAD 软件中建模后导出为 stl 格式, 再使用 blender 软件转换为 fbx 格式后即可导入到 Unity3D 中使用。导入模型时要注意根据现实世界中的尺寸调整模型的比例, 本文所使用的制导弹药模型和目标车辆模型如图 3 所示。

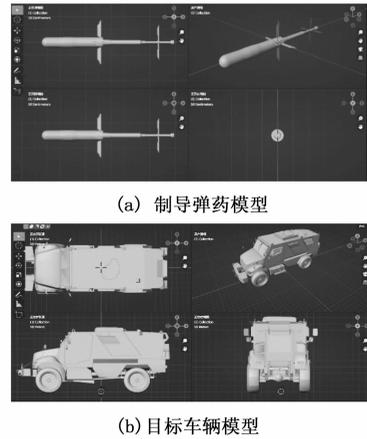


图 3 目标与弹药的三维模型图

2.1.3 三维地形建模

在 Unity3D 中对环境进行建模有许多成熟的方法和工具^[25], 一般使用引擎中的 Terrian 地形作为环境模型使用。Unity3D 中的默认 Terrian 模型为 2048 m × 2048 m 的正方形平面模型, 制作者可以使用不同的笔刷来升高或降低 Terrian 模型的某一块区域来构建各种地形, 再对这个 Terrian 模型进行贴图即可使用。

为了搭建地球上某一地点的真实地形, 首先需要获取该位置的高程图和卫星影像图。这两种图片可以使用互联网上的免费或收费资源。高程图的作用是作为 Terrian 模型的高度图来生成模型的网格, 而卫星影像图则是作为 Terrian 模型的表面贴图。

本文中的地形模型选取某省最高精度为 30 m 的 AST-GTM 地形高程数据, 该数据为 tif 格式文件, 需要在 QGIS 软件中转换为 raw 格式的文件并在 Photoshop 软件中裁剪为 2048 × 2048 像素的尺寸才可供 Unity3D 使用。

Unity3D 也可以储存多个搭建好的地形, 仿真时可以根据需求切换不同环境。图 4 为本文使用的高程图与卫星影像图, 图 5 为处理好后的真实地形模型。

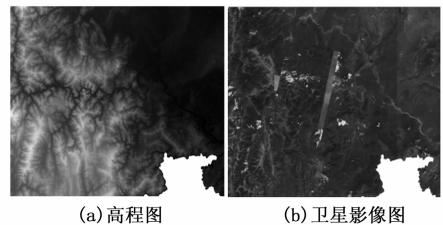


图 4 高程图与卫星影像图

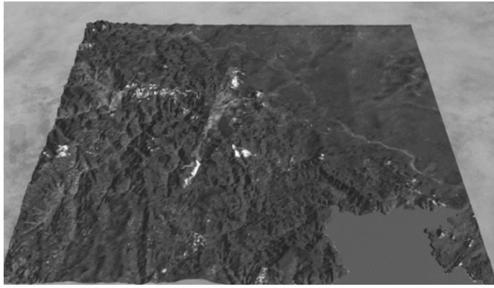


图 5 Unity3D 中搭建好的地形模型

2.2 碰撞检测技术

在高动态可视化场景中，系统需要及时地检测模型之间的碰撞。Unity3D 中内置有物理引擎 PhysX，该引擎能快速、高效地完成碰撞检测需求。PhysX 引擎是通过挂载在三维模型上的以“Collider”（碰撞体）为结尾的组件进行碰撞检测的，若三维模型没有挂载“Collider”组件，则仿真运行时不对该模型进行碰撞检测。Unity3D 中的“Collider”组件根据形状分为“BoxCollider”（方形碰撞体）、“SphereCollider”（球形碰撞体）、“CapsuleCollider”（圆柱形碰撞体）这样的默认组件，也有供用户自定义碰撞计算模型的“MeshCollider”（网格碰撞体）组件。

若需要检测碰撞的物体模型几何面较少，可以使用 Unity3D 自带的“BoxCollider”、“SphereCollider”组件实现碰撞检测。这种默认组件的运行速度快且占用计算资源少，缺点是结构比较单一。对于几何面复杂的目标、为了保证碰撞检测的准确性，需要使用“MeshCollider”组件进行检测，此时可以使用自定义的模型网格作为碰撞体检测网格。本仿真针对制导弹药这样瘦长的物体使用“CapsuleCollider”组件，针对目标车辆则使用“MeshCollider”组件。

设置好碰撞体后，就需要挂载相应的脚本检测模型之间的碰撞并执行碰撞发生后的下一步动作。一般用“OnTriggerEnter”（进入触发器）函数来执行下一步动作，例如碰撞发生后的爆炸特效和被命中目标的燃烧特效等。编写好脚本后需要将其挂载在目标模型上，这样程序开始运行时就可以执行脚本中的代码。本文中制导弹药和目标三维模型设置的碰撞体如图 6 所示。

2.3 数据传输技术

仿真系统建立完后，Matlab/Simulink 需要将计算结果及时地传输到 Unity3D 中以驱动整个场景，现在主流通讯方式有传输控制协议/网际协议（TCP/IP, transmission control protocol/internet protocol）、控制器局域网总线（CAN, controller area network）等。TCP/IP 作为一种以太网接口通信技术被广泛应用在各种工控自动化行业中。TCP/IP 中的用户数据报协议（UDP, user datagram protocol）在数据传输前不需要建立连接，因此实时性较高，能快速传输数据。因为本仿真对实时性有较高的要求，故选择 UDP 协议进行 Matlab 与 Unity3D 之间的通信。

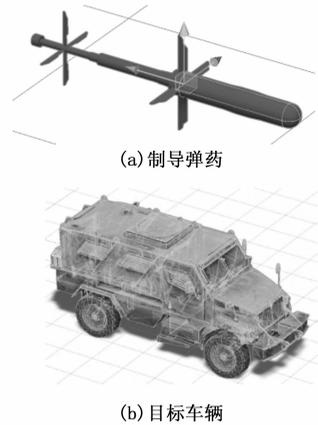


图 6 碰撞体模型

为此，需要在 Matlab/Simulink 端和 Unity3D 端各自建立数据传输模块，在 Matlab 端可以使用 Simulink 模块库中自带的 UDP 发送与接收模块，设置好 IP 地址和端口号后就可以进行数据的发送与接收。

在 Unity3D 端则需要设置数据接收脚本。接收脚本中的 IP 地址字符串和连接端口号要和 Simulink 中 UDP 发送模块的值一样，之后即可设置数据的接收循环。Unity 端开始运行后，UDP 接受脚本就会时刻监听对应 IP 地址和端口广播的数据，当 Simulink 的仿真开始并广播数据后，Unity3D 就能接收到制导弹药和目标的位置、速度等数据。

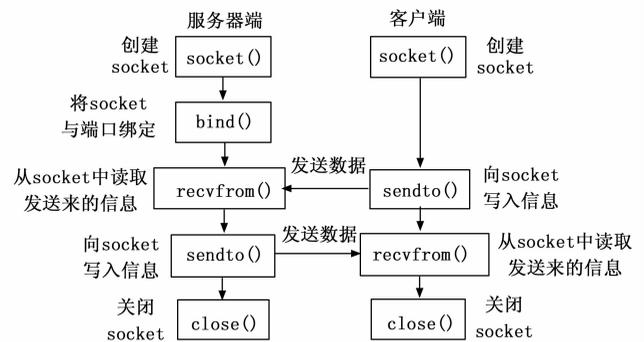


图 7 UDP 数据通信协议

2.4 数值可视化技术

传统意义上的可视化仿真技术使用计算结果驱动模型运动，但在仿真进行时，无法一边观察三维模型的运动一边观察实时计算出来的数值大小。为了满足仿真时能兼顾观察模型运动姿态与数值结果的要求，本文提出一种数值可视化技术，其原理是每隔一个固定的时间间隔或一段固定的移动距离就在物体的运动轨迹上生成这一时刻的指示条，通过指示条的大小和方向来反映弹体在这一时刻的过载情况。

此时 Unity3D 端设置的生成条件为每隔一段固定的飞行距离就生成指示条。如图 8 所示，图中轨迹线是制导弹药在飞行过程中质心位置形成的轨迹线，球体为当前时刻的质心位置，数字表示指示条生成时的飞行时间，“ $n_y =$

(数字)”表示当前位置弹体所受法向过载的数值大小, 指示条的长度代表制导弹药在弹体坐标系中所受法向过载的大小, 指示条向下伸长表示此时的法向过载为负值, 指示条向上伸长表示此时的过载值为正值。Simulink 中的仿真模型设置了舵机在发射后 4.00 s 开始工作, 图 8 中能直观地看到弹体在 4.00 s 开始产生向下的过载。

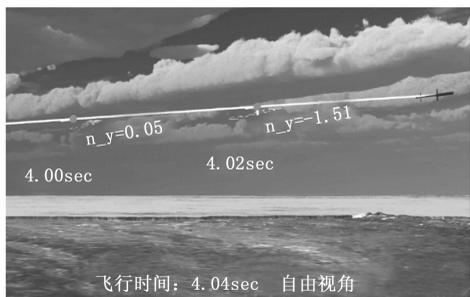


图 8 数值可视化示意图

3 攻击过程可视化仿真的实现

3.1 脚本设置

要让仿真环境在运行时产生诸如模型运动、视角跟随、尾焰与爆炸特效的生成、弹体轨迹的绘制等一系列行为, 就需要编写相应的行为脚本并挂载到对应的模型组件上运行。

以驱动模型运动的脚本为例, 这种脚本就需要以一定的频率从 UDP 数据接收脚本中获取模型的新坐标, 并将物体本身的旧坐标值不断修改为新坐标值, 从而转化为三维模型的平动和转动, 模型运动脚本的作用原理如图 9 所示, 该脚本的作用为在仿真运行开始时实时从 UDP 接收脚本中获取目标模型的坐标和姿态角数据, 同时将模型本身的旧坐标和姿态角数据更改为新的坐标和姿态角数据。

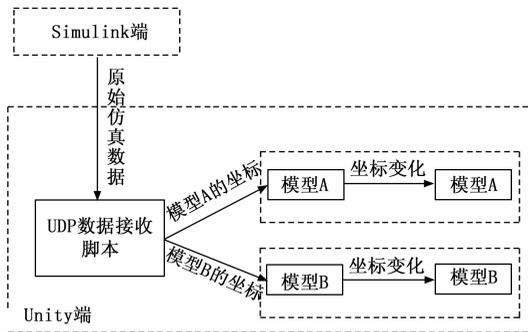


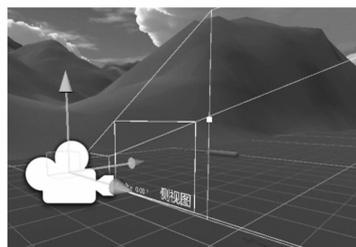
图 9 控制物体运动脚本的工作原理

3.2 跟踪视角设置

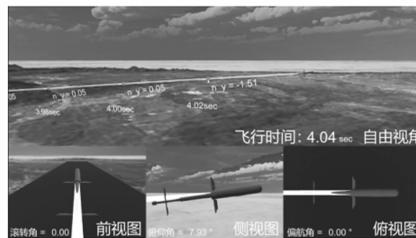
视角的设置是整个弹道可视化仿真中最重要的问题, 设置的正确与否直接影响到最终的显示结果。在 Unity3D 中, 场景运行的最终结果会统一输出到 Game 视窗。Game 视窗显示的画面通过“Hierarchy” (层次视图) 中的“Camera” (摄像机) 组件来实现, 设置好摄像机组件的画面范围和位置后就可以将其拍摄到的画面显示在 Game 视

窗上。

如图 10 (a) 所示, 图中线框显示的就是侧视图摄像机的取景范围。为了满足制导弹药飞行姿态和弹道的观察需求, 本文设置了 4 部摄像机, 其中 3 个摄像机用来拍摄制导弹药的三视图视角, 一个摄像机为自由视角, 使用鼠标实现摄像机的移动和视角的缩放, 如图 10 (b) 所示。



(a) 单个摄像机的取景范围



(b) Game 视窗的输出画面

图 10 跟踪摄像机的设置

3.3 特效设置

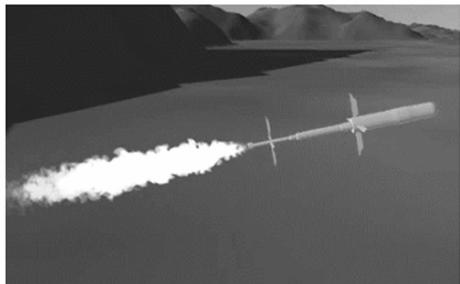
在 Unity3D 中, 火焰、烟雾和爆炸等特效均使用 Unity3D 编辑器内自带的“ParticleSystem” (粒子系统) 组件进行控制, 该组件可以控制粒子的形状、大小和持续时间等。本文使用“ParticleSystem”制作发动机尾焰和弹药命中后目标产生爆炸的特效。

本仿真设定该型制导弹药的发动机分为两级工作, 第一级工作时间为 0.00~0.04 s, 第二级工作时间为 0.15~2.65 s。因此仿真中需要对发动机尾焰的表现时长进行控制, 本文使用一个单独的控制脚本, 在检测到发动机推力不为 0 时开启尾焰特效, 其余时间则关闭。同样编写一个脚本控制爆炸特效, 使用“OnTriggerEnter”函数监测制导弹药与目标的碰撞, 在检测到制导弹药和目标车辆发生碰撞后使用“Instantiate” (实例化) 函数生成一个爆炸特效。最终尾焰与爆炸特效的效果如图 11 所示。

4 应用实例

搭建好 Simulink 数值仿真模型和 Unity3D 三维仿真场景后, 即可设定初始仿真参数, 本文所使用的主要参数见表 1 所示。由于激光制导弹药在攻击过程中需要持续对目标进行照射, 一旦敌方目标的激光告警器感知到激光的照射, 那么敌方就可能启动反制措施使制导弹药无法命中。

因此, 本文对制导弹药攻击目标的过程进行仿真, 寻找在敌方存在反制措施的情况下, 对不同运动状态的目标进行激光照射的窗口期。



(a)弹体尾焰特效



(b)爆炸特效

图 11 视觉效果图

表 1 制导弹药主要参数

参数	数值
制导弹药初始高度 H/m	1.5
弹体重量 m/kg	6
弹体长度 L/m	0.9
第一级发动机推力 F_1/N	6 600
第二级发动机推力 F_2/N	1 000
第一级发动机作用时间 T_1/s	0.04
第二级发动机作用时间 T_2/s	1.5
比例导引系数 K	3.5
初始发射倾角 Q/deg	10

4.1 仿真约束条件

本仿真中主要通过 Unity3D 中的碰撞检测来判断制导弹药是否命中目标，设置的条件为只要制导弹药的三维模型和目标的三维模型发生接触即判定为命中。此外，攻击过程中需要满足一定的约束条件，若仿真过程中的参数超过下列约束，则可以认为攻击失败：

1) 被动段最小飞行速度限制：因本文中制导弹药的弹翼所能提供的升力有限，因此在制导弹药的无动力段速度低于某值时弹翼无法提供足够的升力，从而视为丧失制导能力，本文设定最小飞行速度为 180 m/s。

2) 敌目标反制限制：在敌方目标的激光告警器感应到激光照射后会在一定时间内采取快速机动或释放烟雾等反制措施使制导弹药失去目标，本文设定敌方目标在感知到威胁后的 4.0 s 做出反制措施，反制措施执行 1.0 s 后制导弹药失控。因此制导弹药需要在激光照射有效的 5.0 s 内命中目标。

3) 激光最小照射时间限制：由于反制措施的存在，攻

击方的激光照射时间有限，如果激光照射时间过小，则制导系统来不及修正轨迹造成脱靶。

4) 飞行高度限制：若制导弹药的飞行高度小于 0 m，则视为攻击失败。

5) 飞行时间限制：制导弹药需要在弹上自毁装置启动前命中目标，自毁装置的启动时间为飞行开始后的第 15.0 s。

4.2 仿真实例

4.2.1 目标为静止状态

假定红方在距离发射点 2 100 m 处发现蓝方静止目标后发射制导弹药，从发射到命中目标这段时间蓝方目标保持静止，首先假设蓝方激光反制措施不工作，仿真显示制导弹药大约在 9.73 s 命中目标。那么可以得出在蓝方激光反制措施正常工作时，红方开始激光照射的时间 t 不能早于 4.73 s，否则目标就会启动反制措施使制导弹药脱靶。接着以 0.1 s 为开启激光照射的时间间隔，得出当激光开始照射的时间晚于 8.7 s 时，制导弹药就会来不及进行机动而脱靶。从而得出红方开始激光照射的时间既不能早于 4.73 s，也不能晚于 8.7 s，窗口期一共是 3.97 s。仿真部分弹道如图 12 所示，仿真途中的输出界面如图 13 所示。

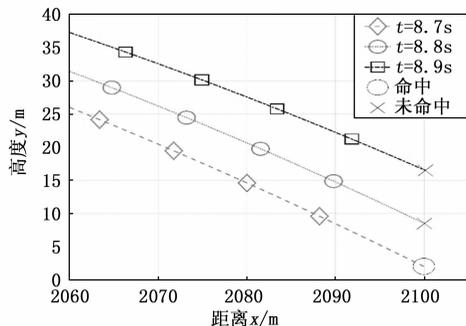


图 12 照射开始时间 t 在 8.8 s 附近的弹道轨迹图

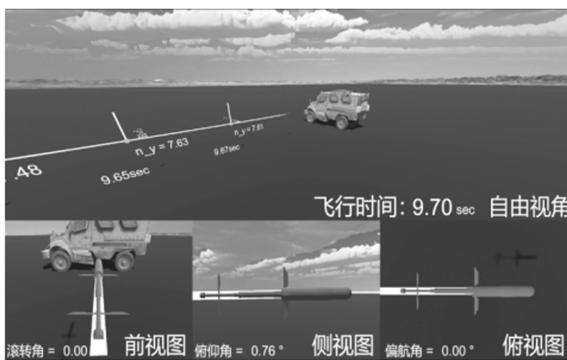


图 13 攻击静止目标时，飞行时间为 9.70 s 时的输出视图

4.2.2 目标为运动状态

假定红方在距离发射点 2 100 m 处发现蓝方运动目标后发射制导弹药，从发射到命中目标这段时间蓝方目标以 10 m/s 的速度向 z 轴负方向运动，首先假设蓝方激光反制措施不工作，仿真显示制导弹药大约在 9.76 s 命中目标。那么可以得出在蓝方激光反制措施开始工作时，红方开始激光照射的时间 t 不能早于 4.76 s，否则目标就会启动反制措

施。接着以 0.1 s 为开启激光照射的时间间隔, 得出当激光开始照射的时间晚于 7.3 s 时, 制导弹药就会来不及进行机动而脱靶。从而得出红方开始激光照射的时间不能早于 4.73 s, 也不能晚于 7.3 s, 窗口期一共有 2.57 s。仿真部分弹道如图 14 所示, 仿真过程中的输出界面如图 15 所示。

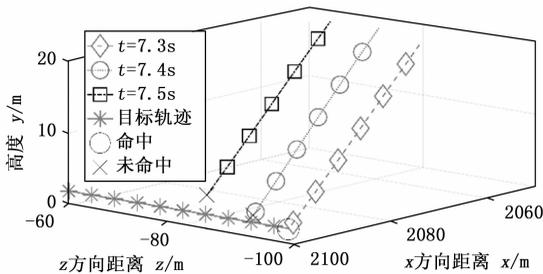


图 14 照射开始时间 t 在 7.4 s 附近的弹道轨迹图

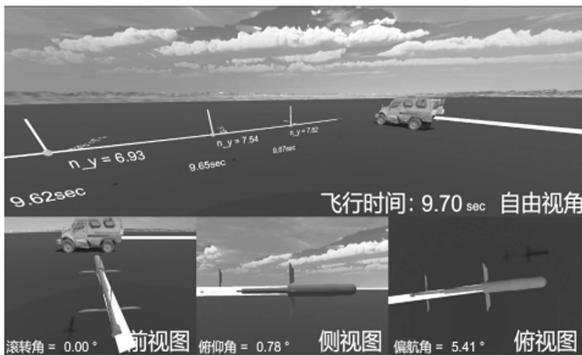


图 15 攻击运动目标时, 飞行时间为 9.70 s 时的输出视图

5 结束语

本文基于 Simulink 和 Unity3D 软件, 建立了一种制导弹药的六自由度弹道可视化平台, 可以实现制导弹药从发射到命中目标的完整攻击过程仿真。本文的应用实例表明该平台能够模拟目标的运动状态对激光照射窗口期的影响, 对制导弹药的研制、使用和作战决策提供一定的参考价值。后续将考虑更多的制导手段和场景设置, 逐步拓展该平台的仿真能力, 进一步逼近真实的攻防对抗过程。

参考文献:

- [1] 程健庆. 军用系统建模与仿真技术发展展望 [J]. 指挥控制与仿真, 2007 (4): 1-8.
- [2] 康凤举, 华翔, 李宏宏, 等. 可视化仿真技术发展综述 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21 (17): 5310-5313.
- [3] 沈忱. 关于对三维视景仿真可视化技术的研究 [J]. 数字技术与应用, 2017 (12): 79-80.
- [4] 赵军民, 何亚娟. 基于 Matlab/Simulink 的弹道仿真模块化设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2007 (1): 147-149.
- [5] 张坤峰. 基于 Simulink 的导弹六自由度建模与仿真 [J]. 舰船电子对抗, 2011, 34 (4): 72-76.
- [6] 高胜灵, 胡松启. 基于 Matlab/Simulink 的导弹六自由度弹道仿真系统设计 [J]. 科学技术与工程, 2011, 11 (1): 29-34.

- [7] 苏跃斌, 辛长范, 郭本亮, 等. 三维比例导引弹道的可视化仿真研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30 (4): 57-60.
- [8] 王意存, 陈琦, 常思江. 采用 Simulink 和 VRML 的六自由度弹道多视角可视化仿真 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40 (1): 143-147.
- [9] 顾绍鹏. 基于 Vega Prime/Creator 导弹飞行轨迹模拟跟踪技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [10] EL-GABRI A R, OUDA A N, AHMED S, et al. Command guidance missile tracking algorithm evaluation based on visual simulation [J]. International Journal of Engineering Research & Technology, 2018, 7 (8): 110-116.
- [11] BUZANTOWICZ, WITOLD. Matlab class for rapid visualization of missile-target engagement scenarios [J]. Problemy Mechatroniki Uzbrojenie, Lotnictwo, Inzynieria Bezpieczenstwa, 2023, 14 (4): 23-36.
- [12] 张龙, 赵志勤, 刘晓蕾, 等. 基于 FlightGear 的制导弹药飞行实测数据可视化研究 [J]. 火炮发射与控制学报, 2014, 35 (1): 92-96.
- [13] 韩晓博. 旋转火箭弹飞行姿态虚拟仿真技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [14] 王源睿, 崔瀚. 基于 Unity3D 的人工增雨火箭弹作用过程视景仿真 [J]. 电子测试, 2019 (18): 139-140.
- [15] 贾岛, 余曜, 蒋涛, 等. 基于 Unity 3D 的防空导弹引战配合可视化仿真研究 [J]. 2021, 41 (6): 49-52.
- [16] 郑向平, 滕云万里, 高亮, 等. 利用 Unity3D 引擎实现某飞行器攻防对抗仿真 [J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38 (5): 102-106.
- [17] 王琦. 制导弹箭弹道视景仿真系统研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [18] 金华, 戴金海. 基于 Matlab/Simulink 的旋转导弹六自由度弹道仿真 [J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27 (2): 222-224.
- [19] 段文龙, 彭杰钢. 基于 Matlab/Simulink 的弹丸外弹道 6 自由度运动仿真 [J]. 重庆工学院学报 (自然科学版), 2009, 23 (4): 146-149.
- [20] MCCAMISH S, ROMANO M. Simulation of relative multiple spacecraft dynamics and control with MATLAB-Simulink and satellite tool Kit [C] //AIAA Modeling & Simulation Technologies Conference & Exhibit, 2006.
- [21] 朱日楠, 王彪, 杨姗姗, 等. Simulink/Unity3D 联合的飞行控制仿真教学系统开发 [J]. 实验室研究与探索, 2023, 42 (11): 187-191.
- [22] 钱杏芳, 林瑞雄, 赵亚男. 导弹飞行力学 [M]. 北京理工大学出版社, 2000.
- [23] CHUSILP P, CHARUBHUN W, NUTKUMHANG N. A comparative study on 6-DOF trajectory simulation of a short range rocket using aerodynamic coefficients from experiments and missile DATCOM [C] //The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2011: 33.
- [24] 张钰, 张俭, 权维利, 等. 基于某反坦克导弹自动驾驶仪设计研究 [J]. 计算机仿真, 2017, 34 (6): 32-36.
- [25] 李一. 基于 Unity3D 的虚拟战场环境研究与实现 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.