

巡飞弹实时航迹监控系统的设计与研究

熊焰明¹, 樊永生¹, 余红英², 文震宇²

(1. 中北大学大数据学院, 太原 030051; 2. 中北大学电气与控制工程学院, 太原 030051)

摘要:针对巡飞弹在执行任务时航迹显控、姿态信息显示不直观的缺点, 设计了基于 Unity3D 的实时航迹监控系统。通过对巡飞弹在突防阶段与侦察阶段的飞行航路进行分析, 利用数字高程模型的构造地形模型, 构建了雷达、高炮与防空导弹 3 大威胁的等效模型, 并建立了巡飞弹飞行航迹规划, 结合弹体姿态建模和虚拟空间坐标定位方法, 利用三维视景仿真技术对整个系统进行模块化设计。试飞试验验证了系统能实时接收弹体航迹状态数据, 并实现弹体姿态复现。

关键词:巡飞弹; 航迹监控; 数字高程模型; 视景仿真; 姿态复现

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-2783(2018)02-0218-06

Research and design of real time track monitoring system for cruise missile

XIONG Yanming¹, FAN Yongsheng¹, YU Hongying², WEN Zhenyu²

(1. Data Science and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A real-time track monitoring system based on Unity 3D is designed to overcome the shortcomings that the display of the projectile, the visual display and the attitude information of cruise missile are not intuitive. Based on the analysis of the flight path of the projectile and the reconnaissance stage, the terrain model of the digital elevation model is used to construct the equivalent model of the three major threats of radar, anti-aircraft and anti-aircraft missile. The flight path Planning is also built. Combined with missile attitude modeling and virtual space coordinate positioning method, the entire system modular is designed by using of three-dimensional visual simulation technology. The flight test verifies that the system can receive real-time track state data and posture reproduction.

Keywords: projectile; track control; digital elevation model(DEM); visual simulation; gesture recurrence

为了适应高速发展的现代战争, 要求能在最短的时间内研制最有效的高性能武器系统捍卫自己的国家, 因此, 对弹药的发射与控制显得尤其重要, 但传统的弹药已经逐渐不能适应现今的作战模式^[1]。争取一击即中的绝对战场主导权是现今对武器研制的主要要求, 巡飞弹即是未来战争中不可忽视的重要部分。在巡飞弹的研制和试验阶段, 需要全面直观地对巡飞弹进行仿真试验, 新的视景仿真技术手段在军事上的应用显得尤为重要^[2]。

目前, 视景仿真技术在军事上的研究与应用已得到了快速的发展。马光利等^[3]利用底层为 OpenGL 的基于三维视景驱动软件 Vega Prime 建立了虚拟导弹弹道轨迹目标训练系统; 王昂^[4]利用机器视觉模拟海洋的实景状况, 采用了基于多层次细节(layer of detail, LOD)渲染和网格高分辨率重构的三维虚拟海洋视景仿真技术。以上仿真与可视化系统的开发与研究涉及底层的图形学以及针对图形处理器(graphics processing unit, GPU)编程的三维渲染问题^[5], 导致代码冗长复杂、开发周期长、可靠性低, 且不利于后期增加需求时的修改与维护, 数据的

输出以及姿态显示也不够直观。

为解决以上问题, 以得到更好的仿真效果, 本文提出了一种结合 Unity3D 引擎模拟巡飞弹监控系统。首先进行系统总体设计, 然后对真实场景进行仿真建模, 并进行弹道姿态解算和空间坐标定位, 最终实现基于 Unity3D 平台的监控系统的设计, 仿真试验验证了实弹在飞行任务中的航迹规划、飞行监控等功能。

1 总体设计

地面站监控系统为某型号信息化弹药预研项目中的一部分, 该系统可在巡飞弹执行任务时对其进行航迹规划, 并可实时监测巡飞弹的飞行状态。系统由两台计算机组成, 一台接收弹载机下行数据, 为主控机; 另一台则对飞行过程进行仿真。巡飞弹与地面站之间通过微波电台通信, 电台将从弹载机上获得的实测数据传输给地面电台, 并将这些数据传送到仿真系统中。整个巡飞弹系统的构成如图 1 所示。

收稿日期: 2017-09-27

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(201601D102029)

第一作者: 熊焰明(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、仿真与可视化

通信作者: 樊永生, 教授, 主要研究方向为图像处理、仿真与可视化, fanys67@163.com

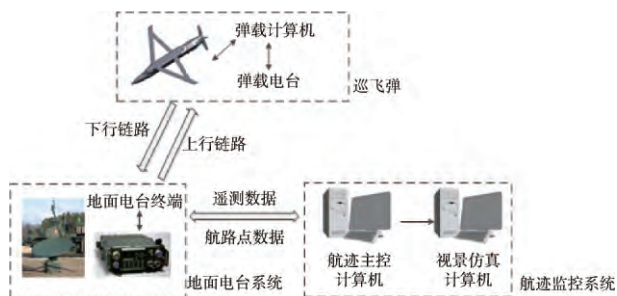


图1 巡飞弹系统构成示意图

2 数学模型

2.1 地形模型

在真实的地形(尤其是不可预测的战场环境)中进行航迹规划才有实际意义,所以地形仿真建模十分重要。真实战场环境的仿真可借助数字地图的高程数据模型 DEM 数据集产品 GDEM^[6-7]。

以某试验区的地形数据为例,将其在 Global Mapper 软件中进行处理,最终得到的该地区高程图如图2所示。

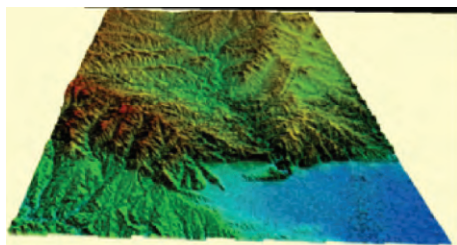


图2 试验区 DEM 数据图

在该图上的试验区进行 DEM 数据导出,根据导出数据,在 MATLAB 可绘制出该试验区 DEM 的三维效果图,如图3所示。

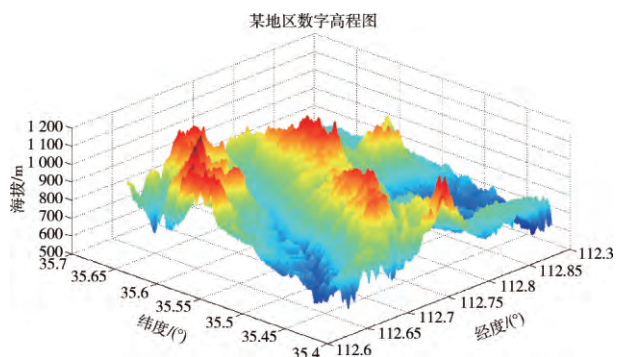


图3 地形模型三维图

2.2 威胁源模型

2.2.1 雷达探测模型

被雷达探测是巡飞弹面临的主要威胁之一,雷达探测模型如图4所示。

图4(a)为雷达作用区域图;图4(b)为雷达等效模型。为便于讨论,可将雷达扫描的区域近似看作

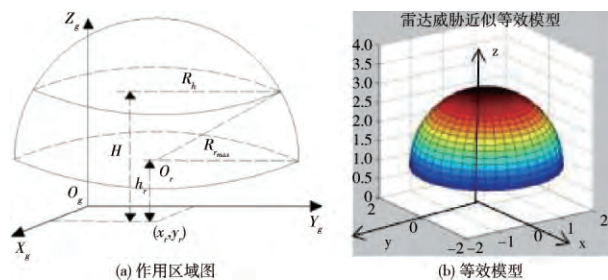


图4 雷达模型

半球,以雷达所在位置点 O_r 为中心进行探测模型的建立, h_r 和 R_{\max} 分别表示雷达的海拔高度和扫描半径,在其探测区域范围内,海拔高度点 $H > h_r$ 时,探测半径 R_h 为

$$R_h = \sqrt{R_{\max}^2 - (H - h_r)^2}. \quad (1)$$

雷达在探测区域内探测到巡飞弹存在概率因素,即不同位置处探测到的概率为

$$P = \exp\left[-\frac{K_R L^2 R_{\max}^4 + h R^4}{h R_{\max}^4}\right]. \quad (2)$$

式中, K_R 、 L 、 R 和 h 分别是雷达探测的系数、雷达探测的水平距离、巡飞弹与雷达之间的距离和巡飞弹的飞行高度^[6]。

2.2.2 防空弹模型

为避免巡飞弹可能受到敌方防空弹攻击的威胁,需对防空弹攻击区进行建模。在攻击区域内,防空弹攻击目标时,需考虑多重因素,在区域内不同位置,对目标的杀伤概率是不相等的,但均不低于某一给定值。

攻击区剖面,如图5所示。

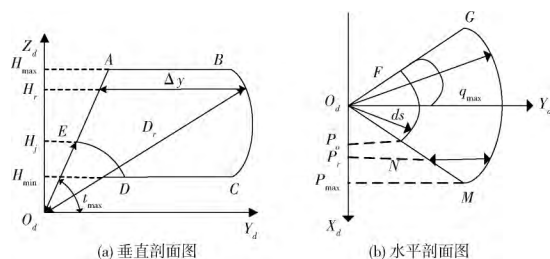


图5 攻击区剖面图

图5(a)为导弹攻击区的垂直剖面图;图5(b)为导弹攻击区的水平剖面图。由图5(a)可知,攻击目标的最大和最小高度分别为 H_{\max} 和 H_{\min} , 与此对应的攻击区高界与低界为 AB 和 DC , 斜距 D_r 表示远界 BC , 斜距 D_s 与高低角 ϵ_{\max} 则表示近界 DEA , Δy 为攻击区纵深。

导弹攻击作用区模型十分复杂,为便于分析,将威胁模型在导弹作用区看作是一个旋转抛物体,如图6所示。

设置作用区远界 R_{\max} 与近界 R_{\min} 便可得到实际威胁区模型,假设在该区域内任意点的威胁度相同,则:

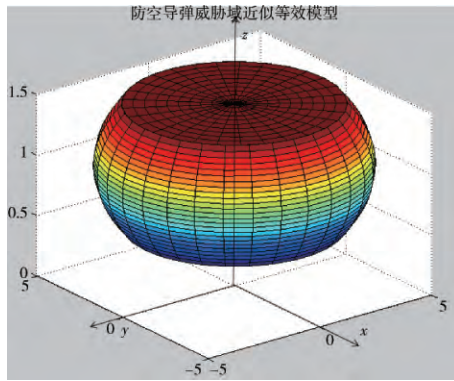


图 6 导弹威胁模型

$$TN = \begin{cases} 0 & h < H_{\min} \\ 1 & H_{\min} \leq h \leq H_{\max} \quad d < D_r \\ 0 & h > H_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中 TN 表示敌方火力威胁。

2.2.3 高炮模型

高炮武器系统在现代防空作战中仍发挥着主力军作用,在一定条件下能够对目标实施致命打击。高炮射界是指可攻击目标的边界,由高低射界 H_{\max} 、有效射界 D_{eff} 、最大射界 D_{\max} 、和方位射界组成,在射界范围内,高炮才存在摧毁敌方的可能。高炮射界示意图如图 7 所示。

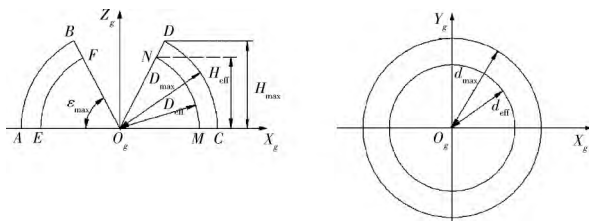


图 7 高炮射界示意图

图 7 中高炮射界的高低角一般为 $-5^\circ \sim 90^\circ$ 。高炮等效模型如图 8 所示。

图 8(a)和图 8(b)分别是高低角为 45° 和 90° 时的等效模型示意图。

高炮对比其他威胁火力较强,在其威胁空间内用 D_{\max} 、 D_{pri} 分别表示高炮的最大杀伤距离和主杀伤距离。其中若 D 为杀伤半径, λ 为杀伤系数,则有 $D_{\max} = (1 + \lambda)D$, $D_{\text{pri}} = (1 - \lambda)D$,即高炮威胁度满足极小型分布。主杀伤距离内的威胁度为 1,而主杀伤距离与最大杀伤距离之间是递减变化的,故有:

$$TN = \begin{cases} 1 & d < D_{\text{pri}} \\ \frac{D_{\max} - d}{D_{\max} - D_{\text{pri}}} & D_{\text{pri}} \leq d \leq D_{\max} \\ 0 & d > D_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

雷达、防导弹威胁与高炮威胁模型的建立,为进行仿真场景航迹规划时添加威胁信息提供了理论依据。

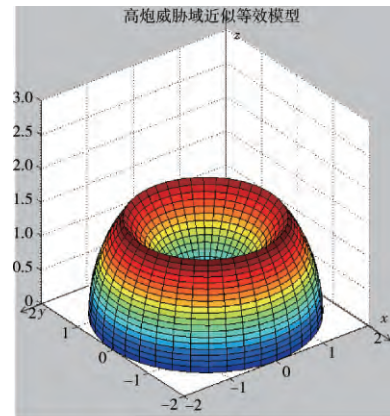
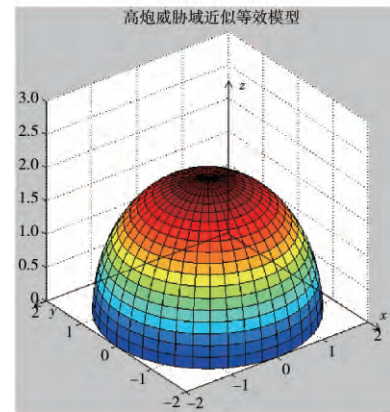
(a) 45° 时(b) 90° 时

图 8 高炮等效模型

2.3 航迹规划

从发射区到侦察区,巡飞弹面临着敌方火力攻击的威胁,在该过程对巡飞弹进行航迹规划是为了躲避敌方防空系统^[8-11],突防航迹的启发函数由以下 3 个因素组成。

1) 飞行高度 (H)

巡飞弹太高会引来敌方雷达探测,太低又会增大撞毁概率,因此代价函数需要考虑高度因素,即在不会撞到障碍物的情况下躲避敌方的威胁。

2) 航迹长度 (L)

飞行时间较短可提高机动性和飞行过程的安全性。

3) 敌方火力威胁 (TN)

有效避开火力威胁才能提高巡飞弹在飞行任务过程中的安全性,因此可将威胁模型的威胁度函数加入到代价函数中。

利用 A^* 算法仿真突防航路规划时,可将第 n 个栅格的代价表示为

$$F(n) = w_l L(n) + w_h H(n) + w_{\text{tn}} TN(n). \quad (5)$$

式中, w_l 、 w_h 和 w_{tn} 分别为航迹长度、高度和威胁度所占的权重。如对 w_l/w_h 和 w_l/w_{tn} 进行不同的设置,可判断巡飞弹在遇到障碍时是选择绕过还是越过,以及在遇到威胁时是躲避还是忽略。高度权重较大时的航迹规划结果如图 9 所示。

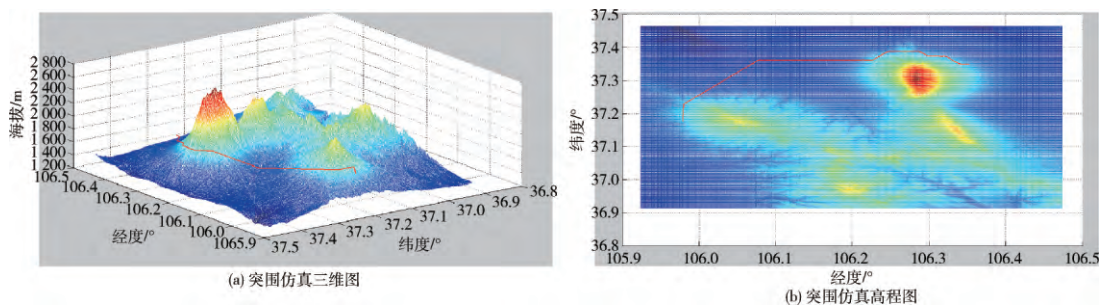


图9 突防阶段航迹规划结果

2.4 姿态解算

在数据驱动下,对巡飞弹从发射到飞行,以及击中目标炸毁的整个过程的飞行姿态进行仿真建模,并且实时显示巡飞弹的滚转角、俯仰角、偏航角,以及东向速度、北向速度、天向速度等信息,使整个仿真过程更加真实可靠。

整个仿真过程中需要观测弹体的姿态角,弹体的姿态角有绕 x 轴(沿轨道前进的切线方向)旋转的姿态角,称为滚转角;绕 y 轴(垂直于轨道面)旋转的姿态角,称为俯仰角;绕 z 轴(垂直于 $0-xy$ 面)旋转的姿态角,称为偏航角。姿态角示意图如图 10 所示。图中, θ 、 β 和 γ 分别为俯仰角、滚转角和偏航角。

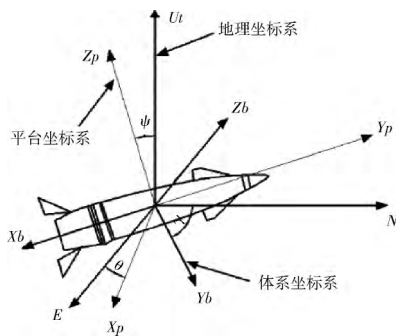


图10 姿态角示意图

根据四元数得到欧拉角数据的转换,由四元数得到弹体的姿态角滚转角、俯仰角、偏航角的转换为:

$$\text{yaw} = \text{atan2}(2 \times q_y \times q_w - 2 \times q_x \times q_z, 1 - 2 \times q_x^2 - 2 \times q_z^2), \quad (6)$$

$$\text{pitch} = \text{asin}(2 \times q_x \times q_y + 2 \times q_z \times q_w), \quad (7)$$

$$\text{roll} = \text{atan2}(2 \times q_x \times q_w + 2 \times q_y \times q_z, 1 - 2 \times q_x^2 - 2 \times q_z^2). \quad (8)$$

由式(6)、式(7)和式(8)可求得弹体在飞行过程中的实时姿态数据,以保证仿真系统中模型姿态显示的正确性。

2.5 空间坐标定位

要将三维坐标信息的图形显示在二维显示屏上,并且得到非常真实的视觉效果,需实现坐标空间的定位。从建模后的模型坐标空间到世界坐标系空间,再到最终的屏幕坐标空间,需要做坐标变换,即:

$$\mathbf{P}_{\text{view}} = \mathbf{M}_{\text{view}} \mathbf{P}_{\text{world}}, \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{\text{world}} = \mathbf{M}_{\text{model2world}} \mathbf{P}_{\text{model}}, \quad (10)$$

$$\mathbf{M}_{\text{view}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

式中 θ 为方向余弦。

\mathbf{M}_{view} 和 $\mathbf{M}_{\text{model2world}}$ 是变换矩阵,通过式(9)和式(10)可得到模型坐标对应的在空间坐标系下的坐标 $\mathbf{P}_{\text{world}}$ 。由于 Unity3D 中的摄像机坐标系使用的坐标系是右手坐标系,所以需要将式(10)的变换矩阵 \mathbf{M}_{view} 的 Z 分量进行取反操作,即:

$$\mathbf{M}_{\text{view}} = \mathbf{M}_{\text{negate}} \mathbf{M}_{\text{view}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{M}_{\text{view}}, \quad (12)$$

所以最终的顶点变换为

$$\mathbf{P}_{\text{view}} = \mathbf{M}_{\text{view}} \mathbf{P}_{\text{world}}. \quad (13)$$

得到视图空间的坐标,即可得到最终的在二维显示屏上的数据输出。

3 系统实现

完成模型建立及算法设计,即可实现巡飞弹航迹监控视景仿真,系统仿真模块设计结构如图 11 所示。

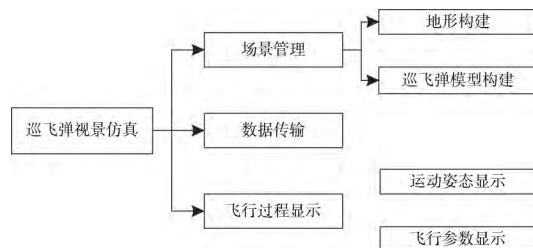


图11 系统模块结构图

3.1 航迹显示

数据发送端的实现是以 C++ 类来封装 Window API 的 MFC 进行设计的,利用 MFC 可以创建一个可视化界面窗口,如图 12 所示。



(a) 航迹初始设置界面



(b) 航迹规划及威胁源显示

图12 发送端软件

图12(a)显示航迹信息,并且为仿真程序提供数据;图12(b)显示加载航路点数据以及设置危险源的二维地图。

在数据接口中,利用基于多线程的UDP的传输模式进行数据收发,从弹载机接收数据信息,并通过判断接收的数据是否符合双方协议。数据帧格式如图13所示。



图13 数据帧格式

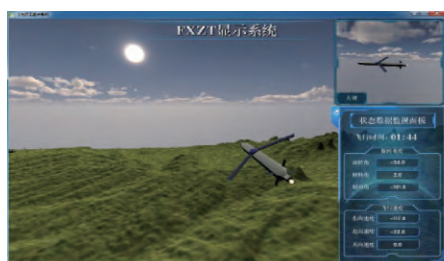
符合协议要求后,对数据进行解析,通过数据驱动巡飞弹按预设航路点飞行。设置威胁源时,可进行避障处理,即修改航路点数据,并将数据通过串口协议RS422发送给仿真系统软件,完成数据的接收和发送,使得巡飞弹能按收到的飞行数据飞行。

在Unity3D中进行脚本编程,接收实时发送的航迹数据,并按照固定协议解析,在程序中开启线程,从线程中读取数据到队列中,为确保实时性,将读取的数据及时删除。仿真场景接收数据发送端的数据,驱动巡飞弹复现飞行姿态。

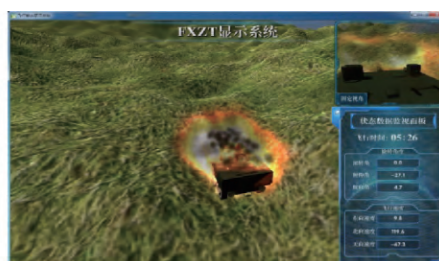
3.2 姿态展示

场景的姿态展示主要运行模型上的脚本程序,实时地根据数据显示弹体的飞行姿态以及击中目标时的爆炸效果,如图14所示。

运行中,实时地对场景的地形环境进行渲染^[12-13],将弹体的飞行姿态及整个环境逼真地呈现出来。通过调用串口收到的数据,在子界面中显示飞行体仿真姿态数据,如飞行时间和滚转角、俯仰



(a) 飞行姿态图



(b) 爆炸效果图

图14 飞行姿态及爆炸效果图

角、偏向角等角度信息,以及有关速度的东向速度、北向速度、天向速度等速度信息;触发子界面的相关按钮,实现场景的加载,以及语音和画面信息提示等功能^[14-16]。

4 结 语

本文按照巡飞弹航迹监控系统的任务需求,利

用高程信息地形建模、A* 算法进行航迹规划和视界仿真,设计了一个适用于巡飞弹的航迹监控系统,并将其接入巡飞弹地面站,通过在基地进行试飞试验,对系统进行测试,验证了系统的正确性,对类似武器的研制以及相关器械的视界仿真,具有一定的参考价值。

(由于印刷关系,查阅本文电子版请登录 <http://www.paper.edu.cn/journal/zgkjlw.shtml>)

[参考文献] (References)

- [1] 张菁, 张天驰, 陈怀友. 虚拟现实技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 56-58.
ZHANG Jing, ZHANG Tianchi, CHEN Huaiyou. Virtual reality technology and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 56-58. (in Chinese)
- [2] 郭阳明. 虚拟现实的实时性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
GUO Yangming. Real-time study of virtual reality [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)
- [3] 马光利, 李智, 牛军浩, 等. 虚拟导弹弹道轨迹目标训练系统设计研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(9): 63-67.
MA Guangli, LI Zhi, NIU Junhao, et al. Research of virtual missile trajectory and target training system [J]. Computer Simulation, 2016, 33(09): 63-67. (in Chinese)
- [4] 王昂. 海上舰艇作战虚拟视景图像系统仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(4): 419-423.
WANG Ang. Virtual naval battle simulation study visual image system. Computer Simulation, 2016, 33(4): 419-423. (in Chinese)
- [5] 房施东, 杨清文, 程义, 等. 火箭炮装填训练视景仿真系统的设计与实现[J]. 计算机仿真, 2007(1): 307-310.
FANG Shidong, YANG Qingwen, CHENG Yi, et al. Design and implementation of simulation system of rocket launcher training visual simulation [J]. Computer Simulation, 2007(1): 307-310. (in Chinese)
- [6] 张永. 基于数字高程地图(DEM)的便携式地形感知系统关键技术的研究与实现[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2016.
ZHANG Yong. Study and implementation of key technology of portable terrain sensing system based on digital elevation map (DEM) [D]. Guanghan: China Civil Aviation Flight Academy, 2016. (in Chinese)
- [7] 郭琳娜, 张吉平, 柳永全, 等. 利用地面三维激光扫描技术进行地形测绘[J]. 中国科技论文, 2015, 10(9): 1014-1018.
GUO Linna, ZHANG Jiping, LIU Yongquan, et al. Using terrain 3D laser scanning technology for terrain mapping [J]. China Sciencepaper, 2015, 10(9): 1014-1018. (in Chinese)
- [8] 丁明华, 李允旺, 王勇. 基于 Unity3d 的麦克纳姆轮移动平台避障算法仿真[J]. 中国科技论文, 2016, 11(10): 1191-1195.
DING Minghua, LI Yunwang, WANG Yong. Simulation of obstacle avoidance algorithm for McNam's mobile platform based on Unity3d [J]. Chinese Sciencepaper, 2016, 11(10): 1191-1195. (in Chinese)
- [9] 窦文豪, 朱凯, 梁盛好, 等. 基于拓扑地图的田间机器人路径规划和控制[J]. 中国科技论文, 2016, 11(22): 2525-2530.
DOU Wenhao, ZHU Kai, LIANG Shenghao, et al. Path planning and control of field robot based on topological map [J]. Chinese Sciencepaper, 2016, 11(22): 2525-2530. (in Chinese)
- [10] 季荣涛. 基于威胁分析的战场空间划分及其在航迹规划中的应用[D]. 南京: 南京大学, 2016.
JI Rongtao. Battlespace divided based on threat analysis and the route planning application [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016. (in Chinese)
- [11] WANG Han, YAN Bingjing, LI Xiaoxia, et al. On optimal path planning for UAV based patrolling in complex 3D topographies[J]. IEEE International Conference on Informaion and Automation (ICIA), 2016, 8: 2475-2485.
- [12] PAOLO M. Building a platform for UAV research[D]. Pisa: University of Pisa, 2003.
- [13] 袁继来. 无人机地面控制站软件的研究与设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
YUAN Jilai. Research and Design of UAV Ground Control Station Software [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [14] 赵元棣, 孙禾, 王洁宁, 等. 基于 PHMM 的终端区航空器综合态势识别[J]. 中国科技论文, 2013, 8(10): 1068-1072.
ZHAO Yuandi, SUN He, WANG Jiening, et al. Comprehensive situation identification of terminal aircraft based on HMM [J]. China Sciencepaper, 2013, 8(10): 1068-1072. (in Chinese)
- [15] 张龙, 赵志勤, 范斌宁, 等. 基于弹载地磁测试的高速旋转稳定弹锥形运动分析[J]. 兵工学报, 2016, 37(12): 2235-2241.
ZHANG Long, ZHAO Zhiqin, FAN Binning, et al. Analysis of cone-shaped motion of high-speed rotation stability based on missile-borne geomagnetism [J]. Journal of Ordnance, 2016, 37(12): 2235-2241. (in Chinese)
- [16] 王洪源, 陈慕羿, 华宇宁, 等. Unity3D 人工智能编程精粹[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 133-150.
WANG Hongyuan, CHEN Muyi, HUA Yuning, et al. Unity3D artificial intelligence programming essence [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 133-150. (in Chinese)