

无人机协同路径规划三维实时可视化仿真平台

陈龚¹, 徐磊², 苏智勇¹

(1. 南京理工大学自动化学院, 南京 210094; 2. 上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 针对当前无人机路径规划研究在规划结果仿真验证和三维可视化方面的不足, 研究和实现了一种无人机协同路径规划三维实时可视化仿真平台。对目标区域进行网格划分和面积计算; 用虚拟相机对无人机载荷侦察波束建模, 基于图形硬件实现侦察波束与三维地形的快速求交; 利用多边形填充算法计算被侦察地形范围, 记录和统计侦察信息并生成相应的色温图。通过仿真平台的实际运行, 证明该仿真平台为传统协同路径规划提供了一种实用的三维可视化仿真验证手段。

关键词: 无人机; 路径规划; 侦察; 实时求交; 仿真平台

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 09-1996-06

DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2016.09.011

3D Real-time Visualization and Simulation Platform for Collaborative Path Planning of UA

Chen Gong¹, Xu Lei², Su Zhiyong¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Shanghai Institute of Electro-Mechanical Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: There are still some issues existing in current path planning of UAV, such as planning result simulation verification and 3D visualization. To solve the problems, a 3D real-time visualization and simulation platform for collaborative path planning of UAV was proposed. The target area was divided and calculated. The reconnaissance beam of UAV was modeled with virtual camera, the intersection points obtained quickly based on graphics hardware. The terrain mesh was calculated by scan-line polygon filling algorithm, reconnaissance information was recorded and analyzed, and the color temperature maps were given. Through the actual operation by the simulation platform, simulation results verify that the simulation platform provides a practical means of visualization simulation and verification for traditional collaborative path planning.

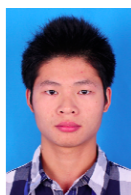
Keywords: UAV; path planning; reconnaissance; real-time intersection; simulation platform

引言

随着无人机技术的飞速发展, 无人机在情报侦察以及遥感探测方面起着越来越重要的作用。面临大范围区域搜索任务时, 相对于单架无人机, 多无人机协同执行任务能克服传感器的角度

限制, 从多个方位对目标区域进行观测从而具有更好的侦察能力和更强的容错能力^[1]。为了实现对整个侦察区域的有效覆盖, 多无人机协同侦察路径规划则显得尤为重要, 同时如何验证规划所得路径结果也是不可或缺的环节。

目前对于路径规划的研究重点主要在于规划算法的研究^[2-3], 而对于规划结果的验证和可视化展示的研究相对较少。杨遵等人^[4]采用了基于分散规划、集中调整思想的层次分解策略来确定参考航路, 通过改进粒子群算法得出无人机协同任



收稿日期: 2016-05-14 修回日期: 2016-07-11;
基金项目: 国家自然科学基金(61300160);
作者简介: 陈龚(1992-), 男, 四川犍为, 硕士, 研究方向为计算机仿真; 徐磊(1983-), 男, 江苏淮安, 硕士, 高工, 研究方向为系统仿真; 苏智勇(1981-), 男, 江苏泰州, 博士, 副教授, 研究方向为计算机视觉、计算机图形学、图像与视频处理。

http: www.china-simulation.com

• 1996 •

务初始航路。章国林等人^[5]提出了一种基于改进蚁群算法与 Voronoi 图相结合的无人机路径规划方法,使无人机对目标区域侦察的路径成本最低。上述文献[4-5]中路径规划结果验证主要通过比较路径节点个数、搜索最大目标个数以及路径燃油成本等方面,缺乏对路径周围地形信息的评估。张艳等人^[6]通过 MatLab 仿真的方式验证路径规划结果,该文献通过对地形障碍进行模拟验证无人机对地形障碍的规避情况,但是无法验证无人机对路径周围地形侦察的分布情况,同时也无法可视化地展示无人机如何规避地形障碍。

针对现有路径规划验证方法的不足,本文设计了一个三维辅助平台对路径规划侦察活动进行三维仿真验证和可视化模拟。该平台能支持对多架无人机协同路径规划进行仿真验证。通过三维仿真的方式进行路径规划验证能更加直观地展现无人机在规划路径上的侦察及避障情况,同时对路径周围地形信息进行记录和分析,为传统路径规划提供了一个实用的三维可视化仿真平台。

1 系统框架

仿真平台主要用于对路径规划算法所得路径航线进行仿真模拟验证,并在仿真过程中记录和分析路径周围地形信息。无人机协同路径规划仿真系统流程如图 1 所示。

系统第一部分为地形预处理,具体内容为对目标区域进行网格划分,面积计算及编号。第二部分则根据无人机及载荷位置和姿态参数构建虚拟相机并实时求交,再确定交点所包围地形并记录网格信息。最后进行后处理,主要内容是对仿真过程中记录的信息进行综合分析和评估,并通过色温图的方式对目标区域的三维地形进行渲染。

2 算法流程

2.1 预处理

预处理的主要内容为对目标区域的地形进行网格划分,同时计算每个网格对应地形的面积并

对网格进行编号以便后续查找。地形预处理示意图如图 2 所示。

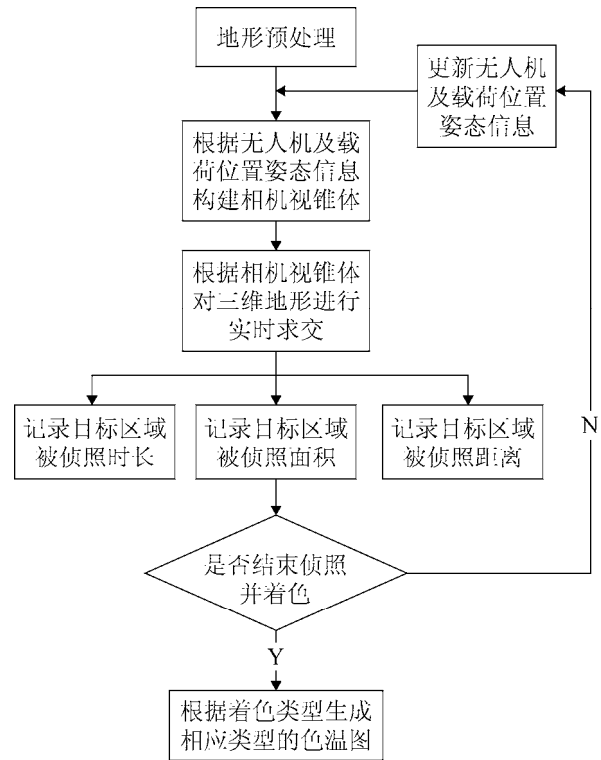


图 1 系统流程图

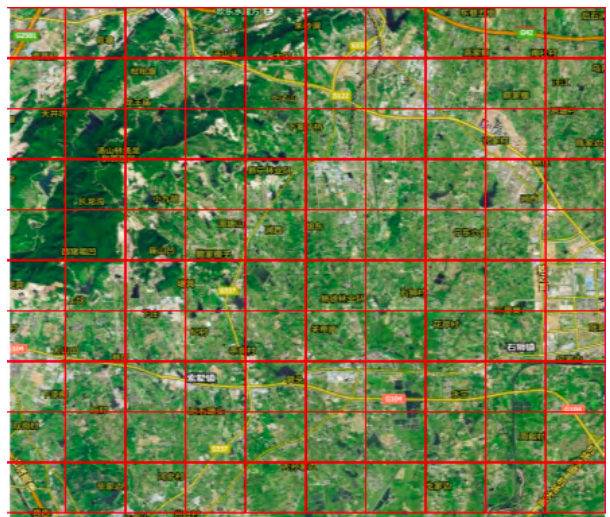


图 2 地形预处理示意图

地形预处理范围可通过指定经纬度确定,网格个数则由地形范围和划分精度共同确定,定义网格长宽精度分别为 ΔL 和 ΔW 。地形网格面积计算示意图如图 3 所示。

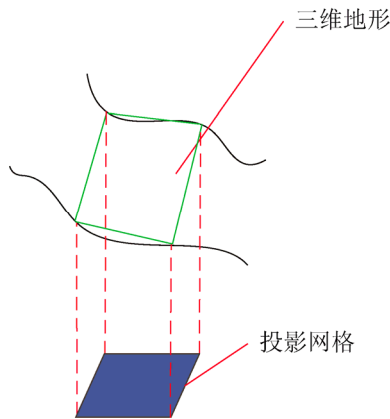


图 3 地形网格面积计算示意图

分别求出网格 4 个顶点在三维地形上对应的坐标点，然后将其连成四边形(如图 3 中的投影网格上方四边形)，用该四边形的面积近似代替此处地形的实际面积。由于三维地形有起伏，四个顶点可能不在同一平面，因此在实际计算中将四边形面积分拆成两个三角形面积之和。虽然地形网格面积是近似计算得到，但是通过提高网格精度 ΔL 和 ΔW 可以进一步减小面积计算误差。

2.2 实时处理

通过预先规划得到相应路径之后，无人机按照规划所得路径进行侦察仿真验证。在验证过程中需要实时计算并更新无人机及侦察载荷的位置和姿态，同时记录被侦察地形区域的相关信息以便作为路径规划结果的评估依据。被侦察区域的确定则需要侦察波束与三维地形进行实时求交，本系统中采用的是基于硬件的求交算法。交点所包围地形网格的查找则采用多边形扫描填充算法来确定。

2.2.1 虚拟相机建模

无人机在侦察过程中通过侦察载荷向路径周围的三维地形发出侦察波束，侦察波束类似于计算机图形显示中的相机视锥体。因此可以用虚拟相机对侦察波束进行建模，相机视点位置模拟侦察载荷位置，相机朝向模拟侦察载荷侦察方向。载荷侦察模型示意图如图 4 所示。

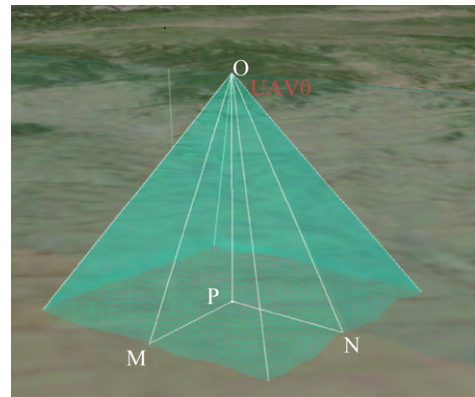


图 4 载荷侦察模型示意图

图 4 中 O 点为侦察载荷所处位置，P 点为 O 点在地面的投影点，M 和 N 分别是地面投影矩形两条边的中点。定义 $\angle NOP$ 为无人机侦察水平视场半角，记做 α ；定义 $\angle MOP$ 为垂直视场半角，记做 β 。无人机的侦察范围由无人机高度，水平视场半角 α 以及垂直视场半角 β 决定。

根据图 4 所示载荷的侦察波束模型可以创建用于与三维地形求交的虚拟相机^[7]。创建虚拟相机后设置相机的透视变换矩阵，观察坐标矩阵以及世界坐标矩阵，上述矩阵由侦察载荷从局部坐标系到世界坐标系的变换计算得到，以保证虚拟相机的视点位置和朝向与侦察载荷的位置和朝向相同。再根据侦察载荷的水平视场半角 α 以及垂直视场半角 β 设置虚拟相机视口参数，视口参数决定相机所能观察到的范围。虚拟相机视口参数包括如下参数：

- (1) X:左上角 x 坐标；
- (2) Y:左上角 y 坐标；
- (3) Width:视区宽度；
- (4) Height:视区高度；
- (5) MinZ:视区最小深度(0.0f~1.0f)；
- (6) MaxZ:视区最大深度(0.0f~1.0f)；

参数(1)~(4)用于确定视区在二维屏幕中的范围，MinZ 和 MaxZ 用于设置近裁剪面和远裁剪面的位置。设置完成上述参数后虚拟相机中所看到的画面即为无人机载荷侦察波束所侦察到的三维地形。

2.2.2 波束与地形的实时求交

为实现多架次无人机协同路径规划和仿真, 需要尽可能提高无人机探测波束和三维地形数据求交的效率。由于无人机运动区域广, 波束探测范围宽, 涉及的三维地形数据量大, 因此, 在每帧渲染时利用波束和三维地形数据进行几何求交的思路不可取。为此, 本文提出利用图形硬件的“硬”裁剪功能实现波束和地形的快速求交。

波束与地形的实时求交算法的核心思想是把虚拟相机视锥范围内的三维地形在后台隐藏的屏幕空间做一次特殊的“渲染”。再通过 GPU(Graphic Processing Unit)自动裁剪得到无人机载荷侦照波束锥体与三维地形的交点。

求交具体步骤包括如下: 首先根据侦照波束参数构建虚拟相机视锥体和隐藏窗口; 其次基于虚拟相机对三维地形进行实时渲染; 最后利用虚拟相机对应的深度缓冲获取相机当前视角下各像素对应的深度值。为了获得视锥体和当前地形的相交边界, 可读取隐藏窗口四周屏幕像素坐标对应的深度值, 通过逆投影变换计算得到该像素对应的三维空间坐标。由于无人机侦照波束与地形求交时是通过波束锥体四周一系列离散的点与三维地形进行求交的, 将这些离散的交点依次连接起来就得到图 5 所示的线。

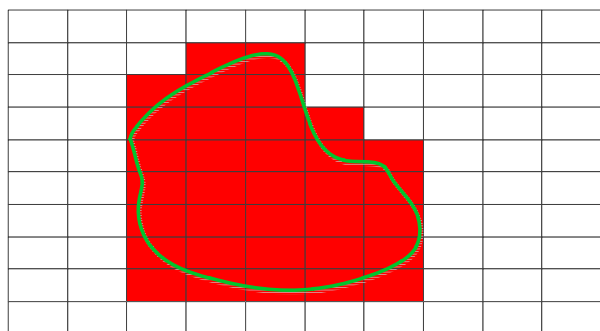


图 5 网格查找计算示意图

2.2.3 地形网格查找

得到载荷侦照波束与三维地形的边界交点后需记录交点所包围地形网格的侦照时长、侦照面

积以及侦照距离等信息。因此需要确定交点所包围地形网格。地形网格查找示意图如图 5 所示。其中矩形代表地形网格, 绿线代表无人机载荷侦照波束与三维地形交点的连线, 而红色矩形则代表被交点所包围的地形网格即每帧侦照波束所侦照到的三维地形。图 5 中边界处一些地形网格并未完全被交点所包围, 但仍将其视为被交点所包围的网格。因为该地形网格确实部分区域被无人机所侦照, 仍对该地形网格进行相应的信息记录。

本文采用多边形扫描填充算法来进行网格查找^[8]。该算法的基本思想是: 用水平扫描线从上到下(或从下到上)扫描由多条首尾相连的线段构成的多边形, 本文中即为交点两两相连而成的多边形, 每根扫描线与多边形的某些边产生一系列交点。将这些交点按照 x 坐标排序, 将排序后的点两两成对, 作为线段的两个端点进行连线, 处于这些连线上的网格则是在多边形内部的网格。算法可归纳为以下 4 个步骤:

- (1) 求交点, 即扫描线和多边形的交点。
- (2) 交点排序, 即按照 x 坐标大小排序。
- (3) 对排序后的点两两匹配。
- (4) 更新扫描线, 判断是否完成多边形扫描。

2.3 后处理

后处理主要包含两部分内容, 首先对仿真过程中记录的数据进行统计和分析, 再根据统计结果以直观的形式展示无人机的侦察分布情况。

统计和分析的具体数据包括目标区域每个地形网格被侦照的次数, 时长以及与无人机的最短距离等信息。对于多架无人机协同路径规划则还包括重复侦照地形范围以及侦察盲区范围。

最终根据分析结果对目标区域地形网格进行可视化展示。本文采用色温图的方式对地形网格进行渲染, 地形着色原则采用 CIE 色度空间中的一条线段作为标准进行映射。地形网格的颜色根据侦照时长、距离变化情况在不同的颜色之间平滑变化。

3 仿真实验

本系统以 VS2010 为开发环境，基于 DirectX 平台进行开发^[9]。仿真实验在 CPU 型号为 Intel(R) Core(TM) i7-4770，主频为 3.40 GHz，GPU 型号为 NVIDIA Quadro k2000，内存为 8G 的计算机上运行。仿真过程中向系统输入无人机在相应路径上的位置，姿态信息包括无人机高度、经纬度以及俯仰角、偏航角以及横滚角等。系统在每帧渲染的过程中实时计算无人机侦照波束的位置朝向并进行实时求交、信息记录以及渲染更新。仿真结果如图 6~10 所示。

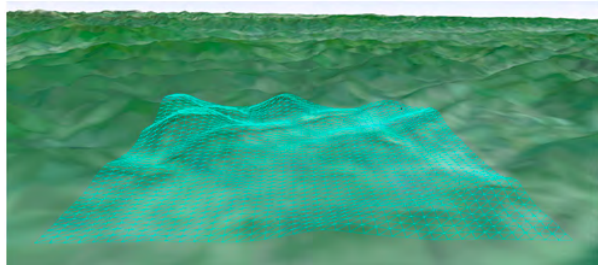


图 6 预处理地形网格图

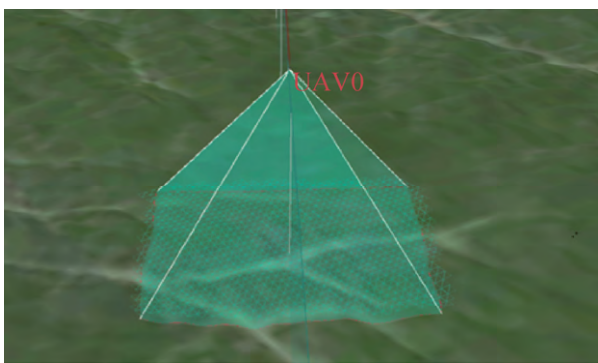


图 7 无人机侦照波束仿真图 1

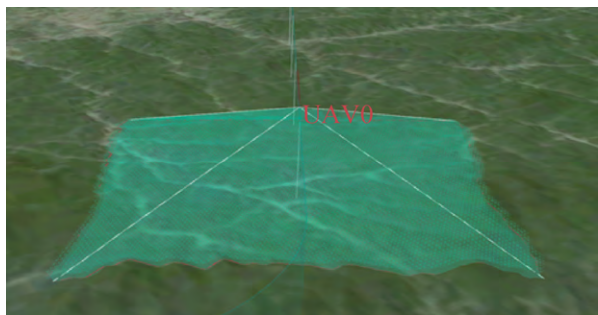


图 8 无人机侦照波束仿真图 2

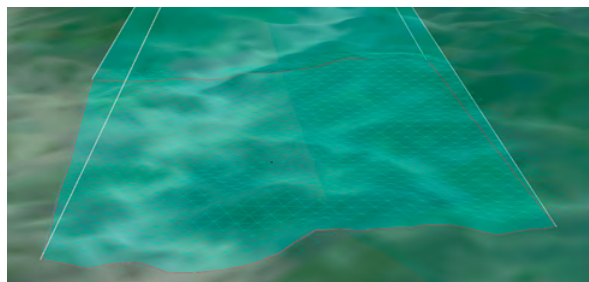


图 9 侦照波束与地形求交图

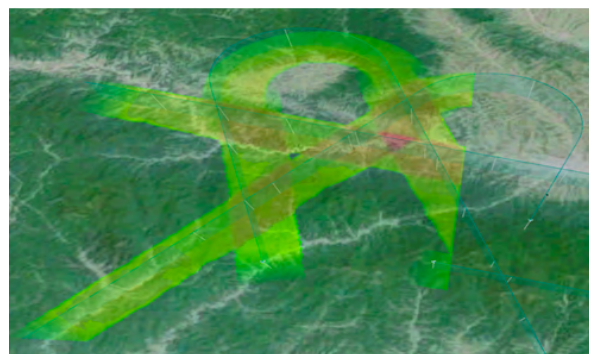


图 10 侦照时长色温图

图 6 所示为网格划分精度 $\Delta L=250\text{ m}$ ， $\Delta W=250\text{ m}$ 时的预处理地形网格结果。网格精度越高单个网格地形越精细，但网格个数也越多，占用内存也就越大，因此需要根据需求在精度和内存开销之间找到合适的平衡点。

图 7 和图 8 均为无人机侦照波束仿真结果图，其中图 7 参数 $\alpha=30^\circ$ ， $\beta=30^\circ$ ，图 8 参数 $\alpha=60^\circ$ ， $\beta=60^\circ$ 。

图 9 为仿真过程中侦照波束与三维地形求交局部图。图中波束锥体底面四周的点为硬件求交算法所得交点。三维地形上渲染的网格即为交点所包围地形网格。在仿真过程中根据无人机以及侦照载荷的位置和姿态更新侦照波束，同时交点及其所包围的地形网格也会相应更新。侦照范围内的网格各自记录被侦照时长以及与无人机的距离，以便后处理时进行统计分析。

扫描结束后可根据地形网格被扫描次数，时长以及与无人机最短距离分别得到各自的色温图。图 10 则是根据地形被无人机侦照探测的时长得出的色温图。地形网格根据侦照时长不同在红

黄绿三种颜色之间平滑变化, 侦照时间越长越接近红色, 侦照时间越短越接近绿色。图 10 中可直观地看出位于航线交会处的三维地形被侦照时间更长, 航线两边的地形被侦照时长相对更短。按扫描次数以及与无人机最短距离的色温图与按时长的色温图类似, 差别在于颜色分布不同, 此处不再赘述。

得益于基于 GPU 的硬件求交算法, 本系统可以同时支持多架次无人机协同路径规划仿真验证。多架次无人机协同路径规划验证仿真结果如图 11~12 所示, 无人机架数与仿真渲染帧率关系如表 1 所示。

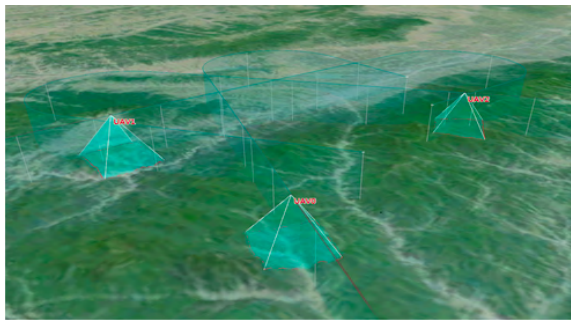


图 11 三架无人机协同侦照仿真

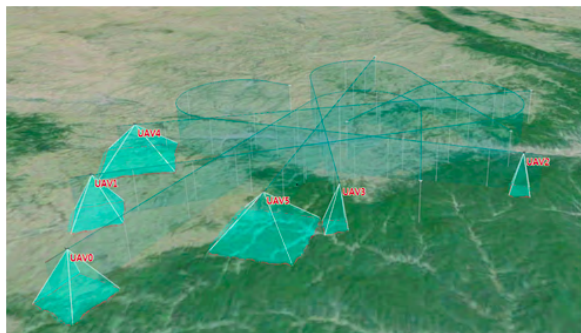


图 12 六架无人机协同侦照仿真

表 1 无人机仿真架次与渲染帧率关联表

架次	$\alpha/^\circ$	$\beta/^\circ$	$\Delta L/m$	$\Delta W/m$	fps
1	30	30	250	250	34
3	30	30	250	250	24
6	30	30	250	250	15

图 11 为三架无人机进行协同路径规划侦照探测仿真。图 12 所示则是六架无人机协同侦照探测

仿真。根据表 1 可以看出, 随着同时仿真的无人机架次的增加, 系统实时渲染的帧速率会相应下降。这是因为侦照波束锥体与地形求交过程中每增加一架无人机就会增加一部分求交的计算量, 从而降低渲染效率。从表 1 中可知即使同时协同仿真的无人机达到 6 架, 渲染的帧数率也能达到 15 fps, 能够基本满足实际应用的需求。

4 结论

本文在深入分析无人机协同路径规划结果仿真验证需求的基础上, 利用虚拟相机对无人机载荷侦照波束进行建模, 基于 GPU 实现波束和地形的快速求交。本文仿真平台能够同时支持多架无人机对目标区域进行协同侦照探测, 并对规划结果进行综合分析和可视化展示。这为传统无人机路径规划特别是多无人机协同路径规划提供了实用的可视化仿真验证平台。

参考文献:

- [1] 彭辉, 沈林成, 霍霄华. 多 UAV 协同区域覆盖搜索研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2472-2476.
- [2] 丁家如, 杜昌平, 赵耀, 等. 基于改进人工势场法的无人机路径规划算法 [J]. 计算机应用, 2016, 36(1): 287-290.
- [3] 魏潇龙, 姚登凯, 谷志鸣, 等. 基于分割法的无人机路径规划研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33(1): 90-94.
- [4] 杨遵, 雷虎民. 一种多无人机协同侦察航路规划算法仿真 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 433-436.
- [5] 章国林, 李平, 韩波, 等. 多雷达威胁环境下的无人机路径规划 [J]. 计算机工程, 2011, 37(4): 206-209.
- [6] 张艳, 高晓光, 魏小丰. 四维空间中的无人机动态路径规划及仿真 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(24): 7838-7841.
- [7] Frank D Luna, 段菲. DirectX9.0 3D 游戏开发编程基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [8] 李楠, 肖克炎. 一种改进的点多边形内外判断算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38(5): 30-34.
- [9] 刘泽坤, 昂海松, 罗东明. 基于 DirectX 的无人机实时飞行仿真系统开发 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 918-920.