

无人机动态路径规划可视化仿真系统研究

刘岱¹, 张旭², 张亚鸣², 王凯²

(1. 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300;

2. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: 针对现阶段无人机动态路径规划算法仿真可视性差和飞行环境仿真不足等问题, 提出了一种基于 Cesium 的无人机动态路径规划可视化仿真系统; 该系统在基于 B/S 架构基础上, 使用开源三维虚拟地球 Cesium 可视化引擎, 按照可视化系统的总体设计及流程, 利用坐标系转换方法与三维可视化技术, 构建了一个无人机在真实地理环境中动态路径规划可视化仿真系统, 实现了三维人工势场法路径规划的动态可视化仿真展示; 实验表明, 该系统不仅能够直观展示无人机在真实地理环境下的动态路径规划过程效果, 还能够为相关研究提供直观、全面的可视化分析和评估手段。

关键词: 无人机; 路径规划; Cesium; 可视化仿真; 人工势场法

Research on Visualization Simulation System for Dynamic Path Planning of UAVs

LIU Dai¹, ZHANG Xu², ZHANG Yaming², WANG Kai²

(1. College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In response to current shortcomings in the simulation visibility of unmanned aerial vehicle (UAV) dynamic path planning algorithms and inadequate flight environment simulations, a UAV dynamic path planning visualization simulation system based on Cesium is proposed. Based on B/S framework, this system utilizes the open-source 3D virtual globe Cesium visualization engine, achieves the overall design and workflow of the visualization system. The coordinate system conversion method and 3D visualization technology are used to construct the dynamic path planning visualization simulation system for UAV in real geographical environments. This system achieves the dynamic visualization simulation display of the three-dimensional artificial potential field path planning. Experiments show that this system not only intuitively presents the dynamic path planning process of UAV in real geographical environments, but also provides intuitive and comprehensive visual analysis and evaluation means for related research.

Keywords: UAV; path planning; cesium; visualization simulation; artificial potential field method

0 引言

近年来, 随着无人机技术的不断发展, 无人机在军事和民用领域应用越来越广泛^[1]。然而, 无人机在面对复杂飞行环境和任务需求时, 往往需要高效、安全、可靠的自主飞行控制系统和路径规划算法来提高飞行效率和安全性。因此, 路径规划作为无人机技术中的重要问题之一, 其在无人机的发展过程中具有至关重要的作用^[2-5]。

无人机的路径规划是指满足无人机能约束指标, 在当前特定的条件下, 寻找一条从起始位置到目标位置的最优或次优飞行轨迹, 它不仅能够保证飞行任务的圆满完成, 还能够尽可能地节约飞行时间和能耗^[6-8]。国内外众多学者对路径规划问题做了大量的研究, 提出了很多算法。当前的路径规划算法可以划分为静态路径规划和动态路径两大类: 1) 静态路径规划算法, 如 A-Star 算法、快速探索随

机树 (RRT, rapidly-exploring random trees) 算法、Dijkstra 算法、蚁群算法、遗传算法和粒子群算法 (PSO, particle swarm optimization) 等; 2) 动态路径规划算法, 如人工势场法、动态窗口法 (DWA, dynamic window approach) 算法、D* 算法。静态路径规划和动态路径规划相互补充, 可以为无人机提供更加完善和全面的路径保障^[9]。其中, 静态路径规划主要寻找一条从起点到目标点的最优路径来实现无人机的高效自主飞行。而动态路径规划则可以为无人机在不确定环境中提供自主路径规划并成功躲避潜在障碍物的能力, 具有更高的适应性和应变能力^[10]。目前, 在无人机路径规划领域的研究有很多, 研究者不断提出新的路径规划方法或者对以往算法改进与融合, 文献 [11] 针对 PSO 算法早期收敛速度快, 后期易陷入局部最优的缺点, 提出一种结合天牛须搜索 (BAS, beetle antennae search algorithm) 算法的改进粒子群算法, 并将其应用于无人机三

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2023-06-15。

作者简介: 刘岱 (1981-), 男, 硕士, 讲师。

通讯作者: 王凯 (1982-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 刘岱, 张旭, 张亚鸣, 等. 无人机动态路径规划可视化仿真系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 227-234, 241.

维空间路径规划。文献 [12] 针对低空突防中无人机飞行环境的复杂性, 综合考虑了飞行高度, 提出了一种用于三维空间路径规划的改进 A* 算法在目标空间中搜索一条两个航路点之间的最优航线航迹长度等权重因子。文献 [13] 针对传统人工势场法的障碍物附近目标不可达、存在局部极小点和振荡的问题对势场函数进行分析和改进, 以保证目标点为势场的全局最小点。文献 [14] 通过改进斥力函数引入动态斥力因子, 以解决人工势场法路径规划算法目标不可达问题。文献 [15] 通过改变斥力函数克服算法中目标不可达问题, 并加入动态步长的方法以解决局部震荡问题。文献 [16] 结合模糊算法计算出模糊输出力, 打破局部最小值处的二力平衡以解决局部最小陷阱问题。文献 [17] 利用概率论建立了一个势场模型, 并通过势场模型的解析式和概率密度函数求出势场的表达式, 以解决目标不可达问题。文献 [18] 通过设定启发式子目标点的方法解决局部最小陷阱问题。

尽管无人机路径规划算法的理论研究已经取得了重要进展, 但路径规划算法传统的图形仿真方式往往难以直观地呈现算法执行过程, 同时对飞行环境和障碍物的仿真也存在不足^[19]。通常把无人机简化为粒子在 Matlab 以曲线和图形模拟无人机路径规划, 这种方式存在仿真不够直观、飞行环境仿真不足等问题。然而, 随着 5G 技术和虚拟现实技术的不断快速发展, 基于三维可视化的仿真技术成为了新的研究热点^[20]。通过使用三维可视化技术, 可以直观形象地演示无人机路径规划的仿真过程, 同时可以更加真实地对复杂的飞行环境和障碍物建立仿真模型, 能够解决无人机路径规划算法仿真不够直观、可视性差的问题, 帮助科研人员更好地发现和解决路径规划过程中存在的问题, 可以为无人机技术的发展提供有力支持。

无人机路径规划可视化仿真越来越受研究人员的关注, 已经有部分的研究人员取得了一系列的研究成果。文献 [21] 针对无人机的航迹轨迹验证问题, 设计了一种基于 Vega Prime 的无人机航迹规划虚拟视景仿真系统。文献 [22] 基于 Unity3D 平台完成无人机战场环境的建模, 设计了无人机三维航迹规划的可视化仿真软件, 并在大地图场景下完成了路径规划算法的可视化仿真。文献 [23] 基于 ArcGIS Engine 设计无人机三维路径规划系统, 对三维路径规划以及避障后的路径规划结果进行了展示和验证。这些可视化仿真系统具有较好路径规划算法验证效果, 但是在研究中存在以下两个问题: 1) 缺乏在真实地理环境中无人机动态路径规划的可视化仿真研究; 2) 路径规划出航迹点数据结果不具备无人机真实飞行地理特征。

针对以上问题, 本文通过运用开源三维虚拟地球 Cesium 可视化引擎, 按照可视化系统的总体设计及流程, 构建了一个基于 B/S (Browser/Server) 架构的无人机在真实地理飞行环境中的动态路径规划可视化仿真系统。该系统利用坐标系转换方法、三维可视化技术等手段, 在真实地形下实现无人机路径规划, 并对路径模拟仿真飞行。此外,

在结合先进的地理信息技术下, 使得本文系统在保证可视化效果的同时, 还能易于获取精准的地理信息支持, 为无人机路径规划研究提供了强有力的支持, 对制定飞行方案, 验证算法合理性有着明确的指导意义。

1 系统架构设计

本文提出的无人机动态路径规划可视化仿真系统的总体设计方式为 B/S 架构, 具有跨平台、易部署等优点, 只需要安装浏览器, 无需安装特定软件即可实现在线访问。以统一规划、分层实施为原则, 本文系统整体架构自上到下分别为: Web 应用层、业务逻辑层、数据层 3 个层次。系统总体架构如图 1 所示。

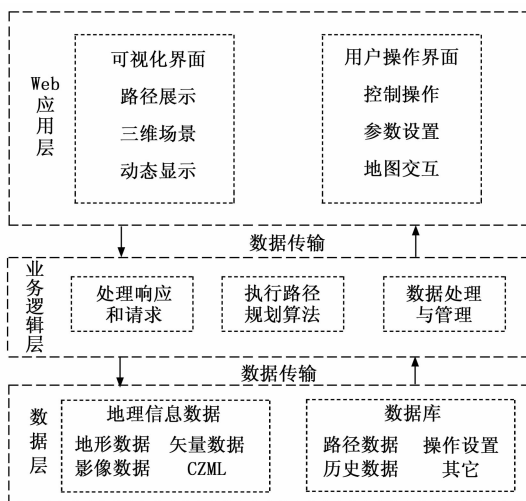


图 1 无人机动态路径规划可视化仿真系统架构

1.1 Web 应用层

Web 应用层主要负责实现可视化界面和用户操作界面功能。其中, 可视化界面承担可视化服务, 实现三维场景渲染, 规划路径可视化展示。用户操作界面提供了人机交互接口, 通过与业务逻辑层的 API 交互, 使用户能够方便地进行输入和发送控制指令等操作。Web 应用层的这两大功能模块的有机结合, 为系统提供了直观、灵活的操作平台, 使得用户能够全面而便捷地掌控飞行过程。

1.2 业务逻辑层

业务逻辑层主要执行无人机路径规划算法, 并生成相应的无人机飞行航迹坐标点, 同时负责处理用户的请求和操作、数据处理与管理、逻辑控制等多种业务逻辑工作。

1.3 数据层

数据层主要负责加载基础地理信息数据, 如地形数据、矢量数据、影像数据及 Cesium Language (CZML, Cesium Language) 格式的数据。同时, 数据层还利用数据库来存储系统运行所需的数据和进行数据处理, 数据库的应用能够提供数据的持久性存储, 确保系统数据的长期保存和可靠性。

2 系统具体设计

2.1 可视化界面设计

可视化界面基于 Cesium 可视化平台开发。Cesium 是一

个基于 WebGL 的用于显示三维地球的开源地图引擎, 可直接在浏览器页面上展示三维虚拟地球并叠加丰富的地理要素。因此, 本文系统采用主流编程语言和开源技术, 采用 Visual Studio Code 编辑器, 运用 HTML、JavaScript 语言调用 Cesium 提供的二次开发接口进行功能开发。

2.1.1 加载地形可视化

本文系统加载全球数字高程模型 (DEM, digital elevation model) 方式简单易操作, 相比较文献 [22], 使用 Unity3D 搭建可视化仿真系统, 需要利用 GoodyGIS、Surfer 等软件, 完成高程数据的三维地形构建, 简化了系统设计过程。且只需改变无人机飞行起始点、目标点及规划空间范围, 即可轻松实现不同地理场景下的可视化仿真。

在本文系统设计中使用 Cesium 提供的 TerrainProvider, 指定 DEM 数据的 URL 地址和相关配置, 通过创建 Cesium Viewer 对象和 TerrainProvider 对象, 将 DEM 数据加载到 Cesium 中, 并在 3D 视图中显示地球的真实地形。其中, TerrainProvider 负责加载和提供地形数据, 而 Viewer 则负责呈现和交互操作, 通过将 TerrainProvider 设置为 Viewer 的地形提供者, 可以实现 DEM 地形的加载和展示。

2.1.2 障碍物威胁模型

无人机实际飞行中, 规划空间中都或多或少分布着障碍物威胁, 且数量、位置、威胁范围都可能变化, 因此障碍物威胁模型的建立, 对无人机的飞行安全至关重要。本文系统可视化仿中, 考虑雷达威胁模型和恶劣天气威胁模型为主要障碍物, 视为无人机路径规划算法需要避障的对象。

本文系统雷达威胁模型当作球体处理, 模型表达式为:

$$(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 + (z - z_a)^2 = r_a^2 \quad (1)$$

式中, (x_a, y_a, z_a) 为雷达威胁模型中心点坐标, (x, y, z) 为模型边缘点坐标, r_a 为模型半径。

恶劣天气威胁模型化为圆柱体处理, 模型表达式为:

$$(x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 = r_b^2, z - z_b < h_b \quad (2)$$

式中, (x_b, y_b, z_b) 为恶劣天气威胁模型底面圆心坐标, (x, y, z) 为模型边缘点坐标, h_b 为模型的高, r_b 为模型半径。

可视化界面中障碍物威胁模型实体的添加, 使用了 Cesium.js 库中的一些功能和 viewer.entities.add 方法创建三维模型, 利用 ellipsoid 属性用于定义模型的相关属性, 包括半径、材质和边框, 并在地图上渲染出来。图 2 为雷达威胁模型, 图 3 为恶劣天气威胁模型。

2.1.3 数据 CZML 格式化

航迹点数据 CZML 格式化, 为本文系统提供了一种功能强大的方式, 在时间维度上呈现无人机实体随航迹点动态变化的过程。同时在此特定数据格式的基础上可以设置 trackedEntity 属性, 使相机跟随、聚焦或在视图中定位到无人机实体, 以便更好地查看或监视该实体的位置或状态。系统航迹点数据 CZML 格式化数据如图 4 所示, 这种描述方式的优势在于提供了丰富的时间维度和地理信息, 并能够以动态、交互式的方式展示无人机的规划路径和状

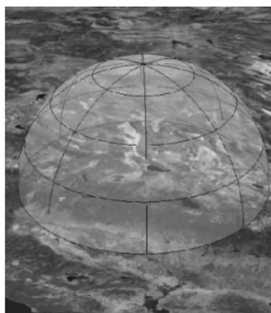


图 2 雷达威胁模型

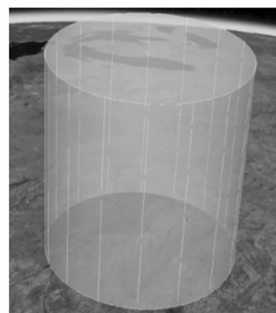


图 3 恶劣天气威胁模型

态, 帮助用户更直观、清晰地理解和分析无人机在不同时间段内的路径模拟仿真飞行情况, 增加了可视化仿真动态效果。

```
(5164) [0, 113.2000551102462, 35.590000015985765, 0.23369776820210988, 0.5, 113.20011022048409, 35.590000031952144, 0.4673997089955109, 1, 113.2001653307223, 35.590000047898236, 0.7011012760632204, 1.5, 113.20022044095215, 35.59000006381425, 0.934809853372232, 2, 113.200275551178, 35.5900000797506, 1.16852235767353, 2.5, 113.20033066139983, 35.59000009569333, 1.40223814350946, 3, 113.20038577161765, 35.59000011140375, 1.63595844046871, 3.5, 113.20044088183145, 35.59000012721896, 1.869682643962226, 4, 113.20049599204559, 35.590000143013796, 2.1034100065475934, 4.5, 113.20055110225137, 35.59000015877857, 2.337142023608402, 5, 113.20060621245314, 35.590000174510855, 2.5708773647105754, 5.5, 113.20066132265089, 35.59000019022528, 2.8046171954844246, 6, 113.20071643284464, 35.59000020591449, 3.0383609314969946, 6.5, 113.20077154303871, 35.59000022158332, 3.2721078270983237, 7, 113.20082665322441, 35.59000023722212, 3.505859376518318, 7.5, 113.20088176340612, 35.5900002528284, 3.739614251140435, 8, 113.2009368735838, 35.590000268416816, 3.9733736147402663, 8.5, 113.20099198375748, 35.590000283980025, 4.207136884006064, 9, 113.20104709392713, 35.590000299518024, 4.440904061213167, 9.5, 113.20110220409714, 35.59000031503567, 4.674674397198586, 10, 113.20115731425877, 35.59000033051594, 4.9084488043096695, 10.5, 113.20121242441637, 35.59000034597835, 5.142227701591499, 11, 113.20126753457, 35.59000036141555, 5.37601050285086, 3, 11.5, 113.20132264471957, 35.59000037682757, 5.609797212931236, 12, 113.2013775486515, 35.59000039221438, 5.84358782983194, ...]
▼ [0, 99]
0: 0
1: 113.2000551102462
2: 35.590000015985765
3: 0.23369776820210988
4: 0.5
5: 113.20011022048409
6: 35.590000031952144
7: 0.4673997089955109
8: 1
9: 113.2001653307223
10: 35.590000047898236
11: 0.7011012760632204
```

图 4 航迹点 CZML 格式划数据

2.2 用户操作界面

用户操作界面是系统的控制操作部分, 为用户提供交互界面, 通过输入框获取用户输入信息并通过按钮触发系统请求操作。用户可在此界面设置各项可视化操作, 包括输入相关参数信息和发起系统所需请求, 实现对系统功能的灵活控制。用户操作界面功能如图 5 所示, 主要包括: 设置无人机起始点和目标点, 设置路径规划规划空间、算法相关参数, 以及添加障碍物威胁信息设置和动态添加新威胁。系统通过交互方式, 使得用户能够轻松地进行路径规划可视化仿真参数的配置, 极大地提高了系统的可操作性和用户体验。

2.3 业务逻辑层设计

2.3.1 路径规划算法

本文利用三维人工势场法路径规划算法对系统进行可视化仿真验证, 以下是简单的算法介绍和在业务逻辑层中具体实现方式:

三维人工势场法路径规划算法思想是对目标点与障碍物分别建立引力与斥力势场, 其中目标点对物体产生引力

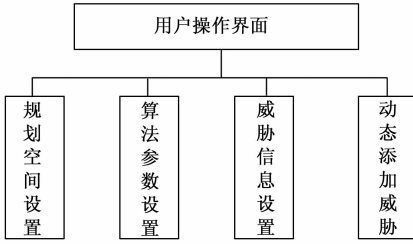


图 5 用户操作界面功能

引导物体朝向其运动，障碍物对物体产生斥力避免物体与之发生碰撞，可能会存在多个斥力同时作用，综合引力与斥力对无人机的作用，由起点到生成一条安全无威胁的路径，最终到达目标点。

本文将势场定义在三维空间 $O-xyz$ 内，假设当前无人机坐标为 $X = (x, y, z)^T$ ，目标点坐标为 $X_g = (x_g, y_g, z_g)^T$ ，引力势场函数 $U_{att}(X)$ 和斥力势场函数 $U_{rep}(X)$ 可以分别表示如下：

$$U_{att}(X) = \frac{1}{2}k\rho^2(X, X_g) \quad (3)$$

式中，引力场 $U_{att}(X)$ 由目标点产生； $\rho(X, X_g) = \|X_g - X\|$ ，表示无人机到目标点的欧式距离，距离越远则引力场越大， k 为引力场系数。

$$U_{rep}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{\rho_i(X, X_0)} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2 & \rho_i(X, X_0) \leq \rho_0 \\ 0 & \rho_i(X, X_0) > \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中，斥力场 $U_{rep}(X)$ 由障碍物决定， $\rho_i(X, X_0)$ 为无人机与第 i 个障碍物之间的距离， ρ_0 为障碍物对无人机产生的影响的最大距离，当无人机到障碍物的距离大于设定的安全距离时候，斥力场为 0，对无人机不产生影响；当无人机到障碍物的距离小于设定的安全距离的时候，障碍物将产生斥力场，并且会随着越接近障碍物 $\rho_i(X, X_0)$ 越小，斥力场影响会越大； η 为斥力场系数。

无人机所受到的引力 $F_{att}(X)$ 和斥力 $F_{rep}(X)$ 分别为：

$$F_{att}(X) = -\nabla[U_{att}(X)] = -k(X, X_g) \quad (5)$$

$$F_{rep}(X) = -\nabla[U_{rep}(X)] =$$

$$\begin{cases} \eta\left(\frac{1}{\rho_i(X, X_0)} - \frac{1}{\rho_0}\right) \frac{1}{\rho_i^2(X, X_0)} & \rho_i(X, X_0) \leq \rho_0 \\ 0 & \rho_i(X, X_0) > \rho_0 \end{cases} \quad (6)$$

无人机所受 N 个障碍物产生斥力的合力为：

$$F_{rep}(X) = \sum_{i=1}^N F_{rep}(X) \quad (7)$$

则无人机所合势场及受合力为 $U_{total}(X)$ 、 $F_{total}(X)$ ：

$$U_{total}(X) = U_{att}(X) + U_{rep}(X) \quad (8)$$

$$F_{total}(X) = F_{att}(X) + F_{rep}(X) \quad (9)$$

业务逻辑层中实现三维人工势场法路径规划算法具体步骤如下：

1) 定义势场函数：为目标点和每个障碍物定义势场函数。目标点的引力场函数可以表示为引力势能，而障碍物

的斥力场函数则表示为斥力势能。

2) 计算合势场及合力：在无人机位置 $X = (x, y, z)^T$ 处，计算目标点 $X_g = (x_g, y_g, z_g)^T$ 和障碍物对无人机的合势能 $U_{total}(X)$ 及合力 $F_{total}(X)$ 。

3) 计算下一个位置：利用合力 $F_{total}(X)$ 和设定的步长 $step$ ，更新无人机的下一个位置。可以将更新公式表示为：

$$q_{new} = q_{old} + step \cdot F_{total}(X) \quad (10)$$

其中： q_{old} 为当无人机前时刻位置， q_{new} 为无人机下一时刻位置。

4) 检查碰撞及更新：检查无人机的新位置 q_{new} ，是否与障碍物发生碰撞。如果存在碰撞，则需要对无人机位置进行修正，使其远离障碍物。

5) 循环迭代：重复上述步骤，直至无人机到达目标点 $X_g = (x_g, y_g, z_g)^T$ 或达到终止条件为止。

2.3.2 动态路径规划设计

无人机动态路径规划是根据实时环境信息和飞行需求，通过调整无人机飞行路径，以提高无人机飞行效率并确保飞行安全的过程。该过程基于实时感知到的环境信息，不断对无人机飞行路径进行动态调整和优化。如图 6 所示展示了无人机动态路径规划的流程，这种实时的动态路径规划策略为无人机飞行提供了可靠的保障，使得无人机能够在复杂多变的环境中高效、安全地执行飞行任务。

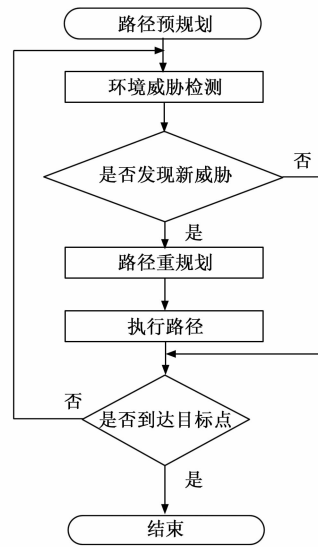


图 6 无人机动态路径规划过程

本文系统在无人机预规划路径模拟仿真飞行过程中，通过在指定位置添加新障碍物威胁，观察无人机路径规划算法对动态添加的障碍物威胁的避障能力，以展示系统动态路径规划可视化仿真效果。如图 7 所示，首先，先进行路径预规划，预规划航迹点以 CZML 的格式进行加载到可视化界面；然后，进行预规划路径模拟仿真飞行；其次，当有新障碍物威胁添加时候，系统利用 position 属性获取提取无人机当前经度、纬度和高度位置信息，进一步处理后作为重归化起始点，并获取新障碍物威胁信息数据；最后，

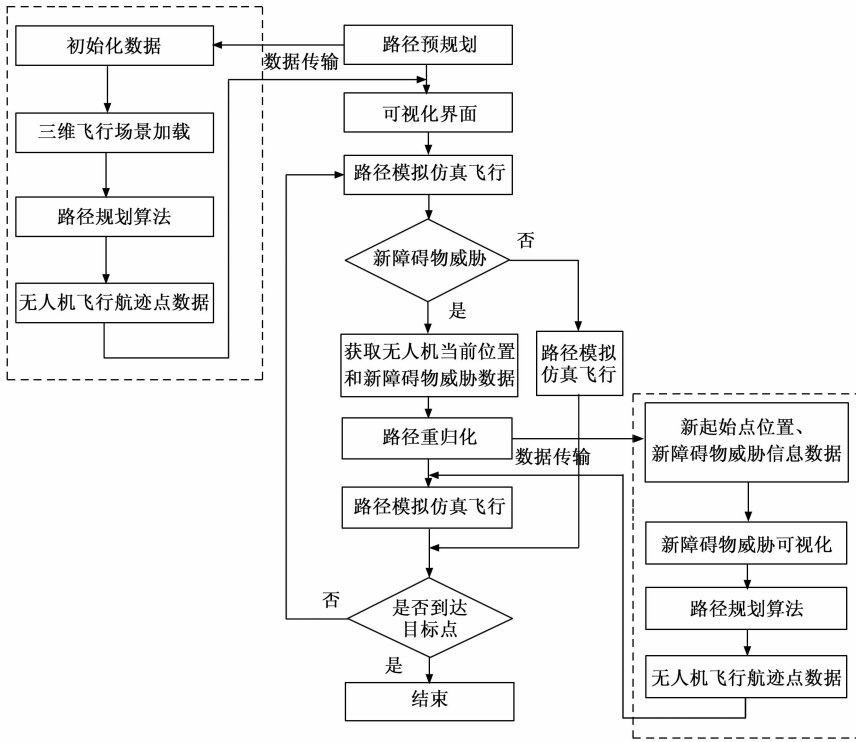


图 7 动态路径规划可视化仿真

执行路径重归化算法, 生成新的路径航迹点数据, 进行三维可视化仿真。

3 关键技术

3.1 坐标系转换

坐标系转换是无人机路径规划生成航迹点数据具备真实飞行地理特征的重要方法。本文系统在用户操作界面输入的飞行坐标数据及障碍物坐标数据都是经纬度、高度数据形式, 这些数据是 WGS84 经纬度坐标系下的地理位置坐标数据, 无法作为初始化数据进行路径规划算法。而在业务逻辑层中为了生成航迹点数据贴近真实无人机飞行数据, 执行路径规划算法依赖于在以地球质心为圆点的笛卡尔空间直角坐标系中实现。因此, 无人机飞行相关数据在处理过程中, 需要实现数据在 WGS84 经纬度坐标系与笛卡尔空间直角坐标系之间的转换, 如经纬度坐标 (113.200, 35.590, 0) 转换为笛卡尔空间直角坐标后为 (-2 045 585.195, 4 772 707.845, 3 691 292.814), 具体的转换方法如下:

假设 WGS84 经纬度坐标系点 P 为 (L, B, H) , 笛卡尔空间直角坐标系为点 (X, Y, Z) , 如图 8 所示, 则可以使用以下公式:

$$\begin{cases} X = (N + H) \cos(B) \cos(L) \\ Y = (N + H) \cos(B) \sin(L) \\ Z = (N(1 - e^2) + H) \sin(B) \end{cases} \quad (11)$$

N, e 计算方式如下:

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2(B) + b^2 \sin^2(B)}} \quad (12)$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (13)$$

其中: a 为地球赤道半径, b 为地球极半径, N 为地球的曲率半径, e 为地球的第一偏心率。

本文系统实现中利用 Cartesian3.fromDegrees 方法将经纬度和高度信息转换为笛卡尔空间直角坐标系中的点。同时, 将笛卡尔空间直角坐标系坐标转换回 WGS84 经纬度坐标, 可以使用 Cartographic.fromCartesian 方法。

3.2 数据加载与处理

在获取大量 DEM 数据坐标点数据进行路径规划算法时, 会面临着网络请求、大数据处理等耗时任务, 导致浏览器无法获取所需的资源。为了优化数据的获取和处理过程, 本文系统使用 Promise 和 async/await 来异步加载和处理 DEM 数据, 如图 9 所示, 根据路径规划算法需求将数据分成批次进行加载, 这种方法可以减少一次性加载大量数据所带来的资源负担。这种方式使得可视化效果能够更快地呈现给用户, 大大减少了用户等待的时间, 极大地提升了用户体验。异步加载和处理的机制为数据的获取和处理提供了更高效、更流畅的解决方案, 是本文中数据处理流程的重要优化策略之一。

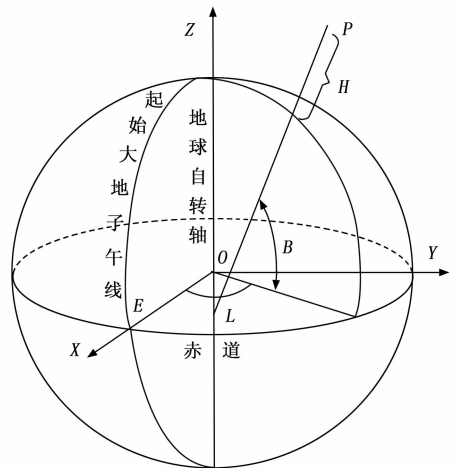


图 8 不同坐标系下的坐标点

4 实验仿真

根据上述设计, 本文系统实验仿真的配置如下: 处理器 Intel (R) Core (TM) i5-7300HQ、显卡 NVIDIA GeForce GTX1050、内存 DDR12G、Windows10 操作系统完成系统的指令发送、三维虚拟地理数据加载、路径规划算法执行、可视化仿真等功能。

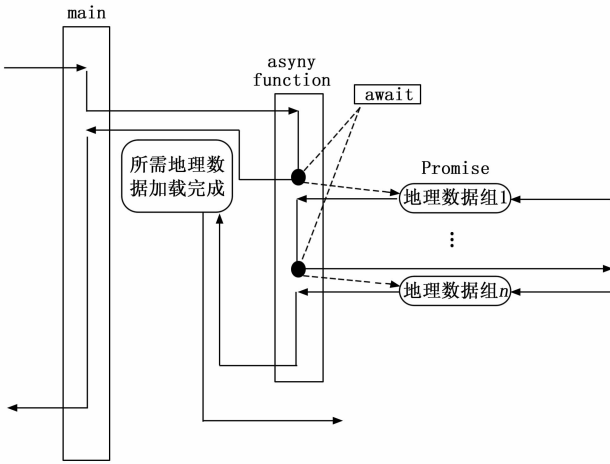


图 9 数据加载与处理过程

4.1 动态路径规划可视化

经过 Web 应用层设计、系统架构开发和前后端接口联调，系统已经能够平稳运行，且与文献 [23] 可视化系统相比较，具备了较好的动态路径规划可视化效果。

实验选择三维人工势场法路径规划算法对本文系统动态路径规划可视化仿真验证，算法的各项参数取值及障碍物威胁信息如表 1 所示。

表 1 算法各项参数及障碍物威胁信息

| 参数 | 配置 |
|-----------|-----------------------------|
| 起始坐标点 | (113.200,35.590,0) |
| 目标坐标点 | (113.270,35.590,300) |
| 步长 | 5 m |
| 引力系数 | 13 |
| 斥力系数 | 25 |
| 雷达 1 | (113.214,35.595,0)、半径 300 m |
| 雷达 2 | (113.222,35.585,0)、半径 300 m |
| 雷达 3 | (113.232,35.593,0)、半径 300 m |
| 恶劣天气 | 半径 300 m、高 800 m |
| 障碍物威胁影响范围 | 200 m |

在可视化界面，使用者无需安装特定软件，通过浏览器即可进行在线的可视化仿真，试验前在用户操作界面设置仿真是否需要加入动态障碍物，以分别适应需要静态和动态的路径规划可视化仿真环境。

本文系统动态路径规划可视化仿真实验过程为：

1) 先进行路径预规划，如图 10 所示，为三维视角下的预规划路径仿真，虚线显示为预规划路径，预规划空间中添加 3 个雷达障碍物威胁，左下为起点，右上为终点。

2) 无人机实体对预规划路径模拟仿真飞行，在飞行到 (113.230, 35.580, 389) 位置时刻，在 (113.240, 35.590, 0) 位置添加恶劣天气障碍物威胁模型，系统会重归化路径生成新的航迹点数据，如图 11、12 所示。其中图 11 为三维视角下的添加恶劣天气威胁重规划路径仿真，图 12 为正俯视角下添加恶劣天气威胁重规划路径仿真，左下为起点，

右上为终点，图中对重归化路径进行了标识。

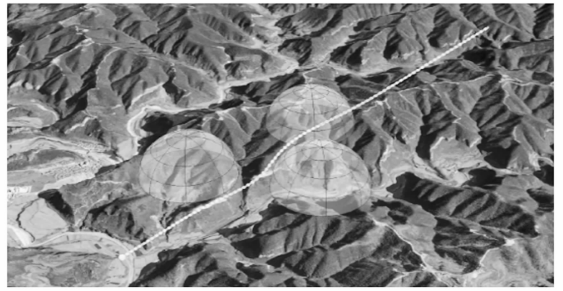


图 10 三维视角下预规划路径

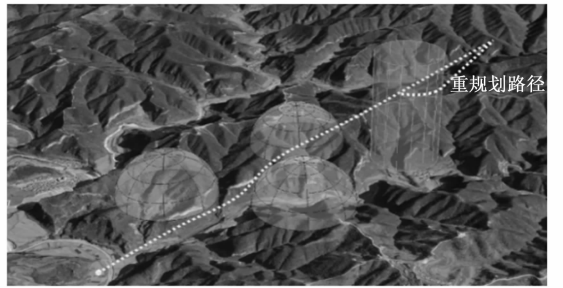


图 11 三维视角下添加恶劣天气威胁重规划路径

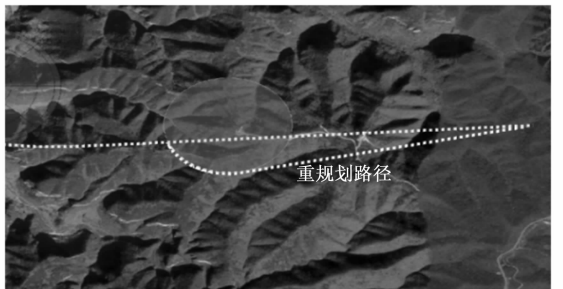


图 12 正俯视角下添加恶劣天气威胁重规划路径

通过实验表明，本文研究的无人机动态路径规划可视化仿真系统具备较为完善的系统功能和出色的可视化效果，直观的展示出算法能够有效地绕开动态添加的恶劣天气威胁模型，避障路线具有很好的可视化效果，实现了动态路径规划的可视化仿真展示。

另外，本文系统对航迹点数据与时间维度相关联、相机配置追踪无人机实体属性设计，有效地提升了系统的动态路径模拟仿真飞行可视化效果。本文系统中航迹点数据通过 CZML 格式化加载，使得路径可以根据时间进行动态更新和显示。可视化效果如图 13、14、15 所示，由图可以观察无人机刚起飞、飞行中、即将到达终点 3 种不同时刻下的无人机跟随航迹点飞行情况。

4.2 不同参数路径规划可视化

为验证本文系统的准确性和敏感性，对三维人工势场法路径规划算法不同参数下的可视化仿真结果进行实验分析。图 16、图 17 分别展示了在观察点 1 下，三维人工势场法路径规划算法中设置障碍物威胁影响距离为 200、400 m 时的可视化仿真效果，而图 18、19 展示了在观察点 2 下，障碍物威胁影响距离为 200、400 m 时的可视化仿真效果。

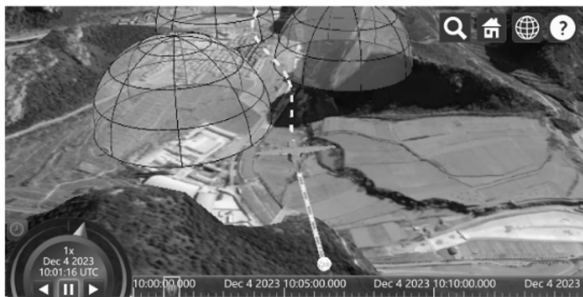


图 13 观察时刻 1 路径模拟仿真飞行可视化

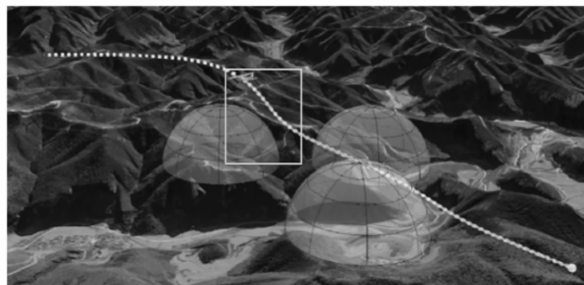


图 17 观察点 1 下雷达威胁影响距离为 400 m 路径

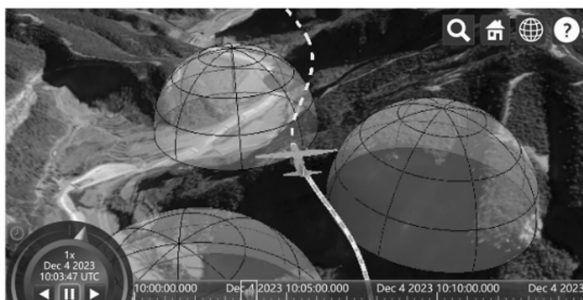


图 14 观察时刻 2 路径模拟仿真飞行可视化

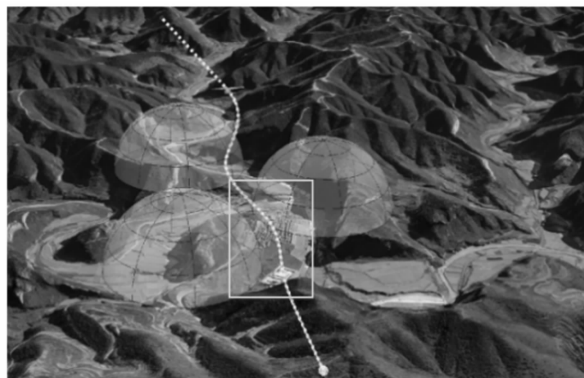


图 18 观察点 2 下雷达威胁影响距离为 200 m 路径



图 15 观察时刻 3 路径模拟仿真飞行可视化

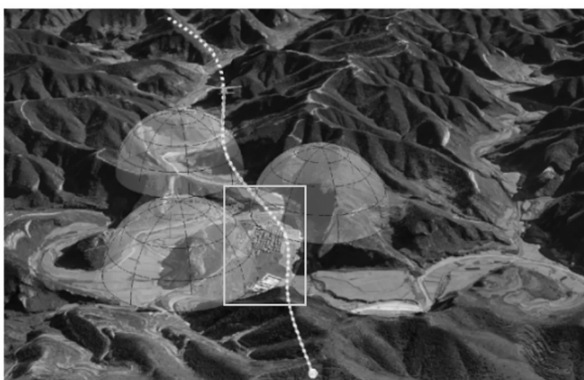


图 19 观察点 2 下雷达威胁影响距离为 400 m 路径

通过对比系统可视化仿真实验结果, 在不同观察点下的矩形标记框中, 可以直观看设置障碍物影响距离为 400 m, 相比较设置为 200 m 时, 无人机避障雷达威胁距离更大, 在算法中设置障碍物威胁影响范围距离越大, 无人机飞行路径躲避雷达威胁距离越远。

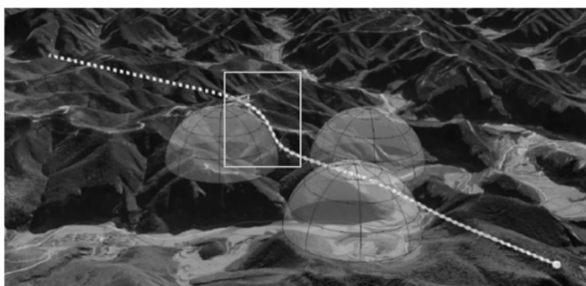


图 16 观察点 1 下雷达威胁影响距离为 200 m 路径

同时, 在本文系统中对雷达障碍物威胁范围进行不同大小设置, 进行多次实验, 分析路径规划结果, 如表 2 所

示。通过实验表明, 在本实验中当无人机受到障碍物威胁影响时, 设置障碍物威胁范围距离越大, 路径节点个数越多, 无人机飞行路径越长, 实验结果与可视化效果相一致。

表 2 不同障碍物威胁范围下路径规划结果

| 实验 | 威胁范围/m | 路径长度/m | 节点数量/个 | 受到影响 |
|----|--------|--------|--------|------|
| 1 | 50 | 6 370 | 1 277 | 否 |
| 2 | 100 | 6 370 | 1 277 | 否 |
| 3 | 150 | 6 380 | 1 278 | 是 |
| 4 | 200 | 6 390 | 1 280 | 是 |
| 5 | 250 | 6 405 | 1 283 | 是 |
| 6 | 300 | 6 445 | 1 291 | 是 |
| 7 | 250 | 6 510 | 1 304 | 是 |
| 8 | 400 | 6 590 | 1 320 | 是 |

本文系统成功展示了不同参数设置下路径规划算法的效果,呈现出更加真实、直观的路径规划结果。路径规划算法参数的不同设置对于路径规划结果的影响不同,障碍物威胁范围影响的变化会直接影响无人机飞行路径的规划效果。通过三维可视化场景的展示,用户可以直观地了解不同参数配置对路径规划结果的影响,为真实无人机实地飞行实验的参数选择提供了重要参考。这一研究成果为进一步优化路径规划算法和参数配置提供了重要的实验依据和参考数据,具有重要的理论和实践意义。

4.3 不同场景路径规划可视化

本文系统加载全球 DEM 数据,相比较传统可视化仿真系统更具有方便选取规划空间的优点。实验通过改变无人机飞行起始点和终点,选择某低空山地高程落差较大的山地规划空间,其中,起始点为 (112.990, 34.450, 0), 目标点为 (112.990, 34.450, 500), 规划效果如图 20、21 所示,图 20 为无人机三维视角下路径规划仿真,图 21 为正俯视角下无人机路径规划仿真,仿真环境中添加了 1 个雷达障碍物威胁模型,虚线为规划路径,右下为起点,左上为终点。



图 20 无人机三维视角下路径规划



图 21 正俯视角下无人机路径规划

可视化仿真实验结果显示,本文系统应用在低空情况下无人机路径规划有较好的可视化仿真效果,可用于指导无人机低空飞行。

5 结束语

路径规划算法测试是一项成本高昂、繁琐耗时的工作,且当前阶段无人机动态路径规划算法仿真不够直观、可视性差。面对上述问题,本文提出无人机动态路径规划可视化仿真系统,采用了 B/S 前后端分离的架构模式,并在利用坐标转换方法和三维可视化仿真技术的基础上,实现了在真实地理环境中的无人机路径规划算法动态可视化仿真。

通过本文系统,用户可以直观地了解无人机的路径规划效果,对路径进行动态模拟仿真飞行,避免无人机相关算法在开发、测试和迭代时频繁且复杂的真机测试,将这些工作转移到可视化仿真环境,并且有效实现算法从仿真环境移植到真实环境中时尽可能少的改动,以满足成本控制等需求。本文系统取得了一定的研究成果,不足之处在于对障碍物威胁模型和无人机自身约束条件考虑的不够全面,以及未实现无人机集群路径规划的可视化仿真。

参考文献:

- [1] 陈麒杰, 晋玉强, 韩露. 无人机路径规划算法研究综述 [J]. 飞航导弹, 2020 (5): 54-58.
- [2] 刘玄冰, 周绍磊, 肖支才, 等. 无人机避障方法研究综述 [J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43 (5): 40-47.
- [3] 张宏宏, 甘旭升, 毛亿, 等. 无人机避障算法综述 [J]. 航空兵器, 2021, 28 (5): 53-63.
- [4] AHMED F, MOHANTA J C, KESHARI A, et al. Recent advances in unmanned aerial vehicles; a review [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47 (7): 7963-7984.
- [5] LIU Q, HOU P L, WANG G J. Intelligent route planning on large road networks with efficiency and privacy [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2019 (133): 93-106.
- [6] YU Z, SUN F, LU X, et al. Overview of research on 3d path planning methods for rotor UAV [C] //2021 International Conference on Electronics, Circuits and Information Engineering (ECIE). IEEE, 2021: 368-371.
- [7] 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.
- [8] 黄书召, 田军委, 乔路, 等. 基于改进遗传算法的无人机路径规划 [J]. 计算机应用, 2021, 41 (2): 390-397.
- [9] 全权, 李刚, 柏艺琴, 等. 低空无人机交通管理概览与建议 [J]. 航空学报, 2020, 41 (1): 6-34.
- [10] 王翼虎, 王思明. 基于改进粒子群算法的无人机路径规划 [J]. 计算机工程与科学, 2020, 42 (9): 1690-1696.
- [11] 付兴武, 胡洋. 基于改进粒子群算法的三维路径规划 [J]. 电光与控制, 2021, 28 (3): 86-89.
- [12] 马云红, 张恒, 齐乐融, 等. 基于改进 A* 算法的三维无人机路径规划 [J]. 电光与控制, 2019, 26 (10): 22-25.
- [13] 湛海云, 陈华胄, 刘强. 基于改进人工势场法的多无人机三维编队路径规划 [J]. 系统仿真学报, 2020, 32 (3): 414-420.

(下转第 241 页)