

11-25-2022

Multi-UAV Trajectory Planning Based on Adaptive Segmented Potential Field Method

Guangjian Tian

School of Information Engineering, Nanchang Hang Kong University, Nanchang 330063, China;
2652433103@qq.com

Jiyang Dai

School of Information Engineering, Nanchang Hang Kong University, Nanchang 330063, China;
djiyang@163.com

Jin Ying

School of Information Engineering, Nanchang Hang Kong University, Nanchang 330063, China;

Ning Wang

School of Information Engineering, Nanchang Hang Kong University, Nanchang 330063, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multi-UAV Trajectory Planning Based on Adaptive Segmented Potential Field Method

Abstract

Abstract: To solve the problems that the traditional artificial potential field method is prone to fall into the local extreme value, target unreachability and excessive curvature of the planned trajectory curvature in the application of UAV trajectory planning, *on the basis of the layered potential field method, a method of adding a second local attractive field at the target point and an attractive set composed of the target attractive field is proposed. This method overcomes the defects of unreachable targets and easy falling into local extremes. In addition, a piecewise function is introduced into the original layered potential field method, which improves the efficiency of trajectory planning and shortens the length of the trajectory.* The simulation compares the traditional artificial potential field algorithm, comparison algorithm one, comparison algorithm two, the potential field algorithm based on the additional attractive field and the compound attractive field proposed in this paper, and the adaptive segmented potential field algorithm. The results show that the adaptive segmented potential field algorithm has better effectiveness and strong robustness.

Keywords

artificial potential field, trajectory planning, multi-UAV, compound attractive field, additional attractive field

Recommended Citation

Guangjian Tian, Jiyang Dai, Jin Ying, Ning Wang. Multi-UAV Trajectory Planning Based on Adaptive Segmented Potential Field Method[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(11): 2368-2376.

基于自适应分段势场法的多无人机航迹规划

田广键, 代冀阳*, 应进, 王宁

(南昌航空大学 信息工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要: 为解决传统人工势场法在无人机进行航迹规划应用中易陷入局部极值、目标不可达与规划航迹曲率过大等问题, 在分层势场法基础上提出了目标点处附加的第二局部引力场和由目标引力场组成的引力集合的方法。该方法克服了目标不可达和易陷入局部极值的缺陷, 且在原有分层势场法中引入分段函数, 提高了航迹规划效率, 缩短了航迹长度。仿真对比了传统人工势场算法、对比算法一、对比算法二、本文提出的基于附加引力场和复合引力场的势场算法以及自适应分段势场算法。结果表明: 自适应分段势场算法具有较好的有效性和较强的鲁棒性。

关键词: 人工势场; 航迹规划; 多无人机; 复合引力场; 附加引力场

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2022) 11-2368-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0538

Multi-UAV Trajectory Planning Based on Adaptive Segmented Potential Field Method

Tian Guangjian, Dai Jiyang*, Ying Jin, Wang Ning

(School of Information Engineering, Nanchang Hang Kong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: To solve the problems that the traditional artificial potential field method is prone to fall into the local extreme value, target unreachability and excessive curvature of the planned trajectory curvature in the application of UAV trajectory planning, on the basis of the layered potential field method, a method of adding a second local attractive field at the target point and an attractive set composed of the target attractive field is proposed. This method overcomes the defects of unreachable targets and easy falling into local extremes. In addition, a piecewise function is introduced into the original layered potential field method, which improves the efficiency of trajectory planning and shortens the length of the trajectory. The simulation compares the traditional artificial potential field algorithm, comparison algorithm one, comparison algorithm two, the potential field algorithm based on the additional attractive field and the compound attractive field proposed in this paper, and the adaptive segmented potential field algorithm. The results show that the adaptive segmented potential field algorithm has better effectiveness and strong robustness.

Keywords: artificial potential field; trajectory planning; multi-UAV; compound attractive field; additional attractive field

引言

无人机航迹规划问题被广泛关注, 近年来国内外学者在路径规划方面取得了大量研究成果。文献

[1]将船舶 4 种风险函数结合 A*算法的代价函数实现了船舶的路径规划实验。文献[2]提出了一种新的快速探索随机树 RRT*N (rapidly-exploring random trees)方法并应用到路径规划中, 该方法通过在节

收稿日期: 2021-06-09 修回日期: 2021-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61663032)

第一作者: 田广键(1992-), 男, 硕士生, 研究方向为智能控制技术。E-mail: 2652433103@qq.com

通讯作者: 代冀阳(1966-), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为鲁棒控制理论及应用、飞行器控制等。E-mail: djiyang@163.com

点的邻居范围生成呈现正态分布特点的新节点, 避免了 RRT* 算法节点生成的全局随机性, 有效引导智能体快速到达目标点。运用到无人机航迹规划的算法还有狼群搜索算法、遗传算法、神经网络算法、PSO (particle swarm optimization) 算法^[3-7]等方法间交叉融合的智能算法。其中, 人工势场算法与其他算法相比具有规划速度快和实时性好的特点, 但是, 传统人工势场算法在进行航迹规划时存在易陷入局部极值和目标不可达的缺点。

针对传统人工势场法存在易陷入局部极值和目标不可达的缺点, 国内外学者为此做出了大量针对性的研究。文献[8]中采用人工势法和 A* 算法结合的混合算法处理智能体路径规划问题, 该文献在改进传统人工势场法时, 采用目标子集方法, 即当检测到智能体陷入到局部最优情况时, 用下一个目标的引力引导智能体脱离局部极值。文献[9]提出了一种正六边形的方法, 有效解决了传统人工势场易陷入局部极值问题。虽然该方法在单智能体的路径规划中表现较好, 但是未能在多智能体的路径规划中应用。文献[10]在世界坐标系下通过改进势场模型、添加动态排斥因子实现了单个无人机局部避障和动态目标追踪实验。

本文进一步改进了传统人工势场法。针对目标不可达问题提出了附加引力场的方法, 针对局部极值问题提出了复合引力场的方法, 同时对原有的分层势场法做了进一步改进, 在分层势场法中加入分段函数, 既保留了分层势场法的优点, 同时有效的缩短了航迹规划时间, 改进后的自适应分段势场算法具有规划航迹平滑、规划效率较高和规划航程短的优点。

1 建模

为了便于分析无人机在仿真环境中的受力和运动情况, 将无人机视为环境中的一个质点。以质心运动学方程描述无人机位置和速度的关系^[11]。质心运动学方程可表示为

$$\begin{cases} m_a \frac{dv}{dt} = P \cos(\alpha_a + \phi_p) \cos \beta_a - R - mg \sin \theta \\ m_a v \frac{d\theta}{dt} = P [\cos(\alpha_a + \phi_p) \sin \beta_a \cdot \sin \gamma_a + \sin(\alpha_a + \phi_p) \cdot \cos \gamma_a] + Y \cos \gamma_a - Z \sin \gamma_a - mg \cos \theta \\ m_a v \cdot \cos \theta \frac{d\psi_z}{dt} = P [\cos(\alpha_a + \phi_p) \sin \beta_a \cdot \sin \gamma_a - \sin(\alpha_a + \phi_p) \cdot \sin \gamma_a] - Y \sin \gamma_a - Z \cos \gamma_a \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_g}{dt} = v \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi_a \\ \frac{dy_g}{dt} = v \cdot \sin \theta \\ \frac{dz_g}{dt} = -v \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi_a \end{cases} \quad (2)$$

式中: v 为无人机飞行速度; α_a 为迎角; β_a 为侧滑角; ϕ_p 为发动机安装角度; γ_a 为速度滚转角; θ 为无人机俯仰角; ψ_a 为航向角; P 为发动机推力; Y , R 和 Z 分别为无人机升力、阻力和侧向力。

本文为了更好地分析自适应分段势场算法的有效性, 忽略无人机复杂六自由度模型, 将无人机数学模型更进一步简化为

$$A = [d_{\max}, d_{\min}, v_k, v_{\max}, F, X, m_a] \quad (3)$$

$$v_{k+1} = v_k + \frac{F}{m_a} dt \quad (4)$$

式中: d_{\max} 、 d_{\min} 分别为无人机最大、最小探测距离; v_k 为无人机第 k 时刻的速度; F 为无人机实时受到的合力; X 为无人机实时位置; m_a 为无人机质量。不同于传统人工势场无人机速度恒定, 式(4)表示本文中无人机第 $k+1$ 时刻速度是由无人机第 k 时刻速度 v_k 和无人机的加速度得出, 并设置无人机的速度上限 v_{\max} 。

2 传统人工势场法

文献[12]提出人工势场算法, 其基本思想是在工作环境中人为构建虚拟引力场和斥力场。环境中的无人机看作一个可移动质点^[13], 目标点产生引力场充满着整个环境并为无人机提供引力, 障碍物在

一定范围内存在斥力场并为无人机提供斥力，2 种力组成的合力引导无人机运动。传统人工势场的受力分析如图 1 所示。

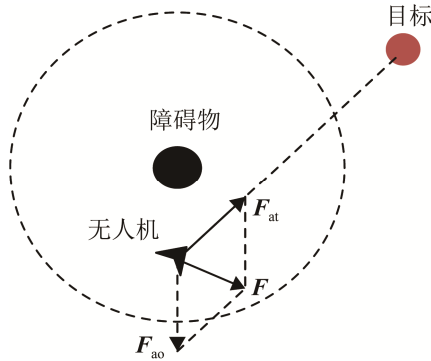


图 1 传统人工势场法受力分析

Fig. 1 Force analysis of traditional artificial potential field method

图 1 中虚线圆为障碍物斥力场影响范围； F 为无人机受到的合力； F_{re} 为无人机受到的斥力； F_{at} 为无人机受到的引力。传统人工势场的引力势场函数为

$$U_{at}(X) = 0.5\alpha\rho^2(X, X_t) \quad (5)$$

相应的无人机受到的引力为

$$F_{at}(X) = -\nabla U_{at}(X) = -\alpha\rho(X, X_t) \quad (6)$$

式中： $U_{at}(X)$ 为目标点在位置 X 处的引力场； $X = (x, y, z)$ 为无人机位置向量； α 为目标点引力系数，引力场强度与引力系数有关，引力系数越大引力场越强； X_t 为目标点所在位置； $\rho(X, X_t)$ 为无人机和目标之间距离。传统人工势场斥力场函数为

$$U_{re}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{\rho(X, X_o)} - \frac{1}{\rho_o}\right)^2, & \rho(X, X_o) \leq \rho_o \\ 0, & \rho(X, X_o) > \rho_o \end{cases} \quad (7)$$

相应的无人机受到的斥力为

$$F_{re}(X) = -\nabla U_{re}(X) = \begin{cases} \eta\left(\frac{1}{\rho(X, X_o)} - \frac{1}{\rho_o}\right)\frac{1}{\rho^2(X, X_o)}, & \rho(X, X_o) \leq \rho_o \\ 0, & \rho(X, X_o) > \rho_o \end{cases} \quad (8)$$

所以无人机在 X 点处所受到障碍物和目标点的势场合力为

$$F(X) = F_{at}(X) + F_{re}(X) \quad (9)$$

3 改进人工势场法

3.1 附加引力场

针对传统人工势场法存在目标不可达的问题，本文提出了一种附加引力场的解决方法。在原有全局引力场基础上附加局部引力场，在一定范围内 2 种引力场同时对无人机施加作用力，超出这个范围时只有原来的全局引力场为无人机提供引力。附加引力场的方法很好地弥补了引力在目标附近过小的缺点，有效解决了目标不可达和无人机在目标附近运动过慢的问题。

改进人工势场的引力场为

$$U_{ata}(X) = \begin{cases} U_{at}(X) = \frac{1}{2}\alpha\rho^2(X, X_t), & \rho(X, X_t) > r_{at} \\ U_{ata}(X) = \frac{1}{2}\gamma\rho^2(X, X_t) + \frac{1}{2}\alpha\rho^2(X, X_t), & \rho(X, X_t) < r_{at} \end{cases} \quad (10)$$

相应的引力为

$$\begin{cases} F_{at}(X) = -\nabla U_{at}(X), & \rho(X, X_t) > r_{at} \\ F_{ata}(X) = -\nabla U_{ata}(X), & \rho(X, X_t) \leq r_{at} \end{cases} \quad (11)$$

$$r_{at} = \rho(X_t, X_o) \quad (12)$$

式中： $\rho(X_t, X_o)$ 为目标点与最近障碍物之间的距离。则无人机与目标点的距离大于 r_{at} 时受到的目标点引力为

$$F_{at}(X) = -\nabla U_{at}(X) = -\alpha\rho(X, X_t), \quad \rho(X, X_t) > r_{at} \quad (13)$$

无人机与目标点距离小于等于 r_{at} 时受到的目标点引力为

$$F_{ata}(X) = -\nabla U_{ata}(X) = -\alpha\rho(X, X_t) - \gamma\rho(X, X_t), \quad \rho(X, X_t) \leq r_{at} \quad (14)$$

式中： α 为传统人工势场引力系数； γ 为附加引力场引力系数； $U_{ata}(X)$ 为附加引力场； $F_{ata}(X)$ 为附加引力； r_{at} 为设置的附加引力场范围。

3.2 复合引力场

针对传统人工势场法下无人机容易陷入局部极值的情况，本文提出一种复合引力场的解决方

法。在无人机没有陷入局部极值之前, 每个无人机朝着自己的目标前进。当检测到无人机陷入局部极值时, 所有目标产生的引力和障碍物产生的斥力组成合力, 帮助无人机脱离局部极值的困境。当检测到无人机脱离局部极值的困境时, 再次改变无人机的合力, 此时无人机所受到的合力由障碍物的斥力和该无人机所属目标的引力共同组成。

无人机陷入局部极值时所受到的引力场为

$$U_{\text{atn}} = \frac{1}{2} \beta (\rho^2(\mathbf{X}_{t1}, \mathbf{X}) + \rho^2(\mathbf{X}_{t2}, \mathbf{X}) + \rho^2(\mathbf{X}_{t3}, \mathbf{X}) + \rho^2(\mathbf{X}_{t4}, \mathbf{X})) \quad (15)$$

相应的引力为

$$\begin{aligned} F_{\text{atn}}(\mathbf{X}) = -\nabla(U_{\text{at1}}(\mathbf{X}) + U_{\text{at2}}(\mathbf{X}) + U_{\text{at3}}(\mathbf{X}) + \\ U_{\text{at4}}(\mathbf{X})) = -\beta(\rho(\mathbf{X}_{t1}, \mathbf{X}) + \\ \rho(\mathbf{X}_{t2}, \mathbf{X}) + \rho(\mathbf{X}_{t3}, \mathbf{X}) + \rho(\mathbf{X}_{t4}, \mathbf{X})) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: U_{at1} 、 U_{at2} 、 U_{at3} 、 U_{at4} 分别为目标 1、2、3、4 对无人机产生的引力场; β 为复合引力场引力系数。 β 值的选取不宜过大, 加入复合引力场的目的是改变无人机在局部极值点的合力方向。

具体的复合引力场的受力分析如图 2 所示。

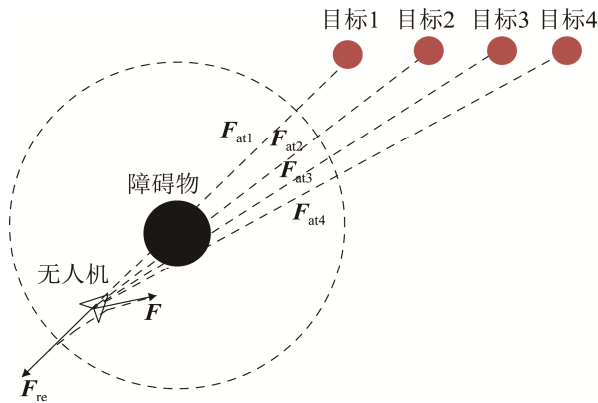


图 2 复合引力场引导无人机突破极值受力分析

Fig. 2 Force analysis of the UAV guided by the compound attractive field to break through the local extreme value

图 2 表示无人机陷入局部极值的情况, 此时所有目标点的引力和障碍物的斥力组成新的合力, 引导无人机脱离局部极值。

3.3 无人机间作用力

为了使无人机在运动中避免发生碰撞, 本文引

入了无人机间作用力^[14]表示为

$$F_{\text{aa}}(\mathbf{X}) = \begin{cases} \varepsilon \left(\frac{1}{\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_a)} - \frac{1}{\rho_a} \right)^2, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_a) \in [\rho_{a\text{min}}, \rho_{a\text{max}}] \\ 0, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_a) \notin [\rho_{a\text{min}}, \rho_{a\text{max}}] \end{cases} \quad (17)$$

式中: ε 为无人机间作用力的增益系数; $\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_a)$ 为相邻无人机之间的距离; ρ_a 为无人机势场力对其他无人机的影响范围。

因此无人机受到的合力为

$$F(\mathbf{X}) = F_{\text{at}}(\mathbf{X}) + F_{\text{re}}(\mathbf{X}) + F_{\text{aa}}(\mathbf{X}) + F_{\text{atn}}(\mathbf{X}) + F_{\text{ata}}(\mathbf{X}) \quad (18)$$

4 基于改进势场法的航迹优化算法

4.1 分层算法原理

针对人工势场法缺乏判定航迹规划的评价机制问题, 文献[15]提出了一种分层势场航迹规划算法, 分层原理如图 3 所示。

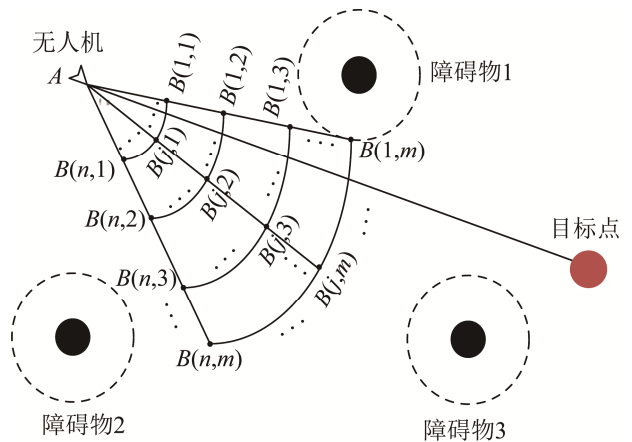


图 3 分层势场法原理

Fig. 3 Principle of layered potential field method

图 3 中 A 点是无人机的位置, 虚线代表障碍物的影响范围, 无人机在运动过程中每次迭代都会扩展出一个扇形的空间区域, 并在该扇形区域内离散出不同步长和角度的航迹点阵。再从这些点阵中选取满足约束条件的最优航迹点, 作为下一刻无人机的起始点。该方法在一定程度上可以对无人机航迹进行优化, 使得规划航迹更加平滑, 不会出现航

迹弯曲较大的情况。但是该种方法的分层次数和规划速度密切相关，随着分层的增多，在每层中选取的点也就越多，规划的速度也就越慢。

其中，分层势场角度的设定和距离无人机最近的障碍物有关。具体表示为

$$\theta = \arccos \frac{d_{AB(j,m)}^2 + d_{AB(1,m)}^2 - d_{B(1,m)B(j,m)}^2}{2d_{AB(j,m)}d_{AB(1,m)}} \quad (19)$$

式中： $d_{AB(j,m)} = \|\mathbf{X}_{B(j,m)} - \mathbf{X}_A\|$ ； $d_{AB(1,m)} = \|\mathbf{X}_{B(1,m)} - \mathbf{X}_A\|$ ； $d_{B(1,m)B(j,m)} = \|\mathbf{X}_{B(1,m)} - \mathbf{X}_{B(j,m)}\|$ 。

4.2 改进分层势场算法

考虑到分层算法在航迹规划中规划速度过慢的问题，本文在分层算法基础上做了进一步改进。文献[15]的分层势场法是一种全过程的分层势场算法，虽然有效解决了无人机在航迹规划过程中出现的无人机航迹弯曲较大问题，但全过程的分层势场算法会造成大量的计算冗余，导致航迹规划时间过长，不适合较广阔区域的无人机航迹规划。为解决这一问题，本文采用一种分段式的分层航迹规划算法。具体分段表示为

$$\begin{cases} \max[\rho(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_j)] \geq d_m \\ \max[\rho(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_j)] < d_m \end{cases} \quad (20)$$

式中： $\max[\rho(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_j)]$ 为无人机到其最近障碍物的最大距离； d_m 为无人机距离障碍物开启分层势场算法的距离； \mathbf{X}_j 为第 j 个无人机的位置； \mathbf{X}_o 为第 i 个障碍物的位置。

当无人机与障碍物的最大距离小于 d_m 时开启分层算法，当无人机与障碍物的最大距离大于等于 d_m 时关闭分层算法。通过实验发现 d_m 取值为

$$d_m = \rho_L + \frac{\rho_L}{v} \cdot v_{\max} \quad (21)$$

式中： ρ_L 为障碍物中心位置到其边缘位置的最大距离； v 为分层速度的最大值； v_{\max} 为无人机在运行过程中的最大速度。

4.3 最优航迹的选择

在最优航迹点的选取上，本文采用文献[15]的

最优航迹点选取方法可表示为

$$d(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o) > d(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_b) \quad (22)$$

式中： $d(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o)$ 为分层航迹点到障碍物几何中心的距离； $d(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_b)$ 为障碍物几何中心到交点的距离。

无人机的能量消耗与无人机运动的航程相关，本文用航迹规划长度来代表航迹规划机制。具体方程为

$$J(\mathbf{X}) = \frac{\|(\mathbf{X} - \mathbf{X}_{\text{new}}) \times (\mathbf{X} - \mathbf{X}_t)\|}{\|\mathbf{X} - \mathbf{X}_t\|} \quad (23)$$

式中： \mathbf{X}_{new} 为分层势场法选取点位置； \mathbf{X} 为无人机的开始位置； \mathbf{X}_t 为无人机目标点的位置。

所以最优航迹点可表示为

$$\begin{aligned} \min(y) &= J(\mathbf{X}) = (j_1(x), j_2(x), \dots, j_m(x)), \\ \text{s.t. } &d(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o) > d(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_b) \end{aligned} \quad (24)$$

4.4 自适应分段势场算法步骤

Step 1: 初始化仿真环境中的各项参数。

Step 2: 由式(4)、式(6)、式(8)、式(17)和式(18)分别计算出无人机的速度、无人机受到的引力、斥力、无人机机间作用力和无人机受到的合力，并更新无人机速度和位置。

Step 3: 检测无人机是否运动到距离障碍物 d_m 的范围内，如果是则执行 step 4，否则执行 step 2。

Step 4: 启动分层势场算法，无人机由分层算法引导运动。

Step 5: 运用分层势场算法更新无人机下一时刻的速度和位置。

Step 6: 检测无人机是否陷入局部极值，如果是则执行 step 7，否则执行 step 11。

Step 7: 由式(8)、式(16)、式(17)和式(18)计算出无人机在复合势场中受到的斥力、引力、机间作用力和合力。

Step 8: 运用复合势场计算出无人机下一时刻的速度和位置。

Step 9: 检测无人机是否脱离局部极值，如果是则关闭复合势场，否则执行 step 8。

Step 10: 更新无人机的速度和位置。

Step 11: 检测无人机与障碍物的距离是否大于 d_m , 如果是则关闭分层势场。否则执行 step 5。

Step 12: 更新无人机的速度和位置。

Step 13: 检测无人机与目标点的距离是否小于 d , 如果是则开启附加引力场, 此时无人机受到的合力由式(14)、式(17)和式(8)的计算结果组成。否则执行 step 12。

Step 14: 更新无人机的速度和位置。

Step 15: 检测无人机是否到达目标点, 如果是则结束, 否则执行 step 2。

自适应分段势场算法流程如图 4 所示。

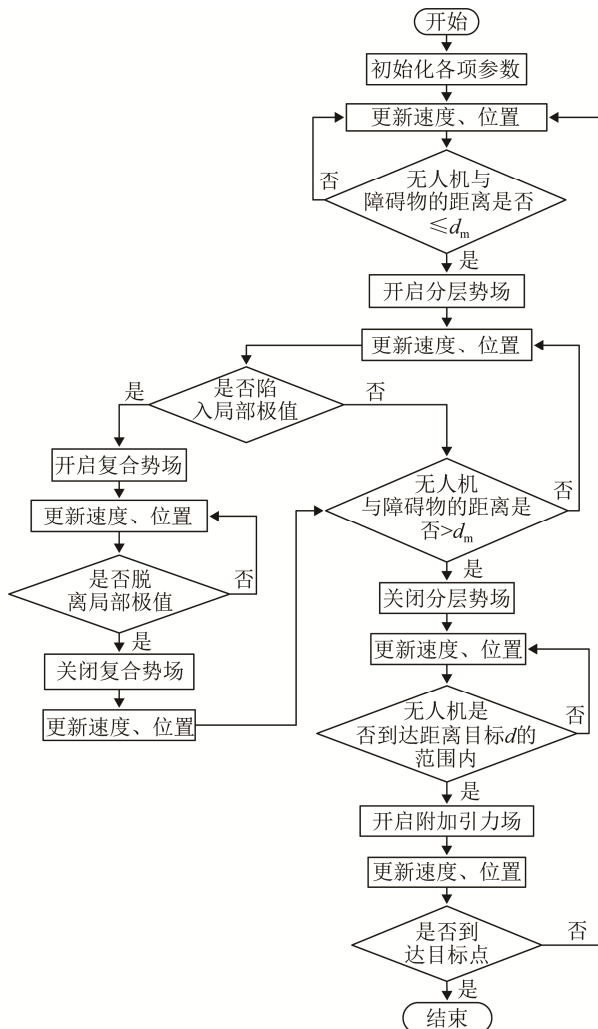


图 4 自适应分段势场算法流程图

Fig. 4 Flow chart of adaptive segmented potential field algorithm

5 数值仿真

无人机在航迹规划过程中遇到的障碍物多种多样, 本文所采用的航迹规划地图参考文献[16]。半球体表示地面雷达所能扫射的半径, 球体表示防空导弹, 扇形的柱体结构表示恶劣环境的影响范围。山峰的仿真模型如式(25)和式(26)所示。障碍物几何中心在三维空间中的坐标如表 1 所示。根据障碍物信息构造 $500 \text{ km} \times 500 \text{ km} \times 200 \text{ km}$ 复杂环境, 如图 5 所示。

$$Z_z(x_z, y_z) = \sin(y + A) + B \cdot \sin(x) + C \cdot \cos(D \cdot \sqrt{x^2 + y^2}) + E \cdot \cos(y) + F \cdot \sin(G \cdot \sqrt{x^2 + y^2}) \quad (25)$$

$$Z_p(x_p, y_p) = \sum_{i=1}^m H_i \exp\left(-\left(\frac{x-x_i}{x_{zi}}\right) - \left(\frac{y-y_i}{y_{zi}}\right)\right) \quad (26)$$

式中: Z_z 为山峰的相对与水平面的高度; A, B, C, D, E, F, G 为常数, 用来控制山地平面的起伏; $Z_p(x_p, y_p)$ 为地图中该点处的高度; x_i, y_i 为地图中第 i 个山峰的中心坐标; x_{zi}, y_{zi} 分别为第 i 个山峰沿 x 轴、 y 轴方向上的衰减量; m 为山峰个数。

表 1 仿真图中障碍物的具体位置

Table 1 Specific location of obstacles in simulation diagram

障碍物	编号	具体位置
山峰	1	400, 200, 0
	2	200, 300, 0
	3	95, 300, 0
恶劣天气	1	0, 500, 0
雷达	1	300, 450, 0
	2	450, 400, 0
	3	340, 330, 0
	4	200, 180, 0
	5	450, 400, 0
导弹	1	200, 200, 80
	2	125, 125, 110
	3	300, 350, 90
	4	250, 250, 120
	5	200, 200, 75
	6	400, 350, 130

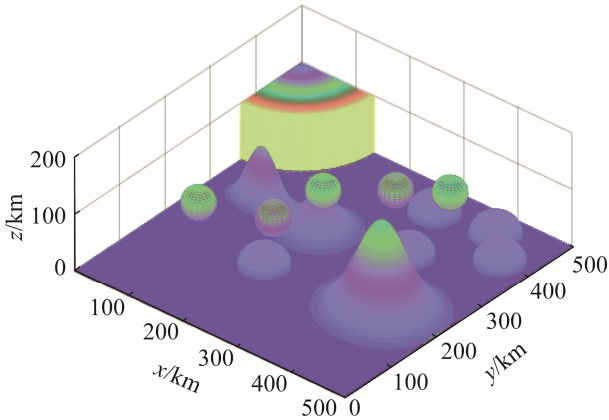


图 5 复杂的仿真环境
Fig. 5 Complex simulation environment

本文运用改进势场法对无人机进行航迹规划，需要对势场函数进行初始化，选取不同的参数会对无人机的航迹规划造成影响，势场函数的数值越大无人机受到的势场影响也就越大。经过不断的实验仿真，本文得出了最佳的参数，如表 2 所示。无人机的初始位置和目标点的位置如表 3 所示。

表 2 势场函数参数

Table 2 Potential field function parameters

参数	数值	参数	数值
α	1.5	γ	10
β	0.1	v_{max}	5
η	2.0	ε	4 300

表 3 无人机与目标位置信息

Table 3 UAV and target location information

无人机	目标
(30, 30, 110)	(450, 450, 110)
(15, 21.397 0, 85.505 1)	(435, 441.339 7, 85.505 1)
(30, 47.320 5, 85.505 1)	(450, 467.320 5, 85.505 1)
(45, 21.339 7, 85.505 1)	(465, 441.339 7, 85.550 1)

6 实验结果及分析

在复杂仿真环境下分别运用传统人工势场算法、加入附加引力场和复合引力场的势场算法、对比算法一、对比算法二和自适应分段势场算法，仿真计算出航迹规划的长度和时间，并进行对比分析，如图 6~10 和表 4 所示。

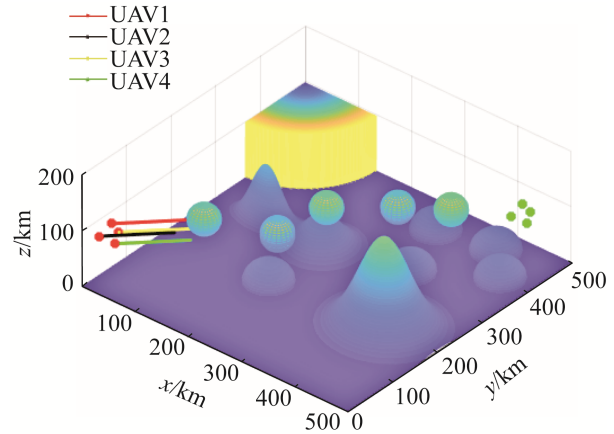


图 6 传统人工势场算法
Fig. 6 Traditional artificial potential field algorithm

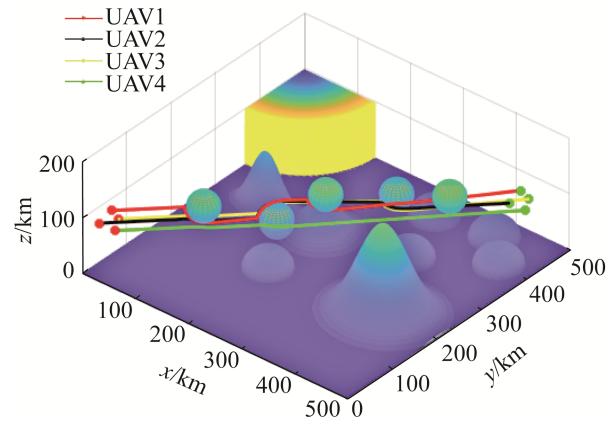


图 7 加入附加引力场和复合引力场
Fig. 7 Adding additional attractive field and compound attractive field

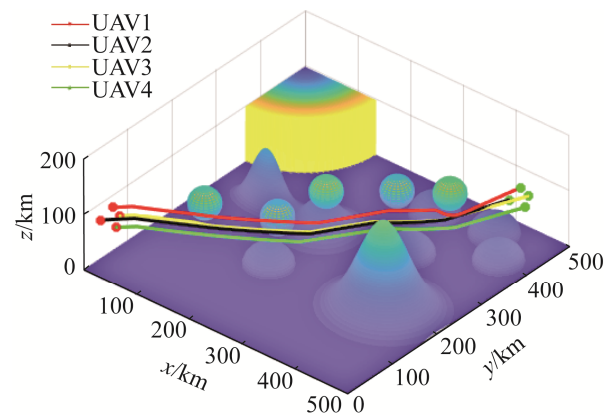


图 8 对比算法一
Fig. 8 Comparison algorithm one

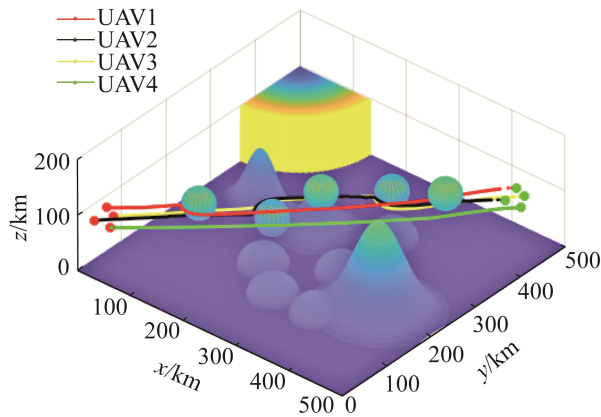


图 9 对比算法二
Fig. 9 Comparison algorithm two

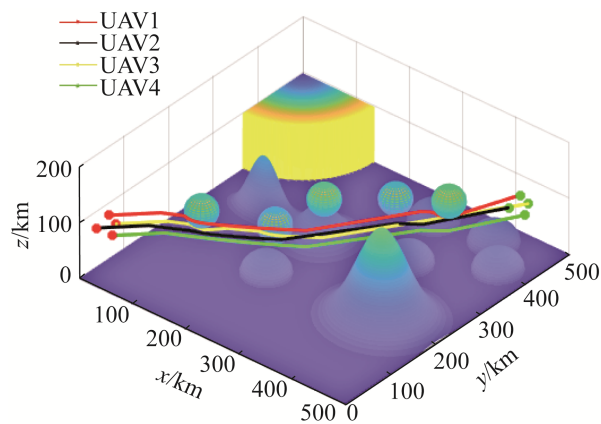


图 10 自适应分段势场算法
Fig. 10 Adaptive segmented potential field algorithm

表 4 各规划方法所用时间及长度

Table 4 Time and length of each planning method

方法	时间/s	航线长度/km
附加引力场 和复合引力 场算法	65.994 2	669.822 5
		613.036 3
		608.454 3
		598.539 8
对比算法一	212.197 4	618.830 2
		626.496 9
		615.069 4
		614.523 5
对比算法二	63.579 6	618.339 2
		613.952 4
		608.770 0
		595.721 5
自适应分段 势场算法	62.979 9	617.627 6
		610.596 3
		612.765 1
		610.057 4

根据仿真结果可知,图 6 是传统人工势场法在航迹规划过程中陷入局部极值的情况,航迹规划失败。图 7 是无人机在复合引力场和附加引力场的作用下,突破局部极值的限制到达目标点,但规划航迹曲率过大,且规划出的航程较长。图 8 是文献[15]算法的仿真效果,航迹比较平滑,但从表 4 可以看出,对比算法一的航迹规划时间较长,不适合较广范围内的航迹规划。图 9 是文献[16]算法的仿真效果,从表 4 可以看出,对比算法二虽然在时间和航程上有些改善,但从图 9 可以看出该算法未能改变无人机航迹曲率过大的缺点。图 10 是本文所提的自适应分段势场算法,规划出的航迹未出现较大弯曲。规划航迹长度和规划时间相对较短。通过以上分析得出,本文采用的自适应分段势场算法具有一定的优越性和可行性。

7 结论

本文提出的改进型人工势场算法在复杂的三维环境中能够快速规划出切实可行的航迹,提高无人机群的执行效能。从以上数据分析中得出以下结论:

(1) 在传统的人工势场算法的基础上进行改进。复合引力场的加入有效弥补了传统人工势场在航迹规划时易陷入局部极值的缺陷。

(2) 在目标点附加第二引力场,有效的解决了传统人工势场法目标不可达和在目标点无人机运动过慢的问题,有效提高了航迹规划效率。

(3) 在分层势场算法基础上添加分段函数,进一步提高了航迹规划效率,有效的缩短了规划航迹。同时,传统人工势场算法缺乏航迹评价机制和传统算法中规划航迹曲率过大的问题也得到了很好的解决。

参考文献:

- [1] Liu Chenguang, Mao Qingzhou, Chu Xiumin, et al. An Improved A-Star Algorithm Considering Water Current, Traffic Separation and Berthing for Vessel Path Planning[J]. Applied Sciences (S0305-0548), 2019, 9(6):

- 1057.
- [2] Mohammed H, Romdhane L, Jaradat M A. RRT* N: An Efficient Approach to Path Planning in 3D for Static and Dynamic Environments[J]. *Advanced Robotics* (S0169-1864), 2021, 35(3/4): 168-180.
- [3] Zhou Q, Zhou Y. Wolf Colony Search Algorithm Based on Leader Strategy[J]. *Application Research of Computers* (S0305-0548), 2013, 30(9): 2629-2632.
- [4] Haghghi H, Sadati S H, Dehghan S M, et al. Hybrid Form of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm for Optimal Path Planning in Coverage Mission by Cooperated Unmanned Aerial Vehicles[J]. *Journal of Aerospace Technology and Management* (S1984-9648), 2020, 12: 1169.
- [5] 朱大奇, 朱婷婷, 颜明重. 基于改进神经网络的多AUV全覆盖路径规划[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(8): 1505-1514.
Zhu Daqi, Zhu Tingting, Yan Mingzhong. Multi-AUV Complete Coverage Path Planning Based on Improved Neural Network[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(8): 1505-1514.
- [6] Zhang Honghan, Guo Yanyang, Xu Yajie, et al. Mission Planning Method of Multi-UUV Search Submarine Acoustic Beacon[J]. *Chinese Journal of Ship Research* (S1000-9604), 2020, 15(1): 1-9.
- [7] Biswas S, Anavatti S G, Garratt M A. Obstacle Avoidance for Multi-agent Path Planning Based on Vectorized Particle Swarm Optimization[M]. Springer, Cham: *Intelligent and Evolutionary Systems*, 2017: 61-74.
- [8] Sang H, You Y, Sun X, et al. The Hybrid Path Planning Algorithm Based on Improved A* and Artificial Potential Field for Unmanned Surface Vehicle Formations[J]. *Ocean Engineering* (S0029-8018), 2021, 223: 108709.
- [9] Fan X, Guo Y, Liu H, et al. Improved Artificial Potential Field Method Applied for AUV Path Planning[J]. *Mathematical Problems in Engineering* (S1024-123X), 2020(1): 1-21.
- [10] 林立雄, 何洪钦, 何炳蔚, 等. 基于改进人工势场模型的无人机局部避障方法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(8): 86-91.
Lin Lixiong, He Hongqin, He Bingwei, et al. Local Obstacle Avoidance Method for Unmanned Aerial Vehicle Based on Improved Artificial Potential Field[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2021, 49(8): 86-91.
- [11] 陈廷楠. 飞机飞行性能品质与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 21-27.
Chen Tingnan. *Aircraft Flight Performance Quality and Control*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 21-27.
- [12] Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[J]. *International Journal of Robotics Research* (S0278-3649), 1986, 5(1): 90-98.
- [13] 张殿富, 刘福. 基于人工势场法的路径规划方法研究及展望[J]. *计算机工程与科学*, 2013, 35(6): 88-95.
Zhang Dianfu, Liu Fu. Research and Development Trend of Path Planning Based on Artificial Field Method[J]. *Computer Engineering & Science*, 2013, 35(6): 88-95.
- [14] 曲成刚, 曹喜滨, 张泽旭. 人工势场和虚拟领航者结合的多智能体编队[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(5): 1-5.
Qu Chenggang, Cao Xibin, Zhang Zexu. Multi-agent System Formation Integrating Virtual Leaders into Artificial Potentials[J]. *Journal of Harbin institute of technology*, 2014, 46(5): 1-5.
- [15] 代冀阳, 王村松, 殷林飞, 等. 飞行器分层势场路径规划算法[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(11): 1505-1510.
Dai Jiyang, Wang Cunsong, Yin Linfei, et al. Aircraft Layered Potential Field Path Planning Algorithm[J]. *Control Theory and Applications*, 2015, 32(11): 1505-1510.
- [16] 王宁, 代冀阳, 应进, 等. 基于自适应扩展势场的多无人机航迹规划仿真[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(9): 2147-2156.
Wang Ning, Dai Jiyang, Ying Jin, et al. Multi-UAV Trajectory Planning Simulation Based on Adaptive Extended Potential Field[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(9): 2147-2156.