

doi: 10.7690/bgzd.2025.01.021

基于多目标多约束的无人机航迹规划算法

林峰, 钱丹

(无锡职业技术学院物联网工程学院, 江苏 无锡 214105)

摘要: 针对 UAV 航迹规划过程中空间域的航迹协调和时间域的协同避撞等问题, 提出基于多目标多约束的无人机航迹规划优化算法。通过分析人工势场法在路径规划中的缺陷, 对斥力势场函数进行改进并融入了虚拟障碍物法。以改进人工势场法作为实现算法, 对多目标多约束条件下的 UAV 航迹规划展开研究和仿真实验。结果表明, 通过调整循环体结构和算法提高航迹合理性和航迹真实性, 算法效率和性能可以得到进一步的提升。

关键词: UAV 航迹规划; 人工势场法; 3 维航迹

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

Research on Multi-UAV Track Planning Based on Multi-object and Multi-constraint

Lin Feng, Qian Dan

(School of IOT Engineering, Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214105, China)

Abstract: Aiming at the problems of trajectory coordination in the spatial domain and cooperative collision avoidance in the temporal domain during the UAV trajectory planning process, a multi-objective and multi-constraint based optimization algorithm for UAV trajectory planning is proposed. By analyzing the shortcomings of the artificial potential field method in path planning, the repulsive potential field function was improved and integrated into the virtual obstacle method. The improved artificial potential field method is used as the implementation algorithm to study and simulate the UAV trajectory planning under multi-objective and multi-constraint conditions. The results show that the efficiency and performance of the algorithm can be further improved by adjusting the structure of the loop body and the algorithm to improve the reasonableness of the trajectory and the realism of the trajectory.

Keywords: UAV trajectory planning; artificial potential field method; three-dimensional trajectory

0 引言

目前,常用的单 UAV 飞行规划算法与地面车辆路径规划算法相似, 主要有遗传算法、A*算法^[1]、D*算法、蚁群算法以及图论方法^[2](如可视图法、Dijkstra 法^[3])等。

程凝怡等^[4]提出基于 Dijkstra 算法的航迹规划法, 该方法是单目标下的约束航迹规划, 其校正点是无形的, 同时也提出了改进方向: 曲线转弯绕离校正点。随着 UAV 自主控制系统的不断发展, 将导航与避障算法、UAV 飞控技术相结合, 利用待求的规划空间信息来实现 UAV 的自主飞行导航是 UAV 航迹规划的重要内容^[5-8]; 因此, 笔者研究适用于 UAV 的常用规划算法, 为进行 UAV 自主导航打下基础。

1 改进的人工势场法设计

传统人工势场法存在两大不足之处: 目标不可达和局部极小值问题, 笔者分别对传统算法的不足之处进行改进。

1.1 斥力势场函数改进

针对传统人工势场法存在的目标不可达问题, 在斥力势场函数中引入 $\rho(q, q_a)^2$, 即无人机到目标点欧氏距离的平方。改进后的斥力势场函数如下:

$$U'_r(q) = \begin{cases} 0.5k\rho(q, q_a)^2 e^{-\rho(q, q_0)^2}, & \rho(q, q_0) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(q, q_0) > \rho_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\rho(q, q_a)$ 为无人机到目标点的欧氏距离; $\rho(q, q_0)$ 为无人机到障碍物的欧氏距离; ρ_0 为障碍物影响距离。

从改进后的势场函数中可以看出: 在目标点处斥力势场永远为零, 可以有效的解决目标不可达问题。

1.2 虚拟障碍物法

传统人工势场法所存在的局部最小值问题的原因就是某一复杂障碍物环境下无人机在某一点所受的引力和斥力大小相等方向相反, 此时无人机所受合力为零, 无人机陷入局部最小值陷阱, 笔者通过增设虚拟障碍物打破此点的合力平衡。

收稿日期: 2024-07-23; 修回日期: 2024-08-21

第一作者: 林峰(1980—), 男, 江苏人, 硕士。

步骤 1 当无人机陷入局部最小值陷阱时往往是处于静止或者振荡状态，可以通过计算无人机一定步数内的实际位移和路程之间的差值是否过大，来判断无人机是否处于局部最小值陷阱中。

步骤 2 分别计算无人机前方范围内左右 2 个四分之一扇区的障碍物数量 n_L 和 n_R 以及 2 个分扇区内最近障碍物的距离。对于处于轴线上的障碍物，笔者将其同时纳入左右 2 个扇区共同计数。

步骤 3 将虚拟障碍物放置在障碍物数量较多的一侧，以在逃脱局部最小值陷阱区域时，避免进入复杂障碍物区域。左右 2 个扇区的障碍物数量相同时，则根据障碍物最近距离，当左侧障碍物最近距离大于右侧时放置在无人机右侧，反之则放置在左侧。

2 航线轨迹的设计与实现

2.1 单目标单障碍的单 UAV 航迹规划

在单 UAV 单目标的单障碍约束任务(航迹任务一)的程序中，导入 UAV 初始位置、障碍物位置和 目标点位置后，运行程序，得到其仿真航迹和结果对比如图 1 所示。

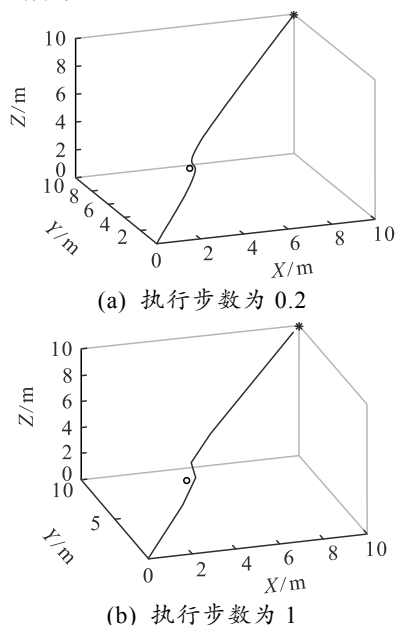


图 1 轨迹

从以上对比可知：当执行人工势场算法时，需要合理设定合力计算循环中的步数，否则会出现航迹不光滑的情况。除了执行步数会对航迹产生影响外，参数设置也会对航迹产生影响，在以上仿真中，引力正比例增益系数 ρ 为 15，斥力正比例增益系数 k 为 10，障碍物的约束距离 ρ_0 为 3。这里保持执行步数不变，仍为 0.2，改变引力正比例增益系

数 ρ 为 20，斥力正比例增益系数 k 为 15，障碍物的约束距离 ρ_0 为 5，进行仿真数据对比如表 1 和 2 所示。

表 1 改变前障碍邻近航迹点数据

障碍点	邻近航迹点		
(4.67, 5.82, 5.82)	(4.79, 5.94, 5.94)	(4.92, 6.05, 6.05)	
(5, 5, 5)	(5.05, 6.16, 6.16)	(5.13, 6.28, 6.28)	(5.24, 6.40, 6.40)
	(5.35, 6.52, 6.52)	(5.48, 6.63, 6.63)	(5.61, 6.74, 6.74)

表 2 改变后障碍邻近航迹点数据

障碍点	邻近航迹点		
(4.65, 5.85, 5.85)	(4.77, 5.96, 5.96)	(4.90, 6.07, 6.07)	
(5, 5, 5)	(5.02, 6.18, 6.18)	(5.15, 6.29, 6.29)	(5.29, 6.39, 6.39)
	(5.42, 6.50, 6.50)	(5.55, 6.61, 6.61)	(5.69, 6.71, 6.71)

从以上仿真中可以得知：如果需要使得人工势场算法的效率和合理性增加，需要通过多次仿真实验，取合理值作为最优参数，将会得到进一步参数优化后的航迹。

2.2 单目标多障碍的单 UAV 航迹规划

在单 UAV 单目标的多障碍约束任务中，其仿真航迹如图 2 所示。

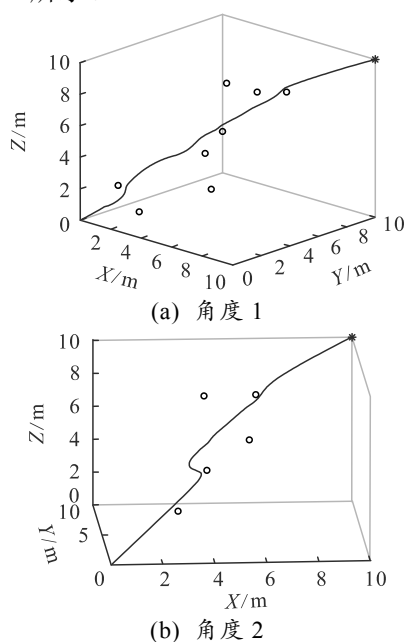


图 2 障碍物数量为 8 个与障碍物数量为 5 个的航迹

对比可知，障碍物的数量和位置都将对航迹产生影响。在仿真中，采用障碍物数量为 8 和 5 的 2 条航迹进行对比，如表 3 和 4 所示。可以发现当障碍物减少时，UAV 在后续的航迹中受到障碍物斥力的影响削弱，以最快航向抵近目标点。

表 3 障碍物为 8 个的末端航迹点数据

目标点	末端航迹点		
(10, 10, 10)	(8.78, 8.05, 9.11)	(8.92, 9.16, 9.21)	(9.06, 9.26, 9.31)
	(9.19, 9.37, 9.41)	(9.33, 9.48, 9.51)	(9.47, 9.58, 9.61)
	(9.60, 9.69, 9.71)	(9.74, 9.80, 9.81)	(9.88, 9.90, 9.91)

表 4 障碍物为 5 个的末端航迹点数据

目标点	末端航迹点		
(10, 10, 10)	(8.44, 9.23, 9.17)	(8.61, 9.31, 9.25)	(8.77, 9.39, 9.34)
	(8.93, 9.47, 9.43)	(9.09, 9.55, 9.51)	(9.25, 9.63, 9.60)
	(9.41, 9.71, 9.69)	(9.58, 9.79, 9.77)	(9.74, 9.87, 9.86)

2.3 多目标多障碍的 UAV 航迹规划

考察人工势场法对于航迹规划的完成度和效率来进行仿真实验。预设好任务中 2 架 UAV 的起飞位置，预设障碍物数量为 7 个。

对于多目标多约束的 UAV 航迹规划任务，最关键的一点是其他 UAV 将对本 UAV 产生斥力。假设 2 机运用相同参数，引力正比例增益系数 ρ 为 15，斥力正比例增益系数 k 为 10，障碍物的约束距离 ρ_0 为 3，对 2 机同步执行航迹规划算法，可以得到 UAV₀ 的校正次数为 509 次，UAV₁ 的校正次数为 304 次。

通过以上航迹规划的仿真实现，可以验证出算法的可行性，并由此作为基础，拓展多个 UAV，以 2 架 UAV 演示，最终实现了多目标、多障碍物、2 个指标。仿真的效果最终如图 3 所示。

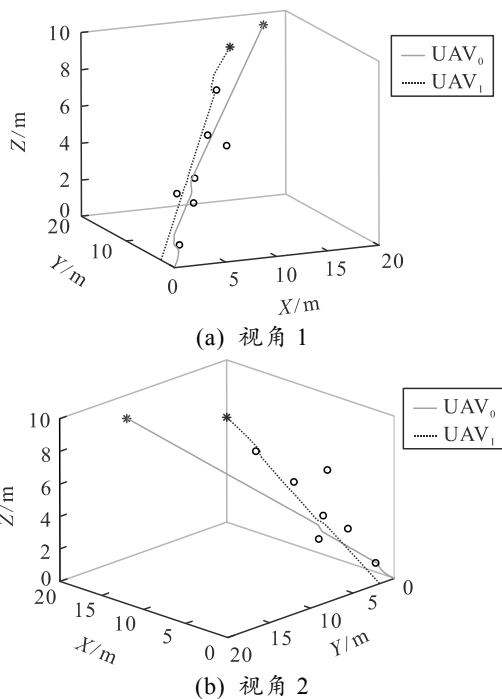


图 3 不同视角的多目标多约束的 UAV 航迹规划仿真结果

从上图可以看出：2 机各自运行航迹规划算法，在保持对静态障碍点避障的同时，也对邻机进行动态避障。从 2 机的航迹点也可以得到该仿真结论，UAV₀ 航迹点共 509 个((0, 0, 0) (0.03, 0.03, 0.02) (0.06, 0.06, 0.04) ... (15.94, 15.94, 9.97) (15.98, 15.98, 9.99))，UAV₁ 航迹点共 304 个((2, 2, 0) (2.02, 2.02, 0.03) (2.05, 2.05, 0.06) ... (9.96, 9.95, 9.95) (9.98,

9.98, 9.98))。

从仿真实验里可以得出：UAV、单障碍物与多障碍、单目标点与多目标点这多种组合下的任务航迹规划，其核心思想最开始是通过对单 UAV 对静态障碍物在基于人工势场算法的控制下，进行合力的调整，从而指导 UAV 进行航行，形成航向航迹。笔者运用仿真平台 Matlab 的数据计算能力，通过改变人工势场法参数、UAV 起飞位置、目标点位置等，在运行算法后，可在仿真平台的变量工作区中得到大量的仿真航迹数据，另外，根据这些航迹点进行航迹的绘制，可以从直观上感知参数合变量的改变对 UAV 航迹的影响。

3 结束语

笔者围绕 UAV 的航迹规划算法在仿真平台中进行实验对比，并采用改进的人工势场法作为本文中多目标多约束下的多 UAV 航迹规划指导算法，在 Matlab 中做出了多种任务航迹对比和绘制，并进行了航迹点数据的横向对比分析。创新地对斥力势场函数进行改进并融入了虚拟障碍物法。

将算法在仿真平台上进一步优化后，可以尝试将算法移植到 UAV 飞控芯片中，通过与 UAV 和各种传感器一同工作，通过飞控内嵌好的算法计算出下一步飞行位置，指导 UAV 飞行。

参考文献：

- [1] 夏顺. 多无人机航迹规划与目标分配方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [2] 辛培源. 基于三维环境复杂约束条件的无人机航迹规划方法研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2014.
- [3] FELIPE LEONARDO LÔBO MEDEIROS, JOSÉ DEMISIO SIMÕES DA SILVA. Computational Modeling for Automatic Path Planning Based on Evaluations of the Effects of Impacts of UAVs on the Ground[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 61: 1-4.
- [4] 程凝怡, 刘志乾, 李昱奇. 一种基于 Dijkstra 的多约束条件下智能飞行器航迹规划算法[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(6): 1284-1290.
- [5] 陈守凤. 基于改进人工势场法的多无人机协同航迹规划算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [6] 赵颖, 徐熙阳. 基于混沌蚁群算法的集群无人机协同任务分配[J]. 兵工自动化, 2023, 42(8): 91-96.
- [7] 罗统, 张民, 梁承宇. 复杂环境下多无人机协同目标跟踪路径规划[J]. 兵工自动化, 2024, 43(9): 90-96.
- [8] 邢顺翔, 陈欣, 王威振, 等. 基于信息地图和改进蚁群算法的多无人机覆盖优化方法[J]. 兵工自动化, 2024, 43(10): 84-91.