

# 无人机路径规划算法研究综述

陈麒杰 晋玉强 韩 露

**摘 要** 目前无人机路径规划算法主要分为经典算法和智能反应算法。详细阐述了两种算法的分类,深入分析了各种算法的基本原理及存在的问题,并针对后续研究给出了发展方向与建议。

**关键词** 无人机 路径规划 经典算法 智能反应算法 混合算法

## 引 言

最初,无人机仅应用于军事和工业领域。随着算法的发展和制造工艺的提升,无人机已被广泛应用于娱乐、医药、采矿、救援、教育、军事、航空航天、农业检测、电力巡检等领域。在使用过程中,无人机配备了智能设备,能够实时模拟出运行的环境,确定自身位置,控制自身飞行状态,探测障碍物并计算规避路径,使无人机能够成功避开障碍物并顺利完成设定任务。计算安全路径,是无人机能够从起飞点到达目标点的重要保障,也是完成任务的重要前提。正确选择路径点则是无人机路径规划中的重要环节。因此,选择适合的算法对于无人机路径规划非常重要。

本文旨在研究目前使用的无人机路径规划算法,寻找常用算法应用中存在的问题和后续研究方向。

## 1 无人机路径规划算法分类

目前,不同的研究人员提出了不同的方法以快速有效地规划无人机路径。目前的导航算法主要分为两类,一种是需要提前载入环境信息的经典算

法,如  $A^*$  算法、随机路图法、细胞分解法(CD)、人工势场法(APF)等算法;另一种是根据实时测量的环境元素信息,与自身的位置信息计算相对关系从而规划路径的智能反应算法,如遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)、蜂群算法(ABC)、布谷鸟算法(CS)等算法(如图1所示)。

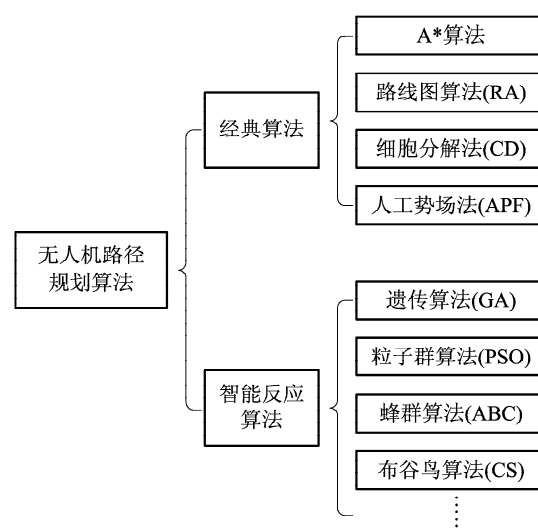


图1 无人机路径规划算法分类

## 2 经典路径规划算法

### 2.1 $A^*$ 算法

荷兰科学家迪杰斯特拉等人在文献[1]中于1968年首次提出  $A^*$  算法,并迅速应用于各个领域。 $A^*$  算法是一种启发式算法,其基本的思想是,当无人机开始运动时,根据长期环境的先验信息,

基金项目: 山东自然科学基金项目(ZR2017MF036)

本文2019-11-05收到,陈麒杰、晋玉强分别系海军航空大学硕士生、副教授

得到每个点之间的代价,将已选择的点集合记为  $M$ ,未选择的点集合记为  $N$ ,算法开始时,集合  $M$  只存在初始点, $N$  中包含除起始点以外的其它节点,选择代价最小的路径点加入集合  $M$ ,之后更新  $M$ 、 $N$  集合信息,根据顶点对顶点的原则,继续选择  $N$  中距离  $M$  中顶点最短代价的路径点加入集合  $M$ ,直至得到最短路径。在运动过程中,全局规划器控制系统按照该路径行动。

$A^*$  作为启发式算法,优点在于计算速度快,能够高效得到无人机路径的信息。但是其缺点也很明显。针对其缺点,研究人员也给出了不同的解决办法。针对  $A^*$  算法计算复杂路径效率低以及在复杂环境下出现搜索失败的现象,文献[2]中,李得伟等人通过改进搜索顺序和优化估价函数,将  $A^*$  算法中的无向搜索改成有向搜索,将全局估价变为局部估价,提高了算法效率。在文献[3]中,宋雪倩等人提出利用 Dubins 曲线找到有效节点,为每一架无人机分别构建最短避障路径,以便更快地得到更短的安全路径。

## 2.2 细胞分割法

在该方法中,控制器将预先获得的地图先验信息划分为不重叠的方格,在当前方格时,经过与之相邻的所有方格,最终到达目的地,实现路径规划。当遇到一个含障碍物的损坏细胞时,将该细胞进一步分割,得到一个不含障碍物的纯细胞,将该细胞添加至路径中,最终确定从初始点到目标点的最佳路径。在计算时,起始点和目标点由不同的纯细胞表示,连接此细胞的纯细胞序列则显示了所需的路径。

Franklin Samaniego 等人在文献[4]中将无人机飞行的空间看作是一个以路径规划中最小步长离散的自适应网格,并利用成本响应法和递归计算进行路径规划,降低了响应时间。Marian Lupescu 等人在文献[5]中将二维中的方形细胞分解拓展为三维中的立方体进行路径规划,并论证了算法的可行性。

## 2.3 随机路图法

随机路图法利用 Voronoi 图和可视图在空间内建立路线图,而所有的路线有着相同的权重,被选择的概率都是相同的,而随机路图法则是根据建立

起的图规划出最优路径<sup>[6]</sup>。在该算法中,节点的选择对于路径的生成起着至关重要的作用。

在文献[7]中,介绍了 Voronoi 图在移动机器人避障过程中的使用。为了提高 Voronoi 图的性能,消除其在应用中存在的急转弯和循环时间长的问题,文献[8]对 Voronoi 图进行了一定的改进,提高了该算法性能。文献[9]中,作者采用八叉树算法将环境进行划分,同时考虑到无人机飞行条件等限制,将能够使无人机通过的空间成为自由空间,同时在整个空间创建边框阵列评估各个自由空间的连接。通过在各个自由空间随机采样路径节点,改进了随机路图法,保证节点在整个三维空间的有效分布,得到无人机在三维空间内飞行的优化路径。

## 2.4 人工势场法

人工势场法由 Khatib<sup>[10]</sup>于1985年提出。在该算法中,目标和障碍物对无人机就像均匀电场中的电荷,分别存在着引力和斥力。引力吸引无人机向目标点移动,斥力使无人机避开障碍物。实现无人机由起始点向目标点的安全路径规划。但该算法存在着局部极小值。

在文献[11]中,作者对动态环境下的人工势场法的路径规划做了分析,并结合演化算法得到了一种新的规划算法,实现了传统人工势场法的参数优化,增强了全局可靠性。王宏伦等在文献[12]中则使用流体力学对人工势场法进行改进,从而使得到的路径更加平滑,同时避免了无人机在目标点附近无法到达目标点的问题。Sfeir 等在文献[13]中利用改进的人工势场解决了导航中的观测、振荡以及避障失败问题,使得当无人机靠近障碍物时的振荡和避障失败问题最小化。

为了更好地提高人工势场法的性能,改进其本身存在的问题,学者们提出将改进人工势场法与其它算法混合的混合算法规划路径,如人工势场法和遗传算法的混合算法<sup>[14]</sup>、人工势场法和粒子群算法的混合算法<sup>[15]</sup>。

## 3 智能反应算法

智能反应算法主要包括遗传算法、人工蜂群算法、布谷鸟算法、粒子群优化算法等。与传统算法相比,它们能够更加有效地处理路径规划中的不确

定性。

### 3.1 遗传算法

遗传算法是一种目前流行的基于搜索的算法,最早由 Bremermann 于 1958 年提出,目前,该算法已经在各个领域得到应用。但它涉及到优化困难问题,必须在给定的约束条件下最大或者最小化目标函数。在这种情况下,为给定的问题分配一个种群,并根据目标函数为种群的个体分配适应能力值,种群内的个体根据环境进行选择,并可通过杂交进行基因传递。种群中的变异保证了种群的多样性,避免了算法过早收敛,不能得到最优结果。与局部算法相比,遗传算法能够更好地利用历史信息。

在路径规划的应用上,文献[16]给出了静态环境下的路径规划方法。而在位置环境中,遗传算法只需要很少的先验信息,就可以完成路径规划,文献[17]给出了在未知环境下路径规划的相应方法。在文献[18]中,马云红等人利用极坐标描述威胁位置和航迹点,从而使路径编码降维,提高了整体的计算效率。

### 3.2 布谷鸟算法

布谷鸟算法是由 Yang 和 Deb<sup>[19]</sup> 在 2009 年提出的一种启发式算法,该算法遵循以下原则:1) 每只布谷鸟在随机选择的巢中一次只产一个蛋;2) 最好的巢将会被传到下一代;3) 可用寄主的巢是固定的,布谷鸟产卵的概率为  $pa \in (0, 1)$ 。在这种情况下,寄主要么摆脱卵,要么重新建立一个新的巢穴。

布谷鸟算法作为一个改进算法,提高了原始算法的收敛速度和效率,因此可以应用于无人机路径规划算法中的性能时间优化问题。Mohanty 在文献[20]中提出了轮式机器人在静态环境中的路径规划问题。他们对复杂环境下的路径规划问题进行了仿真和实时实验,结果表明,误差较小,两者吻合较好。Wang 等人在文献[21]中提出了另一种针对三维未知环境的混合路径规划方法,他们将差分法与布谷鸟算法相结合,加快了全局收敛速度。Xie 等人在文献[22]中提出了布谷鸟算法在无人机探索三维环境尤其是战场环境中的应用,并且证明布谷鸟算法可以解决三维空中路径规划

问题,应用差分优化的方法可以对布谷鸟算法进行有效优化。

### 3.3 粒子群优化算法

粒子群算法是一种基于自然现象的启发式算法,采用了鱼群和鸟群等生物的社会行为。该算法由 Eberhart 和 Kennedy<sup>[23]</sup> 于 1995 年提出,是一种快速增长的优化算法,用于解决工程和科学中的各种问题。粒子群优化算法模仿社会动物的行为,但不要求任何领导个体。通过靠近食物的粒子对其它粒子的引导,得到所需要的解决方案。粒子群算法的每一个粒子,都代表着算法中一个可能的解。

目前,粒子群算法被广泛运用于无人机路径规划领域。在文献[24]中,Tang 等人利用多智能粒子滤波器解决了未知环境下定位和路径规划问题。粒子群算法的使用有助于降低计算量,并保持更稳定的收敛特性,避免陷入局部最优。在文献[25]中,刘科等人利用可行网图结构表示已知威胁,在求得的粗略最短路径基础上,利用粒子群算法和最小二乘法拟合求解最优路径。文献[26]中,根据粒子与局部吸引点和可行解边界距离动态的修正粒子更新位置,改善了全局寻优能力和收敛性能,得到更高质量的无人机路径规划。

### 3.4 人工蜂群算法

在文献[27]中,Karaboga 受到蜜蜂的启发,于 2005 年提出人工蜂群算法。蜂群算法遵循以下原则:1) 工蜂提供蜂蜜来源,并评估食物质量;2) 其它工蜂从提供者处得到位置信息和食物质量信息后,选择食物的来源;3) 侦查蜂确定后,并到达可能的食物来源。

文献[28]提出,利用人工蜂群算法在静态环境下的路径规划,首先使用人工蜂群算法进行局部环境探索,而后使用进化算法得到最优路径。无人战斗机的路径规划是在考虑战场威胁和约束的情况下,获得三维环境中的最优飞行路径。Li 等人在文献[29]中使用平衡化策略对人工蜂群算法进行改进,充分利用迭代过程中的收敛信息来控制勘探精度,在局部和全局能力之间寻求平衡。文献[30]中提出了人工蜂群算法在空中导航领域的应用,并且利用无人直升机完成了诸如信息收集、精确测量和边境巡逻等具有挑战性的任务。

## 4 存在的问题和发展建议

### 4.1 存在的问题

目前,国内外对无人机路径规划问题已经进行了大量研究。虽然无人机路径规划算法的方法较多,但依然面临着许多的困难,主要包括无人机在规划路径时建模、单架无人机路径规划效果较好而无人机编队路径规划的协同和平滑处理,以及面临突发威胁时多无人机路径重规划等问题,具体如下:

1) 无人机建模问题。路径规划过程中,多是将无人机作为一个质点,而不考虑无人机的大小、自身搭载的智能设备等问题,使得无人机建模过于抽象和理想,导致无人机在实际执行规划路径时效果差、飞行航线相互交叉等问题成为急需解决的问题。

2) 路径规划算法中,对于无人机自身性能考虑不足。实际中存在的燃油消耗、飞行转角、法向负荷等问题考虑不足,导致仿真能够实现的路径规划在实际环境中无法实现或鲁棒性较差。

3) 单架无人机在路径规划算法下获得路径规划更容易陷入算法本身存在的局部极值,或是局部最优结果中。

4) 在未知环境下的无人机路径规划,经典算法应对突发情况和动态环境时,路径规划策略成功率较低,计算量大,很难完成实时的路径更新。

5) 相较于传统算法,智能反应算法面对动态环境的路径规划,反应更快,但多机协同情况下时,相互间的交流信息多,导致计算量增加,同时容易陷入自身存在的局部最优等问题。

### 4.2 发展建议

基于上述问题分析,针对无人机路径规划算法的发展,提出以下建议:

1) 针对无人机建模,将无人机本身的状态、性能变化作为新的约束条件,使仿真更贴近于实际,也能更好地应用到实际的装备平台,增强实际控制的鲁棒性;

2) 针对路径规划,应充分考虑无人机之间的相互作用和影响,提高规划路径的可行性,解决航线独立性等实际问题;

3) 单架无人机的路径规划算法,可利用智能

算法或虚拟无人机与单机相互作用的方式避免算法本身存在的极值问题,提高单架无人机路径规划的可靠性和稳定性;

4) 未知环境中的路径规划,可采用经典算法和智能算法的混合方式,针对已知障碍物使用经典算法规划,突发障碍物和极小值问题则使用智能算法局部规划的方式来实现整体路径规划,提高系统稳定性;

5) 针对无人机多机协同的路径规划,建议采用混合算法。协同飞行时正常情况下采用经典算法,突发情况和极小值点时采用智能算法;集群内部,正常情况下采用经典算法以降低飞机之间的通信量,遭遇突发情况,则采用智能算法实现避障的混合规划方式,以提高多机协同情况下集群整体路径规划的可行性和系统鲁棒性。

## 5 结束语

随着对无人机路径规划技术研究的深入,在未知动态环境下,如何选择适合的无人机路径规划算法以便有效实现多机路径规划成为亟需解决的问题。针对动态复杂环境中的无人机路径规划算法,尤其是多种算法相互融合的混合算法,将成为未来无人机路径规划算法的研究方向。

## 参考文献

- [1] Peter E, Hart N J N A. A formal basis for the heuristic determination. IEEE Access, 1968
- [2] 李得伟,韩宝明,韩宇. 一种逆向改进型 A\* 路径搜索算法. 系统仿真学报, 2007(22)
- [3] 宋雪倩,胡士强. 基于 Dubins 路径的 A\* 算法的多无人机路径规划. 电光与控制, 2018, 25(11),
- [4] Samaniego F, Sanchis J, García-Nieto S, et al. Recursive rewarding modified adaptive cell decomposition (RR-MACD): a dynamic path planning algorithm for UAVs. Electronics, 2019, 8(3)
- [5] Lupascu M, Hustiu S, Burlacu A, et al. Path planning for autonomous drones using 3D rectangular cuboid decomposition. IEEE, 2019
- [6] Choset H, Burdick J. Sensor-based exploration the hierarchical generalized Voronoi graph. The International Journal of Robotics Research, 2000, 19(2)

- [7] Garrido S ,Moreno L E. Mobile robot path planning using Voronoi diagram and fast marching. *Int J Robot Autom* , 2015
- [8] Bhattacharya P ,Gavrilova M. Roadmap-based path planning-using the Voronoi diagram for a clearance-based shortest path. *IEEE Robotics & Automation Magazine* , 2008 ,15(2)
- [9] Yan F ,Liu Y ,Xiao J. Path planning in complex 3D environments using a probabilistic roadmap method. *International Journal of Automation and Computing*. 2013 ,10(6)
- [10] Brock O ,Khatib O ,Viji S. Task-consistent obstacle avoidance and motion behavior for mobile manipulation. *IEEE* ,2002(1)
- [11] Montiel O ,Orozco-Rosas U ,Sepúlveda R. Path planning for mobile robots using bacterial potential field for avoiding static and dynamic obstacles. *Expert Systems with Applications* ,2015 ,42(12)
- [12] 王宏伦 ,雷玉鹏 ,姚鹏 ,等. 基于流体扰动计算的无人机三维无碰撞航路规划. *控制理论与应用* ,2016 ,33(03)
- [13] Sfeir J ,Saad M ,Saliha-Hassane H. An improved artificial potential field approach to real-time mobile robot path planning in an unknown environment. *IEEE* ,2011
- [14] Rekha Raja A D K S. New potential field method for rough terrain path planning using genetic algorithm for a 6-wheel rover. *Robotics and Autonomous Systems* , 2015 ,72
- [15] Kuo P ,Li T S ,Chen G ,et al. A migrant-inspired path planning algorithm for obstacle run using particle swarm optimization ,potential field navigation ,and fuzzy logic controller. *The Knowledge Engineering Review* ,2017 ,32
- [16] Shibata T ,Fukuda T. Intelligent motion planning by genetic algorithm with fuzzy critic. *IEEE* ,1993
- [17] Xiao J ,Michalewicz Z ,Zhang L ,et al. Adaptive evolutionary planner/navigator for mobile robots. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* ,1997 ,1(1)
- [18] 马云红 ,周德云. 基于遗传算法的无人机航路规划. *电光与控制* ,2005 ,12(5)
- [19] Yang X ,Deb S. Cuckoo search via Lévy flights. *NABIC 2009 ,IEEE World Congress* ,2009
- [20] Prases K ,Mohanty D R P. Optimal path planning for a mobile robot using cuckoo search algorithm. *Experimental & Theoretical Artificial Journal* ,2014 ,28
- [21] Wang G ,Guo L ,Duan H ,et al. A hybrid metaheuristic DE/CS algorithm for UCAV three-Dimension path planning. *The Scientific World Journal* ,2012
- [22] Cong Xie H Z. Application of improved cuckoo search algorithm to path planning unmanned aerial vehicle. *Springer International Publishing Switzerland* , 2016 ,9771
- [23] Eberhart R ,Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory. *IEEE* ,1995
- [24] Tang X ,Li L ,Jiang B. Mobile robot SLAM method based on multi-agent particle swarm optimized particle filter. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications* ,2014 ,21(6)
- [25] 刘科 ,周继强 ,郭小和. 基于改进粒子群算法的无人机路径规划研究. *中北大学学报(自然科学版)* , 2013 ,34(4)
- [26] 郭蕴华 ,王晓宗. 基于改进量子粒子群算法的无人机路径规划. *船海工程* ,2016 ,45(1)
- [27] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. *Technical Report-TR* ,2005(6)
- [28] Contreras-Cruz M A ,Ayala-Ramirez V ,Hernandez-Belmonte U H. Mobile robot path planning using artificial bee colony and evolutionary programming. *Appl Soft Comput* ,2015 ,30
- [29] Li B ,Gong L ,Yang W. An improved artificial bee colony algorithm based on balance-evolution strategy for unmanned combat aerial vehicle path planning. *The Scientific World Journal* ,2014
- [30] Ding L ,Wu H ,Yao Y. Chaotic artificial bee colony algorithm for system identification of a small-scale unmanned helicopter. *International Journal of Aerospace Engineering* ,2015