

应用 D* Lite 算法的目标移动时无人机三维航迹规划

陈侠, 刘冬

(沈阳航空航天大学自动化学院, 沈阳 110136)

摘要: 针对不确定环境下目标移动时的无人飞行器三维航迹规划问题, 采用改进的 D* Lite 搜索算法, 设计了一种三维航迹快速规划方法。利用改进的代价评估函数, 根据突发威胁和移动目标的实时信息, 将航迹规划约束条件和改进的搜索算法相结合, 给出了地面目标移动时的无人飞行器三维航迹规划方法。仿真结果表明, 该算法不但可以满足实时在线的航迹规划要求, 能够有效躲避突发威胁, 打击移动目标, 还能有效地缩小搜索空间, 提高搜索效率及寻优能力, 能较好地解决不确定环境下目标移动时的航迹规划问题。

关键词: 无人飞行器; 移动目标; 不确定环境; 三维航迹规划

中图分类号: V279; TN956 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)07-0001-05

An Improved D* Lite Algorithm Based 3D Path Planning for UAVs When Target is Moving

CHEN Xia, LIU Dong

(School of Automation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: With respect to the problem of 3D path planning of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) under uncertain environments when the target is moving, a method of fast 3D path planning was designed based on the improved D* Lite algorithm. By use of the improved cost evaluating function and the real-time information of unanticipated threats and moving targets, and based on the constraints together with the improved search algorithm, a method of 3D path planning for UAVs was given. The simulation results demonstrated that the algorithm can not only meet the real-time path planning demands, avoid the unanticipated threats and attack the moving targets, but also reduce the search space, improve the search efficiency and optimizing capability, which is a good method for path planning of UAV under uncertain environments.

Key words: unmanned aerial vehicle; moving target; uncertain environment; 3D path planning

0 引言

无人飞行器(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)航迹规划是指利用地形和情报等信息, 在特定的约束条件下, 规划出从起飞点到目标点生存概率最大的一条突防轨迹^[1]。

目前有关传统的航迹规划算法^[2-3]的研究成果已经比较丰富, 而针对目标移动时的航迹规划算法的研究文献还不多见。文献[4]将 LRTA* 算法与飞行器航迹规划特点相结合, 给出了一种多步搜索算法, 提出

了移动目标的飞行器航迹搜索算法, 但该算法需要在一个较大的范围内搜索, 规划时间可能会比较长; 文献[5]提出了一种针对运动目标的快速三维航迹规划方法, 该方法将目标运动与航迹搜索结合起来, 能够对目标的运动做出实时反应, 但生成的航迹很可能不是全局最优航迹。Sun Xiaoxu 等采用 G-FRA*^[6]与 D* Lite 算法^[7]相结合的思想, 在二维空间中给出了移动目标的二维最优路径算法^[8], 但没有考虑无人飞行器的性能约束以及三维航迹规划问题。本文在 Moving Target D* Lite 算法的基础上, 提出一种在不确定环境下针对目标移动时的三维航迹规划算法。仿真结果表明, 该算法能够有效躲避突发威胁, 打击移动目标, 有效缩小搜索空间, 提高搜索效率。

1 规划空间建模

无人飞行器在执行任务时, 除了要考虑地形、地物

收稿日期: 2011-09-01

修回日期: 2013-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(61074159); 航空科学基金资助项目(2008ZC54023)

作者简介: 陈侠(1962—), 女, 辽宁新民人, 博士后, 研究方向为多UCAV 协同任务规划。

信息之外,还要考虑气象、人文以及敌方防空雷达与防空火力等影响^[9]。构建三维航迹规划空间,需要将威胁源数据与地形数据融合成一种综合的地形信息,把威胁源转化为地形障碍来处理,缩小数字地图的存储空间,简化航迹搜索算法。

1.1 威胁源数学模型

本文将威胁源以概率分布形式来表示,介绍几种典型的威胁模型。

针对探测雷达、防空导弹等类型威胁源,采用多变量高斯分布(也是多变量正态分布)模型^[10],表达式为

$$f_{x_i} = \frac{L_{\text{threat}}}{2\pi\sqrt{\det(k_i)}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x_i - \mu_i)^T k_i^{-1} (x_i - \mu_i)\right] \quad (1)$$

式中: $x_i = [x \ y]^T$ 为威胁源坐标; $\mu_i = [\mu_x \ \mu_y]^T$ 为

均值; $k_i = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix}$ 为协方差矩阵,即威胁分布的幅

度; L_{threat} 为威胁值,表示威胁源的威胁强度。

禁飞区可以分为:军事管理区、恶劣天气区、未知威胁区、不可逾越的障碍区等区域,本文采用均匀分布模型,其表达式为

$$g_x = \begin{cases} \frac{L'_{\text{threat}}}{(b-a)(d-c)}, & a \leq x \leq b, c \leq y \leq d \\ 0, & x < a, x > b, y < c, y > d \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x_i = (x, y)$; L'_{threat} 为威胁强度。

图1所示为以上两种典型的威胁源模型, x 轴、 y 轴表示威胁源的位置信息, z 轴为存在威胁源概率。

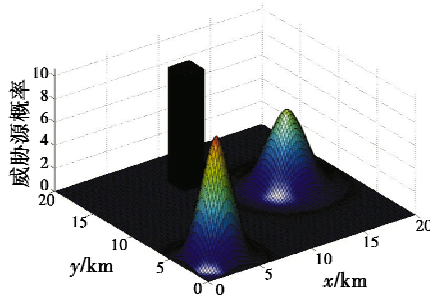


图1 威胁存在的概率地图

Fig.1 The probability map of the existence of the threat

1.2 等效数字地图的建立

采用数字地图融合信息的思想,将战场环境的威胁信息融合到地形、地物信息中,形成一种综合的地形信息^[11-12]。首先要对威胁源进行数学建模,然后将其威胁信息与地形高程信息进行量化统一处理,最后将威胁信息叠加到数字高程地图中,表达式为

$$M(x_i, y_i) = \begin{cases} M_h(x_i, y_i) + M_t(x_i, y_i), & \text{在}(x_i, y_i)\text{处有威胁} \\ M_h(x_i, y_i), & \text{在}(x_i, y_i)\text{处无威胁} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $M(x_i, y_i)$ 表示等效地图的高程; $M_h(x_i, y_i)$ 表示原始初始地形的高程; $M_t(x_i, y_i)$ 表示威胁等效高程。构建等

效数字地图的目的是将战场环境威胁融入到地形威胁中。图2为威胁源的等效数字地图的可视化模型。

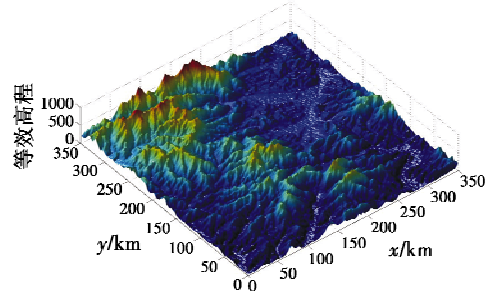


图2 规划空间

Fig.2 Configuration space

2 移动目标的实时航迹规划算法

2.1 节点拓展

采用 MT-D* Lite (Moving Target D* Lite) 算法,对搜索节点进行拓展,在无人飞行器三维航迹中,需要在拓展节点时加入约束条件:航程约束 L_{max} ,最小步长 L_{min} ,最大转弯角 φ_{max} ,最大爬升角/俯冲角 α_{max} ,飞行高度 H_{max} ,指定的目标打击方向 θ_{direct} 等。根据这些约束条件,对搜索节点的拓展进行限制,这样可以在很大程度上缩小拓展空间、降低复杂度、缩短搜索时间。图3为空间节点拓展示意图。

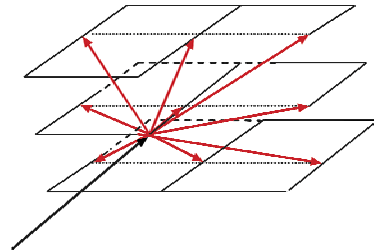


图3 节点拓展

Fig.3 Search space of current node

2.2 改进的代价函数

对于栅格化的规划空间而言,航路点就是三维栅格划分的离散空间节点集,关键在于在这离散节点集中如何寻找到符合约束条件的、航迹代价最小的航路点集合,这是三维航迹规划的核心问题。下面给出无人飞行器的三维航迹代价函数 $c(s, s')$ 。

$$c(s, s') = \omega_1 d(s, s') + \omega_2 H(s, s') + \omega_3 f_i + B_i \quad (4)$$

式中: s 为三维空间的一个节点; s' 为 s 的临节点; $d(s, s')$ 表示两点间的欧式距离; $H(s, s')$ 表示两点间的平均高度; f_i 表示两点间的威胁代价值; ω_i 为权重值,表示在不同代价中的偏好程度; B_i 表示违背约束条件的惩罚函数,其表达式为

$$B_i = \beta_{i_{\text{min}}} \times \delta_{i_{\text{min}}} \times b_{i_{\text{min}}} + \beta_i \times \delta_i \times b_i + \dots + \beta_{\phi} \times \delta_{\phi} \times b_{\phi} + \beta_{i_{\text{max}}} \times \delta_{i_{\text{max}}} \times \delta_{i_{\text{max}}} \times b_{i_{\text{max}}} \quad (5)$$

式中: $b_{l_{\min}} = (l_{\min} - l_i) / l_{\min}$ 为最小步长的惩罚函数; l_i 为第 i 段航迹的长度; $b_i = \sum_{k=1}^n L_k$ 为通过威胁区的惩罚函数, 若 $L_k = 1$, 表示第 k 段航迹通过威胁区, 否则 $L_k = 0$; $b_\phi = \left(\cos \phi - \frac{\sigma_i^T \sigma_{i+1}}{|\sigma_i| |\sigma_{i+1}|} \right) / \cos \phi$ 为最大转弯角惩罚函数, 其中: $\sigma_i = (x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1})^T$, 表示第 i 段航迹的向量, $|\sigma_i|$ 表示 σ_i 的长度; $b_{l_{\max}} = \left(\sum_{i=1}^n l_i - l_{\max} \right) / l_{\max}$, 为最大航程惩罚函数; $\sum_{i=1}^n l_i$ 是总的航迹长度。违背约束因子为

$$\delta_k = \begin{cases} 1, & b_k > 0 \\ 0, & b_k \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $k \in \{l_{\min}, t, \phi, l_{\max}\}$, 违背约束时, $\delta_k = 1$, 反之为零。

2.3 相关函数定义

整体代价评估函数值 $f(s, s_{\text{goal}})$ 可以表示为

$$f(s, s_{\text{goal}}) = g(s) + h(s, s_{\text{goal}}) \quad (7)$$

式中: $g(s)$ 为起始点到一个当前节点 s 的真实代价; $h(s, s_{\text{goal}})$ 为该当前节点 s 到目标点的估计代价, 称为启发函数。

在 MT-D* Lite 算法中, 前瞻值 $r(s)$ 表示节点 s 局部一致性的判别值, 其表达式为

$$r(s) = \begin{cases} \min_{s' \in P(s)} (g(s') + c(s, s')), & s = s_{\text{start}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P(s)$ 为 s 节点的父节点集合; $g(s')$ 为目标点到节点 s' 真实代价。当 $r(s) = g(s)$ 时, 则称 s 点是局部一致的, 反之不一致。

将储存节点信息的 K 值定义为二位向量, 如下所示

$$K(s) = [k_1(s), k_2(s)] \quad (9)$$

式中: $k_1(s) = \min(g(s), r(s)) + h(s, s_{\text{goal}}) + k_m$; $k_2(s) = \min(g(s), r(s))$; $k_m = k_m + c(s_{\text{goal}}, s_{\text{oldgoal}})$, 为偏差代价函数。

2.4 改进的 MT-D* Lite 算法流程

移动目标的三维航迹规划算法主要分为 3 个阶段。首先, 根据战场环境信息和原始地形高程生成等效数字地图, 并规划出一条从飞行器初始位置到目标初始位置的初始最优航迹; 然后, 飞行器沿着初始最优航迹飞行, 在目标点位置发生变化时, 修改局部航迹, 重新生成到达目标点的最优航迹; 最后, 如果有突发威胁出现, 并对无人飞行器造成威胁, 则局部更新威胁信息, 躲避突发威胁, 直到无人飞行器到达目标点。

改进的 MT-D* Lite 算法的基本思想是利用 $g(s)$ 的一阶前瞻值 $r(s)$, 对局部不一致的节点进行节点拓展, 并更新该节点的 $r(s)$ 值, 使得该节点重新具有局部

一致性, 并将其作为算法是否需要继续拓展并更新节点信息的判断标准, 从而可以规划出一条新的代价最小的航迹。

假设开始已经生成一条最优航迹, 从目标点开始移动, 直到搜索到当前目标点位置, 原始目标点与当前目标点间的航迹代价值为 $c(s_{\text{goal}}, s_{\text{oldgoal}})$ 。由于目标点位置发生了变化, 所以需要判断是否继续更新节点信息, 判断条件是当前节点的航迹代价值是否满足如下关系式。

$$\begin{cases} T_K < g(s_{\text{oldgoal}}) + c(s_{\text{goal}}, s_{\text{oldgoal}}) \\ r(s_{\text{goal}}) > g(s_{\text{goal}}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, T_K 为 OPEN 表中的最小值。

当前节点的航迹代价值是由初始航迹代价值和 $c(s_{\text{goal}}, s_{\text{oldgoal}})$ 代价值构成的, 所以它为当前最优航迹的最大代价值, 如果 OPEN 表中的最小值小于这个最大代价值, 则需要继续拓展并更新 OPEN 表中的节点信息, 进一步缩小该最大值的界限, 直至当前目标点重新具有局部一致性, 则停止更新节点信息。具体步骤如下所述。

1) 初始化。对所有节点 $s \in S$, 令 $g(s) = r(s) = \infty$, 设 $r(s_{\text{start}}) = 0$, 设 s_{start} 为无人飞行器的实时位置, s_{goal} 为移动目标的实时位置, 并将 s_{start} 插入 OPEN 表中。

2) 取 OPEN 表中代价判别向量 K 值最小的一个节点 u 进行拓展, 将 u 点进行拓展后从 OPEN 中删除。

3) 若 u 为目标点, 则求得优航迹。然后无人飞行器按照航迹点向目标点 s_{goal} 飞行。若 u 不是目标点, 则计算 $g(u)$ 和 $r(u)$, 如果 $g(u) > r(u)$, 则转向 4), 否则转向 5)。

4) 令 $g(u) = r(u)$, 并对 u 的临界点 $s_n \in S(u)$ 进行拓展, 然后更新临界点代价和后指针信息, 令 $r(s') = \min_{s' \in S(u)} (g(u) + c(s', u))$, $b(s) = u$ 表示 s 点指向 u 节点。

5) 令 $g(u) = \infty$, 然后对 u 的临界点 $s_n \in S(u)$ 进行拓展, 更新临界点 s_n 的父节点 s' 的信息, 令 $r(s_n) = \min_{s' \in P(s_n)} (g(s') + c(s', s_n))$, 若 $r(s) = \infty$, s 节点的后指针为空, 否则指向代价最小的 s' 节点。

6) 更新无人飞行器与目标的当前位置信息。根据实时位置信息及时调整起始点和目标点。若有新威胁出现, 将受到影响的节点做一致性判断, 利用 $insert(u)$ 将局部不一致的节点放入 OPEN 表中进行下一步的拓展, 否则转到 2)。

3 仿真结果分析

本文选取的规划空间为 $35 \text{ km} \times 35 \text{ km}$ 的随机地形, 以步长为 1 km 划分空间。参数选取是: 最大转弯角为 60° ; 最大爬升/俯冲角为 45° ; 最小航迹长度为 1 km ;

最低飞行高度大于等于地形高度 1 km。

为了分析算法的有效性,假设无人机的平均飞行速度为地面移动目标最大移动速度的 5 倍,即无人飞行器飞行 5 段航迹,地面移动目标移动 1 步,并且目标点的移动是离散的,方向是固定的。如果在无人飞行器飞行过程中,有突发威胁出现,无人飞行器可以根据机载探测设备提前做出反应,及时修改局部航迹,躲避威胁区。无人飞行器还可以根据指挥员的作战意图改变航迹代价权重值,即在航程代价与威胁代价之间做出权衡。

在仿真试验中,设定无人飞行器的起始位置(3 km,3 km,200 km),移动目标的起始位置(30 km,21 km,150 km)。其中:圆圈标出的部分为不确定信息表示的威胁作用范围;蓝色线段表示无人飞行器生成的初始航迹;红色线段表示在无人飞行器探测到目标点位置发生变化时重新生成的航迹;紫色五角星为目标移动的轨迹。

情形 1 图 4 和图 5 显示了一组在没有突发威胁的情况下,航程代价与威胁代价的权重取值相同的航迹规划结果,即没有对航程与威胁代价的偏好。图 5 中,Z 轴为威胁信息与地形高程信息进行量化统一处理后的一种代价值,为无量纲单位,情形 2、3 与此相同。

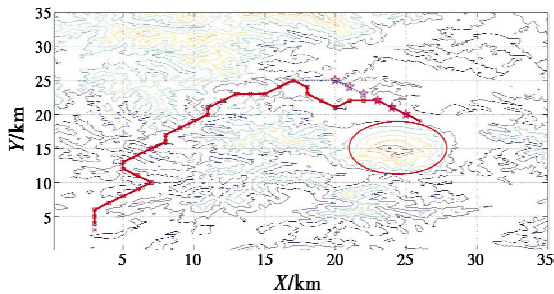


图 4 在情形 1 下航迹规划俯视图

Fig. 4 Top view of the planned trajectory in case 1

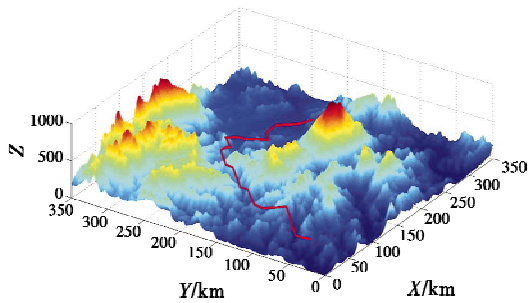


图 5 在情形 1 下的三维航迹显示

Fig. 5 3D view of Trajectory in case 1

情形 2 图 6 和图 7 所示为在有突发威胁出现时,航程代价与威胁代价的权重取值相同的航迹规划结果。

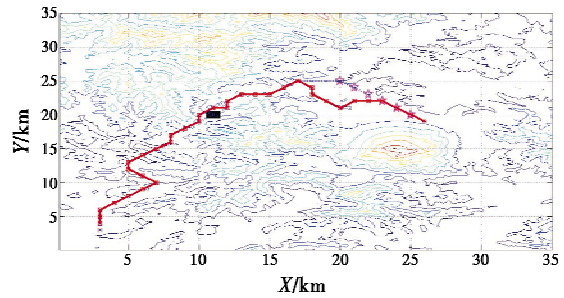


图 6 在情形 2 下航迹规划俯视图

Fig. 6 Top view of the planned trajectory in case 2

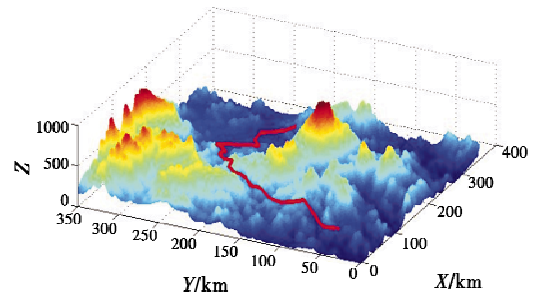


图 7 在情形 2 下的三维航迹显示

Fig. 7 3D view of trajectory in case 2

情形 3 图 8 和图 9 表示了航程代价与威胁代价的权重取值不同情况下的航迹规划,在无人飞行器的航迹规划中降低了威胁对无人飞行器的影响,即威胁代价的权重小于航程代价的权重。代价函数中的权重系数 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别取 0.5,0.3,0.2。

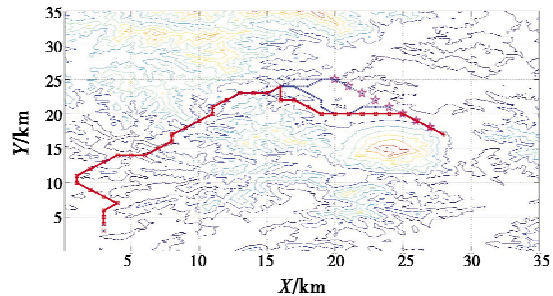


图 8 在情形 3 下航迹规划俯视图

Fig. 8 Top view of the planned trajectory in case 3

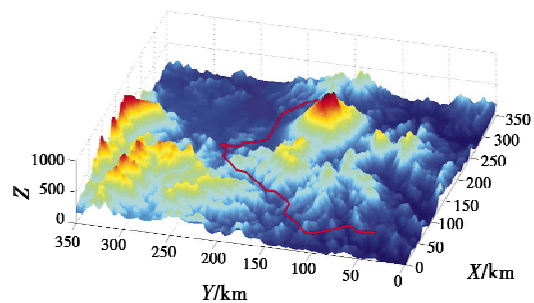


图 9 在情形 3 下的三维航迹显示

Fig. 9 3D view of trajectory in case 3

表 1 分别给出了 3 组对比数据,第 1 组是在没有突发威胁条件下,航程代价与威胁代价权重相等的航迹规

划情况;第2组是在有突发威胁条件下,航程代价与威胁代价权重相等的航迹规划情况;第3组是在没有突发威胁条件下,航程代价与威胁代价权重不等的航迹规划情况,分别对比了3种情况下的航迹代价、航迹长度及规划时间。实践结果表明,在航程代价与威胁代价的权重取值相同的条件下,有突发威胁出现时,算法耗时相对比较多一点,同时航程也有所增长。在航程代价与威胁代价权重不等,且威胁代价的权重大于航程代价权重的情况下,算法耗时相对较长,航迹长度明显增加,航迹规划的整体威胁代价有所降低。

表1 不同情形下的航迹规划数据

Table 1 Trajectory data under different conditions

情形	整体代价	静态威胁等级	航迹长度/km	规划时间/s
1	32.89	5	33.63	1.260069
2	35.27	5	35.09	1.406404
3	28.05	3	38.79	1.674539

表2分别给出了3组对比数据,第1组是郑昌文等人提出的基于MTS算法的三维航迹规划参数与规划时间;第2组数据是在没有突发威胁情况下,且满足航程代价与威胁代价权重相等的条件下,利用改进的MT-D* Lite算法得出的;第3组数据是在有突发威胁,且满足航程代价与威胁代价权重相等的条件下,利用改进的MT-D* Lite算法得出的三维航迹规划参数与规划时间。

表2 不同算法下的航迹规划数据

Table 2 Trajectory data of different algorithm

算法	拓展节点数	规划时间/s
1	405	2.314116
2	275	1.260069
3	286	1.406404

由表2可以看出,基于改进的MT-D* Lite算法规划出来的航迹规划拓展节点更少,规划的时间也更短。

总之,通过对MT-D* Lite算法的改进,在突发威胁的情况下,实现了针对目标移动时的航迹规划寻优问题的在线实时性要求。改进的MT-D* Lite算法不仅能适用于飞行器的三维航迹规划,能够有效躲避突发威胁和打击移动目标,而且规划时间与其他算法相比有所提高。同时,通过改变权重参数,还可以体现决策者的规划意图等。

4 结论

本文在不确定环境条件下,针对目标移动时的无人飞行器动态三维航迹规划问题进行了研究,通过对MT-D* Lite算法的改进,把突发威胁和目标的移动作

为航迹规划的重要信息,对环境的变化做出实时反应,有效躲避突发威胁和打击移动目标。改进的MT-D* Lite算法不仅能适用于飞行器的三维航迹规划,而且在规划时间上有所提高,可以满足航迹规划寻优问题的实时性要求。需要指出的是,不确定环境下,目标移动时的无人飞行器动态三维航迹规划问题是一个新的研究课题,相信还会有其他研究方法出现。

参考文献

- [1] 冯琦,周德云. 军用无人机发展趋势[J]. 电光与控制, 2003,10(1):9-13.
- [2] 任波,于雷,韩李勋. 自适应蚁群算法的无人机航迹规划方法[J]. 电光与控制,2007,14(6):36-39.
- [3] 李锐,刘占辰,荆献勇. 基于启发式算法的无人机三维航迹规划仿真研究[J]. 电光与控制,2009,16(8):27-36.
- [4] 郑昌文,丁明跃,关世义,等. 一种针对运动目标的飞行器航迹搜索算法[J]. 宇航学报,2003,24(5):444-450.
- [5] 周其忠,闫利,关世义,等. 一种针对运动目标的快速航迹规划方法[J]. 系统仿真学报,2007,19(5):987-996.
- [6] SUN X, YEOH W, KOENIG S. Generalized fringe-retrieving A*: Faster moving-target search on state lattices [C]// Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010:1081-1087.
- [7] KOENIG S, LINKHACHEV M. D* Lite [C]// Proceedings of AAAI, 2002:476-483.
- [8] SUN X, YEOH W, KOENIG S. Moving target D* Lite [C]// Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), 2010: 67-74.
- [9] 李春华,郑昌文,周成平,等. 一种三维航迹快速搜索方法[J]. 宇航学报,2002,23(3):12-17.
- [10] DOGAN A, ZENGIN U. Unmanned aerial vehicle dynamic target pursuit by using probabilistic threat exposure map [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2006, 29(4):944-954.
- [11] 张得舒,黄长强,丁达理,等. 基于A*算法的无人机攻击轨迹解算[J]. 电光与控制,2011,18(3):18-20.
- [12] 郝震,张健,朱凡,等. 雷达威胁下的无人机三维航迹规划[J]. 飞行力学,2010,28(1):47-51.