

# 基于博弈论的无人机搜索路径规划

杨少环, 高晓光, 符小卫

(西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710129)

**摘要:** 现阶段的无人机搜索路径规划主要以区域覆盖率以及搜索时间为指标, 缺乏对目标运动行为的综合利用。本文以敌我双方为局中人, 把敌我双方可能的行为作为策略集, 建立博弈论模型, 通过求解 Nash 均衡改进扫描式搜索路径规划算法。仿真表明, 基于博弈模型的规划算法较改进前不仅能够满足对待搜索区域的完全覆盖, 而且提高了无人机的任务完成率, 说明了该算法的有效性。

**关键词:** 无人机; 搜索路径规划; 博弈论; 任务完成率

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.10.22

## Search path planning of unmanned aerial vehicles based on game theory

YANG Shao-huan, GAO XIAO-guang, FU Xiao-wei

(Department of Electronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** The regional coverage and the search time are used as the evaluation index for search path planning of unmanned aerial vehicles (UAV) at present, which leads to the lack of utilization of the target behaviors. A game theory model, which takes both parties in the struggle as the players and uses the behavior of both parties as the strategy set, is established. By solving the Nash equilibrium of the model, the scanning algorithm for the search path planning is improved. Simulation results, which demonstrate that the improved algorithm can not only match the needs to completely cover the search area, but also improve the completion rates of UAV task, illustrate the effectiveness of the algorithm.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; search-path planning; game theory; completion rate

## 0 引言

在任务区域执行目标压制等任务时, 无人机对敌方位置及威胁等级等信息掌握不完全, 需要对目标战区进行覆盖式的搜索。在搜索到目标之前, 无人机一直沿任务规划时设定的搜索路径飞行, 因此在地面进行的搜索路径规划对于提高无人机的搜索效率至关重要。现有的搜索算法<sup>[1-3]</sup>均把目标假定为固定目标, 在搜索指标中只考虑区域覆盖率与搜索耗时。然而, 大多数情况下目标都是有相对运动的, 此时, 传统的搜索算法无法保持较高的目标截获率。

当同一环境中的决策者有利益冲突时, 引入博弈的模型可以得到一个双方最优的决策结果。在路径规划博弈论模型研究方面, 国内外也很多学者开展了研究, 但大多是针对任务主体规避障碍到达终点<sup>[4-8]</sup>或空战决策<sup>[9-13]</sup>等问题, 关于搜索路径规划的研究还未见公开报道。

在搜索任务过程中, 敌方需要完成自己的任务(攻击

我方设施或逃离战区), 而我方无人机则要阻止敌方完成其任务, 敌方通过选取最佳路径来使其完成任务的几率最大, 我方通过改变搜索路径来增大发现敌方的几率。根据以上分析, 可以将敌我双方作为局中人, 敌我双方的运动行为作为策略集, 建立博弈模型对搜索路径规划问题进行研究。

## 1 扫描式搜索路径规划算法

传统的区域搜索以扫描式搜索路径为主<sup>[1-2]</sup>, 如图 1 所示。图 1 中边框为目标区域, 目标区域内为无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)搜索路径, 图示路径的扫描方向 $\theta_U$ 向右, 圆形区域为敌方任务的区域。

在无人机进行区域搜索时, 无人机与目标(target, T)的运动行为分别是: 目标的速率 $v_T$ 与方向 $\theta_T$ 是影响目标下一时刻的主要因素, 而无人机的动向主要由其扫描方向决定, 即在任务装订时确定<sup>[1]</sup>。本文的博弈模型就是基于上述无人机与目标的运动行为所决定的策略集建立的。

收稿日期: 2010-09-13; 修回日期: 2011-01-01。

基金项目: 国家自然科学基金(60774064); 航天支撑基金(2009-HT-XGD)资助课题

作者简介: 杨少环(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机路径规划、复杂系统建模与仿真。E-mail: xibeigongda.100@163.com

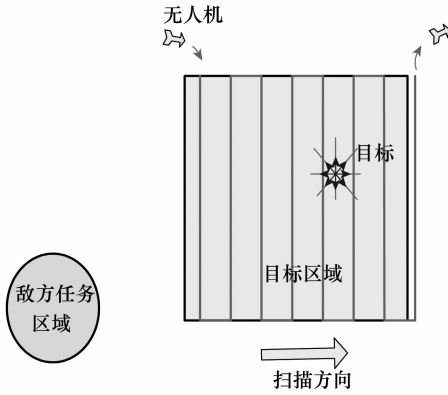


图 1 无人机区域搜索示意图

## 2 基于博弈模型的无人机搜索路径规划算法

### 2.1 无人机搜索路径规划博弈模型

在无人机搜索目标过程中,局中人集<sup>[14-15]</sup>为

$$N = \{U, T\} \quad (1)$$

其中,无人机的状态向量为

$$X_t = (x_U(t), y_U(t), h_U(t))^T \in A_1 \quad (2)$$

式中,  $x_U(t), y_U(t), h_U(t)$  是无人机在  $t$  时刻的位置,  $t \in \{0, 1, 2, \dots\}$ ;  $A_1$  为无人机的状态空间。

目标的状态向量为

$$Y_t = (x_T(t), y_T(t))^T \in A_2 \quad (3)$$

式中,  $x_T(t), y_T(t)$  是目标在  $t$  时刻的位置,  $t \in \{0, 1, 2, \dots\}$ ;  $A_2$  为目标的状态空间。

无人机通过对目标区域的扫描方向  $\theta_U$  的选择决定无人机在下一时刻的位置,即无人机的决策变量为

$$S_U(t) \triangleq (\theta_U(t)) \in B_1 \quad (4)$$

$B_1$  是无人机的决策空间,即

$$B_1 = \{\theta_U \mid \theta_U \in [0, 2\pi)\}$$

目标通过改变其速率的大小  $v_T$  及运动方向  $\theta_T$  来控制下一时刻的位置,即目标的决策变量为

$$S_T(t) \triangleq (v_T(t), \theta_T(t)) \in B_2 \quad (5)$$

式中,  $B_2$  是目标的决策空间,表达式为

$$B_2 = \{(v_T, \theta_T) \mid v_T \in [0, \max v_T], \theta_T \in [\theta_{Tmin}, \theta_{Tmax}]\}$$

其中  $[\theta_{Tmin}, \theta_{Tmax}]$  为目标偏离其任务方向的区间。

状态向量与决策变量之间的关系为

$$X_{t+1} = f(X_t, S_U(t), t) \quad (6)$$

$$Y_{t+1} = f(Y_t, S_T(t), t) \quad (7)$$

无人机期望通过  $(S_U, S_T)$  的选择使得捕获目标的几率  $J_1$  最大,即

$$J_1(S_U, S_T) = \max \quad (8)$$

而目标则期望通过  $(S_U, S_T)$  的选择使得其完成任务(逃逸或攻击我方设施)的几率  $J_2$  最大,即

$$J_2(S_U, S_T) = \max \quad (9)$$

对于上述博弈模型,如果存在

$$S_U^* \triangleq (\theta_U^*), \quad S_T^* \triangleq (v_T^*, \theta_T^*)$$

满足

$$J_1(S_U^*, S_T^*) \geq J_1(S_U, S_T^*), \quad \forall S_U \quad (10)$$

$$J_2(S_U^*, S_T^*) \geq J_2(S_U^*, S_T), \quad \forall S_T \quad (11)$$

则  $(S_U^*, S_T^*)$  为此博弈的 Nash 均衡。

可用迭代法求解上述博弈的 Nash 均衡,但其计算量非常大。由于本文应用的范围是比较具体的实际环境,所以可根据经验及战术仿真结果对我双方的目标函数进行一定范围的预测,从而解出 Nash 均衡,并改进搜索路径规划算法。

### 2.2 基于 Nash 均衡的搜索路径规划

在实际的无人机区域搜索环境下,目标对我方无人机起飞时间以及搜索区域等信息无法完全掌握,并不知道无人机何时处于何处。所以,对目标来说,被无人机发现的概率可看成是一个关于时间的均布函数,目标完成其任务的时间越长,被发现的几率越大。目标执行任务取得最小时,  $J_2$  可取得最大值。如图 2 所示,目标以  $(\max v_T, \theta_{BA})$  为决策行为时满足式(11)。

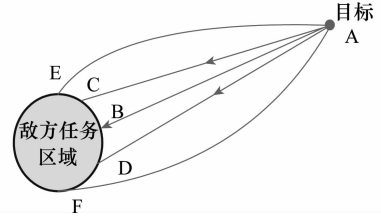


图 2 敌方任务示意图

在搜索目标过程中,敌方速度为  $v_T$ ,无人机在半个扫描周期扫描到的实际面积如图 3 所示。图 3 中区域 A 表示已扫描过的区域;区域 B 表示无人机在半个周期能扫描到的区域;区域 C 表示无效区域; $\theta$  表示无人机扫描方向与目标运动方向的夹角,  $\theta \in (-\pi, \pi]$ 。

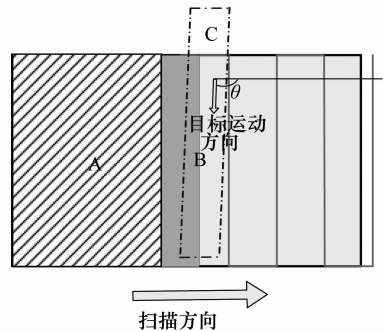


图 3 某时刻无人机在半个扫描周期扫过的实际面积

假定目标在任务区域的概率分布是概率为  $p = 1/s$  的一个均匀分布,  $s$  为目标区域的面积,无人机搜索到目标的期望为

$$E = p \times s_e \quad (12)$$

式中,  $s_e$  为无人机探测到的有效面积。由图 3 可知当目

标运动方向与扫描方向夹角小于  $\pi/2$  时,扫描到的区域会有一部分落入已扫描过的区域 A,产生重复扫描区域,得

$$s_c(|\theta| < \pi/2) < s_c(|\theta| \geq \pi/2) \quad (13)$$

$E_{\max}$  只能在  $\{|\theta| \geq \pi/2, -\pi < \theta \leq \pi\}$  内取到,此时

$$s_c = s_b - s_c = h - v_s t_0 \cos(|\theta| - \pi/2) \quad (14)$$

由式(14)可得,当无人机扫描方向与目标运动方向反向(夹角为  $\pi$ )时,可取得  $E_{\max}$ ,即  $J_1$  最大。

实际中,我方很难得到目标的具体位置,无法计算出其具体运动方向。如图 4 所示,目标在任务区域的概率分布是一个均匀分布。由式(14)得,  $|\theta|$  离  $\pi$  点越近  $J_1$  越大。一般而言,目标区域与敌方任务区域之间的距离远远大于目标区域的边长,  $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$  区间很小,即图 4 中 1、2、3、4、5 角度相差不大,且无人机扫描方向选择  $\vec{MO}$  时,由于过目标区域中心  $O$  点的线可将区域分为两个目标出现期望相等的区域,目标可能的方向与扫描方向的夹角在  $\pi$  点左右的期望最大,此时可取得最大的  $J_1$ ,即当无人机以为决策行为时满足式(10)。

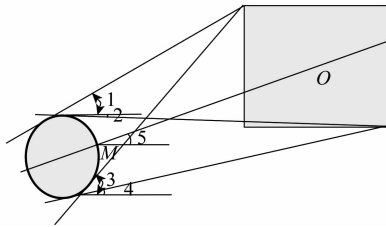


图 4 几何关系图

以上分析可得出博弈模型的 Nash 均衡为

$$S_U^* \triangleq (\theta_{MO}), S_T^* \triangleq (\max v_T, \theta_{BA}) \quad (15)$$

由此可以得到无人机在目标区域内的路径点如图 5 所示,由于已经确定了搜索路径的扫描方向,所以无人机飞入目标区域的进入点为 2 个(见图 5 中 A、B),无人机选取从其起始位置距离最近的进入点飞入目标区域,从进入点开始依次飞过每一个路径点所连成的路径即为无人机的搜索路径,图 5 给出了无人机起始位置距 A 点较近的搜索路径。

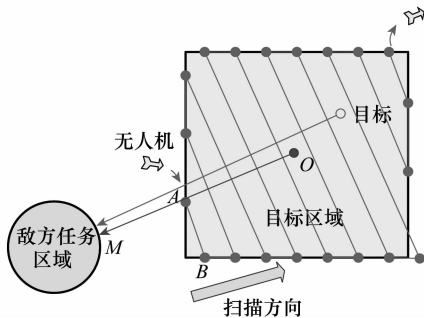


图 5 基于 Nash 均衡的搜索路径

### 3 无人机区域搜索算例

以某海域的货船护航为例,如图 6 所示,货船速度为 15

节,需要穿越直径为 5 海里的高劫持率的圆形区域,此区域的西南方 50 海里处有一个  $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$  的海盗聚集区域,海盗最大船速为 23 节,我方无人机从机场起飞到海盗聚集区域执行搜索护航任务,无人机速度为 108 km/h。由于海盗船的初始位置不确定,在仿真过程中采用蒙特卡罗法对护航事件进行分析,即海盗船以等概率分布随机出现在海盗聚集区域并向预设事故高发区域运动,  $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$  取  $[-30^\circ, 30^\circ]$ ;无人机在机场起飞,并对海盗聚集区域进行搜索,直到发现海盗船或搜索结束。如果发现海盗船,则任务完成;如果没有发现,则任务失败。

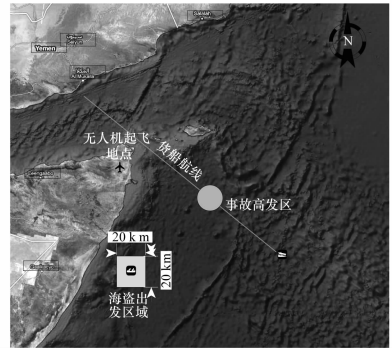


图 6 某海域无人机搜索护航态势图

在对搜索算法进行性能评估时,分别考虑搜索时间  $t$ 、无人机扫过面积与搜索区域面积的比值  $S/s$  ( $s$  表示待搜索的目标区域面积,  $S$  表示无人机搜索过程中导引头扫过的面积)和无人机的任务完成率  $\eta$ 。

$$S = A \cdot t$$

式中,  $A$  为导引头单位时间内扫过的面积。

$$\eta = n/N$$

式中,  $N$  为总仿真实验次数;  $n$  为仿真中无人机成功截获目标的次数。

表 1 是敌我双方分别采用改进前后的搜索算法得出的搜索性能对比,每种情况各仿真 10 000 次。

表 1 搜索性能分析

采用决策方式	$t/s$	$S/m^2$	$(S/s)/\%$	$\eta/\%$
敌我双方均未采用改进决策	5 641.9	507 771 000	126.9	45.15
无人机采用改进决策,目标未采用	6 291.1	566 619 000	141.5	84.65
目标采用改进决策,无人机未采用	5 641.9	507 771 000	126.9	13.97
敌我双方均采用改进决策	6 291.1	566 619 000	141.5	65.63

表 1 中  $S/s$  改进前后都超过了 100%,这是由于无人机为保证在搜索区域内进行直线搜索飞行,不留遗漏区,必须在搜索区域外进行转弯。

从表 1 可以看出,改进后的搜索算法搜索时间较改进前增加了 11%;改进前后的算法都能够将目标区域完全覆

盖;改进前的搜索算法在目标采用最优决策时任务完成率仅为 13.97%,采用改进后的算法可以将任务完成率提高到 65.63%。特别的,当目标不采用最优决策时,无人机的任务完成率可达到 84.65%。

从以上分析可知,改进后的算法可以通过损失较小的时耗来显著的提高任务完成率。

## 4 结束语

本文提出了一种基于博弈论的无人机搜索路径规划算法,该算法能够在目标有机动行为时对我双方的行为进行充分利用,从而不仅使规划出的路径能够完全覆盖待搜索区域,而且将无人机完成对目标搜索的几率提高了 5 倍。如果在考虑目标策略集时进一步加入威胁联网等因素,可以得到在复杂情况下对目标区域的搜索路径算法。

## 参考文献:

- [1] 沈延航,周洲,王雪. 攻击型无人机巡弋搜索航路优化设计与仿真[J]. 火力与指挥控制, 2006,31(7):43-45. (Shen Y H, Zhou Z, Wang X. The loiter trajectory optimization and simulation of the attack UAV[J]. *Fire Control and Command Control*, 2006,31(7):43-45.)
- [2] 彭辉,沈林成,霍霄华. 多 UAV 协同区域覆盖搜索研究[J]. 系统仿真学报,2007,19(11):2472-2476. (Peng H, Shen L C, Huo X H. Research on multiple UAV cooperative area coverage searching[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(11): 2472-2476.)
- [3] 周延安,梅刚. 反辐射无人机搜索路径规划研究[J]. 舰船电子对抗,2006,29(5):8-10. (Zhou Y A, Mei G. Research on search path layout of anti radiation UAV[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2006,29(5):8-10.)
- [4] Arsie A, Savla K, Frazzoli E. Efficient routing algorithms for multiple vehicles with no explicit communications[J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2009,54(10):2302-2317.
- [5] 叶晔,岑豫皖,谢能刚. 基于博弈论的多移动机器人聚集任务路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2009,45(6):216-218. (Ye Y, Cen Y W, Xie N G. Path planning of flocking task for multiple mobile robots based on game theory[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009,45(6):216-218.)
- [6] Sheng W H, Yang Q Y, Tan J D, et al. Distributed multi-robot coordination in area exploration[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2006,12(54):945-955.
- [7] Amigoni F, Gatti N, Ippedico A. A game-theoretic approach to determining efficient patrolling strategies for mobile robots[C]// *Proc. of the International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*, 2008:500-503.
- [8] Pavone M, Savla K, Frazzoli E. Sharing the load: mobile robotic networks in dynamic environments[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2009,16(2):52-61.
- [9] 付超,杨善林. 基于博弈论的多无人机协同作战仿真系统[J]. 系统仿真学报,2009,21(9):2591-2594. (Fu C, Yang S L. Multi-UAV cooperative fight simulation system based on game theory[J]. *Journal of System Simulation*, 2009,21(9):2591-2594.)
- [10] Shen D, Chen G S, Cruz J B, et al. Game-theoretic modeling and control of military air operations with retaliatory civilians[C]// *Proc. of the IEEE Aerospace Conference*, 2010:1-10.
- [11] Zhang L, Li P F. Study on air formation to ground attack-defends decision making in duple-fuzzy condition[C]// *Proc. of the 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology*, 2010:698-702.
- [12] Chen H M, Shen D, Chen G S, et al. Tracking evasive objects via a search allocation game[C]// *Proc. of the American Control Conference*, 2010:6981-6986.
- [13] Bhattacharya S, Basar T. Game-theoretic analysis of an aerial jamming attack on a UAV communication network[C]// *Proc. of the American Control Conference*, 2010:818-823.
- [14] Liang X N, Xiao Y. Studying bio-inspired coalition formation of robots for detecting intrusions using game theory[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, 2010,40(3):683-693.
- [15] 侯定丕. 博弈论导论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2004, 2:185-188. (Hou D P. *Introduction to game theory*[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2004:185-188.)