

基于稀疏A*搜索和改进人工势场的无人机动态航迹规划

姚 远^{1,2}, 周兴社^{1,2}, 张凯龙^{1,2}, 董 冬³

(1. 西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072; 2. 陕西省嵌入式系统重点实验室, 陕西 西安 710072;

3. 韩国中央大学 普适计算实验室, 韩国 首尔 156-756)

摘要: 针对不同属性的障碍物所构成的威胁分布模型, 本文提出了一种基于稀疏A*搜索算法预规划和改进人工势场相结合的无人机动态避障算法. 该算法首先对威胁分布建立栅格化模型; 然后根据静态威胁, 基于稀疏A*搜索算法进行全局航迹规划; 最后结合预规划路径和动态威胁分布, 利用改进人工势场法完成无人机的动态避障. 仿真结果表明, 该方法能够规划出给定威胁指标下的全局最优路径并达到良好的动态规避性能.

关键词: 稀疏A*搜索; 航迹规划; 人工势场; 动态避障

中图分类号: V249 **文献标识码:** A

Dynamic trajectory planning for unmanned aerial vehicle based on sparse A* search and improved artificial potential field

YAO Yuan^{1,2}, ZHOU Xing-she^{1,2}, ZHANG Kai-long^{1,2}, DONG Dong³

(1. School of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Embedded System Technology, Xi'an Shaanxi 710072, China;

3. Ubiquitous Computing Lab, Computer engineering of Chung-Ang UNIV, Seoul S.Korea 156-756, Korea)

Abstract: Based on the sparse A* search algorithm for path planning and the improved artificial potential field, we propose a method of dynamic trajectory planning for unmanned aerial vehicle(UAV) in the threat model composed of obstacles with different attributes. This method first builds a grid model of the threat distribution; and then, it makes the global path planning by sparse A* search algorithm according to the static obstacles; Finally, combining the pre-determined route and the dynamic obstacles, UAV can accomplish the dynamic trajectory planning by using the improved artificial potential field. Simulation results indicate that the proposed method can find a global optimal path with the given risk index and achieve a good performance of dynamic obstacle avoidance.

Key words: sparse A* search; trajectory planning; artificial potential field; dynamic obstacle avoidance

1 引言(Introduction)

航迹规划是根据地形、天气和威胁等信息, 寻找飞行器从起始点到目标点之间最优运行轨迹的新一代低空突防技术^[1]. 随着各国军事力量的发展, 现代战争形势的复杂性也逐渐增强, 传统的航迹规划算法已不能满足高复杂度战场环境的需求. 目前, 动态航迹规划已成为提高飞行器环境适应性和生存能力的重要方法, 该方法通过实时接收和分析威胁数据, 自适应的改变预先规划的航迹, 能有效降低飞行器受机动威胁攻击的几率^[2]. 但由于外界环境因素的不确定性, 动态航迹规划的效果是无法预估的. 在分析两种方法特点的基础上, 本文提出了航迹预规划和动态避障相结合的动态航迹规划.

从几何学角度, 解决航迹预规划问题的方法主

要分为图论方法和栅格算法两种, 如基于图论的Vornoi图法^[3]、PRM算法^[4], 以及基于栅格的A*算法与动态规划算法^[5]等. 考虑到实时性要求, 本文选择了稀疏A*搜索算法.

在预规划的基础上, 要完成动态环境中对机动威胁的规避, 还需要结合动态避障算法, 如滚动路径规划法^[6]、STENTZ A的D*算法^[7]、遗传算法或人工势场法等. 其中, 人工势场法以其快捷的环境描述形式在动态避障和运动规划中得到了广泛应用. 人工势场法由Khatib于1986年提出^[8], 它是对运动环境的一种抽象描述, 其基本思想是构造由目标点引力和障碍物的斥力共同作用的人工势场, 搜索势函数梯度下降的方向来寻找无碰撞路径.

考虑到传统的人工势场没有一个对规划路线的

评价指标以及容易出现局部极小等自身缺陷, 本文对其进行进一步优化, 并最终采用基于稀疏A*搜索和改进人工势场相结合的方法. 首先, 在给定威胁指标下进行基于稀疏A*搜索的航迹预规划, 然后构造改进人工势场, 在预定航点的引导下完成无人机动态避障. 实验结果表明, 本文提出的算法能满足复杂环境下的实时性要求并达到良好的动态航迹规划效果.

2 威胁模型(Threat model)

2.1 基本假设(Basic assumptions)

假设 1 无人机处于定高、恒速飞行状态, 可将航迹规划简化为2维平面内的路径规划问题;

假设 2 静态威胁包括高炮、导弹、雷达等威胁, 均以圆形区域来描述. 除雷达监测威胁外, 其余威胁在圆形区域内按统一的威胁等级来度量, 雷达监测威胁满足方程(1):

$$P = \frac{P_t G A_e \sigma}{4\pi^2 R^4}, \quad (1)$$

其中: P 为雷达接受的回波功率, P_t 是雷达的发射功率, G 是发射天线增益, A_e 是天线接收有效面积, σ 是雷达截面积, R 是目标距雷达中心的距离;

假设 3 航迹预规划只考虑已知静态威胁. 动态威胁按一定运动规律运行, 可被实时检测到.

2.2 威胁等级(Threat level)

根据各种威胁对无人机的威胁程度不同, 将威胁划分为5个等级, 每个等级对应不同的威胁度^[9], 威胁等级和威胁度(T_d)如表1所示.

表1 威胁等级与威胁度
Table 1 Threat level and threat degree

威胁类型	威胁等级	威胁度
小口径高炮群	1	16
大口径高炮群	2	25
便携式防空导弹群	3	36
地空导弹群, 雷达探测	4	49
不可穿越	5	100

当环境中某点同时受 n 个威胁影响时, 该点的威胁度取威胁等级最高的威胁障碍物的威胁度值.

2.3 栅格化威胁模型(Grid threat model)

栅格法也被称为单元分解建模, 其主要思想是将环境离散化为规则的基本单元—2维或3维的栅格, 通过对栅格的描述实现环境的系统建模.

栅格化威胁模型如图1所示, 黑格代表威胁空间, 白格代表自由空间. 每个方形栅格都有一个表征值CV, 代表该格的威胁度. 对于雷达威胁以外的威胁, 在圆形区域内CV值按照威胁等级对应的威胁度取值, 对于雷达威胁, 其CV值按照方程(1)的规律由中心向相邻的8个方向逐渐衰减. 多个威胁重叠时,

栅格的CV值取最高等级威胁的威胁度.

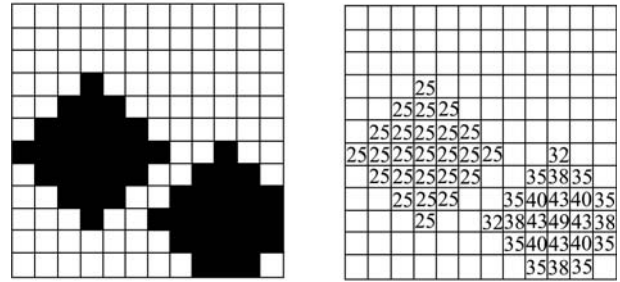


图1 栅格化威胁模型及CV赋值

Fig. 1 Grid threat model and CV assignment

3 基于稀疏A*搜索的航迹预规划(Sparse A* based trajectory pre-planning)

3.1 稀疏A*搜索的约束条件(Constraint condition of sparse A* search)

A*算法^[10]是一种启发式搜索算法, 它在搜索过程中引入启发信息, 对周围每一个搜索位置进行评估, 选取最好的位置进行下一步搜索, 直到达到目标为止. A*算法采用的评价函数 $f(n)$ 对结点 n 进行评估, 其形式如式(2)所示:

$$f(n) = g(n) + h(n). \quad (2)$$

其中: $g(n)$ 是状态空间中从初始结点到结点 n 的实际代价, $h(n)$ 是从结点 n 到目标结点最佳路径的估价, 也就是启发信息. 稀疏A*搜索算法由Szczerba于2000年提出^[11], 该算法通过把约束条件加入到搜索中, 能有效地裁剪掉搜索空间中的无效结点, 从而大大缩短搜索时间. 本文主要考虑两种约束, 即最小转弯半径和最大航程约束. 下面详细介绍如何将约束条件应用到搜索过程中去:

1) 最小转弯半径约束.

转弯半径 R_i 如图2所示. 其中 A_{i-1} , A_i 和 A_{i+1} 是搜索过程中产生的3个连续结点, 则 A_{i+1} 能被扩展的约束条件是式(3):

$$R_i < r_{\min}, \quad (3)$$

其中 $r_{\min}$ 是无人机的最小转弯半径.

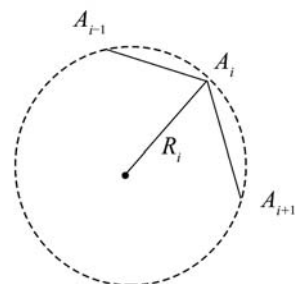


图2 转弯半径示意图

Fig. 2 Turning radius

2) 最大航程约束.

总航程如图3所示.

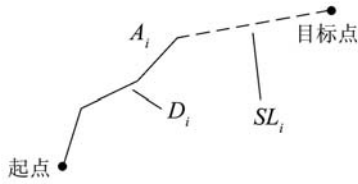


图3 总航程示意图

Fig. 3 Total distance

图中: A_i 是当前考虑的搜索结点, D_i 是从起点到 A_i 的实际航程, SL_i 为从 A_i 到目标点的直线距离, 这个直线距离要小于等于实际规划路径. 则 A_i 可以被扩展的约束条件如式(4), $d_{\max}$ 是无人机的最大航程:

$$D_i + SL_i < d_{\max}. \quad (4)$$

3.2 航迹规划评价函数(Evaluation function of trajectory planning)

从动力消耗和威胁代价两点综合考虑, 建立航迹规划评价函数如下:

$$f(n) = (1 - \tau)c(n) + \tau t(n) + h(n), \quad (5)$$

其中: $c(n)$ 为从起始点到当前结点 n 的动力消耗, 考虑无人机定高、恒速飞行, 机动作相对较少, 因此动力消耗仅与航迹长度相关, 本文中就以航迹长度来表示动力消耗. $t(n)$ 是威胁代价, 即航迹经过的所有栅格的威胁度总和. $h(n)$ 是启发信息, 本文中用当前栅格到目标点的距离来计算. 定义威胁指标 $\tau \in [0, 1]$, 用来调整动力消耗与威胁代价的权重, 需要在预规划前设定. τ 越接近0, 搜索过程中对威胁的敏感度越弱. 当 $\tau = 0$ 时, 该函数形式就是传统的A*算法评价函数. 当 $\tau \geq 0.9$ 时, 用式(6)将威胁的半径适当增大, 使得规划航迹能够远离静态威胁:

$$R = R[\exp(\tau - 0.1) - 0.4]. \quad (6)$$

3.3 稀疏A*搜索算法(Sparse A* search)

基于稀疏A*搜索算法的具体步骤如下:

Step 1 将起始点插入OPEN表, 将CLOSED表置空;

Step 2 如果OPEN表为空, 算法以搜索失败结束. 调整算法参数重新规划;

Step 3 从OPEN表中选择代价最小的元素作为当前节点, 将它放入CLOSED表中;

Step 4 如果当前节点即是目标点, 则航迹搜索过程结束. 从目标点开始向上回溯直到起始位置, 得到从起始到目标的最小代价路径;

Step 5 对当前结点相邻的8个结点进行判断, 如满足最小转弯半径约束和最大航程约束, 则将其作为一个可扩展结点计算其评价函数值 f , 否则舍弃. 对于选择的可扩展结点: a) 如果该结点不在OPEN表和CLOSED表中, 则添加到OPEN表中, 并将它的父节点指针指向当前节点; b) 如果该结点已在OPEN表中, 则比较其评价函数值 f 与该结点在OPEN表中的原评价函数值 f , 如果较小, 则记录新的 f 值并将它的父节点指针指向当前节点; c) 如果该结点在CLOSED表中, 则跳过它继续扩展其他结点;

Step 6 转Step 3, 继续循环, 直到找到解或无解退出.

4 改进人工势场法(Improved artificial potential field)

4.1 传统人工势场法(Traditional artificial potential field)

传统人工势场法在文献[8]中提出, 通过构造虚拟的引力场和斥力场, 来寻找一个无碰撞路径. 设 q 为处于2维搜索空间中的一点, 则该点的引力势函数和斥力势函数分别定义为

$$U_{\text{att}}(q) = \frac{1}{2}k\rho_G^2(q), \quad (7)$$

$$U_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}m[\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}]^2, & \rho(q) \leq \rho_0; \\ 0, & \rho(q) > \rho_0. \end{cases} \quad (8)$$

$\rho_G(q)$ 和 $\rho(q)$ 是 q 到目标点和威胁的距离, k 和 m 是引力增益和斥力增益, ρ_0 是威胁最大影响距离.

q 点受到 q_G 点的吸引力和威胁点的斥力为该点势函数的负梯度:

$$F_{\text{att}}(q) = -k\rho_t(q), \quad (9)$$

$$F_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} m[\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}]\frac{1}{\rho(q)^2}, & \rho(q) \leq \rho_0; \\ 0, & \rho(q) > \rho_0. \end{cases} \quad (10)$$

传统人工势场法对于只存在静态威胁的环境能够快速规划出一条无碰撞路径, 但对于存在动态威胁的空间规划效果就减弱了. 而且由于存在引力和斥力相等的局部极小点, 该方法还有可能引起目标不可达而导致规划失败. 本文通过引进相对速度斥力势场和斥力常数模糊控制器来解决这两个问题.

4.2 相对速度斥力势场(Relative velocity repulsive force potential field)

为了完成无人机的动态避障, 本文引入了相对

速度斥力势场(RVRFPF)^[12], 定义 t 时刻无人机与威胁的相对速度 $v_{OU}(t)$ 和状态判断值 $P(t)$ 如式(11), 其中 $q_{OU}(t)$ 表示从无人机指向威胁的相对位置矢量. $P(t) < 0$ 表示无人机正接近威胁, $P(t)$ 绝对值越大则接近速度越快; 相反, 无人机正远离威胁.

$$\begin{cases} v_{OU}(t) = V_O(t) - V_U(t), \\ P(t) = v_{OU}(t)q_{OU}^T(t). \end{cases} \quad (11)$$

定义相对速度斥力势场函数为

$$U_{\text{repv}}(q) = \begin{cases} mv_{OU}(t)|\sin \theta|, & P_{OU}(t) \leq 0, \rho(q) \leq \rho_0; \\ 0, & P_{OU}(t) > 0 \text{ 或 } \rho(q) > \rho_0. \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\theta \in (-\pi, \pi)$ 为相对速度矢量与相对位置矢量的夹角, 如图4所示.

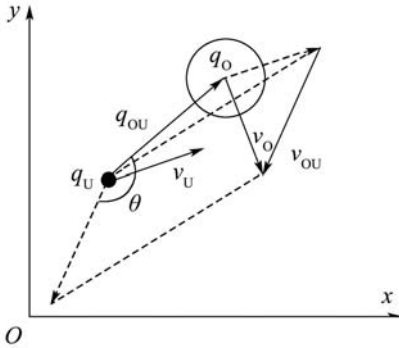


图4 相对速度矢量和相对位置矢量

Fig. 4 Relative velocity vector and relative position vector

相对速度斥力势场所产生的斥力是势函数对位置的偏微分.

设无人机与威胁的相对位置表示为 $(\Delta X, \Delta Y)$, 则式(12)可以转化为

$$U_{\text{repv}}(q) = mv_{OU}(t) \frac{|\Delta Y|}{\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}}. \quad (13)$$

相对速度斥力可以用下式计算:

$$F_{\text{repv}}(q) = \begin{cases} Aq(\theta), & \theta \geq 0; \\ -Aq(\theta), & \theta \leq 0. \end{cases} \quad (14)$$

其中:

$$A = \frac{mv_{OU}(t)}{\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}}, \quad q(\theta) = \cos \theta (-\sin \theta, \cos \theta).$$

引入相对速度势场后的无人机在人工势场中受到的总斥力为

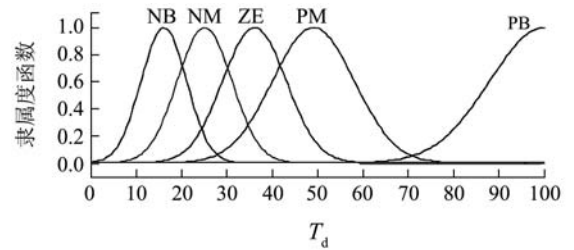
$$F_{\Sigma \text{ repv}}(q) = \sum_{i=1}^N [F_{\text{repvi}}(q) + F_{\text{repi}}(q)], \quad (15)$$

其中: $F_{\text{repi}}(q)$ 用式(10)计算, N 是所有静态威胁和动态威胁的数量总和.

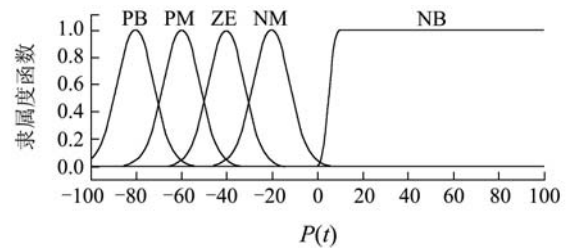
4.3 斥力增益模糊控制器(Repulsive force gain fuzzy controller)

传统人工势场法中容易出现局部极小值点, 因为对于一个确定的引力场和斥力场, 引力和斥力相等的位置是存在的. 为了避免局部极小值所造成的振荡和目标不可达等问题, 本文设计了斥力增益模糊控制器(RFGFC). 通过障碍物的威胁度 T_d 和状态判断值 $P(t)$ 来控制斥力增益, 使无人机处于一个动态的模糊势场中, 能有效的避免局部极小值.

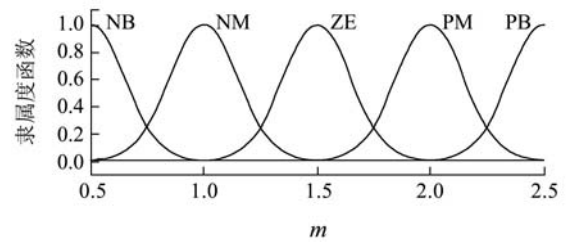
该控制器有两个输入, 威胁度 $T_d \in [0, 100]$ 和状态判断值 $P(t) \in [-100, 100]$. 一个输出, 斥力增益 $m \in [0.5, 2.5]$. 模糊论域均划分为5个等级: PB, PM, ZE, NM, NB. 隶属度函数如图5所示.



(a) 威胁度隶属度函数



(b) 状态判断值隶属度函数



(c) 斥力增益值隶属度函数

图5 输入输出隶属度函数

Fig. 5 Membership function of input/output

根据威胁度越大斥力越大, 接近威胁越快斥力越大的原则, 设计如表2所示的模糊规则.

表2 模糊规则表
Table 2 Fuzzy rules

$P(t)$	T_d				
	PB	PM	ZE	NM	NB
PB	PB	PB	PM	ZE	NM
PM	PB	PM	ZE	NM	NM
ZE	PM	ZE	NM	NM	NB
NM	ZE	NM	NM	NB	NB
NB	NM	NM	NB	NB	NB

斥力增益模糊控制器输入输出曲面如图6所示。

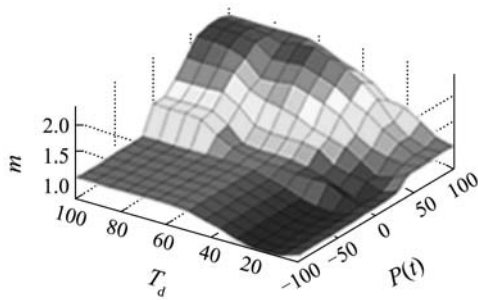


图6 斥力增益模糊控制器输入输出曲面

Fig. 6 Input/output surface of RFGFC

4.4 基于预规划引导的改进人工势场法(Pre-planning based improved artificial potential field)

由于人工势场法采用构造虚拟引力场和斥力场的方式来寻找避障路径, 并不需要建立搜索状态空间, 所以没有一个指标来衡量规划路径的优劣. 因此, 本文通过在预规划航迹中设定中间目标点来引导无人机在动态避障的同时尽量贴近预规划航迹飞行. 这样预规划航迹的评价函数值就能够近似的描述人工势场法在实际避障过程中产生路径的代价. 同时, 将威胁指标 τ 也引入到斥力常数模糊控制器中, 把其中一个输入 T_d 改为 $\tau^2 T_d$. 这样, 人工势场法也能根据不同的威胁指标来完成动态避障过程.

中间目标点添加过程如下:

1) 计算航迹总威胁影响 J_{Threat} . 其中: nq 为航迹点总数, $Q_{\text{Threat}i}$ 为预规划航迹中点 q 的总威胁影响, Q_j 是第 j 个威胁对点 q 的威胁影响, N 为静态威胁个数, r 是威胁半径, P 采用式(1)计算:

$$J_{\text{Threat}} = \sum_{i=1}^{nq} Q_{\text{Threat}i}, \quad (16)$$

$$Q_{\text{Threat}} = \sum_{i=1}^{nq} Q_j, \quad (17)$$

$$Q_j = \begin{cases} T_d, & \rho(p) \leq r, \\ P, & r < \rho(p) \leq \rho_0, \\ 0, & \rho(p) > \rho_0. \end{cases} \quad (18)$$

2) 遍历所有航迹点, 将航迹划分为 M 段威胁影响相同的子航迹. 一般取 $M = N \sim 1.5N$;

3) 计算子航迹的威胁分布密度 H , 根据每段子航迹的威胁分布密度来添加中间目标点. 中间目标点为子航迹的 K 等分点, K 取 $0.1H + 1$. H 用式(19)计算, 其中 sq 是子航迹起点, eq 是子航迹终点. 在威胁半径内的中间目标点要被删除:

$$H = \frac{\sum_{i=sq}^{eq} Q_{\text{Threat}i}}{eq - sq}, \quad (19)$$

采用中间目标点来引导人工势场法, 在某些情况下也可以消除局部极小值的影响, 如图7所示.

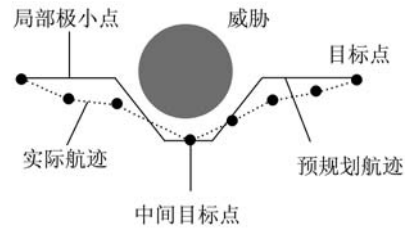


图7 基于预规划航迹引导的人工势场法

Fig. 7 Pre-planning based improved artificial potential field

图中实线表示预规划航迹, 虚线表示实际航迹, 如果仅考虑目标点的引力场和威胁的斥力场, 那么无人机会陷入局部极小点而导致目标不可达. 加入中间目标点后, 无人机先由中间目标点产生的引力场引导, 在绕过局部极小点到达中间目标后, 再由最终目标点产生引力场, 使其顺利达到终点.

5 算法结果与仿真(Simulation and result)

结合所提出的方法, 设计了一个模拟演示系统来验证算法的有效性. 模拟显示区域为600像素 $\times$ 480像素, 相邻像素对应实际距离为200 m, 实际规划范围是120 km $\times$ 96 km. 圆形区域表示静态威胁, 小圆点表示动态威胁. 本文中的动态威胁的威胁度统一定义为4级. 这里描述的显示区域见图8、图9.

5.1 基于稀疏A*搜索算法的航迹预规划仿真(Simulation of sparse A* based trajectory pre-planning)

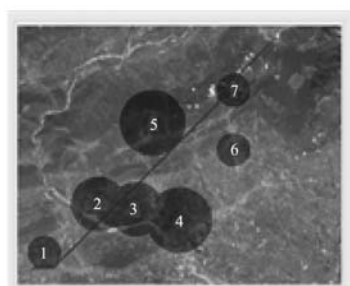
在使用稀疏A*算法进行航迹预规划时只考虑已知静态威胁, 在120 km $\times$ 96 km的范围内7个静态威胁坐标、半径和威胁度如表3所示.

表3 静态威胁属性表
Table 3 Property of static threat

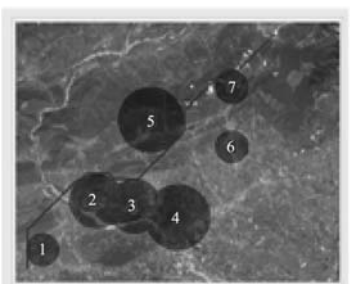
编号	坐标	影响半径	威胁等级
1	(50,60)	30	4
2	(150,150)	50	3
3	(220,140)	40	4
4	(300,120)	60	5
5	(250,300)	60	5
6	(400,250)	30	1
7	(400,360)	30	2

设起始坐标为(20, 20), 目标坐标为(480, 460), 分别取 $\tau = 0.1, \tau = 0.5, \tau = 0.9$ 进行航迹预规划. 考虑所有的静态威胁, 其中威胁2,3和4区域有重叠.

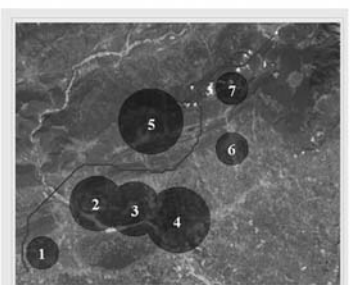
比较图8(a)(b)和(c), 在不同 τ 取值下, 规划航迹明显不同. τ 越大, 规划航迹越侧重于威胁代价而轻视动力消耗. 3种情况对应的动力消耗和威胁代价分别为: 1290/709, 1426/86, 1620/0.



(a) $\tau = 0.1$ 时的预规划航迹



(b) $\tau = 0.5$ 时的预规划航迹



(c) $\tau = 0.9$ 时的预规划航迹

图8 不同 τ 值的稀疏A*搜索算法航迹预规划
Fig. 8 Sparse A* based trajectory pre-planning with different τ values

5.2 基于预规划引导的改进人工势场法仿真 (Simulation of pre-planning based improved artificial potential field)

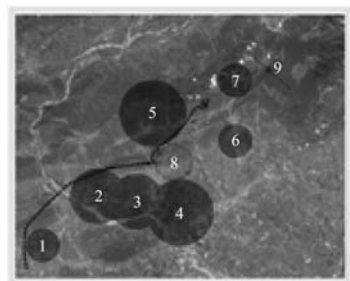
在120 km×96 km的规划范围内, 加入2个动态威胁, 其属性如表4所示.

表4 动态威胁属性表
Table 4 Property of dynamic threat

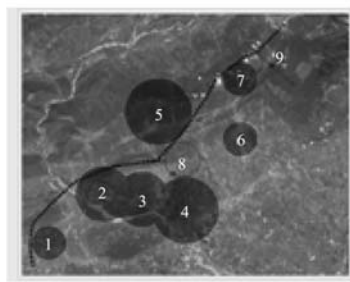
编号	坐标	影响半径	威胁等级	运行轨迹
8	(240,200)	5	4	圆周运动
9	(440,400)	5	4	直线运动

在加入动态威胁后, 需要使用改进的人工势场法来进行动态避障. 基于预规划航迹引导的改进人工势场仿真结果如图9所示, 其中虚线表示无人机的实际运行轨迹.

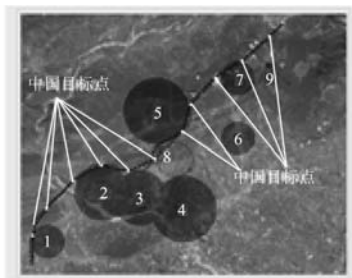
首先, 从图9(a)中, 可以看到引入速度斥力场后的动态避障的有效性和缺陷. 无人机顺利的避过第1个动态威胁后, 却在点(340,370)附近陷入局部极小值而无法达到最终目标. 加入斥力系数模糊控制器之后, 避障结果如图9(b)所示. 无人机摆脱了局部极小值, 成功到达目标点. 最后, 在斥力常数模糊控制器输入中加入威胁指标并通过计算出的中间目标点来引导无人机进行动态避障. 如图9(c)所示, 预规划航迹上的白点即为中间目标点. 在中间目标点的引导下, 改进人工势场法动态规划的路径基本接近预规划航迹, 而且仍然能够有效完成动态避障.



(a) 引入相对速度斥力势场



(b) 引入斥力增益模糊控制器



(c) 基于预规划航迹引导

图9 基于预规划航迹引导的改进人工势场仿真

Fig. 9 Simulation of pre-planning based dynamic obstacle avoiding

6 结论(Conclusion)

本文将稀疏A*搜索算法和人工势场法结合起来,运用到无人机动态航迹规划中。首先,通过稀疏A*算法寻找给定威胁指标下的全局最优航迹,然后构造引入了速度斥力场和斥力常数模糊控制器的改进人工势场在预规划航迹的引导下完成动态避障,并设计了模拟演示系统。仿真结果表明,本文提出的算法能够达到良好的动态航迹规划效果。

参考文献(References):

- [1] 杜萍, 杨春. 飞行器航迹规划算法综述[J]. 飞行力学, 2005, 23(2): 10 – 14.
(DU Ping, YANG Chun. Introduction of air vehicle path planning algorithms[J]. *Flight Dynamics*, 2005, 23(2): 10 – 14.)
- [2] BLACKMAN S, POPOLI R. *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*[M]. London, Britain: Artech House, 1999.
- [3] BEARD RANDAL W, MCLAIN TIMOTHY W. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(6): 911 – 922.
- [4] OVERMARS M. *A random approach to path planning*[R]. The Netherlands: Utrecht University, 1992.

- [5] 张毅, 罗元, 郑太雄, 等. 移动机器人技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
(ZHANG Yi, LUO Yuan, ZHENG Taixiong, et al. *Mobile Robot Technology and Its Applications*[M]. Beijing, China: Electronics Industry, 2007.)
- [6] 席裕庚, 张纯刚. 一类动态不确定环境下机器人的滚动路径规划[J]. 自动化学报, 2002, 28(2): 161 – 175.
(XI Yugeng, ZHANG Chungang. Rolling path planning of mobile robot in a kind of dynamic uncertain environment[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(2): 161 – 175.)
- [7] STENTZ A. CD: a Real-time resolution optimal re-planning for globally constraint problem[C] // *Proceedings of the 18th National Conference Artificial Intelligence*. USA: AAAI Press, 2002: 1088 – 1096.
- [8] KHATIB O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1986, 5(1): 90 – 98.
- [9] 鲁艺, 周德云. 无人机初始路径规划空间建模方法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3): 491 – 493.
(LU Yi, ZHOU Deyun. Study on initial path planning layout model for UAV[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(3): 491 – 493.)
- [10] MITCHELL J S B, KEIRNEY D M. Planning strategic path through variable terrain data[C] // *Proceedings of the Applications of Artificial Intelligence*. USA: SPIE Press, 1984: 172 – 179.
- [11] SZCZERBA R J, GALKOWSKI P, GLICKSTEIN I S, et al. Robust algorithm for real-time route planning[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2000, 36(3): 869 – 878.
- [12] GE S S, CUI Y J. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method[J]. *Autonomous Robots*, 2002, 13(3): 207 – 222.

作者简介:

姚远 (1985—), 男, 博士研究生, 研究领域为嵌入式计算技术、智能决策与控制, E-mail: far_202@126.com;

周兴社 (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为嵌入式计算、分布式计算和普适计算技术;

张凯龙 (1977—), 男, 博士, 研究领域为嵌入式计算技术、智能决策与控制;

董冬 (1984—), 男, 硕士研究生, 研究领域为无线传感器网络。