DOI:10.19789/j.1004-9398.2015.03.016

基于空间综合威胁体的无人机航迹规划方法研究

辛培源[1] 徐智勇[2]

(1. 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室,北京 100048; 2. 中国科学院电子学研究所创新工程中心,北京 100190)

摘 要

传统规划多数在平面中模拟威胁,难以真实表达威胁对无人机的影响范围,为了提高无人机飞行中的安全性和稳定性,在航迹规划中尽量规避周围环境的威胁,本文提出了一种基于空间综合威胁体的航迹规划方法,在目标区域内建立空间综合威胁体模型并进行分析及计算,最后进行航迹规划. 空间综合威胁体的限制可有效减少待扩展节点的数量,提高航迹规划计算的效率.

关键词: 航迹规划,威胁模型,Marching Cubes 算法,稀疏 A* 算法.

中图分类号: V279

0 引 言

无人机的航迹规划是指在人工不干预或少干预下,系统根据飞机性能、环境影响要素等约束条件下自动计算无人机最优飞行航迹,保证无人机安全、高效的完成任务[1]. 航迹的有效规划不但增加了无人机完成飞行任务的概率,也可以控制飞行成本并降低机体损耗,在防空技术日益先进的现代战争中,航迹规划作为提高无人机执行任务中存活率并实施合理打击的有效手段,受到各国广泛关注. 传统的航迹规划在整个三维空间中寻找飞行路线,难以保障无人机飞行中的安全性,并且待扩展节点过多,影响规划效率. 现有的无人机航迹规划由于涉及的约束多样化,所以合适的数学构造模型研究是算法研究的关键,也是实际航迹规划的核心技术. 目前为止,只有美国完成了海陆空的协同航迹任务规划系统,而我国在这方面的技术仍然处于研究初期. 近些年来主要的航迹规划算法包括 A* 算法(稀疏 A* 算法)[2]、Voronoi 图法[3]、遗传算法[4]等, Voronoi 图法将所有威胁作为点,适合二维航迹处理,遗传算法对整个空间探索能力不足,容易过早收敛得到局部极值,综合考虑本文采用稀疏 A* 算法生成三维航迹.

收稿日期: 2014-02-26

常规航迹规划中经常使用平面模型模拟环境中的威胁因素,不能完全满足三维空间中的约束,导致得到的航迹在空间中有一定偏差,本文依据不同的威胁因素建立三维威胁模型,使航迹能满足威胁因素在三维空间中对无人机的约束. 本文中依据地形等要素建立三维威胁模型,进行插值和重采样处理后得到空间综合威胁体实现单元体的统一,再使用 Marching Cubes 算法以一定的安全阈值为界计算可飞行区域,最后选择稀疏 A* 算法进行航迹规划.

1 空间综合威胁体建模

环境威胁是航迹规划中必须考虑的重要因素,航迹规划中对威胁因素的规避选择不但可以确保无人机的安全,而且可以减少计算节点,节省处理时间. 环境威胁因素有很多种,包括地形威胁、火力威胁、探测威胁和禁飞区威胁等等,空间综合威胁体是基于以上威胁因素分别建立各自的威胁模型并根据威胁等级融合后得到,是生成可飞行区域的基础.

1.1 威胁等级

假设 雷达、导弹、高炮等静态威胁,均以球形空间来描述,根据威胁类型不同,各种威胁可以按照威胁等级进行量化统一. 当某个位置受到多个威胁影响时,该点的威胁度为各种威胁的威胁度之和,威胁度大于或等于 1 时,该点不可穿越.

对于地形威胁等非攻击性的固定威胁,可将其

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

列为最高等级的不可穿越威胁，按照对无人机威胁程度的差异，将威胁划分为 5 个等级[5]，每个威胁等级分别对应不同的威胁度，如表 1 所示.

表 1　威胁等级与威胁度

威胁类型	威胁等级	威胁度
小口径高炮群	1	0.04
大口径高炮群	2	0.09
便携式防空导弹群	3	0.16
地空导弹群、探测威胁	4	0.25
不可穿越威胁	5	1.00

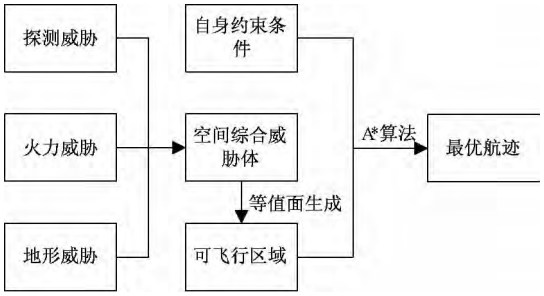


图 1　航迹生成流程

1.2　威胁分类

1) 探测威胁模型

探测设备对无人机的威胁并不是直接的，本身没有攻击能力，因为探测威胁源于探测设备的锁定跟踪和周围防控武器的配合，被探测到也就意味着无人机处于一定的危险之中. 包括三种状态:

①短时间内遭到探测，但是距离和时间都不满足被防控武器击落的危险.

②较长时间内被探测后并被锁定，虽然处于防空武器的射程范围之外，但是航线被探测追踪，此时的威胁是后继性累加的，同时也具有前瞻性的特点.

③无人机必须突防，突防的原则是 100% 规避地形威胁，同时尽量避免火力威胁及探测威胁，此时威胁度较低的区域成为相对安全区.

2) 火力威胁模型

火力威胁要素作为无人机重要威胁之一，其威胁度相对较大，火力威胁要素与火力中心区的位置、火力范围和周边地形有着密切的联系，火力威胁要素的建模和探测威胁要素类似，但是，与探测威胁模型不同，武器威胁要素必须精确定位，否则边缘的离散数据值(或奇异值) 平滑插值后可能导致预测失准，从而潜在的加大无人机的实际威胁.

3) 地形威胁模型

DEM 影像数据是航迹规划算法所需要的基础数据，根据规划区域内的 DEM 以及威胁源信息就能计算出每个单元的威胁估计值. 同样，路径规划需要获知飞行轨迹的起始单元和目标单元坐标，然后根据飞行轨迹的起止点坐标选择处理合适大小的 DEM 影像.

除上述威胁之外，环境威胁因素还包括禁飞区威胁、大气威胁等，由于其威胁范围不固定以及威胁程度区别较大，需要根据实际情况进行建模.

1.3　空间综合威胁体及可飞行区域

各个威胁体建模完成后，对规划区域栅格化为连续相邻的体元素单元，体元素由 8 个顶点构成，位于威胁模型内的顶点，其顶点值为威胁体的威胁度，位于威胁模型外的顶点，其顶点值为零，当顶点位于多个威胁模型内时，该点的顶点值为威胁度的叠加. 空间综合威胁体是由所有威胁度不为 0 的顶点构成的空间，以一定的威胁度为安全阈值，所有威胁度小于该阈值的点构成的空间为可飞行区域.

在确定了无人机飞行的安全阈值后，使用三维等值面生成的经典算法 Marching Cubes [6] 计算航迹可飞行区域. 威胁体中的一个体元素可以用图 2 表示. 逐个处理威胁体中的每一个体元素，将顶点威胁度同安全阈值进行匹配，如阈值大小为相邻两点威胁度之间，采用插值计算出匹配点的位置. 算法的基本假设是当体元素较小时，威胁度沿着体元素边呈局部连续线性变化，可以用一系列的三角形表示体元素中的安全阈值面. 将体元素的 8 个顶点的威胁值与安全阈值进行比较，判断各个顶点位于安全阈值面的外侧或是内侧，根据 8 个顶点的状态，确定剖分方式. 顶点分类规则为: 1) 当体元素顶点值大于或等于安全阈值，则定义该顶点位于安全阈值面之外，记为正点(“1”) ; 2) 当体元素顶点值小于安全阈值，则定义该顶点位于安全阈值面之内，记为负点(“0”) . 如果考虑互补对称性，可将 256 种情况简化成 128 种，再利用旋转对称性，可进一步简化成 15 种. 基于上面的分析，计算安全阈值面后就可以得到体元素的状态表，根据体元素顶点的标记就可以确定剖分方式. 算法需要遍历所有立方体单元来生成等值面，为了减少访问与等值面不相交的单元，选用八叉树为结构来组织所有单元，当节点与等值面相交时，该节点分为八叉树，不相交则跳过，重复该过程直到节点为最小单元.

在确定体元素内三角剖分模式后，就要计算三角片顶点的位置. 对于当前被处理体元素的某一条边，如果其两顶点的标记值不同，那么安全阈值面一

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

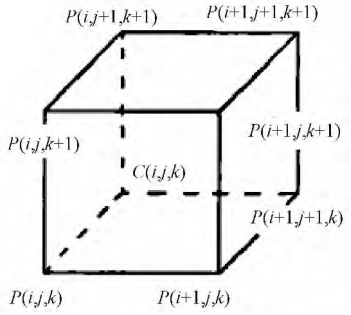


图2 单一威胁体元素

定与此边相交,且仅有一个交点. 设交点信息为(p, v, m, u),其中 p 代表交点坐标及法向量,v 代表两个端点的坐标,m 代表两个端点的威胁度,u 代表安全阈值. 求出安全阈值面与体元素的交点及法向量以后,就可以将这些交点连接成三角形,作为安全阈值面的一部分.

可飞行区域计算流程:

1) 读入规划范围内的三维规则威胁模型,逐个构造威胁体元素,得到空间综合威胁体;

2) 将体元素每个顶点的威胁度与安全阈值做比较,构造体元素的状态表,得出将与可飞行区域有交点的边界体元素;

3) 通过线性插值方法计算体元素边与可飞行区域的交点及法向量;

4) 根据各三角面片上各顶点的坐标及法向量计算可飞行区域.

2 最优航迹自动生成

稀疏 A* 算法是人工智能领域的经典启发式搜索算法,算法的基本思路是利用启发信息和约束条件找到以最小代价通向目标点的最优路径. 决定航迹规划算法在航迹规划中应用性能的因素除了搜索策略外,还有航迹代价的描述和启发函数的选取. 基于上述思路,将无人机的机动性能等约束条件与规划空间的划分结合起来,然后再利用航迹规划算法得到满足要求的可行航迹,不但使生成的航迹可以满足某些航迹约束,同时加速了航迹搜索过程.

2.1 约束条件

自身约束条件包括: ①距离约束,限制了航迹的长度必须小于或等于一个预先设置的最大距离,相应于有限的燃料供应或在某一固定时间内必须达到目标; ②最大转弯角,限制了生成的航迹线的拐角只能在小于或等于自身最大拐弯角. ③最小步长,限制无人机在开始改变飞行姿态前必须直飞的最短距离; ④最大俯冲角/爬升角,限制了无人机在垂直平面内上升和下降的最大角度.

利用上述约束条件划分规划区域,从当前位置出发满足自身约束条件并位于可飞行区域内的只有有限个体元素单元,如图 3 所示,避免了遍历该区域的每一个单元.

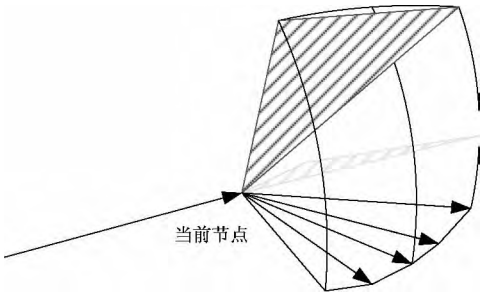


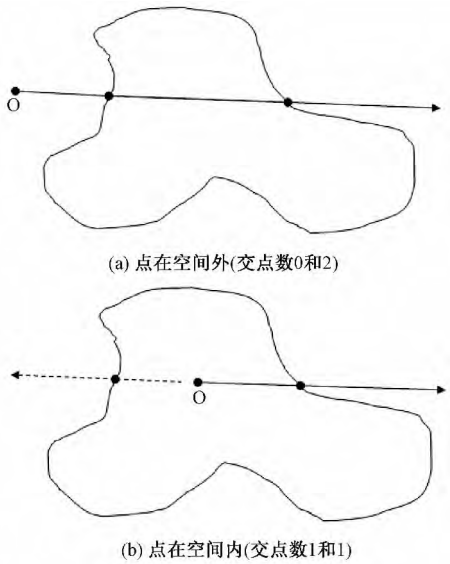
图3 可行搜索空间(考虑步长和俯仰角)

2.2 射线求交法

选择出符合约束条件的节点后,需判断节点是否位于可飞行区域内部,在此,选择射线求交法进行判断.

1) 由当前点任意引出两条位于同一直线并且方向相反的射线,如果两条射线与可飞行区域的交点个数都为偶数,则当前点位于可飞行区域外部.

2) 由当前点任意引出两条位于同一直线并且方向相反的射线,如果两条射线与可飞行区域的交点个数都为奇数,则当前点位于可飞行区域内部.



(a) 点在空间外(交点数0和2)

(b) 点在空间内(交点数1和1)

图4 射线求交法

2.3 航迹自动规划

航迹规划搜索算法是通过设计合适的启发式函

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

数,全面评估各扩展单元的代价值,通过比较各扩展单元代价值的大小,选择最有希望的单元加以扩展,直到找到目标单元为止.

$$g(m) = \lambda p(m) + \rho D(m) \quad (1)$$

P(m) 表示规划路径上的所有威胁的累积,而 D(m) 代表规划路径长度; 其中的 λ 和 ρ 是各项的加权系数. 代价函数就是规划路径上的所有威胁进行量化,对可能经过的各单元进行评估.

节点扩展的过程中,首先通过约束条件除去一部分无法到达的节点,然后依次判断节点是否位于可飞行区域的包围盒内部,如果不在则舍弃,如果在包围盒内部,继续判断节点是否位于可飞行区域的内部,如果不在则舍弃,如果在区域内部,进行代价函数的计算. 代价函数的选取是 A* 算法中的关键,实际中可能会出现多个代价之间互相耦合,无法通过确切的数学表达式加以描述. 代价函数应遵循以下原则: ①函数直观,意义明确; ②代价函数中的参数量化统一; ③代价值计算尽量简单,节省时间,保证效率. 本文使用代价函数如下:

$$J = \sum (W1^* Li + W2^* Hi + W3^* Pi) \quad (2)$$

L_i 为第 i 个体元素与起始体元素间的欧式距离; H_i 为第 i 个单元的高度; P_i 为第 i 个单元在规划区域内的威胁值; W_1、W_2、W_3 分别为距离代价、高度、代价和威胁代价的权重系数,通过调整 W_2/W_1 的大小可以在翻越山峰和绕过山峰之间进行权衡,而调整 W_3/W_1 的大小可以选择是否穿越威胁区域或是绕过威胁区域.

3　实验结果

试验数据加载地形威胁因素、探测威胁因素、火力威胁因素等数据,根据威胁等级叠加后得到空间综合威胁体,选择适合的安全阈值生成可飞行区域. 如图 5 所示,(a) 中安全阈值为 0.8,航迹直接从威胁之间穿过; (b) 中安全阈值为 0.5,航迹不能穿过威胁较高的红色区域; (c) 中安全阈值为 0.2,航迹需绕过所有威胁区域.

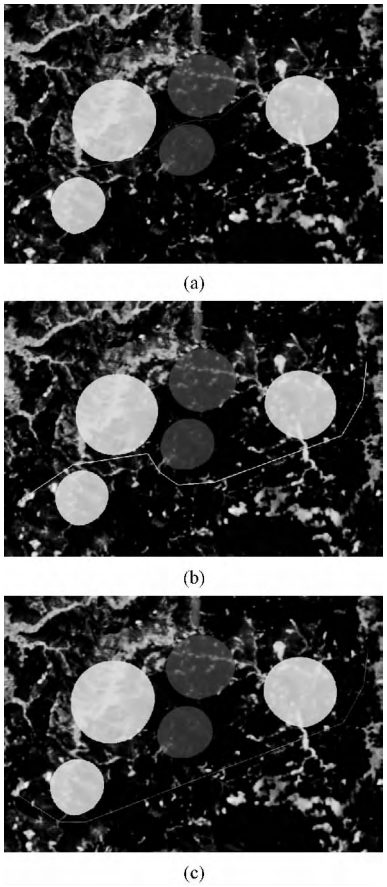


图 5　不同安全阈值得到的航迹

4　结　论

空间综合威胁体的建立、基于不同安全阈值的可飞行区域生成与航迹规划,大大增强了无人机的适用性、经济性和安全性,修改与之相适应的规划算法,增强了飞行中段的航迹再计算能力,极大增强了实时性. 由于航迹规划约束较多,数学模型建立复杂,需视具体情况增加约束条件和提高建模精度. 本文通过对空间综合威胁体的建模和以可飞行区域为基础进行的航迹规划,实现了离线规划与实时规划的结合,实验仿真结果表明,本文提出的方法能够较好的规划无人机的航迹,并且据此得到的航迹线在实际中是可行的.

参　考　文　献

[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.
[2]　严江江, 丁明跃, 周成平, 蔡超. 一种基于可行优先的三维航迹规划方法 [J]. 宇航学报, 2009, 30(1): 139 – 144.
[3]　赵文婷, 彭俊毅. 基于 VORONOI 图的无人机航迹规划 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 1540 – 1545.
[4]　徐正军, 唐硕. 基于改进遗传算法的飞行航迹规划 [J]. 宇航学报, 2008, 29(5): 139 – 144.

(下转第 87 页)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

The Progress on Partition and Determination of COD Fractionation

Hu Weixuan　Wang Xiaoyan

(College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University; Beijing　100048)

Abstract

As an important and rapidly-determined organic pollution parameter in water body, the traditional COD index can not distinguish organic matter of different biodegradation properties and needs further division. In this paper, the development of the COD fractionation partition source, ie, Activated Sludge Models (ASMs) is brief summarized. A class of ASMs parameters related to COD is introduced, emphatically the classification method of COD fractionation, and the determination methods are summed up. In the end, application prospect of the new instruments in the determination of COD fractionation group is forecast.

Key words: Activated Sludge Model, COD fractionation, determination method.

(上接第 81 页)

[5] 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.

[6] 孙伟, 张彩明, 杨兴强. Marching Cubes 算法研究现状 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(7) :947 - 952.

Research on UAV Trajectory Planning Based on Spatial Merged Threat

Xin Peiyuan[1]　Xu Zhiyong[2]

(1. Key Laboratory of 3-Dimensional Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing　100048;
2. Innovation center, Institute of Electronic, Chinese Academy of Sciences, Beijing　100190)

Abstract

Traditional planning mostly simulates threats in the plane, it couldn't truly show the influencing scope of threats, in order to enhance the security and stability of UAV during the flight and avoid the threats in the surroundings as far as possible, a trajectory planning method based on spatial merged threat is proposed, building a spatial merged threat model in the target zone, then analyzing and calculating, planning trajectory at last. The restrict of the spatial merged threat can lessen the number of nodes to extend effectively and raise the efficiency of the trajectory calculating.

Key words: trajectory planning, threat model, marching cubes, sparse A* .

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net