

一种基于可行优先的三维航迹规划方法

严江江, 丁明跃, 周成平, 蔡 超

(华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 针对三维航迹规划的实时性问题, 提出了一种基于可行优先的三维航迹规划方法。不同于通常的最优优先算法, 该方法使用可行优先的准则, 有效地剪除了搜索空间, 提高了搜索效率, 从而使三维航迹规划能够应用于实时航迹规划中。在搜索过程中, 该方法通过改进局部航迹的三维规划, 飞行状态保持, 动态网格, 导引点集四种策略, 能快速地规划出三维航迹。算法复杂度分析和试验表明, 该方法能够有效地完成航迹规划任务, 获得满足要求的可行航迹。

关键词: 航迹规划; 可行优先; 稀疏 A* ; 计算复杂度

中图分类号: V249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2009)01-0139-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.025

0 引言

飞行器航迹规划是指在综合考虑飞行器机动性能、突防概率、碰地概率和飞行时间等约束因素下, 寻找一条从起始点到目标点的最优或可行的飞行轨迹^[1]。航迹规划的规划区域广阔, 搜索空间巨大, 目前应用于航迹规划的各种优化搜索算法, 其计算时间随问题规模的变大, 往往以指数级别增长, 获得一条最优航迹往往需要很长的收敛时间和极大的内存空间^[2], 这对于作战时的实时应用是不现实的。一般来说, 航迹规划问题都是 NP-hard 问题^[3], 这意味着不存在已知的多项式时间算法来求取最优解。在实际应用中, 能够规划出代价值可接受, 规划时间却大大缩短的可行航迹也许更有意义, 尤其在注重快速反应的现代战争中, 航迹规划的实时性和有效性对于提高军队作战效能, 实施快速打击具有重大作用。

本文提出了一种基于可行优先(Feasible First Search, FFS)准则的三维航迹规划方法, 该方法在基于稀疏 A* 算法^[4](Sparse A* Search, SAS)的航迹规划^[5]基础上, 通过改进局部航迹的三维规划, 飞行状态保持, 动态网格和导引点集四种策略, 极大地缩短了搜索时间并减小了搜索空间, 同时保持了航迹代价的次优性。试验结果表明, 该方法能够有效实现三维航迹搜索, 快速得到可行的飞行航迹。

1 基于稀疏 A* 算法的三维航迹规划

传统 A* 算法通常将规划空间表示为网格的形式, 通过预先确定的代价函数寻找最小代价路径。它对当前位置的每一个可能到达的网格单元计算代价, 然后选择最低代价的网格单元加入搜索空间来探索。那么加入搜索空间的这一新位置又被用来产生更多的可能路径。代价函数为 $F(x) = G(x) + H(x)$, 其中 $G(x)$ 项为从起始位置到当前位置 x 的真实代价, $H(x)$ 为从当前位置 x 到目标位置代价的估值。在 A* 算法扩展的每一步都将选择具有最小 $F(x)$ 值的节点插入到可能路径的链表中。

三维 SAS 算法^[5,6]将最小航迹步长、最大拐弯角、最大爬升/下滑角、航迹距离约束、飞行高度限制、固定目标位置进入方向等航迹约束条件结合到搜索算法中。当前航迹点在最大拐弯角 α 、最大爬升/下滑角 β 和最小航迹步长 L 之内能够到达的只有有限数量的节点单元。这些节点被限制在一个由四棱锥面和球面包围的区域内。如图 1 所示。

搜索过程中并不需要遍历该区域内的每一个节点, 而只需考虑其中的若干个扇面。假设在这个区域内均匀地选取 M 个扇面, 代表了航线的 M 个爬升/下滑角度, 把每一个扇面都分成 S 个扇区, 这样共得到 $M \times S$ 个扇区。计算扇区中与当前节点距离为 L 的节点矢量的代价, 依据稀疏 A* 算法, 每一扇

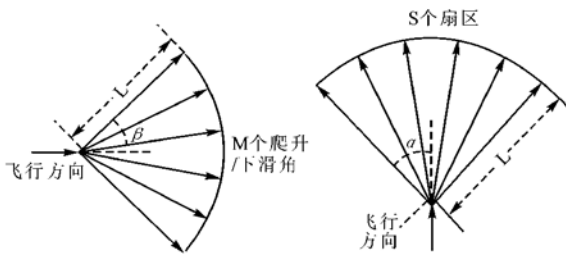


图 1 扩展区域的空间侧视图和俯视图
(左:侧视图;右:俯视图)

Fig.1 Side view and planform of patulous area
(left:side view; right:planform)

区只保留最小代价节点。每一个节点生成的扩展子节点数最多为 $S \times M$ 个。

为躲避雷达的探测和进行地形跟踪,飞行器需要在尽可能低的高度上飞行。但是飞得过低往往会增加与地面相撞的概率。因此,飞行器的飞行高度是有一定限制的,实际飞行过程是在一个飞行管道内的运动。如图 2 所示,两条虚线之间即为飞行器的可飞飞行管道,小黑点表示的是航迹的每次机动(爬升/下滑/平飞)点。航迹在规划的过程中,如果一段航迹无法满足飞行器或者地形的约束条件,则这段航迹规划失败,在扩展的所有航迹段中选一条代价最小的继续扩展直到目标。

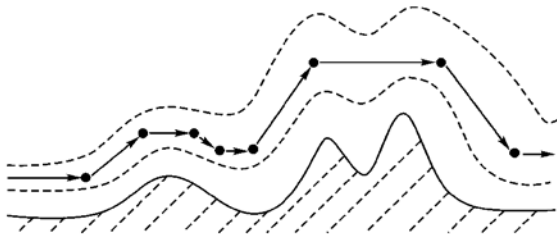


图 2 规划航迹的高度剖面显示
Fig.2 Section plan of planned route

2 基于可行优先准则的三维航迹规划

2.1 改进局部航迹的三维规划

一个三维子节点是否扩展是由它的代价函数 $F(x) = G(x) + H(x)$ 所决定的, $G(x)$ 项为扩展节点到当前子节点 x 的真实代价, $G(x)$ 可以由公式 $G(x) = P(x) + Q(x)$ 来表示,其中 $P(x)$ 为扩展节点到当前子节点 x 的平面代价, $Q(x)$ 为扩展节点到当前子节点 x 的高度代价。飞行器在高度规划时,需要进行大量的读取地形数据的工作,以检测规划航迹是否满足飞行器和地形之间的约束条件。规划航迹

还需要随着地形的变化进行地形回避和地形跟踪,同时计算航迹在飞行管道内不同飞行高度上的代价。可见三维航迹高度规划的计算量是较大的。

本文采用改进局部航迹三维规划的策略,首先计算出扩展区域内起始点到当前子节点的平面代价 $P(x)$,比较这些平面代价,选一个平面代价最小的航迹段进行高度规划,如果成功,则把它对应的子节点作为此次扩展的代价最小的节点继续扩展进行规划,如果高度规划失败,则删除此航迹段,再从中选一个平面代价最小的子节点重复此过程,而不对剩下的航迹段进行高度规划,这样扩展的航迹或许不是最优的,但保证了航迹的可行性,大大节省了时间,加快了搜索速度。

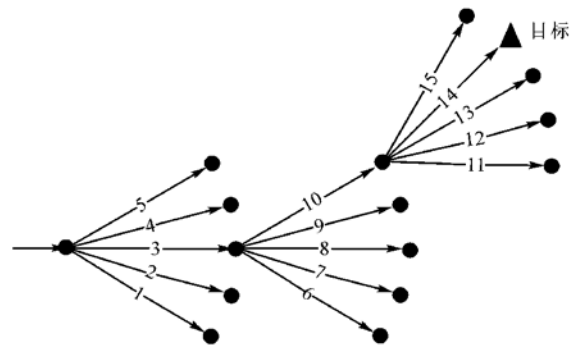


图 3 改进局部航迹的三维规划
Fig.3 3D-Planning of improved local route

如图 3 所示,假设接近目标时有三段航迹,每段航迹有 5 条待选扩展航迹。计算第一段航迹中 5 条待选航迹的平面代价,第 3 号航迹平面代价是最小的,那么对第 3 号航迹进行高度规划以实现地形回避和地形跟踪,如果高度规划通过,那么扩展第 3 号航迹,依次类推直到目标,可以看出,在最好情况下,接近目标的三段航迹中,实际进行了高度规划的只有第 3, 10, 14 号这 3 条航迹,比扩展的总航迹数少了很多。在实际的规划过程中,每段航迹扩展的航迹数越多,那么节省的时间也就越多。

2.2 飞行状态保持

在飞行管道中,飞行器可以有爬升、下滑、保持平飞三种飞行状态。如果扩展出的高度搜索空间中节点的数量越大,其包含组成最优航迹的节点的可能性也越大,但是在高度搜索空间过多的扩展节点会导致飞行器在此段航迹中机动频繁,飞行组合多,计算量巨大。本文采用如下的方法减少高度规划的计算量:在飞行管道内,优先扩展不改变当前飞行状

态的节点,如果高度规划通过,就保持当前飞行状态。虽然有可能它代价不是最低的,却减少了飞行器的频繁机动,又大大缩减了搜索时间。如果这种节点不适合扩展(比如需要爬升避免地形碰撞),再考虑地形因素去计算其他扩展节点。如图 4 所示,带虚线的航迹为根据地形状况进行了频繁机动的航迹,实线表示的航迹为保持飞行状态后的实际飞行航迹。可以看到,在地形和飞行管道许可的情况下,保持当前的飞行状态,可以减少飞行器的机动次数,并减少了高度规划过程中的扩展节点的计算量。

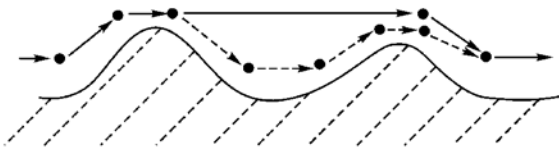


图 4 保持当前飞行状态
Fig. 4 Keeping current flight state

2.3 动态网格

A* 算法的问题是,整个规划区域被划分成若干个网格,因为在理论上对于规划空间中的每一个网格单元航迹都能以不同的角度通过,因此整个地图网格中每一个网格单元就可能代表 A* 搜索空间中的节点,这限制了 A* 算法在实时规划系统中的应用。采用稀疏 A* 搜索算法削减搜索空间,也同样需要搜索众多的节点。本文采用动态网格的方法,在整个规划区域中,根据不同的情况采用不同大小的网格。计算长的路径时使用大网格地图,即分辨率比较低的地图,这大大降低了规划区域中搜索的总网格数;在接近目标的时候,切换到小网格地图,也即分辨率较高的地图进行精确寻路。如图 5 所示,在距离目标较远的搜索空间时,采用了分辨率低的地图,这是为了减少搜索空间的节点数而降低了飞行器飞行线路的精确性,所以需要保证地图分辨率降低在许可的范围之内。在接近目标一定范围之内时,使用较高分辨率的地图网格,从而确保攻击目标的精确性。

2.4 导引点集

在攻击目标的时候,对攻击目标的方向是有一定限制的,尤其是多发导弹攻击一个目标的情况,要求多发导弹从不同的角度同时攻击目标从而达到最佳的打击效果。但在实际的规划过程中,由于飞行器自身物理性能的限制,造成了在搜索到目标附近时局部收敛速度变慢。如图 6 所示,在搜索到目

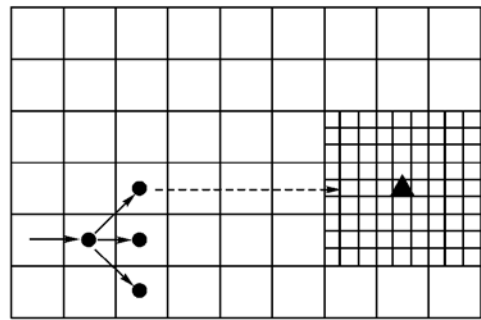


图 5 动态网格
Fig. 5 Dynamic grid

标附近时,由于需要考虑攻击目标的角度,造成接近目标的多数航迹规划失败,找到一条可行航迹的计算量会大增。本文提出一种导引点集的方法来加快最后规划段的收敛速度。

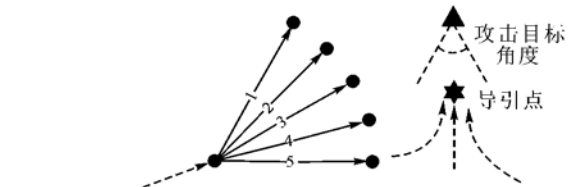


图 6 导引点引导飞行器攻击目标
Fig. 6 Guide point direct UAV to attack target

在图 6 中,带虚线的箭头代表飞行器经过一定路径后靠近目标点的中间航迹,带点线的箭头代表攻击目标的可行航迹。在接近目标的规划过程中,第 1、2、3 号航迹扩展的节点更接近目标,但不满足攻击目标角度的约束条件。如果在目标攻击角度范围内设定一个导引点,让规划的航迹向导引点靠拢,优先扩展第 4、5 号航线,则大大加快了规划成功的速度。除了在接近目标的时候使用导引点外,在威胁区比较多,比较密集的地方,也可以使用导引点来引导飞行器绕过威胁区域,顺利到达目标。在搜索空间中,导引点只是起到引导作用的点,而不是航迹必须经过的点,这样导引点的设置就可以比较灵活,导引点的设置暂时没有统一的标准,在规划前可以使用人机交互的方式来确定导引点集。在多飞行器多任务协同航迹规划中,导引点集也许可以发挥更好的作用。如图 7 所示,三个飞行器分别攻击三个目标,在威胁区密集的地方,通过使用导引点来引导飞行器攻击不同的目标,可以大大加快协同规划的进程。

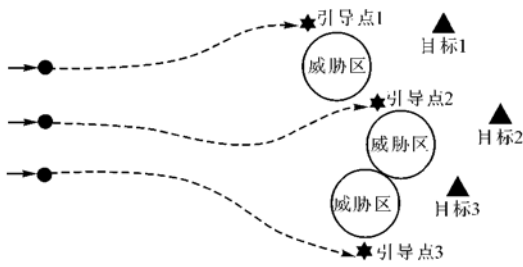


图 7 多任务协同规划中的导引点

Fig. 7 Guide points of multiple mission planning

3 算法复杂度与分析

由于实际的规划过程复杂的多,只能对基于 FFS 的三维航迹规划算法的运算复杂度做一个假设性的定量分析。为简单起见,以单条航迹规划为例,假设一个扩展区间内各条扩展航迹计算需要的时间是相同的,这个时间包括平面规划的时间 T_p 和高度规划的时间 T_Q ,假设整个规划过程需要规划 m 个扩展航迹段,而每个航迹段需要扩展 n 条航迹,则整个规划过程总耗时可以表示为 $m \cdot n \cdot (T_p + T_Q)$ 。由 2.1 节可知,使用稀疏 A* 算法进行航迹规划时,一条航迹其高度规划耗时是大于其平面规划耗时的,设 $T_p \approx 4 T_Q$,则总耗时可近似表示为 $5 \cdot m \cdot n \cdot T_p$ 。基于 2.1 节中的方法,在极限情况下,设前 $(m-2)$ 个扩展航迹段只需要做一次高度规划,最后两个航迹段由于需要以一定的角度攻击目标,每段航迹需要做两次高度规划,那么总耗时可表示为 $m \cdot n \cdot T_p + (m+2) \cdot T_Q$;基于 2.2 节中的方法,设每次高度规划需要计算的节点数减少为以前计算节点数的 50%,那么每次高度规划的耗时降低为 $0.5 T_Q$;基于 2.3 节中的方法,假设接近目标的最后两个航迹段使用高精度地图网格,前 $(m-2)$ 个航迹段使用低精度地图网格,分辨率之比为 1:4,则前 $(m-2)$ 个航迹段需要计算的节点数极限情况下可能降低为原来的 $1/16$;基于 2.4 节中的方法,假设攻击角度导引点只在最后两个航迹段起到作用,节省了大约 50% 的规划搜索时间。将这些方法统一起来,则基于 FFS 的三维航迹规划算法的运算复杂度在极限情况下可近似表示为 $(mm + 2m + 30n + 60) \cdot T_p/16$ 。基于 FFS 的三维航迹规划耗时与基于 SAS 三维航迹规划耗时之比值可表示为 $(mm + 2m + 30n + 60)/(80mm)$,设 $m = n = 50$,则比值为 0.021,设 $m = n = 20$,则比值为 0.034,极限情况下,基于 FFS 的三维航迹规划耗时只有基于 SAS 三维航迹规划耗时的 3% 左右。

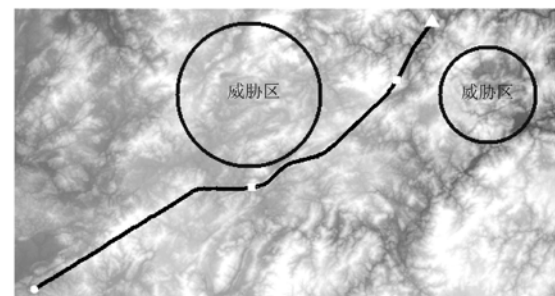
4 试验结果

第三节中的算法复杂度分析只是在极限情况下的假设,在运用 FFS 的实际规划过程中,每个扩展航迹段不可能只进行一次高度规划就顺利通过,在复杂的地形条件下,为了进行地形跟踪和寻找一条满足约束条件而可行的航迹,计算量减少的幅度并没有极限情况下那么大。本文试验使用了 $600\text{km} \times 600\text{km}$ 范围大小的真实数字地形高程图 (DIED) 和模拟生成的威胁数据,数字地形高程图采用分辨率为低精度的 100m 和高精度的 25m 两组地图,在离目标 20km 以外使用 100m 分辨率地形高程图,在目标 20km 范围内使用 25m 分辨率地形高程图,威胁区使用圆形的矢量表达方式。表 1 给出了起始点、目标点和规划环境均不同的任务在两种算法下的规划耗时对比情况。

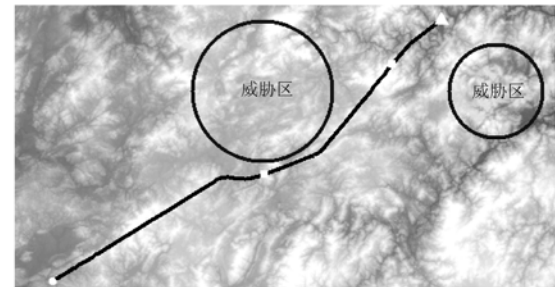
表 1 规划耗时对比

Table 1 Time comparison of route planning

任务	规划耗时(分钟)	
	SAS	FFS
1	28.3	2.9
2	15.6	2.7
3	13.4	1.9
4	9.1	1.3
5	4.3	0.6



(a) SAS规划航迹



(b) FFS规划航迹

图 8 SAS 与 FFS 规划出的不同路径

Fig. 8 Different planning routes based on SAS and FFS

图 8 是表 1 中任务 5 在 SAS 和 FFS 算法下规划出的两条不同路径,白色圆点是规划起始点,白色小矩形是地形匹配区,三角形为目标点。图 9 是两条航迹沿着航线路径的高程图剖面。为简单起见,在攻击段采用直接下降攻击的方法。

从图 8 中可以看出,两条航迹的二维航迹差别

不大,在初始阶段甚至基本一样。这在图 9 中两条航迹初始阶段的地面高程数据基本相同可以得到验证,同样从图 9 中可以看到两条航迹的三维航迹却并不相同。在使用航迹检查软件进行航迹检查后,结果表明两条航迹都是满足飞行器和地形约束条件的可行航迹。

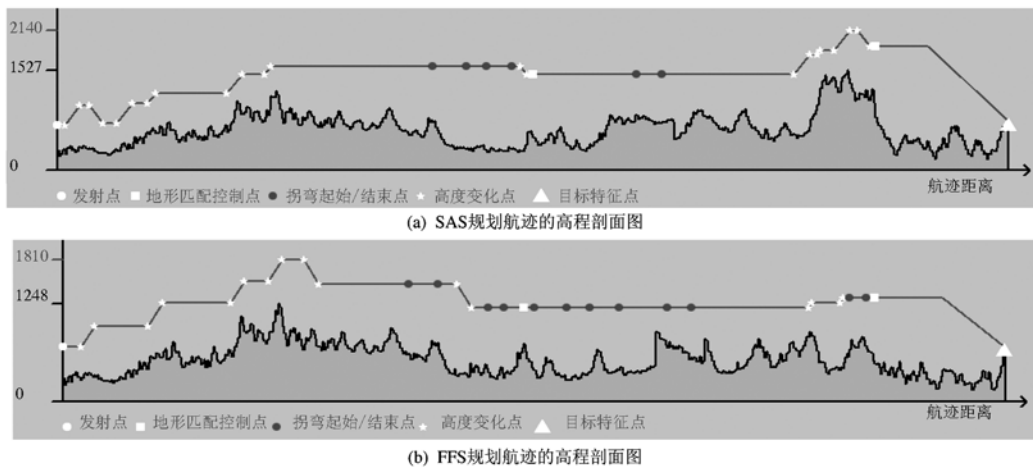


图 9 SAS 与 FFS 规划航迹的高程剖面图

Fig. 9 Section plane image of planning routes based on SAS and FFS

5 结论

本文提出的基于可行优先的三维航迹规划方法是一种快速有效的方法,可以应用于实时规划系统中。由于是在三维空间进行搜索,充分利用了地形信息,规划出来的航迹能够进行有效的地形回避和威胁回避,并且生成的航迹是可行的,在多飞行器航迹协同规划和在线动态实时规划上也有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] 闵昌万,袁建平. 军用飞行器航迹规划综述[J]. 飞行力学, 1998, 16(4): 14 - 19. [MIN Chang-wan, YUAN Jian-ping. Introduction of military aircraft route planning[J]. Flight Dynamics, 1998, 16(4): 14 - 19(in Chinese).]
- [2] 郑昌文,严平,丁明跃,等. 飞行器航迹规划研究现状与趋势[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1441 - 1446. [ZHENG Chang-wen, YAN Ping, DING Ming-yue, et al. Research status and trend of route planning for flying vehicles[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(6): 1441 - 1446(in Chinese).]
- [3] 唐强,张祥伦,左玲. 无人机航迹规划算法的初步研究[J]. 航空计算技术, 2003, 13(1): 125 - 132. [TANG Qiang, ZHANG Xiang-

lun, ZUO Ling. Initial study on the path planning's algorithms for unmanned aerial vehicles[J]. Aeronautical Computer Technique, 2003, 33(1): 125 - 128(in Chinese).]

- [4] Szczerba Robert J. Robust algorithm for real-time route planning[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 869 - 878.
- [5] 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. [LI Chun-hua, ZHENG Chang-wen, ZHOU Cheng-ping, et al. Fast search algorithm for 3D-route planning[J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(3): 12 - 17(in Chinese).]
- [6] 周成平,陈前洋,秦筱岚. 基于稀疏 A* 算法的三维航迹并行规划算法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2005, 33(5): 42 - 45. [ZHOU Cheng-ping, CHEN Qian-yang, QING Xiao-wei. Parallel algorithm of 3D route planning based on the sparse A* algorithm[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Nature Science Edition), 2005, 33(5): 42 - 45(in Chinese).]

作者简介:严江江(1979 -),男,华中科技大学博士研究生,研究方向为飞行器任务规划、计算机视觉等。

通信地址:华中科技大学图像识别与人工智能研究所(430074)

电话:(027)87544512

E-mail: yjsaltriver@yahoo.com.cn

