

基于改进D*算法的无人机航路规划及光顺*

UAV Route Planning and Smoothing Based on Improved D* Algorithm

吴剑^{1,2} 张东豪¹/1 南昌航空大学 2 洪都航空工业集团650所

摘 要: 无人机变向会导致航程的增加, 距离威胁中心越近遇险概率也越大。本文在原D*算法启发函数的基础上增加了与转角相关的项以及到威胁中心距离相关的项。仿真结果表明, 改进算法能以很小距离代价的增加, 换取了转角代价和威胁代价的大大减小。为了使得航路尽可能光滑可飞, 本文还对航路序列进行三次样条插值处理, 达到了预期效果。

Abstract: The turn of flying UAV will leads to the increasing range, the threat probability will be bigger while it is closer to the threat center. So, on the basis of heuristic function in D* algorithm, this paper increased items associated with the corner and the distance of the threat center. The simulation results show that the improved algorithm achieves greatly reduction of the corner cost and threat cost at the expense of a narrowly increasing range. In order to make the route smooth and flyable as far as possible, this paper also used the cubic spline interpolation to smooth the route sequence, and achieves the desired objective.

关键词: D*算法; 启发函数; 三次样条插值; 转角代价; 威胁代价

Keywords: D* algorithm; heuristic function; cubic spline interpolation; corner cost; threats cost

0 引言

目前,无人机的航路规划采用的是以启发式搜索为核心的方法,最为典型的是A*算法^[1],并由此发展了D*算法^[2-3]及其改进算法。但是,从这些算法的启发函数上可以看到,航路的代价只考虑到了距离代价(燃油代价),很少考虑无人机的转向角代价和威胁代价。然而,无人机航向的频繁改变也能增加距离代价^[4](如图1),这是航路规划者最容易忽略的。目前,对敌人火力威胁进行建模是非常困难的,主要原因是很难获取准确的对敌火力参数和选取足够精确的模型。因此,应该采用保守的模型,并考虑无人机飞过威胁时的代价。为解决这个问题,本文对启发函数进行了修改,并对已生成的航路序列进行光滑处

理,以确保无人机航路的光滑、可飞。

1 威胁建模

威胁建模是一个复杂的综合问题,随着威胁的种类、特征以及飞行任务的变化而变化^[5]。本文把威胁场简化成具有一定作用半径的圆,同时考虑不够准确的威胁参数,对所有的威胁都留有一定的余度。

$$J = \begin{cases} 0 & d > r + 5; \\ 5 * e^{r-d} & r \leq d < r + 5; \\ +\infty & d < r. \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中J是无人机受到的威胁代价; r 是威胁的有效半径; d 是无人机当前位置到威胁中心的距离。图1为根据威胁的数学模型在地图上画出的威胁图。威胁的半径为威胁的有效半径。

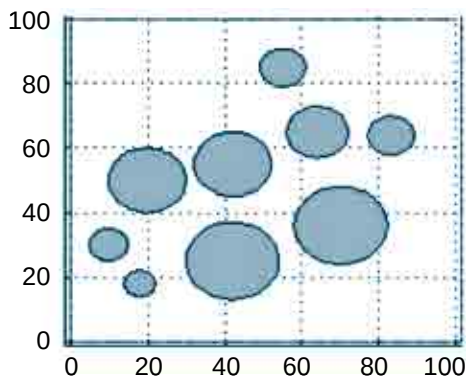


图1 威胁模型图

2 算法的描述和改进

A*算法是在图中给定节点间动作,根据估价函数搜寻最优路径的方法,以最小步骤寻找最优路径。但是,A*算法没有有效的二次规划,当遇到突发威胁时,A*算法采用的是完全规划,不能利用原有的规划信息。D*算法是在A*算法和Dijkstra算法^[6]的基础上建立起来

* 基金项目: 航空科学基金(2010ZC66009)资助项目。

的,适合于不确定的环境。在规划过程中,选择启发函数值最小的点首先被扩展,因此,启发函数的选择是否合适是能否达到预定效果的关键。 D^* 算法启发函数如(2)式,其中 $h(X)$ 是指目标点到 X 点的实际代价; $g(X, R)$ 是指点 X 到无人机当前位置的估计代价。

$$f(X, R) = a h(X) + b g(X, R) \quad (2)$$

考虑到无人机的物理约束,对于高速飞行的无人机而言,如果飞机飞行中频繁地转弯,容易使无人机偏离既定航路,同时还会拉长无人机的航程。如图2所示,航路规划得到的航路是 X_i 到 X_{i+1} 的直线,但是无人机实际飞行的航道却是弧线 $X_i X_{i+1}$,很明显弧线的长度要大于直线的长度。

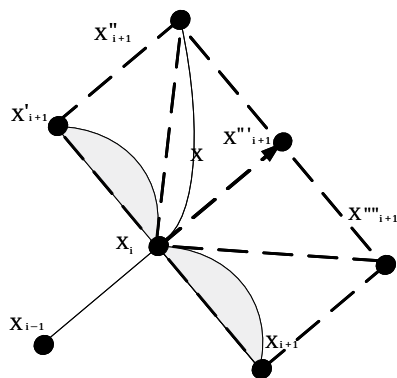


图2 无人机空中转弯

同时,在多机协同的条件下,频繁的改变航向还可能产生碰撞。所以,代价的评估应该考虑到飞行过程中拐弯的角度因素,修改后的启发函数如式(3)所示。其中, $thr(X)$ 是指在 X 点航向偏移的角度。

$$f(X, R) = a h(X) + b g(X, R) + c thr(X) \quad (3)$$

考虑到威胁代价,函数的启发函数应该修改为:

$$f(X, R) = a h(X) + b g(X, R) + c thr(X) + d J(X) \quad (4)$$

式(4)中 $J(X)$ 为 X 到目标点的威胁代价。

3 航路光顺

一般由航路规划算法得到的航路,无人机是无法直接飞行的^[7]。因为,航路规划者通常把得到的航路序列用直线段连接起来,这忽略了无人机飞行时的物理约束。鉴于此,本文利用三次样条插值^[8],对航路进行光滑处理,使每一段小区间满足一个光滑的三次样条插值函数。再把每个小段连接起来,使连接点一、二阶导数相等,确保航路的光滑性。

根据三次样条插值的条件,各个被插值点的横坐标必须各不相同。航路规划算法得到的航路点序列则不受这样的束缚,所以,得到的航路点不一定满足三次样条插值的这一条件。为了达到光顺航路的目的,本文采用对航路点序列分段进行三次样条插值的方法。其具体步骤是:

第一步:把横坐标连续递增的航路序列分成一组,共 n 组;把横坐标连续递减的航路序列分成一组,共 m 组;把横坐标连续且相等的航路序列分成一组,共 q 组。

第二步:若 $q \neq 0$,则需要在这些组的区域内交换横纵坐标以转化为适合插值的航路序列;否则继续。

第三步:计算不同序列组接合处节点左右两边的斜率。

第四步:按照每组两端的斜率,调用三次样条插值算法函数($chazhi(X, Y, s0, sN)$),对航路进行光滑处理。其中, X, Y 分别表示一组航路点的横、纵坐标向量; $s0, sN$ 分别表示各组序列两端点处的斜率。

4 仿真验证

假设在 100×100 范围内,突发

威胁在同一个位置,单步最小扩展角为 $\pi/4$ 和最小单步步长为3。采用改进前后的 D^* 算法对无人机航路规划做仿真。图3是采用改进前的 D^* 算法(规划航路时既没有转向角的约束,也没有考虑威胁代价)得到的航路。图4是采用加入角度约束后的 D^* 算法得到的航路。图5是既有角度约束,又考虑到威胁代价所规划出的航路。具体对比结果见表1。

表1中, $(a, b, c, d) = (1, 1, 0, 0)$ 表示

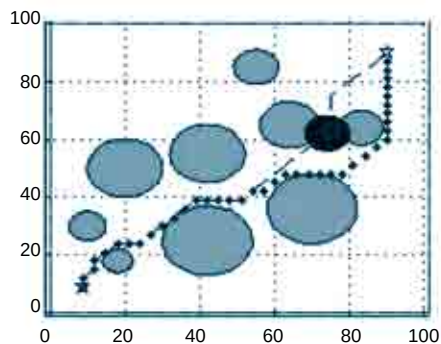


图3 无角度和威胁约束的规划航路

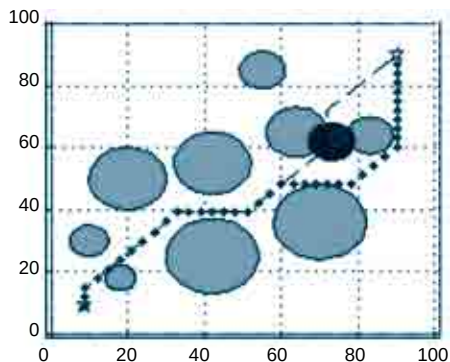


图4 角度约束的航路规划

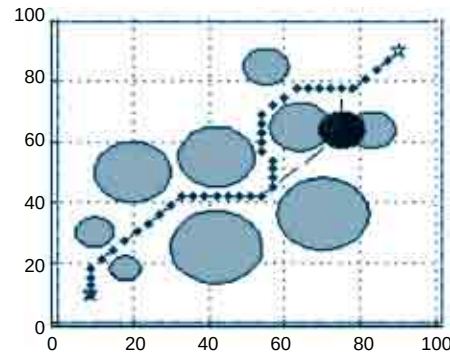


图5 修改后的规划航路

表1 规划结果比较

	距离代价	转角代价	威胁代价
改进前初次规划(a, b, c, d)=(1, 1, 0, 0)	125.0965	8.6394	20.3636
改进前重规划(a, b, c, d)=(1, 1, 0, 0)	135.6396	10.9956	33.2930
有角度约束时重规划(a, b, c)=(1, 1, 0.5, 0)	135.6396	6.2832	23.4540
有威胁约束时重规划(a, b, c, d)=(1, 1, 0, 1)	136.3675	11.7810	5.1934
改进后重规划(a, b, c, d)=(1, 1, 0.5, 1)	138.1249	9.7810	5.3464

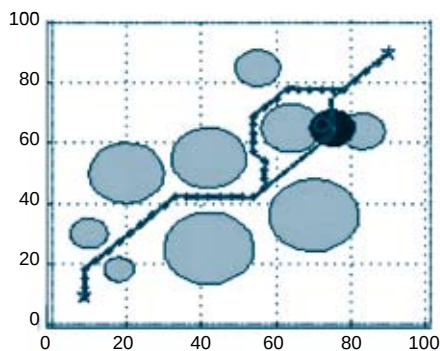


图6 采用三次样条插值所得航路

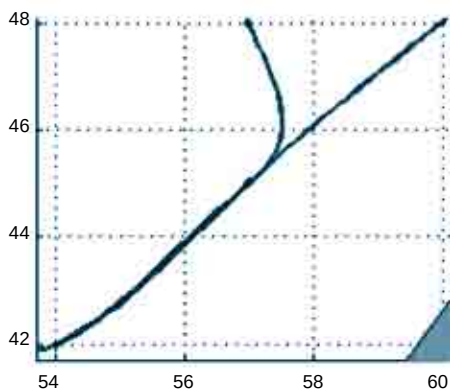


图7 小区间上的插值航路

启发函数的各项(经历的距离代价、估计代价、角度代价、威胁代价)系数分别为1、1、0、0。图6是对图5所的航路采用三次样条插值所得到的航路。

图7是对图6的局部进行放大,图中显示初次规划和重规划两种情况下,[54, 60]上的插值函数。(5)式是指初次规划的航路序列在[57, 60]上的三次样条插值函数;

(6)式是指再次规划的航路序列在[45, 48]上的三次样条插值函数。

$$S(x)=0.0108984x^3-1.9409917x^2+116.1799x-2289.2886521 \quad (5)$$

$$S(y)=0.0766391y^3-10.9095326y^2+517.2752497y-8112.3229745 \quad (6)$$

5 结束语

为了减少飞行中频繁转弯导致飞机路程增加、容易撞机等危险,本文在D*算法的启发函数上加上了转角代价。同时,考虑到对敌方火力威胁参数或恶劣天气估计不够准确,为使无人机应尽可能的远离这些威胁,故在算法的代价函数上还引入了威胁代价。仿真结果表明,改进算法是在付出很小的距离代价的前提下,大大缩减了总的偏向角和威胁代价。考虑到无人机飞行时的物理约束,为了得到一条光滑可飞的航路,本文利用三次样条插值算法对航路做了光顺处理,达到了预期效果。

AST

参考文献

- [1] Peng L, Xinhang H, Min W. A Hybrid Method for Dynamic Local Path Planning[C]. 2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted

Computing, IEEE Computer Society Press, April 2009. 317–320

[2] Stentz A. Optimal and Efficient Path Planning for Partially-known Environments[C]., Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1994: 3310–3317.

[3] Stentz A. The Focussed D* Algorithm for Real-time Replanning[C]. International Joint Conference on Artificial Intelligence. LAWRENCE ERLBAUM ASSOCIATES LTD, 1995, 14: 1652–1659.

[4] Ryoo C K, Cho H, Tahk M J. Optimal guidance laws with terminal impact angle constraint[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(4): 724–732.

[5] 董世友, 龙国庆, 祝小平. 无人机航路规划的研究[J]. 飞行力学, 2004, 22(3): 21–24.

[6] 章国林, 李平, 韩波, 等. 多雷达威胁环境下的无人机路径规划[J]. 计算机工程, 2011, 37(4): 212–215

[7] Oh H, Shin H S, Tsourdos A, et al. Coordinated Road Network Search for Multiple UAVs Using Dubins Path[M]. Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 55–65.

[8] 许小勇, 钟太勇. 三次样条插值函数的构造与Matlab实现[J]. 兵工自动化, 2006, 25(11): 76–78.

作者简介

吴剑, 博士后, 副教授, 研究方向为先进控制与应用。