

值在两次实验中依次为 2000 和 1000, d_s 的初值为 1.3, 并在退火过程的 1/2 和 3/4 以及 9/10 处分别减小至初值的 0.8、0.5 和 0.3 倍. FSSA-SA 算法中, 在退火过程的后 1/3 段进行冗余节点剔除, 判断位置冗余的阈值设置为 0.5.

表 1 威胁信息表

序号	威胁类型	中心点坐标	R_{min}	R_{max}
1	雷达	(20, 40)	5	10
2	雷达	(55, 80)	8	16
3	导弹	(65, 30)	8	16
4	导弹	(45, 40)	5	10
5	导弹	(35, 20)	5	10
6	导弹	(35, 40)	5	10
7	导弹	(35, 30)	5	10
8	高炮	(25, 75)	5	10
9	高炮	(85, 70)	5 <td 10	
10	地形	(30, 65)	5	10
11	地形	(20, 85)	5	10

我们进行了两组规划仿真实验, 规划起止点分别为 (85, 15)、(5, 85) 和 (10, 10)、(100, 100). 每组实验中, 每个算法都进行了 10 次航迹规划, 各自规划中最优结果见图 4、5. 10 次规划结果取均值后如表 2 所示.

从表 2 中的初始代价一项可以看出, 简化的稀疏 A* 算法相比于随机产生的方式能够得到更优化的初始航迹. 这是由于它在搜索初始航迹时, 在综合代价函数的作用下, 每一步都尽量选取威胁较小且尽量靠近目标点的节点作为下一个扩展节点. 换句话说, 算法的每一步的扩展都建立在对上一步扩展节点的择优选择之上, 这样能够尽量保证得到代价较低的初始航迹. 从表 2 中的最终代价均值可以看到, 从更优化的初始解开始再经过相同的退火过程之后, 新的 FSSA-SA 算法得出的结果要比 SA 算法更为优化.

忽略初始化的影响, 由 SA 与 FSSA-SA 算法的步骤可知, 它们在搜索航迹中的主要耗时取决于降温过程中, 对整条航迹反复遍历中的扰动与择优. 参数 $nsweeps$ 的大小决定了反复遍历的次数, 航迹节点数目的大小决定了每次遍历中需要访问节点的个数. 对于 SA 算法而言, 其航迹节点数目始终恒定, 若设初始航迹节点数为 m , 则 $m \times nsweeps$ 的值越大, 搜索耗时就越长, 反之则就越少, 这一点在表 2 中两次实验的 SA 算法耗时对比中得到了验证. 对于 FSSA-SA 算法而言, 由于在低温区进行了冗余节点的剔除, 所以在初始航迹节点数目、退火条件都相同的情况下, 其搜索耗时要少于或相等于 SA 算法, 具体结果如表 2 所示. 进一步说, 简化稀疏 A* 算法搜索得到的初始航迹的节点数

目与 $nsweeps$ 的乘积大小, 可以为判断 FSSA-SA 算法的上限运行时间长短提供参考.

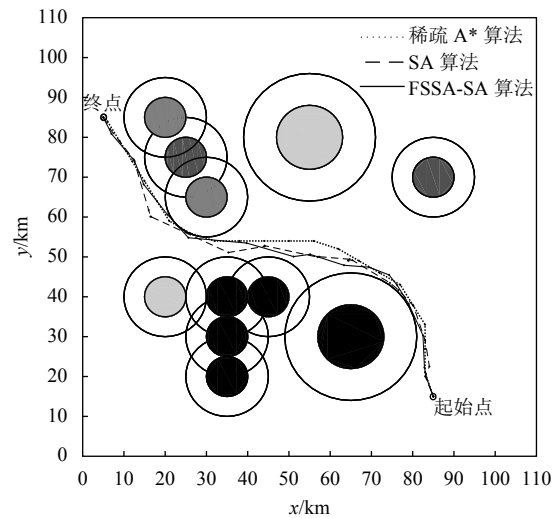


图 4 第一次仿真规划结果示意图

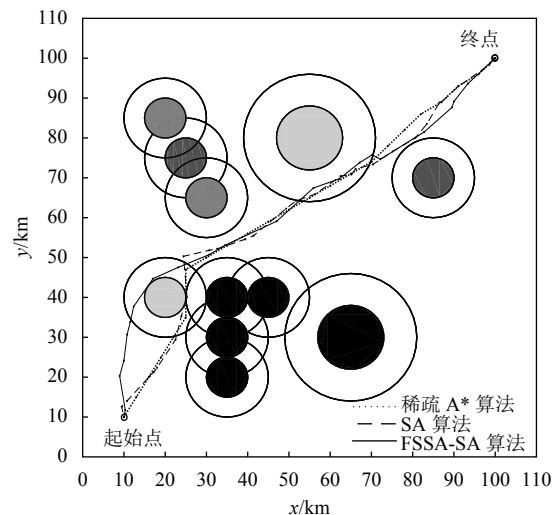


图 5 第二次仿真规划结果示意图

从表 2 可知, 相比于稀疏 A* 算法的搜索结果, 虽然 FSSA-SA 算法最终航迹代价略高, 但其占用了较少的节点内存空间, 花费了较少的搜索时间. 稀疏 A* 算法的内存占用量与运行耗时会随着搜索覆盖范围的增大而增加, 因为其主要遍历每一个已到访位置和为它们提供储存空间. FSSA-SA 算法的耗时前文已做出分析, 它的运行内存占用量主要由简化稀疏 A* 算法决定. 简化的稀疏 A* 算法在搜索过程中, 一方面保存已搜得的路径节点, 另一方面只保存被扩展节点的当前最优子节点, 所以在搜得整条初始航迹时的耗存节点数最大. 在后续的退火过程中, 由于去冗余节点操作的存在, 这些节点的数目只可能减少而不会增加. 因此, FSSA-SA 算

法的最大耗存节点数取决于简化稀疏 A* 算法规划出的 初始解节点数大小。

表2 规划结果对比表

实验序号	规划算法	初始航迹节点数	最终航迹节点数	初始代价	最终代价均值	平均耗时 (s)	最大耗存节点数
1	稀疏 A*	-	22	-	97.03	2.00	1114
	SA	22	22	920.05	135.37	1.34	22
	FSSA-SA	22	18	100.43	97.10	1.25	22
2	稀疏 A*	-	24	-	107.08	1.04	1051
	SA	31	31	553.04	195.09	1.03	31
	FSSA-SA	31	23	140.56	112.59	0.97	31

观察图4、5可以看到, FSSA-SA 算法规划的航迹整体较为平滑. 这是因为: 为了缩短航程, 文中设计的新解产生方式能够使得航迹上的每一个中间节点, 都尽量的与它相邻的两个节点构成一条直线. 进而从整体看来, 航迹中没有较大的转角出现, 更适合无人机实际的飞行.

5 结束语

本文为解决威胁环境下的无人机航迹规划问题, 提出了一种 FSSA-SA 算法. 该算法中, 使用简化稀疏 A* 算法为模拟退火算法产生初始解, 并通过将某一节点在与其两个相邻节点连线垂直的方向上进行随机移动, 实现对退火过程中随机扰动的模拟, 在低温区时, 对于位置冗余的节点进行了剔除. 实验结果表明, 本文 FSSA-SA 算法能够利用较少内存, 快速的得到一条综合代价较低且较为平滑的航迹, 在实时性要求较高并且存储资源有限的规划情况下, 具有一定的实用性.

参考文献

- Liu LF, Shi RX, Li SD, *et al.* Path planning for UAVS based on improved artificial potential field method through changing the repulsive potential function. Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC). Nanjing, China. 2016. 2011–2015. [doi: 10.1109/CGNCC.2016.7829099]
- 胡中华, 赵敏, 姚敏, 等. 无人机航迹规划技术研究及发展趋势. 航空电子技术, 2009, 40(2): 24–29, 36. [doi: 10.3969/j.issn.1006-141X.2009.02.006]
- Qi Z, Shao ZH, Ping YS, *et al.* An improved heuristic algorithm for UAV path planning in 3D environment. Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Nanjing, China. 2010. 258–261. [doi: 10.1109/IHMSC.2010.165]
- Li H, Fu Y, Elgazzar K, *et al.* Path planning for multiple Unmanned Aerial Vehicles using genetic algorithms. Proceedings of 2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. St. John's, NL, Canada. 2009. 1129–1132. [doi: 10.1109/CCECE.2009.5090303]
- 白俊强, 柳长安. 基于蚁群算法的无人机航路规划. 飞行力学, 2005, 23(2): 9–12.
- Lin MX, Yuan K, Shi CZ, *et al.* Path planning of mobile robot based on improved A* algorithm. Proceedings of the 29th Chinese Control and Decision Conference. Chongqing, China. 2017. 3570–3576. [doi: 10.1109/CCDC.2017.7979125]
- 王维, 裴东, 冯璋. 改进 A* 算法的机器人最短路径规划. 计算机应用, 2018, 38(5): 1523–1526.
- 姚雨, 李庆, 陈曦. 优化的 A* 算法在航迹规划上的应用. 微电子学与计算机, 2017, 34(7): 51–55.
- 何平川, 戴树岭. 一种改进的 UAV 三维航迹实时规划算法. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(10): 1248–1251.
- 王雷, 李明, 蔡劲草, 等. 改进遗传算法在机器人路径规划中的应用研究. 机械科学与技术, 2017, 36(5): 711–716.
- 赖智铭, 郭躬德. 基于自适应阈值蚁群算法的路径规划算法. 计算机系统应用, 2014, 23(2): 113–118, 59. [doi: 10.3969/j.issn.1003-3254.2014.02.019]
- Aarts E, Korst J. Simulated Annealing and Boltzmann Machines. Chichester: Wiley, 1989.
- 胡中华. 基于智能优化算法的无人机航迹规划若干关键技术研究[博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- 赵毓. 基于群体智能算法的无人机航迹规划研究[硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Kirkpatrick S, Gelatt CD Jr, Vecchi MP. Optimization by simulated annealing. Science, 1983, 220(4598): 671–680. [doi: 10.1126/science.220.4598.671]
- 耿修堂, 吴勇, 许进. 基于禁忌退火算法的巡航导弹航迹规划. 火力与指挥控制, 2009, 34(11): 43–47. [doi: 10.3969/j.issn.1002-0640.2009.11.012]
- Szczerba RJ, Galkowski P, Glicktein IS, *et al.* Robust algorithm for real-time route planning. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 869–878. [doi: 10.1109/7.869506]
- 何雨枫, 曾庆化, 王云舒, 等. 室内微型飞行器实时路径规划算法研究. 电子测量技术, 2014, 37(2): 23–27. [doi: 10.3969/j.issn.1002-8978.2014.02.007]