

基于改进加权 A* 算法的舰机联合航迹规划

王 玮¹, 王玉惠^{1,2}, 王文敬², 张洪波²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016; 2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000)

摘要: 基于改进加权 A* 算法研究了舰机联合航迹规划问题。首先, 通过分析驱逐舰的武器系统结构, 得出驱逐舰和舰载直升机在联合执行任务时的安全距离; 由于传统 A* 算法运用于舰机联合航迹规划问题的局限性, 引入安全代价和路径安全值加权系数, 基于传统 A* 算法给出了改进加权 A* 算法, 协同规划舰艇和舰载机的路径; 最后, 通过案例仿真验证了算法的有效性。

关键词: 联合航迹规划; A* 算法; 安全值; 舰载机; 舰艇

中图分类号: TJ761.9; E919 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)09-0007-04

Joint Path Planning for Warship and Aircraft Based on Improved Weighted A* Algorithm

WANG Wei¹, WANG Yu-hui^{1,2}, WANG Wen-jing², ZHANG Hong-bo²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China)

Abstract: The path planning for warship-aircraft joint operation is studied. Firstly, the weapon system of the destroyer is analyzed to obtain the safe distance when the shipboard helicopter and the destroyer are performing a task cooperatively. Since the traditional A* algorithm cannot be applied directly to the path planning for warship-aircraft joint operation, the security costs and the path safety factor are introduced. An improved weighted A* algorithm is given based on the traditional algorithm, to solve the path planning problem for warship-aircraft joint operation. Finally, a case simulation is given to verify the effectiveness of the improved algorithm.

Key words: joint path planning; A* algorithm; security value; shipboard aircraft; warship

0 引言

舰机联合作战是空海一体战的重要体现, 目前已经成为各军事强国争先发展的方向。作为联合作战的核心, 先进的指挥控制系统可以保证联合作战具有高度信息化优势。

航迹规划是指挥控制系统的重要组成部分之一。合理的航迹规划可节省燃料、时间, 并将路径上受到的威胁降低到最小, 使作战单元准时到达或撤离战场, 对于战争的胜利起着至关重要的作用。目前, 国内外关于航迹规划的研究成果很多^[1-10], 但大多是针对空间

飞行器和地面机器人的航迹规划^[2-6], 在空海作战方面成果较少, 且主要集中于舰载直升机的航迹规划^[2-7], 采用的研究方法主要有 A* 算法^[7]、人工势场法^[3]、遗传算法^[4]、蚁群算法^[5]和粒子群算法^[2]等。其中, 由于 A* 算法是启发式搜索, 其估价函数是每走一步改变一次, 代价函数也是随着搜索而改变。这个特点正好适用于航迹规划, 且效率高、应用广, 是目前航迹规划问题的研究热点。但是现有的成果大都是针对独立单元或者同类的单元进行航迹规划^[3-5], 对多个异类的单元同时进行联合规划还鲜有文献报道。

航母战斗群是舰机联合作战的主体, 其中驱逐舰担负着侦察、反潜、防空、警戒和火力支援等作战任务, 是名副其实的“海上多面手”。在舰机联合作战中, 结合驱逐舰的强续航力和舰载直升机的高机动性, 可大大扩大侦察范围和作战半径, 体现空海一体战的优势。为此, 协同规划驱逐舰和舰载直升机的航迹具有重要

收稿日期: 2015-08-31

修回日期: 2016-06-30

基金项目: 航空科学基金(20135152047); 光电控制国家重点实验室资助项目; 国家自然科学基金(61374212)

作者简介: 王 玮(1990—), 男, 湖北宜昌人, 硕士生, 研究方向为舰机联合作战。

的意义。但由于传统的A*算法只能进行独立规划,为解决此问题,必须考虑两者的协同性。

综上所述,本文考虑某驱逐舰和舰载直升机共同执行任务,结合其相互掩护的特点,在传统A*算法的基础上,考虑舰机协同,引入安全代价和路径安全性加权系数,给出改进的A*算法,运用改进的A*算法规划出联合执行任务的合理路径,并通过仿真实例验证算法的有效性。

1 问题描述

1.1 驱逐舰武器系统

驱逐舰是航母战斗群外围防御圈最重要的屏障,当驱逐舰受到打击时,航母战斗群的作战能力会受到极大影响。驱逐舰可以反舰、反导和反潜,其武器系统组成如图1所示,其武器覆盖范围如图2所示。

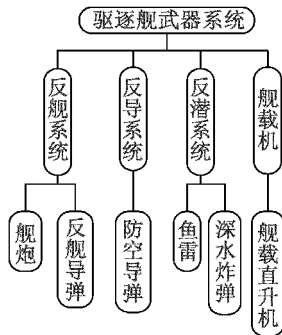


图1 驱逐舰武器系统组成图

Fig.1 Weapon system of the destroyer

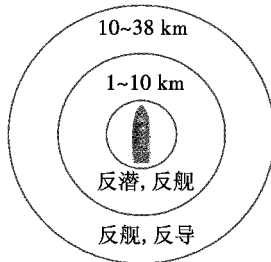


图2 驱逐舰武器拦截覆盖范围

Fig.2 The interception ranges of the destroyer's weapons

从图1和图2可以看出,驱逐舰具有良好的防空和反潜能力,在内防区可对于来袭飞机、导弹进行有效拦截,通常对导弹的拦截在38 km以内。当舰载直升机执行任务时,驱逐舰对空中舰载机的保护能力与两者之间的安全距离密切相关。

1.2 安全值模型

从驱逐舰的武器拦截系统分析可以看出,驱逐舰对空中舰机的保护能力有限,舰载直升机执行任务时会受到对方舰艇防空炮、飞机的航炮和中近程导弹等的威胁,而这些威胁是未知的,无法估量。但是当舰载

直升机执行任务时,驱逐舰在一定范围内可以给予一定的火力掩护,保护其安全。

从图2可以看出,驱逐舰对距离越近的舰载直升机保护能力越强,且当距离大于一定范围(大于38 km)时就几乎没有保护能力,显而易见,安全值大小与双方距离密切相关。两种最常用的安全值模型是反比例模型和高斯模型^[11],由于这两者对结果影响不大,并考虑到舰机联合规划航迹的实时性要求,借鉴文献[11]中的思想,采用相对简单的反比例模型,不过,当舰载直升机距离驱逐舰大于38 km时,驱逐舰对舰载直升机的保护能力几乎为0,这时的安全值也为0,则安全值表示为

$$t = \begin{cases} 1/d & 0 < d \leq 38 \\ 0 & d > 38 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为安全值; d 为舰载机和驱逐舰的距离。

2 基于改进A*算法的联合航迹规划

2.1 传统A*算法

A*算法是一种静态路网中求解最短路径最有效的直接搜索方法,可表示为

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

式中: $f(n)$ 为从起始点到目标节点的估价函数; $g(n)$ 为从起始点到节点 n 的实际代价; $h(n)$ 为从节点 n 到目标节点的最优估价。

鉴于篇幅,传统A*算法的具体过程可以参考文献[12]。

2.2 改进加权A*算法

由于利用传统A*算法只能独立规划两条航迹,因此,针对驱逐舰和舰载直升机的联合航迹规划问题,为避免传统A*算法的缺陷,本文借鉴文献[11]中的思想给出了改进加权A*算法,该算法可以同时规划出两条协同航迹。由式(1)可以看出,当两者距离大于38 km时,驱逐舰对舰载直升机已无保护能力,当驱逐舰和舰载直升机之间的距离小于38 km时,式(1)可以简化为

$$t = \frac{1}{d} \quad 0 < d \leq 38 \quad (3)$$

规划两条联合航迹,相应的代价函数分别为

$$f_A(n) = h_A(n) + g_A(n) + \eta\gamma \frac{1}{t} \quad (4)$$

$$f_B(m) = h_B(m) + g_B(m) + \eta\gamma \frac{1}{t} \quad (5)$$

式中: A 代表舰载直升机; B 代表驱逐舰; $f_A(n)$ 为舰载直升机的代价函数; $f_B(m)$ 为驱逐舰的代价函数; $h_A(n), h_B(m)$ 分别为 A 和 B 到达节点 n 和 m 的实际代价; $g_A(n), g_B(m)$ 分别为 A 和 B 从节点 n 和 m 到目

的节点的估计代价; $\eta\gamma \frac{1}{t}$ 为安全代价, t 为安全值, $\eta(0 \leq \eta \leq 1)$ 为安全值系数, 与路径规划中的安全需求有关, 其取值规则为 $\eta = \frac{\alpha}{\beta} (\alpha \leq \beta)$, α 为指挥官对安全的需求, β 为指挥官对时间的需求, 安全需求不可能大于时间的需求, 当没有安全需求时, 即 $\eta = 0$ 时, 驱逐舰和舰载直升机各自规划航迹, 当 $\eta = 1$ 时, 联合路径对安全要求达到最大, η 取值越大, 对路径的安全要求越高, 因此在考虑安全性的情况下, 联合路径的距离可能不是最优的; $\gamma(0 \leq \gamma \leq 1)$ 为安全代价系数, 是安全值和代价估计的一个相关系数, 与规划路径的环境等因素有关, 其取值规则见表 1。

表 1 γ 取值规则表
Table 1 The values of γ

地理天气	好	中	差
近海岛屿	0.2	0.5	0.8
远海岛屿	0.3	0.7	0.9
远洋海面	0.4	0.8	1

安全代价系数 γ 是一个无量纲的参数, 从表 1 可以看出, 天气环境越差, 安全代价系数越大, 说明航迹在安全方面的花费就越大。同时, 地理位置对安全代价系数取值也有影响, 处于岛屿地形时, 可以明确危险的来源主要是岛屿, 安全代价系数取值较小; 处于远洋海面时, 不知危险来自何处, 安全代价系数取值较大。

改进 A* 算法的原理如图 3 所示。鉴于篇幅, 图 3 仅给出 A 的各代价取值, B 的代价取值方法类似。

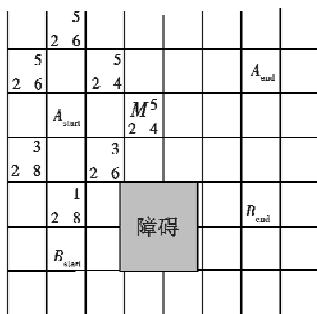


图 3 加权 A* 算法原理

Fig. 3 The principle of the weighted A* algorithm

A, B 分别需要到达目的地 A_{end} 和 B_{end} , A 先走, B 再走。考虑到是针对驱逐舰和舰载直升机的联合航迹规划, 二者行进速度不同, 且通常舰载直升机的行进速度是驱逐舰的 2 倍, 设定 A 走 2 步, B 走 1 步。如图 3 所示, A 有 8 个方格可供选择 (最左边一个明显是最次解, 图中没有显示)。以 M 点为例, 其中, 左下角 2 为实际代价, 右下角 4 为估计代价, 右上角 5 为安全代价, 在式(3)中分别以 $g_A(M), h_A(M), \eta\gamma \frac{1}{t}$ 表示, 则

$f_A(M) = 11$ 。同理, 依次求出 A 可以移动的 8 个节点的代价值, 并且移动到代价值最小的 1 个节点。

假定 A 移动到 M 点时, B 可移动 1 步, 同理可以找出 B 相邻 4 个点 (由于 B 每次移动 1 步, 只有上下左右 4 个点可供选择) 的代价函数, 然后 B 移动到代价函数值最小的 1 个点, A 再走 2 步, B 再走 1 步, 以此类推。当只有 A 到达目的地时, A 就不用移动, 只需 B 移动; 当只有 B 到达目的地时, B 就不用移动, 只需 A 移动; 当二者都达到终点后, 就停止。

2.3 算法流程

改进后的算法具体工作流程如下:

- 1) 初始化, 分别生成舰载直升机和驱逐舰的 open 列表 A 和 B 以及 close 列表 C 和 D;
- 2) 把 A 起始点加入 open 列表 A, 把 B 起始点加入 open 列表 B, open 列表中仅含有起始点, 记 $f_A = h_A$ 和 $f_B = h_B$;
- 3) 如果 open 列表 A 和 B 都为空, 则结束搜索, 否则跳转至步骤 4);
- 4) 查找 open 列表 A 中 f_A 最小的点作为当前节点, 并检查该节点是否为目标节点, 若是, 则跳转至步骤 5); 若不是, 则继续向下执行步骤 6);
- 5) 查找 open 列表 B 中 f_B 最小的点作为当前节点, 并检查该节点是否为目标节点, 若是, 则跳转至步骤 3); 若不是, 跳转至步骤 7);
- 6) 把当前节点移除 open 列表 A, 并加入 close 列表 C, 跳转至步骤 8);
- 7) 把当前节点移除 open 列表 B, 并加入 close 列表 D, 跳转至步骤 9);
- 8) 扫描当前节点周围节点的启发值 h_A , 同时更新周围节点的安全值 t , 并按要求将当前节点作为周围节点的父节点, 跳转至步骤 5);
- 9) 扫描当前节点周围节点的启发值 h_B , 同时更新周围节点的安全值 t , 并按要求将当前节点作为周围节点的父节点, 跳转至步骤 3)。

3 仿真分析

为了验证所提算法的有效性, 本文采用 Matlab 进行了仿真。考虑如下仿真案例: 驱逐舰和舰载直升机从同一个地点出发分别去不同地点执行任务, 且舰载直升机的行进速度是驱逐舰的 2 倍, 由于是远海岛屿地形, 假设天气状况差, 安全值系数 γ 取 0.9, 路径安全系数 η 分别取 0.3 和 0.7。基于 2 节提出的改进 A* 算法, 协同规划舰机联合航迹, 仿真结果如图 4、图 5 所示。

不考虑舰艇直升机和舰艇联合航迹安全性的路

径,采用传统 A* 算法分别独立规划两条航迹,仅考虑避障和路径最短,结果如图 4 所示。

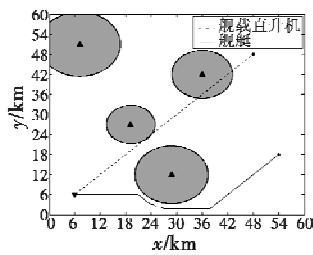


图 4 传统 A* 算法独立规划仿真图

Fig. 4 Independent planning based on traditional A* algorithm

从图 4 可以看出,舰载直升机和驱逐舰都走了各自到达目的地的最短路径,虽然可以节省时间和燃料,但是在行进过程中二者的距离却越来越远,协同很少,本文提出的安全值也很小,联合的路径安全系数就较小。

当考虑线路的安全性,路径安全权值 η 分别为 0.3 和 0.7 时,仿真路线如图 5 所示。

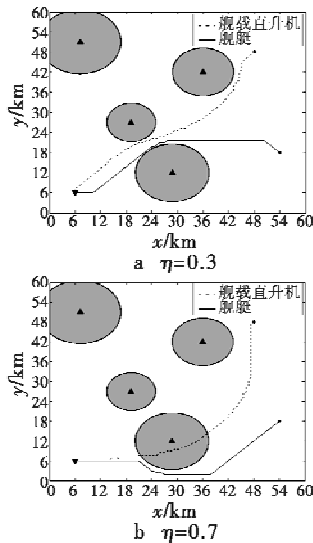


图 5 改进加权 A* 算法仿真图

Fig. 5 Simulation based on improved A* algorithm

从图 5 可以看出,联合路径的路程相较于图 4 增大不少,但是在二者行进过程中,驱逐舰和舰载直升机之间保持的距离较近。为了区分联合路径安全性的高低,本文给出路径的总安全值的概念,即为各时刻安全值的总和。

具体仿真数据对比如表 2 所示。

表 2 仿真结果比较

Table 2 Comparison of the simulation results

参数	传统 A* 算法	改进加权 A* 算法($\eta=0.3$)	改进加权 A* 算法($\eta=0.7$)
耗时/s	0.0786	0.156	0.148
总安全值	498.52	531.25	754.35

从表 2 结果显示,相比于传统 A* 算法,本文提出的算法大大提高联合路径的安全性,不过,优化时间变长,同时安全权值越大,路径的安全性能越高。

4 总结

本文基于传统 A* 算法的思想,提出了基于改进加权 A* 算法,同时提出安全值的概念,很好地解决了在威胁未知时舰机联合航迹规划。通过案例仿真表明:

- 1) 改进加权 A* 算法可大大提高舰机联合航迹的安全性,可使舰艇和舰载直升机更好地面对突发事件;
- 2) 通过改变代价函数里的安全代价权值,可以在路径耗时长短和路径安全大小中取一个平衡值,从而适应不同的地理环境和任务要求。

本文仅考虑了航迹的安全性和路径的长短、避障等基本问题,在下一步的研究中可拓展至多目标情况下执行复杂任务。

参考文献

- [1] STENTZ A. Optimal and efficient path planning for partially-known environments [C] // Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, California, USA, 1994:3310-3317.
- [2] 黄伟,孙德宝,秦元庆. 基于粒子群算法的机器人路径规划 [J]. 兵工自动化, 2006, 25 (4): 49-51. (HUANG Y, SUN D B, QIN Y Q. Path planning of mobile robot based on particle swarm optimization algorithm [J]. Ordnance Industry Automation, 2006, 25(4): 49-51.)
- [3] 黄炳强,曹广益. 基于人工势场法的机器人路径规划研究 [J]. 计算机工程与应用, 2006, 27: 26-28. (HUANG B Q, CAO G Y. The path planning research for mobile robot based on the artificial potential field [J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 27: 26-28.)
- [4] 王海英,蔡向东,尤波,等. 基于遗传算法的机器人动态路径规划研究 [J]. 传感器与微系统, 2007, 26 (8): 32-34. (WANG H Y, CAI X D, YOU B, et al. Research on dynamic path planning of mobile robot based on genetic algorithm [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(8): 32-34.)
- [5] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005. (DUAN H B. Principle and application of ant colony algorithm [M]. Beijing: Science Press, 2005.)
- [6] 郝宗波,洪炳镛,黄庆成. 基于栅格地图的机器人覆盖路径规划研究 [J]. 计算机应用研究, 2007, 24(10): 56-58. (HAO Z B, HONG B R, HUANG Q C. Study of coverage path planning based on grid-map [J]. Application Research of Computers, 2007, 24(10): 56-58.)

(下转第 23 页)

参考文献

- [1] JIANG H, WANG J J, GONG Y H, et al. Online multi-target tracking with unified handling of complex scenarios [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(11):3464-3477.
- [2] DU B, ZHANG L P. Target detection based on a dynamic subspace[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(1):344-358.
- [3] 张旭光, 孙巍, 韩广良, 等. 一种弹孔自动识别算法的研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6):747-753. (ZHANG X G, SUN W, HAN G L, et al. An automatic recognition algorithm for bullet holes[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(6):747-753.)
- [4] 邵亚非, 张利, 吴国威. 一种基于模型的军用靶图序列弹孔检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(11):1075-1078. (SHAO Y F, ZHANG L, WU G W. A model based detection algorithm for sequential target holes [J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(11):1075-1078.)
- [5] YE C L, MI H. The technology of image processing used in automatic target-scoring system [C]//Fourth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, 2011:349-352.
- [6] 秦斌, 殷晓露, 禹世杰. 实弹射击报靶系统的图像校正[J]. 现代电子技术, 2014, 37(14):109-113. (QIN B, YIN X L, YU S J. Image correction of wireless ultrasound read-out system for shooting practice [J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(14):109-113.)
- [7] 高颖, 王阿敏, 王凤华, 等. 改进的小波变换算法在图像融合中的应用[J]. 激光技术, 2013, 37(5):690-695. (GAO Y, WANG A M, WANG F H, et al. Application of improved wavelet transform algorithm in image fusion[J]. Laser Technology, 2013, 37(5):690-695.)
- [8] EL-TAWEEL G S, HELMY A K. Image fusion scheme based on modified dual pulse coupled neural network[J]. IET Image Process, 2013, 7(5):407-414.
- [9] BHATNAGAR G, WU Q M J, LIU Z. Directive contrast based multimodal medical image fusion in NSCT domain[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2013, 15(5):1014-1024.
- [10] 孙延奎. 小波变换与图像、图形处理技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2012. (SUN Y K. Wavelet transform and image processing technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.)
- [11] 余汪洋, 陈祥光, 董守龙, 等. 基于小波变换的图像融合算法研究[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(12):1262-1266. (YU W Y, CHEN X G, DONG S L, et al. The research of image fusion algorithm based on wavelet transform[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(12):1262-1266.)
- (上接第10页)
- [7] 赵真明, 孟正大. 基于加权 A* 算法的服务性机器人路径规划[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(s1):205-207. (ZHAO Z M, MENG Z D. Path planning of service robot based on adding-weight A* algorithm [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(s1):205-207.)
- [8] 周小镜. 基于改进 A* 算法的游戏地图寻径的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011. (ZHOU X J. Research of routing in the game map based on improved A* algorithm [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.)
- [9] 许至杰. 迁移学习理论和算法研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012. (XU Z J. Research about the theories and algorithms of transfer learning [D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.)
- [10] 段奕明. 蜂群算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014. (DUAN Y M. Research on bee colony algorithm [D]. Xi'an: Xidian University, 2014.)
- [11] 邓顺平, 张艳军, 刘会平. 一种基于威胁势场的 A 星路径规划算法[J]. 科技视界, 2014(3):6. (DENG S P, ZHANG Y J, LIU H P. Path planning based on threat potential field and A* algorithm [J]. Science & Technology Vision, 2014(3):6.)
- [12] 陈圣群, 滕忠坚, 洪亲, 等. A* 算法在车辆导航系统中的应用研究[J]. 微计算机信息, 2008, 33:269-270. (CHEN S Q, TENG Z J, HONG Q, et al. Applied research of A-star algorithm in traffic navigational system [J]. Microcomputer Information, 2008, 33:269-270.)

本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅