

控制与决策

Control and Decision

多平台海上协同搜索与路径优化策略研究

杜永浩, 邢立宁, 陈盈果

引用本文:

杜永浩, 邢立宁, 陈盈果. 多平台海上协同搜索与路径优化策略研究[J]. *控制与决策*, 2020, 35(1): 147–154.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0464>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[一种自适应多策略行为粒子群优化算法](#)

An adaptive multi-strategy behavior particle swarm optimization algorithm

控制与决策. 2020, 35(1): 115–122 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0240>

[考虑需求响应的水火电优化调度改进型花朵授粉算法](#)

An improved flower pollination algorithm for hydrothermal scheduling incorporating demand response

控制与决策. 2019, 34(8): 1645–1653 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0356>

[改进人工蜂群算法求解分布式柔性作业车间调度问题](#)

Improved artificial bee colony algorithm for distributed and flexible job-shop scheduling problem

控制与决策. 2019, 34(12): 2527–2536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0336>

[基于多策略人工蜂群的多序列比对算法](#)

Multiple sequence alignment algorithm based on multi-strategy artificial bee colony

控制与决策. 2018, 33(11): 1990–1996 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0788>

[基于A*改进算法的四向移动机器人路径搜索研究](#)

Research of four-way mobile robot path search based on improved A* algorithm

控制与决策. 2017, 32(6): 1007–1012 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0244>

[Tent混沌人工蜂群与粒子群混合算法](#)

Hybridization algorithm of Tent chaos artificial bee colony and particle swarm optimization

控制与决策. 2015, 30(5): 839–847 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0750>

[基于随机评价机制的交互式双子群QPSO算法](#)

Improved dual-group interaction QPSO algorithm based on random evaluation

控制与决策. 2015(3): 526–530 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1291>

[无人机编队超视距空战决策及作战仿真](#)

BVR air combat decision making and simulation for UAV formation

控制与决策. 2015(2): 328–334 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1751>

多平台海上协同搜索与路径优化策略研究

杜永浩, 邢立宁, 陈盈果[†]

(国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 针对传统海上搜索研究中搜索平台与行为单一、缺乏协同的问题, 建立多平台海上协同搜索路径优化模型, 研究协同搜索与路径优化对策. 在协同搜索策略方面, 给出同构协同与异构协同搜索策略的定义, 并设计不同规模的协同仿真场景; 在路径优化策略方面, 根据海上搜索平台的搜索特点, 设计基于行为和基于智能算法的路径优化策略. 在此基础上, 对比研究不同规模的海上协同搜索策略与路径优化策略效果. 结果表明: 基于混合智能算法的路径优化效果普遍优于基于行为的搜索策略与单一算法, 异构协同搜索策略能够充分发挥各平台优势、取长补短, 取得了优于单平台和同构协同搜索的收益效果.

关键词: 多平台; 协同搜索; 路径优化; 基于行为; 智能算法

中图分类号: TP273; V279

文献标志码: A

Strategies of maritime cooperative searching and path optimization using multiple platforms

DU Yong-hao, XING Li-ning, CHEN Ying-guo[†]

(College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Considering the monotony of the searching platform and the behavior of traditional maritime coverage path planning, as well as the absence of cooperation, this paper establishes the mathematical model for the maritime cooperative searching problem using multiple platforms and researches the strategies of searching cooperation and path optimization. In terms of the cooperative searching, definitions on homogenous and heterogeneous cooperative searching strategies are provided, and simulation scenarios of different scales are designed. In terms of the path optimization, the strategies based on behaviors and intelligent algorithms are designed according to the searching characteristics of different maritime platforms. On that basis, comparisons on effects from various cooperative searching and the path optimization strategies in different maritime scenarios are conducted. It is indicated that the path optimization strategy using hybrid intelligent algorithms presents a superior performance than the behavior-based strategy and the single algorithm. The heterogeneous cooperative searching strategy is probable to take advantages of different platforms while making up their disadvantages, contributing to a higher profit than the single and the homogenous cooperative searching.

Keywords: multi-platform; cooperative searching; path optimization; behavior based; intelligent algorithm

0 引 言

随着世界各国对海洋资源需求的日益增加, 以及海事任务和海洋技术的多样化发展, 以舰船、飞机和卫星等为代表的海上搜索平台越来越多地应用于海上搜救^[1]、勘探测绘^[2]、卫星测控^[3]和军事侦察^[4]等领域. 在现代海上搜索问题中, 海上搜索路径规划技术综合考虑了资源与约束条件, 通过智能优化与决策技术实现了目标海域的覆盖搜索, 对降低搜索时间与平台成本、提升搜索效率起到至关重要的作用. 不

过, 搜索路径的规划效果受海上平台的搜索模式和搜索能力影响显著, 单一的搜索平台已经很难有效应对现代海上搜索问题不断增长的问题规模与任务复杂性. 所以, 通过投入搜索模式和搜索能力各异的搜索平台, 开展海上多平台协同作业的搜索模式具有更强的工程适用性和广泛的研究前景.

已有的海上搜索问题常被简化为覆盖路径规划问题 (Coverage path planning, CPP). CPP 问题最早源于机器人领域^[5], 近年来被广泛应用于区域监测^[6]、

收稿日期: 2018-04-15; 修回日期: 2018-09-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61773120, 71331008, U1501254); 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资助项目 (2014-92); 广东省科技计划项目 (2015B010131015, 2015B010108006); 广东省高等学校国际暨港澳台科技合作创新平台项目 (2015KJHZ023).

责任编辑: 王光臣.

[†]通讯作者. E-mail: ygchen@nudt.edu.cn.

目标搜索^[7]、地形勘测^[8]和农作物耕作^[9]等领域.文献[10]定义了“8字式”舰船编队巡逻搜索方式,通过区域分割策略实现目标海域的持续覆盖与战术封锁.文献[11]设计了一种“内旋式(spiral)”移动机器人覆盖算法,通过引入机器人边界跟随行为实现了不规则区域的有效遍历.文献[12]在“牛耕式(Boustrophedon)”搜索行为和区域分割策略的基础上,通过贪心算法对无人机覆盖策略进行了优化.文献[13]考虑了直升机吊放雷达的搜索特点,设计了“回字型”拓展方阵搜索策略,对比了单机搜索与多机协同的搜索效果.此外,文献[14]没有拘泥于某种搜索行为,而是将待搜索区域进行栅格化处理,在网格轨迹优化的基础上辅以飞行动力控制修正,实现了多架无人机分布式协同搜索的效果.文献[15]结合栅格处理与“牛耕式”搜索策略,基于神经网络算法完成了多潜航器覆盖与动态避障任务.

上述研究大多基于单一平台或同构协同策略开展搜索任务,很少涉及多平台异构协同搜索问题.而与单平台或同构协同搜索问题相比,异构协同搜索具有以下特点:1)平台间的搜索速度差异大;2)平台间的搜索方式差异大;3)平台间的搜索成本差异大.多平台协同搜索路径优化的关键是发挥不同平台的搜索优势,优势互补、相互协作,从而实现最高的搜索覆盖效率.鉴于此,本文通过投入舰船、飞机和卫星3类行为各异的搜索平台,建立了多平台协同搜索路径优化模型,并以此为基础研究了不同规模的海上协同搜索策略与路径优化策略效果.

1 问题描述与数学建模

现阶段,用于搜索作业的海上平台主要有舰船、飞机和卫星等.舰船类平台具有较好的搜索连续性,飞机类平台具备优越搜索灵活性,卫星类平台拥有更大的搜索视角.可见3类搜索平台具备独特的搜索优势,有良好的协同作业发挥空间.针对舰船类、飞机类和卫星类平台海上搜索行为特点,本节建立多平台海上协同搜索路径优化模型.

1.1 问题描述与假设

为了直观地描述多平台协同搜索路径优化问题,一定程度上降低问题规模与难度,作一些合理假设:

- 1) 考虑到海浪速度相对搜索平台较小,故视搜索目标为静态质点,将问题简化为CPP问题.
- 2) 考虑到海浪高度相对于无人机高度较小,故视目标海域具有相同的海平线高度,将问题简化为二维平面模型.
- 3) 考虑到搜索海域面积较大,故视搜索平台为质

点模型,且不受转向半径的限制和多平台相遇时机动避让的影响.

在多平台协同搜索问题中,平台搜索模式、速度和成本之间的互补性很大程度上影响着协同搜索的效率.因此,发掘各搜索平台所擅长的搜索形式,避免重复的搜索行为,对多平台协同搜索问题求解具有重要意义.在本文海上协同搜索问题中,投入使用的搜索平台有以下3种:

1) 舰船类平台.一种通过在舰首搭载探测设备,探测其舰首方向一定扇形区域,并沿航迹方向开展持续性搜索的海面搜索平台.该平台的特点是从目标区域的某一边界进入,保持航速 v_A 对航迹方向半径为 r_A 、视角为 α 的扇形区域开展持续的搜索行为.同时,为避免平台频繁机动而影响搜索效率,该平台直线航行时间不得少于 t_A .搜索模式如图1(a)所示.

2) 飞机类平台.一种通过在机身搭载探测设备,探测其周围一定圆形区域,并沿航迹方向开展跳跃性搜索的旋翼式空中搜索平台.该平台的特点是在搜索过程中必须悬停在空中,持续时间为 t_B .在完成对半径为 r_B 的圆形区域搜索后,方可以速度 v_B 转移至其他搜索位置开展后续搜索.同时,考虑到飞机携带的资源有限,该平台搜索次数不得超过 n_{\max} .搜索模式如图1(b)所示.

3) 卫星类平台.一种通过在星上搭载探测设备,探测其星下一定矩形区域,并沿轨道方向开展持续搜索的天基搜索平台.该平台的特点是可以发挥卫星的侧摆机动能力,通过调整侧摆量 γ ($\gamma < \gamma_{\max}$)对其星下点轨迹两侧幅宽为 r_C 的矩形视界开展持续性搜索,视界推扫速度为 v_C .但出于成本与安全性考虑,该平台任意两次侧摆机动的的时间间隔不得超过 t_C .搜索模式如图1(c)所示.

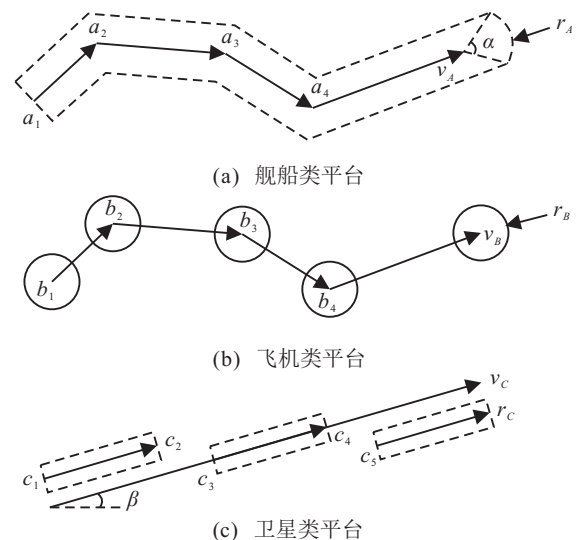


图1 多平台搜索模式示意图

1.2 问题优化变量

为了直观地描述平台的搜索轨迹,同时降低搜索问题的规模,对目标区域进行栅格化处理.目标区域的网格集合记为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, n 表示栅格化的数量.问题的优化变量包括:

1) 舰船类平台搜索轨迹.第 i 个舰船类平台航行轨迹可以用其转移点集合 A_i 来描述,令 $A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in_{A_i}}\}$,其中 $a_{ij} \in S$, n_{A_i} 为第 i 个舰船类平台转移点数量,如图1(a)所示.第 i 个舰船类平台的搜索时间记为 T_{A_i} ,期间所搜索的网格数记为 s_{A_i} .

2) 飞机类平台搜索轨迹.第 i 个飞机类平台飞行轨迹通过其转移点集合 B_i 来表示,令 $B_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in_{B_i}}\}$,其中 $b_{ij} \in S$, n_{B_i} ($n_{B_i} \leq n_{\max}$)为第 i 个飞机类平台转移点数量,如图1(b)所示.第 i 个飞机类平台的搜索时间记为 T_{B_i} ,期间所搜索的网格数记为 s_{B_i} .

3) 卫星类平台搜索轨迹.第 i 个卫星类平台由于搜索方向受到其飞行轨道的限制,只具备沿其星下点轨迹两侧侧摆的搜索能力,故其搜索轨迹可以用集合 C_i 表示,令 $C_i = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in_{C_i}}\}$,其中 $c_{ij} \in S$, n_{C_i} 为第 i 个卫星类平台搜索设备的开关机次数,如图1(c)所示.第 i 个卫星类平台的搜索时间记为 T_{C_i} ,期间所搜索的网格数记为 s_{C_i} .

1.3 问题数学模型

在多平台海上协同搜索问题中,搜索路径优化的目的是利用较短的搜索时间和较低的搜索成本,完成较大面积的区域搜索,可见多平台海上协同搜索路径优化属于一类组合优化问题.结合海上协同搜索的实际情况,建立如下数学模型:

$$\max \sum_{i=A}^C \sum_{j=1}^{n_i} s_{ij} - w_1 \max(T_{ij}) - w_2 \sum_{i=A}^C \sum_{j=1}^{n_i} T_{ij} \text{cost}_i. \quad (1)$$

s.t.

$$a_{i0} \in S_{\text{bound}}, \forall i \leq n_A; \quad (2)$$

$$\text{dist}(a_{ij}, a_{i(j+1)}) \geq v_A t_A, \forall a_{ij} \in A_i; \quad (3)$$

$$\Delta t(b_{ij}, b_{i(j+1)}) = \text{dist}(b_{ij}, b_{i(j+1)})v_B + t_B, \quad \forall b_{ij} \in B_i; \quad (4)$$

$$\text{slope}(c_{ij}, c_{i(j+1)}) = \beta, c_{ij} \in C_i, j = 1, 3, 5, \dots; \quad (5)$$

$$\Delta t(c_{ij}, c_{i(j+1)}) \geq t_C, c_{ij} \in C_i, j = 2, 4, 6, \dots; \quad (6)$$

$$\gamma(c_{ij}) \leq \gamma_{\max}, \forall c_{ij} \in C_i. \quad (7)$$

目标函数(1)表示海上多平台搜索问题是以搜索面积 $\sum s_{ij}$ 最大化,全局搜索时间 $\max(T_{ij})$ 最小化,以及搜索成本 $\sum T_{ij} \text{cost}_i$ 最小化为目标的组合

优化问题.其中: n_i 为第 i 类搜索平台投入作业的数量, cost_i 为第 i 类搜索平台单位时间的搜索成本, w_1 和 w_2 分别为搜索时间和搜索成本的权重系数.

约束(2)表示受初始位置和航迹连续性的限制,舰船类平台必须从目标区域的某一固定边界进入, S_{bound} 表示目标区域某一边界的网格集合.

约束(3)表示为了避免舰船类平台频繁机动,其直线航行时间不得少于 t_A ,函数 $\text{dist}(s_i, s_j)$ 表示任意两网格点之间的距离.

约束(4)表示受搜索模式限制,飞机类平台必须持续开展时间为 t_B 的悬停定点搜索,而后方可以以速度 v_B 转移至其他搜索位置继续搜索.函数 $\Delta t(s_i, s_j)$ 表示搜索平台到达任意两网格点的时间间隔.

约束(5)表示受卫星航迹影响,卫星类平台任意一段观测的起始点和结束点之间的轨迹必须与星下点轨迹平行.函数 $\text{slope}(s_i, s_j)$ 表示任意两网格点间的轨迹斜率.

约束(6)表示受卫星姿态转换动作约束,卫星类平台任意两段观测间隔不少于侧摆机动时间 t_C ^[16].

约束(7)表示受卫星侧偏能力限制,卫星类平台任意观测位置距离星下点轨迹的偏移量 $\gamma(c_{ij})$ 不得超过卫星的最大侧偏量 γ_{\max} .

综上,本节针对舰船类、飞机类和卫星类平台海上协同搜索问题,在问题合理简化的基础上,建立了多平台协同搜索的统一化约束满足模型,为多平台海上协同搜索路径优化提供了前提.

2 协同搜索策略

海上搜索平台的协同与否,以及多平台之间的协同程度与方式对搜索结果具有十分重要的影响.目前,在各类无人机群协同作战任务研究中,通常将协同方式分为同构协同和异构协同两类^[17].其中,同构表示协同对象的属性、功能与约束完全一致,而异构则表示协同对象的属性、功能或约束存在差异.由此,根据海上搜索问题中飞机类、舰船类和卫星类平台的功能及约束特点,本节参考无人机领域对协同方式的划分方法,设计如表1所示的海上平台在不同任务场景下的协同搜索策略,并结合下文的定义对海上平台搜索策略进行说明.

2.1 单平台搜索

定义1(单平台搜索) 在海上搜索问题中,只出动单一海上搜索平台,对目标海域开展搜索任务的搜索策略.

在3种不同规模的海上搜索问题中,本文将分别投入1艘舰船、1架飞机和1颗卫星开展单平台搜索任务,分别记为场景1#~9#.

表1 海上平台协同搜索策略

场景序号	协同策略	场景规模	平台数量		
			舰船类	飞机类	卫星类
1#	单平台	小	1	0	0
2#			0	1	0
3#			0	0	1
4#		中	1	0	0
5#			0	1	0
6#			0	0	1
7#		大	1	0	0
8#			0	1	0
9#			0	0	1
10#	同构协同	小	3	0	0
11#			0	3	0
12#			0	0	3
13#		中	6	0	0
14#			0	6	0
15#			0	0	6
16#		大	12	0	0
17#			0	12	0
18#			0	0	12
19#	异构协同	小	2	1	0
20#		中	3	2	1
21#		大	6	4	2

2.2 多平台同构协同搜索

定义2 (同构协同搜索) 在海上搜索问题中,同时出动多个同构海上搜索平台,即舰船类、飞机类与卫星类中某一类平台,对目标海域开展协同搜索任务的搜索策略。

在3种不同规模的海上搜索问题中,本文将分别投入数量为3、6、12的舰船类、飞机类和卫星类平台开展同构协同搜索任务,分别记为场景10#~18#。

2.3 多平台异构协同搜索

定义3 (异构协同搜索) 在海上搜索问题中,同时出动多个异构海上搜索平台,即舰船类、飞机类与卫星类中某几类平台,对目标海域开展协同搜索任务的搜索策略。

在3种不同规模的海上搜索问题中,本文将分别投入2艘舰船与1架飞机;3艘舰船、2架飞机与1颗卫星;6艘舰船、4架飞机与2颗卫星开展异构协同搜索任务,分别记为场景19#~21#。

3 路径优化策略

路径优化策略是解决海上协同搜索问题的根本方法,路径优化策略的优劣也将直接影响协同搜索的收益。分别设计基于行为的路径优化策略和基于智能算法的路径优化策略,为海上多平台协同搜索路径优化问题提供方法指导。

3.1 基于行为的路径优化

基于行为的路径优化指依据某种恒定的搜索行为,约束了搜索平台的转向角度,通过优化搜索平台

的初始方向和搜索时长,以实现最大搜索效益的路径优化策略。基于行为的路径优化策略具有较小的问题规模和良好的可执行性,是求解覆盖路径规划问题的主要优化方法。本节参照“牛耕式”搜索行为^[18],分别设计舰船类和飞机类平台的行为式搜索策略,如图2所示。为保障飞机类平台的覆盖效率,“牛耕式”搜索策略的转移系数 λ 取值为 $[0.5, 1.5)$ 。同时,为提升平台边界搜索的覆盖效率,在该策略中引导平台的转向方向为垂直转向或转向至与搜索边界平行的方向。

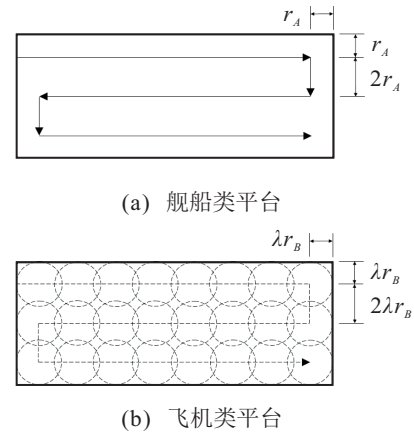


图2 “牛耕式”搜索行为

3.2 基于混合智能算法的路径优化

基于行为的路径优化策略未必适用于搜索模式差异较大的不同搜索平台。例如,跳跃式搜索的飞机类平台在与持续性搜索的舰船类平台协同搜索的过程中,会对后者的搜索盲区进行交叉补充搜索,而基于恒定行为的策略则无法发挥平台协同的优势,很难获得满意的结果。另一方面,在特殊的军事搜索行动中,待搜索目标极有可能依据我方搜索行为作出预判和规避^[19],造成我方侦察失效。因此,本节不局限于各平台的搜索行为,直接采用智能优化算法对平台的搜索轨迹进行迭代优化。

基于智能算法的路径优化指在满足平台搜索路径基本约束的情况下,通过智能优化算法直接优化平台的搜索轨迹,以实现最大搜索效益的路径优化策略。实践表明,禁忌搜索算法(Tabu search, TS)、模拟退火算法(Simulated annealing, SA)和逾期接受算法(Late acceptance, LA)等广泛使用的人工智能优化算法已成为求解大规模NP难问题的有效途径^[20-22]。因此针对多平台海上协同搜索路径优化问题,本节分别从解的编码和邻域搜索的角度出发,在传统SA和LA算法的邻域搜索过程中引入遗传策略和禁忌策略,以提升算法的全局搜索能力。

3.2.1 混合遗传策略

采用整数编码的方式,记录了每个搜索平台的转移点编号序列,如图3所示。为提升算法的全局搜索

能力,在传统SA和LA的基础上引入遗传算法中的交叉与变异策略.

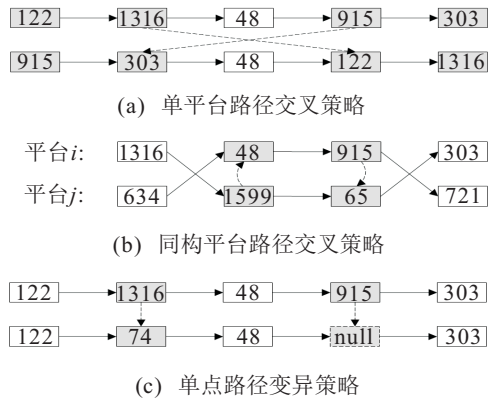


图3 平台搜索路径优化中的遗传策略

交叉策略包括单平台路径交叉和同构平台路径交叉.单平台路径交叉操作对某一平台当前转移点集合中连续几个转移点进行交换,实现了对单平台路径片段顺序的交叉,例如图3(a)中路径片段122→1316与915→303进行了交换.同构平台路径交叉操作对两个同构平台中的连续转移点进行交换,实现两个平台的路径交叉,例如图3(b)中平台*i*的路径48→915与平台*j*的路径1599→65进行了交叉.

由于异构平台的搜索路径特征往往差异较大,交叉结果以不满足约束的搜索路径居多,本节未设计异构平台路径交叉策略.变异策略采用图3(c)所示的单点变异操作.

3.2.2 混合禁忌策略

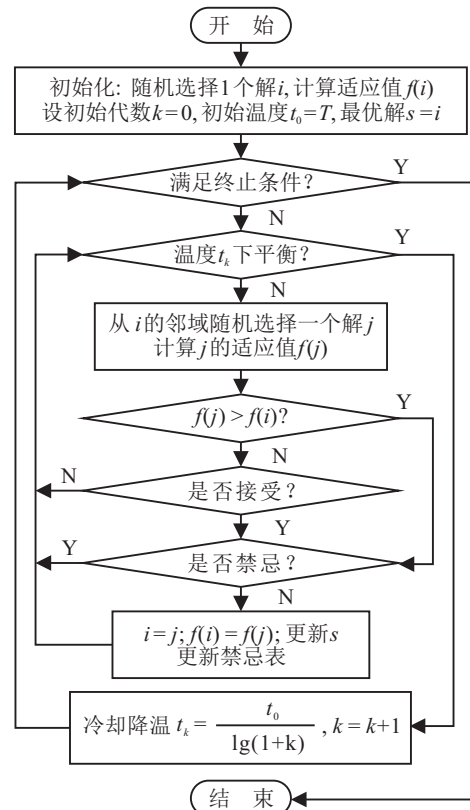
禁忌策略主要体现在局部搜索的过程中.在SA算法方面,禁忌策略嵌入其每次降温操作前的内循环过程中,记录内循环搜索空间中局部最优解,以提升当前退火温度下局部搜索的效果.算法流程如图4(a)所示.其中,适应度函数 $f(i)$ 即为式(1)所示的海上协同搜索路径优化问题的综合目标函数;模拟退火算法的冷却降温过程采用经典降温函数;温度 t_k 下的平衡条件为连续30次邻域构造后最优解 s 未被改进;初始温度 t_0 为

$$t_0 = -\frac{\Delta f_{\max}}{\ln p}. \quad (8)$$

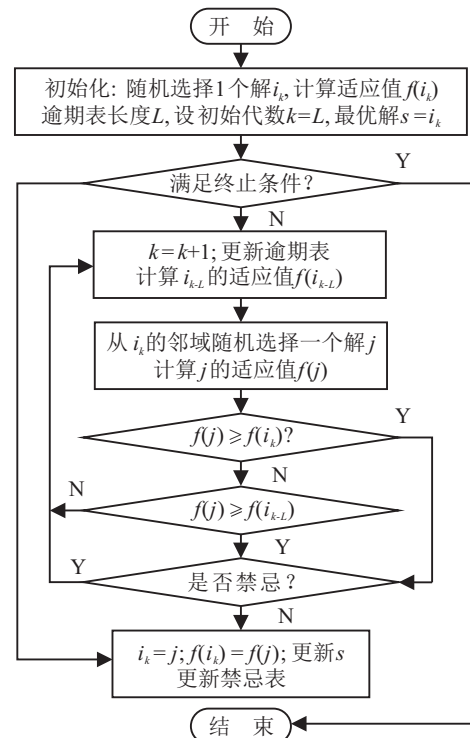
其中: Δf_{\max} 为30组随机初始解中的最大适应度差值,参数 p 取经验值0.8.

在LA算法方面,由于算法在迭代过程中接受的是非劣解,很有可能重复访问适应度值 $f(i)$ 相同的局部最优解.本节在LA算法中引入禁忌策略,当每次访问逾期表后进行禁忌操作,若待接受的新解已被禁忌,则放弃接受,以避免重复的解空间搜索.算法流程如图4(b)所示.

此外,考虑到本文海上协同搜索场景与投入平台



(a) 禁忌模拟退火算法流程



(b) 禁忌逾期接受算法流程

图4 混合禁忌策略的智能优化算法

数量差异较大,为适应不同规模的搜索场景,通过下式定义算法中禁忌表与逾期表的长度:

$$L_{\text{tabu}} = [\alpha L_{\text{entity}}] + 1, \quad (9)$$

$$L_{\text{late}} = [\beta L_{\text{entity}}]. \quad (10)$$

其中: L_{entity} 为搜索路径的转移点总数, α 和 β 分别取经验值 0.05 和 10.

综上, 分别设计了基于行为和基于混合智能优化算法的路径优化策略, 为海上多平台协同搜索路径优化问题提供了方法指导. 下文将利用上述策略开展海上多平台协同搜索仿真研究, 分别对协同搜索策略和路径优化策略的效果进行讨论分析.

4 仿真分析

4.1 仿真场景

根据多平台海上协同搜索问题建模与优化策略, 针对 3 种不同规模的海域场景开展搜索路径优化仿真, 即 $25 \times 25 \text{ km}^2$ 小规模场景, $50 \times 50 \text{ km}^2$ 中等规模场景, $100 \times 100 \text{ km}^2$ 大规模场景. 为定量对比优化效果, 3 种场景的优化时间分别统一为 100 s, 500 s 和 1 000 s, 收益值为 5 次优化结果的平均收益.

在仿真实验中, 考虑到海上搜索任务的时效性和快响性通常要求较高, 甚至不吝成本要求短时间内完成搜索任务, 本文的仿真实验不考虑各平台执行任务的搜索成本. 令搜索时间的权重系数 $w_1 = \sum n_i$, $i = A, B, C$.

4.2 协同搜索策略对比分析

为了直观地展示单平台、同构协同与异构协同搜索策略的收益差异, 表 2 对不同规模的海域搜索场景中 3 者的收益均值进行对比, 其中搜索路径优化算法均为 TSA.

表 2 海上平台协同搜索策略

场景规模	协同策略	搜索平台	场景序号	收益均值
小	单平台	舰船类	1#	405
		飞机类	2#	368
		卫星类	3#	313
	同构协同	舰船类	10#	423
		飞机类	11#	404
		卫星类	12#	384
异构协同	—	19#	426	
中	单平台	舰船类	4#	1 248
		飞机类	5#	380
		卫星类	6#	695
	同构协同	舰船类	13#	1 573
		飞机类	14#	1 509
		卫星类	15#	1 692
异构协同	—	20#	1 748	
大	单平台	舰船类	7#	3 118
		飞机类	8#	380
		卫星类	9#	1 454
	同构协同	舰船类	16#	5 927
		飞机类	17#	3 826
		卫星类	18#	5 984
异构协同	—	21#	6 247	

由表 2 可见, 单平台搜索在小规模场景中收益与协同搜索收益相近, 但无法满足大中场景中的搜索收益需求, 表明了协同策略的必要性. 在同构协同方面, 飞机类平台虽然拥有较大的转移速度, 但搜索次数有限, 特别是在大规模场景中, 搜索收益远不及卫星类与舰船类平台. 同时, 对比异构搜索与同构搜索收益可知, 得益于飞机类平台灵活的机动能力, 以及卫星类平台较大的连续推扫搜索能力, 搜索平台相互合作、取长补短的异构协同策略在各类规模的搜索场景中均表现出优于同构协同的收益效果.

4.3 路径优化策略对比分析

在多平台异构协同的基础上, 针对不同规模的搜索场景, 本节首先对比基于行为的搜索策略与智能优化策略收益值, 见图 5, 其中舰船类平台的进入边界约束如图中箭头所示. 由图 5(a) 和图 5(d) 可见, 在小场景搜索中, 基于行为的搜索策略与智能优化策略收益接近, 不同类型平台之间的搜索区域相互独立, 没有重叠. 图 5(b) 和图 5(e) 引入卫星类搜索平台, 基于行为的搜索策略与智能优化策略在搜索路线上产生了一定区别, 但舰船类平台的搜索路径均趋近于卫星类平台的推扫方向. 同时, 由于飞机类平台拥有优越的转移速度, 能够“跳跃”至其他平台邻域, 弥补搜索“盲区”, 达到协同效果. 图 5(c) 中, 不同类型的搜索平台因搜索能力各异而承担了不同面积的搜索任务, 各司其职, 互不干扰, 但缺乏协同. 图 5(f) 智能优化策略中飞机类平台发挥优越的机动性能, 对舰船类与卫星类平台附近的搜索盲区开展补充搜索或交错搜索, 取得了更高的覆盖率和总体收益. 因此, 在多平台协同的海上搜索问题中, 基于智能算法的路径优化策略能够更加充分地发挥各类平台优势, 在搜索行动中相互协作、取长补短, 普遍优于基于行为的路径优化效果.

另外, 本节对比了同等优化时间下基于不同混合智能策略的路径优化效果, 如图 6 所示, 白色为 SA, 阴影为 LA. 由图 6(a) 小场景搜索结果可见, SA 与 LA 优化收益和标准差相近, 遗传策略、禁忌策略和遗传禁忌策略对搜索效果有一定程度的提升. 图 6(b) 中场景搜索结果表明, 混合智能策略对 SA 和 LA 的优化效果有明显提升; 除基本算法外, SA 的收益效果均略优于 LA, 但优化结果的标准差也偏大; 禁忌策略和遗传禁忌策略对优化效果提升较大, 但遗传禁忌策略也带来了更大的标准差. 图 6(c) 大场景搜索结果表明, 混合智能策略对 SA 优化效果有一定提升, 对 LA 优化效果提升显著; SA 基本算法的优化效果显著优于 LA, 但随着遗传与禁忌策略的引入两者收益差异缩短;

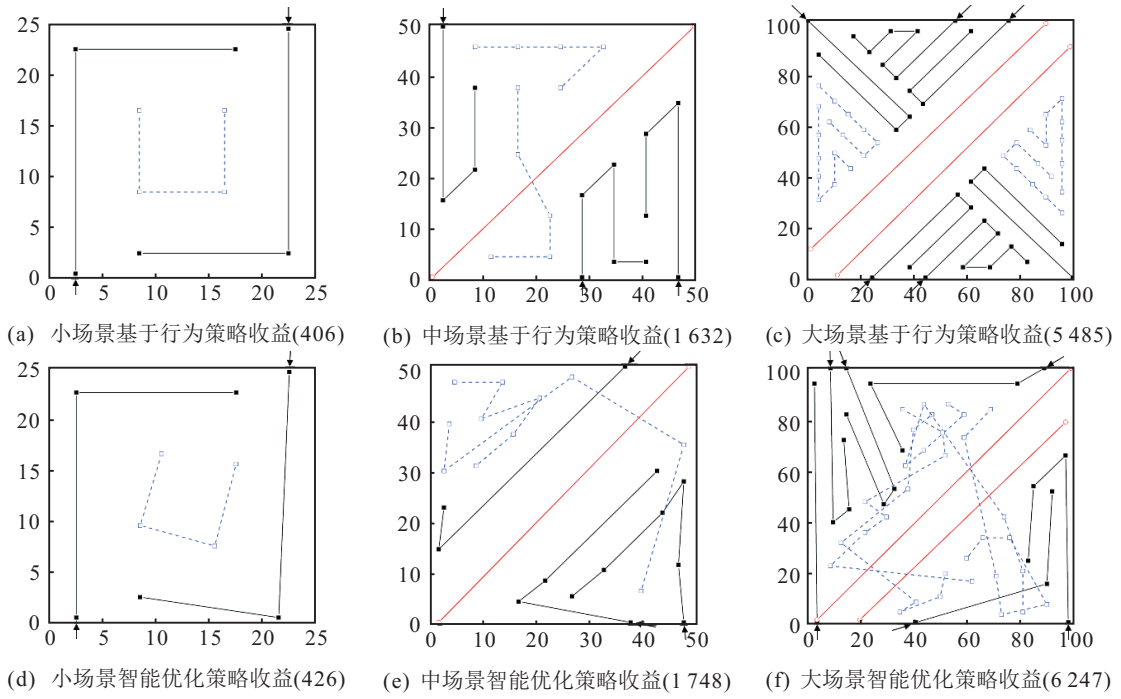


图5 基于行为与基于智能算法的搜索收益对比

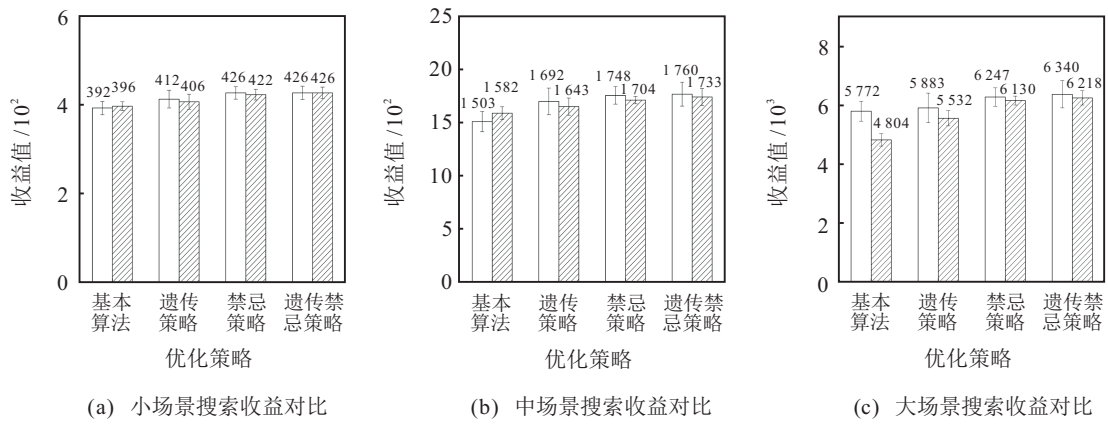


图6 基于不同智能优化策略的搜索收益对比

SA优化结果的标准差普遍大于LA,遗传策略在提升优化效果的同时也带来了较大的收益标准差。综上,遗传策略、禁忌策略和遗传禁忌策略均对多平台异构协同搜索收益带来了不同程度的提升,其中遗传禁忌策略的提升效果最佳,禁忌策略次之且具有较小的标准偏差。

5 结论

依赖舰船、飞机和卫星开展的海上搜索行动是现代海上军事任务、资源勘测和突发救援的主要形式。针对传统方法中搜索平台与行为单一、缺乏协同的问题,本文建立了多平台海上协同搜索路径优化模型,设计了多平台海上协同搜索与路径优化策略,开展了不同规模的搜索路径优化仿真,得出以下两点研究结论:

1) 基于混合智能算法的路径优化效果普遍优于

基于行为的搜索策略与单一算法,混合智能策略中遗传禁忌策略效果最佳,禁忌策略次之且具有较小的标准偏差。

2) 异构协同搜索策略能够充分发挥各平台优势、取长补短,在大中规模的海域搜索中取得了明显优于单平台与同构协同搜索的收益效果。

同时,由于国内外相关研究较少,本文在建模过程进行了较多简化,协同优化策略也存在很大提升空间。针对不足之处,指出以下两点未来研究内容:

1) 平台协同方面,基于Multi-Agent技术,研究多平台交互的分布式路径优化策略,提升搜索自主性、并行性与鲁棒性。

2) 算法协同方面,利用分布估计算法、协同进化算法等分布式算法应对多平台协同搜索大规模、多目标和强约束的优化问题。

参考文献(References)

- [1] Varela G, Caamano P, Orjales F, et al. Autonomous UAV based search operations using constrained sampling evolutionary algorithms[J]. *Neurocomputing*, 2014, 132(23): 54-67.
- [2] Galceran E, Carreras M. Coverage path planning for marine habitat mapping[C]. *Oceans 2012 MTS/IEEE. Virginia: IEEE, 2012: 1-8.*
- [3] 张忠华, 顾纪祥, 茅永兴, 等. 航天器海上测控技术现状分析与发展思考[J]. *遥测遥控*, 2011, 32(4): 1-4. (Zhang Z H, Gu J X, Mao Y X, et al. Current situation analysis and development thinking of spacecraft maritime tracking and controlling technologies[J]. *J of Telemetry, Tracking and Command*, 2011, 32(4): 1-4.)
- [4] Department of Defense. The unmanned system integrated roadmap, FY 2011-2036[R]. Washington: Department of Defense, 2011.
- [5] Galceran E, Carreras M. A survey on coverage path planning for robotics[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, 61(12): 1258-1276.
- [6] Bircher A, Kamel M, Alexis K, et al. Three-dimensional coverage path planning via viewpoint resampling and tour optimization for aerial robots[J]. *Autonomous Robots*, 2015, 40(6): 1-20.
- [7] Lazarus S B, Tsourdos A, White B A, et al. Cooperative unmanned aerial vehicle searching and mapping of complex obstacles using two-dimensional splinegon[J]. *J of Aerospace Engineering*, 2010, 224(2): 149-170.
- [8] Franco C D, Buttazzo G. Coverage path planning for UAVs photogrammetry with energy and resolution constraints[J]. *J of Intelligent and Robotic Systems*, 2016, 83(3/4): 1-18.
- [9] Hameed I A. Intelligent coverage path planning for agricultural robots and autonomous machines on three-dimensional terrain[J]. *J of Intelligent and Robotic Systems*, 2014, 74(3/4): 965-983.
- [10] 罗翔, 郭万海, 姜志勇. 水面舰艇编队巡逻搜索时的组织与战术计算[J]. *指挥控制与仿真*, 2007, 29(4): 52-62. (Luo X, Guo W H, Jiang Z Y. Organizing and tactical calculating for warship formation in searching submarine[J]. *Command Control and Simulation*, 2007, 29(4): 52-62.)
- [11] Lee T K, Baek S H, Choi Y H, et al. Smooth coverage path planning and control of mobile robots based on high-resolution grid map representation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, 59(10): 801-812.
- [12] Li Y, Chen H, Meng J E, et al. Coverage path planning for UAVs based on enhanced exact cellular decomposition method[J]. *Mechatronics*, 2011, 21(5): 876-885.
- [13] 罗木生, 姜青山, 侯学隆, 等. 直升机使用吊声应召反潜兵力需求仿真[J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(6): 1277-1286. (Luo M S, Jiang Q S, Hou X L, et al. Simulation of optimum helicopter force in definite second time submarine search by dipping sonar[J]. *J of System Simulation*, 2012, 24(6): 1277-1286.)
- [14] Barrientos A, Colorado J, Cerro J D, et al. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots[J]. *J of Field Robotics*, 2011, 28(5): 667-689.
- [15] Zhu D Q, Tian C, Jiang X F, et al. Multi-AUVs cooperative complete coverage path planning based on GBNN algorithm[C]. *The 29th Chinese Control and Decision Conf. Chongqing: IEEE, 2017: 6761-6766.*
- [16] Liu X L, Laporte G, Chen Y W, et al. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for agile satellite scheduling with time-dependent transition time[J]. *Computers and Operations Research*, 2017, 86(1): 41-53.
- [17] 邸斌, 周锐, 丁全. 多无人机分布式协同异构任务分配[J]. *控制与决策*, 2013, 28(2): 274-278. (Di B, Zhou R, Ding Q X. Distributed coordinated heterogeneous task allocation for unmanned aerial vehicles[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(2): 274-278.)
- [18] 陈海, 王新民, 焦裕松, 等. 一种凸多边形区域的无人机覆盖航迹规划算法[J]. *航空学报*, 2010, 31(9): 1082-1088. (Chen H, Wang X M, Jiao Y S, et al. An algorithm of coverage flight path planning for UAVs in convex polygon areas[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(9): 1082-1088.)
- [19] Hamilton M J, Kemn S, Hughes D. Antisubmarine warfare applications for autonomous underwater vehicles: The GLINT09 sea trial results[J]. *J of Field Robotics*, 2010, 27(6): 890-902.
- [20] 王凌, 郑环宇. 一种多目标资源受限项目调度问题的教学算法[J]. *控制与决策*, 2015, 30(10): 1868-1872. (Wang L, Zheng H Y. A teaching-learning-based optimization algorithm for multi-objective resource constrained project scheduling problem[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(10): 1868-1872.)
- [21] Wang J J, Wang L. A knowledge-based cooperative algorithm for energy-efficient scheduling of distributed flow-shop[J]. *Trans on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, DOI: 10.1109/TSMC.2017.2788879.
- [22] 吴楚格, 王凌, 郑晓龙. 求解不相关并行机调度的一种自适应分布估计算法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(12): 2177-2182. (Wu C G, Wang L, Zheng X L. An adaptive estimation of distribution algorithm for solving the unrelated parallel machine scheduling[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(12): 2177-2182.)

作者简介

杜永浩(1993—), 男, 博士生, 从事智能优化理论与应用的研究, E-mail: duyonghao15@163.com;

邢立宁(1980—), 男, 研究员, 博士, 从事智能优化理论与应用等研究, E-mail: xing2999@qq.com;

陈盈果(1986—), 男, 副教授, 博士, 从事智能优化理论与应用等研究, E-mail: ygchen@nudt.edu.cn.