

控制与决策

Control and Decision

USV&AUV水下目标协同搜索与打击航迹规划

吴宇, 苏析超, 崔佳鹏, 杨戈

引用本文:

吴宇, 苏析超, 崔佳鹏, 等. USV&AUV水下目标协同搜索与打击航迹规划[J]. *控制与决策*, 2021, 36(4): 825–834.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1038>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于两阶段迭代优化的空天观测资源协同任务规划方法

A two-stage iterative optimization method for the coordinated task planning of space and air observation resources

控制与决策. 2021, 36(5): 1147–1156 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1193>

面向多目标侦察任务的无人机航线规划

UAV trajectory planning for multi-target reconnaissance missions

控制与决策. 2021, 36(5): 1191–1198 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1284>

天临空协同对地观测任务规划模型与并行竞争模因算法

Planning model and parallel competing memetic algorithm for space–near space–air based cooperative earth observation missions

控制与决策. 2021, 36(3): 523–533 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0732>

FMM与改进GBNN模型相结合的多AUV实时围捕算法

Multi-AUV real-time hunting control based on FMM and improved GBNN model

控制与决策. 2020, 35(12): 2845–2854 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0393>

微型无人机集群低时延组网规划方法

A low delay networking planning method for micro UAV swarm

控制与决策. 2020, 35(11): 2696–2706 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1549>

USV&AUV水下目标协同搜索与打击航迹规划

吴宇¹, 苏析超^{2†}, 崔佳鹏¹, 杨戈³

(1. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044; 2. 海军航空大学 航空作战勤务学院, 山东 烟台 264001;
3. 中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100036)

摘要: 异构载运工具合作执行复杂任务是提高任务完成效率的有效手段, 已被广泛应用于军事与民用任务. 关注对水下目标的搜索与打击任务, 此项任务由水面航行器 (unmanned surface vehicle, USV) 与水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 合作完成. 首先描述 USV&AUV 系统的框架以及 USV 与 AUV 在系统中发挥的作用. 在协同航迹规划模型中, 整个任务被划分为目标搜索和目标打击两个阶段, 两个阶段的目标分别是使得搜索空间最大和 AUV 与目标的末端位置误差最小. 模型中的约束包括 USV 和 AUV 的机动能力、目标探测能力、通讯范围等. 在协同策略的设计中, 针对该任务两个阶段的特点, 分别基于随机模拟实验和异步规划策略设计协同航迹规划算法, 以集中式和分布式模式分别生成两阶段的航迹. 仿真结果表明, USV&AUV 系统能够在不同的条件下完成对水下目标的搜索与打击任务. 在目标打击阶段, 与集中式规划结构相比, 分布式规划结构能够应对各种复杂的场景并成功完成任务.

关键词: 载运工具; USV; AUV; 协同航迹规划; 异步规划策略

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1038

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 吴宇, 苏析超, 崔佳鹏, 等. USV&AUV 水下目标协同搜索与打击航迹规划 [J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 825-834.

Coordinated path planning of USV&AUV for an underwater target

WU Yu¹, SU Xi-chao^{2†}, CUI Jia-peng¹, YANG Ge³

(1. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Aviation Operations Support, Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 3. System Engineering Research Institute, China State Ship Building Corporation, Beijing 100036, China)

Abstract: Coordination among heterogeneous vehicles becomes an effective approach to improve the efficiency of completing complicated tasks, which has been widely applied both to military and civil mission. The search and strike mission for underwater targets is focused on, and this mission is executed by the cooperation between an unmanned surface vehicle (USV) and an autonomous underwater vehicle (AUV). First, the framework of the USV&AUV system is described, and the roles of USV and AUV in this mission are defined. In the coordinated path planning model, the whole mission is divided into the search phase and the strike phase, and the indexes are maximizing the search space and minimizing the terminal position error respectively. The maneuverability, target detection capability and communication range of vehicles are all taken into account in this model. According to the characteristic of different phases, strategies based on random simulation experiments and asynchronous planning are developed respectively, and the paths are generated in a centralized or a distributed mode. Simulation results show that the USV&AUV system can complete the search and strike mission in different cases. Compare to the centralized mode, the distributed mode can address various situations in the strike phase.

Keywords: vehicles; USV; AUV; coordinated path planning; asynchronous planning

0 引言

多载运工具合作完成复杂任务能够增加成功率, 提高任务完成效率, 已成为新的趋势. 例如多无人机

能够同时对运动目标发动攻击, 对目标造成最大限度的损伤^[1]. 另外一个典型的例子是舰载机与航母配合, 使得舰载机能够安全降落到航母甲板上^[2]. 在

收稿日期: 2019-07-20; 修回日期: 2019-10-28.

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(2019CDJGFHK001); 国家自然科学基金项目(61671462); “泰山学者”建设工程专项经费项目.

责任编辑: 巩敦卫.

†通讯作者. E-mail: suiting1012@163.com.

以上两个例子中,任务能够成功执行的前提是对各载运工具的运动进行综合考虑.另外,载运工具间的协同可进一步划分为两大类,即同构载运工具间的协同和异构载运工具间的协同.在第1类中,常见的是无人机系统(UAV system, UAVs)、无人车系统(UGV system, UGVs)、无人水面航行器系统(USV system, USVs)、无人水下航行器系统(AUV system, AUVs)在空中、地面、海面、水下分别执行各类任务.第2类中,有UAV&UGV系统、UAV&USV系统、UAV&AUV系统等.在这些系统中,不同种类的载运工具根据各自特点和任务需求充当不同的角色.文本引入USV&AUV系统完成水下目标搜索与打击任务,研究USV与AUV的协同机制,目标是进一步提高任务完成效率.

对于同构载运工具,多无人机协同被广泛应用于侦察^[3]、物资配送^[4]等任务,受到了更多的关注.在协同控制中,每架无人机的飞行路线至关重要^[5].针对多无人机协同避碰航迹规划问题,文献[6]提出了一种增加无人机自身斥力场的改进人工势场与Bezier曲线相结合的方法,使无人机在避碰时能有效避免频繁大转角和急促转弯现象的发生.采用的分段Bezier曲线平滑算法能有效消除航迹的振荡现象.USVs编队通常被用于执行搜救任务,任务分配、航迹规划、队形控制等问题^[7-8]应当首先考虑,以保证USVs系统的正常运行.对于基于自组织映射和快速推进算法,文献[9]提出了一种新的智能多任务分配与航迹规划算法.在该方法中,一种新颖的能源协调模式和任务优先级确定策略被用来处理能量消耗和通信范围问题,实现了将任务高效分配到每个USV上的目标.AUVs编队则用于执行数据收集^[10-11]、水下油井维护和部署底栖生物站^[12]等任务.文献[13]研究了AUVs编队的协同狩猎问题.在搜索阶段采用分割与分列的平行搜索策略,维持稳定的编队,防止AUV间的碰撞.在协同追赶阶段,采用动态结盟与分配追赶方向的方法,能够高效完成追赶任务.

与同构载运工具间的协同相比,关于异构载运工具协同的研究鲜有报道.比较常见的是UAV与UGV间的协同,UAV在空中观察地面图像,并将结果传送至UGV构建地面地形地图,同时也能提高识别地面障碍物的准确性^[14].UAV&UGV系统利用了UAV灵活敏捷的特点和UGV携带的强大的计算资源^[15].类似地,UAV&USV系统可用于监测和清除海洋污染^[16].UAV用于监测多个海洋区域,而USV用来清除这些污染.为了优化这一过程,文献[17]采用遗传算法规划从起点到目标点的航迹.所提出的

方法能够减少海洋区域的污染程度,同时也将载运工具的容错能力考虑在内.以上UAV&UGV系统和UAV&USV系统中,各载运工具的功能相对独立,尚未充分挖掘不同载运工具的优点,实现优势互补.任务执行过程中,载运工具间的关系为“主-辅”关系或顺承关系.例如,在UAV&UGV系统中,由UAV主要负责完成侦察、打击等任务,而UGV为UAV提供各种资源服务,如提供地面图像、计算结果等,并未真正与UAV共同完成任务.在UAV&USV系统中,首先用UAV观测海洋区域,待发现污染后再由USV清除污染,两种载运工具也未同时执行任务.以上两种系统中主要关注信息交互与融合、单载运工具航迹规划等问题,而协同航迹规划问题尚未受到关注.

本文研究的水下目标搜索与打击任务,可以采用单个AUV,AUVs编队或者USV&AUV系统来完成.但是AUV搜索目标的能力较弱^[18],当目标距离AUV较远时,仅仅使用AUV会花费大量的时间在搜索目标上,降低任务执行的效率.因此,本文采用USV&AUV系统完成水下目标搜索与打击任务,关注协同航迹规划问题的建模和算法设计问题,进一步提高任务完成效率.论文的主要贡献如下:

- 1) 描述USV&AUV系统框架、水下目标搜索与打击任务的内容,定义不同任务阶段USV和AUV的功能;
- 2) 建立搜索与打击任务的模型,此模型中考虑载运工具的机动能力、通信和探测距离的约束,针对每个任务阶段特点提出不同的优化指标;
- 3) 提出USV&AUV协同策略和航迹规划算法,根据每个任务阶段特点,分别采用集中式和分布式方式处理信息,利用粒子群算法生成USV和AUV的行动航迹.

1 USV&AUV系统和搜索与打击任务描述

本文研究的水下目标搜索与打击任务描述如下:USV与AUV分别在海面和水下工作,协同搜索水下目标.当USV或AUV探测到水下目标的位置时,搜索阶段结束.然后水下目标的位置信息将会发送至AUV,AUV跟随目标并最终完成对其的打击任务.

在执行任务过程中,USV与AUV之间通过声通信的方式进行信息交流.USV和AUV在系统中的功能总结如下:

- 1) USV: 在目标搜索阶段,USV的任务是尽量扩大搜索范围,还有一个重要的功能是保证USV与AUV之间的距离始终在最大允许通信范围内.当目标位置被USV探测到后,在AUV发现目标前,USV负

责将目标的实时位置信息发送给 AUV.

2) AUV: 虽然与 USV 相比 AUV 的航行速度较慢, 但 AUV 仍与 USV 协同搜索水下目标. 当目标被探测到后, AUV 根据 USV 发送来的目标实时位置信息朝目标航行, 并最终打击目标.

在目标搜索阶段, USV 从 AUV 处收集信息并做出决策, 决定 USV 和 AUV 下一时刻的行动, 生成的指令信号发送至各载运工具执行. 以上过程将会一直持续到水下目标被 USV 或 AUV 探测到. 目标有可能首先被 USV 或者 AUV 探测到, 为方便起见, 称这两种情况分别为情形 1 和情形 2. 情形 2 较为简单, 由于目标首先被 AUV 探测到, AUV 应当不断缩小与目标之间的距离并最终打击目标, 在这种情况下, USV 没有参与到打击阶段中, 因此无需与 USV 建立联系. 情形 1 较为复杂, 在 USV 探测到水下目标后, 它会使自身与目标的距离始终保持在最大探测距离范围内, 并且将目标的实时位置信息发送至 AUV. 一旦 AUV 探测到目标, 情形 1 将会转换为情形 2. 根据 USV 和 AUV 在打击阶段的工作模式, USV 和 AUV 可以自主地决定自己的行动方案.

2 USV&AUV 系统数学模型

本节首先描述 USV、AUV 和水下目标的运动和机动能力; 随后设置每个任务阶段的约束条件, 保证信息交流和目标探测的有效性以及打击任务的成功; 最后提出反映每个任务阶段的优化指标, 确保完成任务的效率.

2.1 USV 与 AUV 运动模型以及水下目标运动预测

在航迹规划问题中, 通常将载运工具视为质点, 采用质点运动模型(包括动力学模型和运动学模型)描述其运动, 甚至在一些文献中只考虑了质点运动学模型^[19]. 这是因为与控制器模块相比, 航迹规划模块作为外回路为内回路提供控制指令信号, 要求有较快的运算速度. 航迹规划问题中载运工具通常视为刚体, 其运动模型由一组变系数非线性微分方程描述, 求解此方程组需要花费一定时间, 应当在控制器模块这一层来解决此问题. 在协同航迹规划问题中, 为了进一步节约时间用于协同模块的计算, 现有文献中只考虑了载运工具的运动学模型^[20-21]. 基于以上考虑, 本文将 USV、AUV 和水下目标都简化成质点进行, 只需关注它们在三维空间内的位置信息. 在以上前提下建立地面坐标系, 定义海平面为 XOY 平面, OZ 轴正方向垂直向上. USV、AUV 和水下目标的质点运动用如下方程组表示:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \cos \varphi, \\ \dot{y} = v \cos \theta \sin \varphi, \\ \dot{z} = v \sin \theta, \\ \dot{\theta} = q, \\ \dot{\varphi} = r, \\ \dot{v} = a. \end{cases} \quad (1)$$

其中: (x, y, z) 和 v 是位置和速度信息, θ 和 φ 是俯仰角和偏航角, q 、 r 和 a 是俯仰角速度、偏航角速度和加速度. 可在以上变量加注角标 S 、 U 和 T , 分别表示 USV、AUV 和水下目标的状态. 式(1)中, $u = [q, r, a]^T$ 为控制变量, $x = [x, y, z, v, \theta, \varphi]^T$ 为状态变量. 当初始状态和控制变量确定后, USV、AUV 和水下目标的状态可通过式(1)计算得到.

引入机动能力来反映载运工具改变速度、高度和运动方向的能力. 为表达载运工具机动能力, 控制变量必须约束在一定范围内. 下式分别是对 USV、AUV 和水下目标的机动能力约束:

$$\begin{cases} q_S = 0, \\ |r_S| \leq r_{S\max}, \\ |a_S| \leq a_{S\max}. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} |q_U| \leq q_{U\max}, \\ |r_U| \leq r_{U\max}, \\ |a_U| \leq a_{U\max}. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} |q_T| \leq q_{T\max}, \\ |r_T| \leq r_{T\max}, \\ |a_T| \leq a_{T\max}. \end{cases} \quad (4)$$

式(2)~(4)中的下标 S 、 U 和 T 分别表示 USV、AUV 和水下目标. 式(2)中, 由于 USV 在水面上航行, 其俯仰角 θ 与俯仰角速度 q_S 始终为 0. 注意到水下目标的运动是随机的, 因此 q_T 、 r_T 和 a_T 也是满足式(4)的随机数, 用来确定水下目标在每个时刻的运动状态.

如果水下目标在 USV 或 AUV 的探测范围内, 则其当前位置会被探测到. 但是, 由于水下目标做随机运动, 其下一时刻的位置无法提前预知, 只能通过可靠的方法进行预测. 本文基于卡尔曼滤波方法预测水下目标下一时刻的位置信息.

卡尔曼滤波的线性微分方程组表示如下:

$$\begin{cases} X(k) = AX(k-1), \\ Z(k) = HX(k-1). \end{cases} \quad (5)$$

其中: X 是水下目标的实际状态, Z 是状态的观测值, A 是从时刻 $k-1$ 到 k 的转移矩阵, H 是从 X 到 Z 的转移矩阵. A 和 H 可以通过水下目标的运动方程确定, 展示如下:

$$X(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ x'(k) \\ y(k) \\ y'(k) \\ z(k) \\ z'(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k-1) \\ x'(k-1) \\ y(k-1) \\ y'(k-1) \\ z(k-1) \\ z'(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T^2}{2} & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x(k-1) \\ a_y(k-1) \\ a_z(k-1) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$Z(k) = \begin{bmatrix} x_Z(k) \\ y_Z(k) \\ z_Z(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x'(k) \\ y(k) \\ y'(k) \\ z(k) \\ z'(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \\ v_z(t) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 T 是两个相邻时刻的时间间隔. 从式(6)和(7)可以看出, A 和 H 可以表示为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

用卡尔曼滤波方法预测水下目标运动的法则如下:

$$\begin{cases} X(k|k-1) = AX(k-1|k-1), \\ P(k|k-1) = AP(k-1|k-1)A^T + Q, \\ X(k|k) = \\ X(k|k-1) + K(k)(Z(k) - HX(k|k-1)), \\ K(k) = P(k|k-1)H^T / (HP(k|k-1)H^T + R), \\ P(k|k) = (I - K(k)H)P(k|k-1). \end{cases} \quad (8)$$

其中: P 是估计误差的协方差矩阵, Q 是系统噪声标准矩阵, R 是测量误差的协方差矩阵, K 是增益矩阵. 当初始值 $X(0)$ 和 $P(0)$ 给定且 Q 和 R 的值设置好之后, X 在时刻 k 的估计值可基于 k 时刻 Z 的观测值递归得到.

2.2 载运工具的状态约束

此任务中, 载运工具的状态必须满足一定的条件来保证运行安全和有效交流, 这些约束条件总结如下:

1) 可行空间约束.

载运工具必须在一定的空间范围内运动. 注意到 USV 总是在水面上运动, 因此有附加的约束条件, 展示如下:

$$\begin{cases} x_{\min} \leq x_S, x_U, x_T \leq x_{\max}; \\ y_{\min} \leq y_S, y_U, y_T \leq y_{\max}; \\ z_{\min} \leq z_U, z_T < 0; \\ z_S = 0. \end{cases} \quad (9)$$

其中: x_{\min} 、 x_{\max} 、 y_{\min} 和 y_{\max} 是 XOY 平面的边界, z_{\min} 是 AUV 能够航行的最深位置.

2) 载运工具速度约束.

载运工具的最大运动速度约束如下:

$$\begin{cases} |V_S| \leq V_{S\max}, \\ |V_U| \leq V_{U\max}, \\ |V_T| \leq V_{T\max}. \end{cases} \quad (10)$$

3) 末端约束.

AUV 应该在末端时刻击中目标. 当 AUV 与目标中心的距离小于一定值时, 可认为此时目标已被击中, 此约束表示如下:

$$[(x_U(t_f) - x_{tar}(t_f))^2 + (y_U(t_f) - y_{tar}(t_f))^2 + (z_U(t_f) - z_{tar}(t_f))^2]^{\frac{1}{2}} \leq \text{dis}_{W-T}. \quad (11)$$

其中: $(x_{tar}, y_{tar}, z_{tar})$ 是水下目标的预测位置, t_f 是末端时刻.

4) 载运工具最大探测范围与最大通信距离.

本文假设 USV 和 AUV 的探测范围为球面, 球面的半径 d_{det} 则被定义为最大探测距离. 当 USV 或 AUV 与目标的距离小于 d_{det} 时, 则认为目标已被探测到. 另外, 为了保证正常的信息交流, USV 与 AUV 之间的距离应当小于 d_{S-U} .

2.3 优化指标与协同机制

本任务两个阶段的目标不尽相同. 在目标搜索阶段, 应当尽量增大搜索空间来增加探测到目标的概率. 在目标打击阶段, AUV 与目标之间的距离应当越小越好, 以实现精确打击. 当 USV、AUV 中的一个探测到水下目标时, 目标搜索阶段结束, 并立即转入到目标打击阶段. 每个阶段的优化指标如下:

$$J_1 = \max((V_{USV} \cup V_{AUV}) \cap V_{z \leq 0}), \quad (12)$$

$$J_2 = \min[(x_U(t_f) - x_{tar}(t_f))^2 + (y_U(t_f) - y_{tar}(t_f))^2 + (z_U(t_f) - z_{tar}(t_f))^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

其中: V_{USV} 和 V_{AUV} 分别是 USV 和 AUV 的搜索范围, $V_{z \leq 0}$ 是在海平面以下的空间. 式(12)中, 优化指标整合了来自 USV 和 AUV 的信息, 因此采用集中决策的方式, 由一个单独的决策中心向 USV 和 AUV 发出控制指令信号. 相比于 AUV, USV 能够搭载具有强大计算能力的计算机, 因此在目标搜索阶段由 USV 做出决策, 如图1所示.

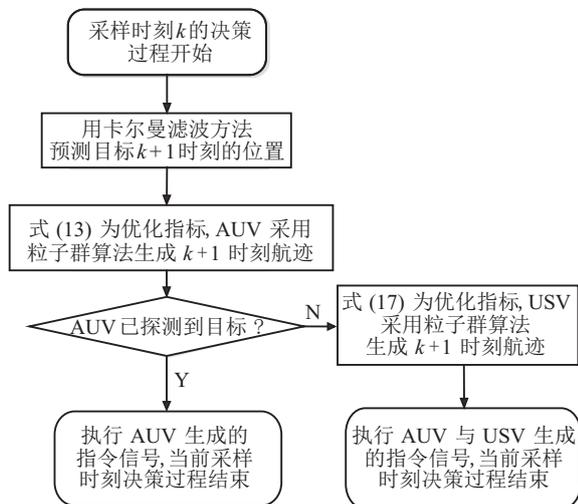


图1 在采样时刻k异步规划策略过程

计算式(13)的优化指标时, 仅仅需要 AUV 的位置信息, 因此理论上采用集中式或分布式决策(即 USV 和 AUV 能够自己决定其下一步的行动, 而不存在一个单独的决策中心向其他载运工具发送指令信号)均可求解此问题. 但是, 在集中式决策下, 所有的约束条件都在同一优化问题中考虑, 有可能会出现问题搜索不到可行解的情况. 在分布式决策中, 所有的约束条件将会被分解到几个子优化问题中进行处理, 降低了问题的求解难度, 更有可能获得问题的可行解. 本问题中, 在分布式决策模式下, USV 或 AUV 在做决策时只需考虑与自身相关的约束条件.

3 协同目标搜索与打击航迹规划算法

在本任务中, 目标搜索与打击两个阶段相对独立, 因此提出两个算法来分别解决两个子问题. 为了适应在线规划的要求, 采用滚动优化的方法, 在每一步的优化中, 只生成下一时刻的控制指令信号.

3.1 基于随机模拟实验的协同搜索算法

由于水下目标的运动是随机的, 为增大搜索到目标的可能性, 最直接的方法就是增加可探测空间的体积. 为了计算式(12)优化指标, 必须对几个体积取交集来衡量解的质量. 但是, 要精确计算式(12)的值并不容易, 需要花费大量的在线计算时间, 而且目标搜索阶段的目的是为了得到精确的探测空间体积, 而是从众多的备选解中选出对应下一时刻最好 USV、AUV 位置的解, 以尽量覆盖整个搜索空间.

针对以上在计算方面的困难和问题的实际情况, 本文基于随机模拟实验提出一种估算策略. 由于水下空间被定义为一个长方体, 其长、宽、高可以分别被均匀地划分成 a, b, c 份, 因此一共有 $(a + 1) \cdot (b + 1) \cdot (c + 1)$ 个点分布在长方体表面或内部.

对于一个特定的 USV、AUV 位置组合, 探测空间的大小可以通过落入此空间点的个数进行衡量. 这样就将复杂的准确计算探测空间体积问题转换成了判断点是否在由 USV、AUV 组成的组合探测空间内. 因此, 式(12)的优化指标可以改写为

$$J_1 = \min((a + 1) \cdot (b + 1) \cdot (c + 1) - N_{space}), \quad (14)$$

其中 N_{space} 是落在组合探测空间内点的个数.

在每个采样时刻, USV、AUV 在下一时刻的最佳位置组合由粒子群算法进行优化. 在目标搜索阶段, USV&AUV 系统以集中方式组织, 决策由 USV 统一做出, 因此在粒子群算法中控制变量为

$$u^1 = [r_s, a_s, q_U, r_U, a_U]^T.$$

u^1 通过以下法则进行更新:

$$\begin{aligned} \Delta u_i^1(t) = & \omega \cdot \Delta u_i^1(t-1) + c_1 \cdot \text{rand}_1 \cdot (u_{ib}^1(t) - \\ & u_i^1(t)) + c_2 \cdot \text{rand}_2 \cdot (u_{gb}^1(t) - u_i^1(t)), \end{aligned} \quad (15)$$

$$u_i^1(t+1) = u_i^1(t) + \Delta u_i^1(t). \quad (16)$$

其中: $u_i^1(t)$ 是粒子 i 在第 t 次迭代过程中的控制变量, $u_{ib}^1(t)$ 和 $u_{gb}^1(t)$ 是对应个体历史最优解和当前全局最优解的控制变量, ω 是惯性权重, c_1 和 c_2 是加速限制因子, rand_1 和 rand_2 是在 $[0,1]$ 内服从均匀分布的随机数. 如果 $u_i^1(t+1)$ 中的任何元素不满足式 (2)~(4), 则其将会被设置为最接近阈值, 使得算法能够正常运行. 另外, 如果经粒子群算法更新的解不满足 2.2 节中的约束条件, 则其适应度值将会被设置成一个很大的数, 表示这个解将会被舍弃.

3.2 基于异步规划策略的航迹规划算法

在目标打击阶段, USV 和 AUV 的行动方案由各自决定, 航迹规划最直接的方法是使 USV 或 AUV 在满足与自身相关的约束条件下不断生成下一步的行动航迹. 本文采用异步规划策略, 即在每个采样时刻, USV 和 AUV 以一定的次序先后决定下一时刻自己的行动航迹.

在每个采样时刻 k , 探测到目标的载运工具将会广播目标的当前位置信息; 然后 AUV 首先做出决策, 因为它是目标打击任务的实际执行者, 应当对 AUV 施加更少的约束以获得更好的结果. 因此, 在 AUV 做决策时, 没有把 USV 与 AUV 通信距离约束考虑在内. 在用卡尔曼滤波方法预测出水下目标下一时刻的位置后, 以式 (13) 为目标, AUV 决定下一步的行动方案. 在 AUV 做出决策后, USV 随后参考 AUV 的决策确定自己下一步的行动方案. 与施加在 AUV 上的约束相比, USV 做出决策时需要考虑 USV 与 AUV 之间通信距离的约束. 此时, USV 根据以下优化指标做出决策:

$$J_{2USV} = \min(d_{S-T}(k+1)), \quad (17)$$

其中 $d_{S-T}(k+1)$ 是 $k+1$ 时刻 USV 与水下目标之间的距离.

在目标打击阶段再一次使用粒子群算法生成 USV 和 AUV 的最优控制指令. 与目标搜索阶段不同, 目标打击阶段的 USV 和 AUV 的控制变量分别为 $u_{USV}^2 = [r_s, a_s]$ 和 $u_{AUV}^2 = [q_u, r_u, a_u]$. 异步规划策略的过程如图 1 所示. 图 1 中, 在 AUV 探测到目标后, 将不再关注 USV 的运动, 因为随后 AUV 将会对目标

实施打击, 而在这一过程中 USV 没有做出贡献.

3.3 协同搜索与打击任务航迹规划算法流程

以上章节详细描述了协同搜索与打击任务航迹规划算法. 下面给出整个算法的流程, 如图 2 所示.

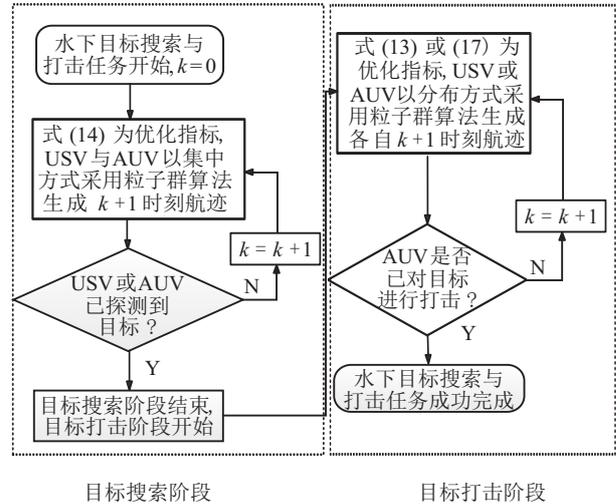


图 2 协同航迹规划

图 2 中, 关于 USV 和 AUV 如何获得最佳行动方案的内容已在 3.1 和 3.2 节阐述, 故此处省略. 粒子群算法分别用于生成目标搜索和目标打击阶段 USV 和 AUV 的航迹. 当 USV 和 AUV 中的任何一个探测到目标时, 目标搜索阶段结束, 同时目标打击阶段开始, 将此时 USV、AUV 和目标的状态信息作为目标打击阶段的初始状态输入. 因此, 尽管两个任务阶段的优化指标不同, 但由于粒子群算法是先后分别对两个任务阶段进行优化, 算法在两个阶段中独立使用, 不会相互影响. 另外, USV 与 AUV 的协同过程在两个阶段也不同. USV 和 AUV 参与了目标搜索的整个阶段, 而在目标打击阶段, 当 AUV 探测到目标后, USV 将会对剩余的任务没有贡献, 由 AUV 单独对目标实施打击.

4 仿真研究

为了说明本文所建立模型的合理性和提出协同航迹规划算法的优越性, 本节对不同设置和协同策略下的水下目标搜索与打击任务进行仿真. 对水下目标的初始位置进行不同设置, 以验证本文提出方法的有效性. 在目标打击阶段, 对两种决策方式 (集中式和分布式) 进行对比, 从而验证采用分布决策方式的优势. 在以上仿真实验中, 两相邻采样时间的间隔设置为 1 s, USV、AUV 的初始位置分别为 $(0, 0, 0)$ 和 $(0, 0, -30)$. 所有的结果都在主频为 3.40 GHz 的 Intel Core i7-3370 处理器上运行程序得到. 粒子群算法的参数取值参考了文献 [22] 中的设置. 由于在滚动优化过程中, 每次求解优化问题时控制变量的数目较少

(目标搜索阶段控制变量个数为5,目标打击阶段USV和AUV控制变量个数分别为2和3),经过不断尝试和比较,最终将优化种群的规模设置为10,最大迭代次数设置为20,使得在计算量不大的情况下就可以获

得令人满意的结果.另外,载运工具的机动能力和性能通过查阅“银色马林鱼”水面无人艇和“割喉者”无人潜艇的相关数据获得.其他的关于载运工具初始状态和约束的信息如表1所示.

表1 初始状态和约束条件设置

参数	值	参数	值	参数	值
$\theta_S(t_0)$ /deg	0	r_{Umax} /(rad / s)	0.2	x_{max} /m	5000
$\varphi_S(t_0)$ /deg	0	a_{Umax} /(m / s ²)	1	y_{min} /m	-5000
$V_S(t_0)$ /(m / s)	10	q_{Tmax} /(rad / s)	0.1	y_{max} m	5000
$\theta_U(t_0)$ /deg	0	r_{Tmax} /(rad / s)	0.2	z_{min} /m	-300
$\varphi_U(t_0)$ /deg	0	a_{Tmax} /(m / s ²)	1	dis_{W-T} /m	2
$V_U(t_0)$ /(m / s)	3	V_{Smax} /(m / s)	20	d_{det} /m	1000
r_{Smax} /(rad / s)	0.2	V_{Umax} /(m / s)	5	d_{S-U} /m	500
a_{Smax} /(m / s ²)	5	V_{Tmax} /(m / s)	3		
q_{Umax} /(rad / s)	0.1	x_{min} /m	-5000		

4.1 水下目标初始位置为(1000, 1000, -50)时仿真结果

水下目标的其他状态的初始值为 $\theta_T(t_0) = -30\text{deg}$, $\varphi_T(t_0) = 0\text{deg}$, $V_T(t_0) = 3\text{m/s}$.在以上设置下,USV、AUV和水下目标的运动航迹如图3所示.

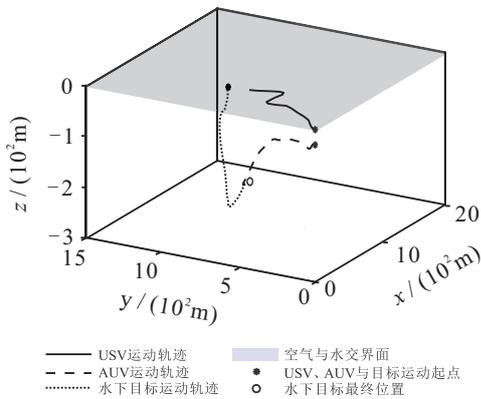


图3 USV、AUV、水下目标运动航迹

从图3可以看出,AUV能够成功打击水下目标.为了说明以上结果满足所提出的约束条件,USV、AUV与目标间的距离以及USV与AUV两者间的距离随时间变化曲线如图4所示.

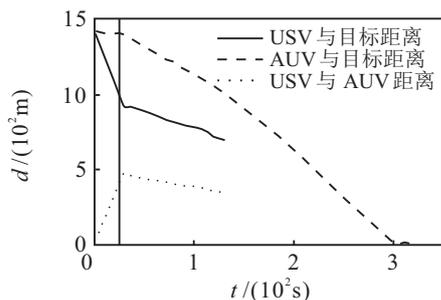


图4 USV、AUV、水下目标三者间距离

图4中,竖线为搜索与打击阶段的分界.可以看到水下目标首先被USV探测到,经过一段时间,目标才在AUV的探测范围内.而USV与AUV的距离始终在允许通信距离范围内,保证了正常的信息交流.当AUV探测到目标后,USV的航迹将不再受关注,故下方两曲线的后半段没有画出.下面列出以上结果中的一些重要数据信息,如表2所示.

表2 情形1下搜索与打击任务重要结果数据

项目	数据
探测到目标时刻/s	USV: 26; AUV: 132
任务结束时刻/s	321
与目标末端位置误差/m	1.97

AUV与目标的末端位置误差在允许的数值范围内.在第26s,USV探测到目标并且将此消息发送至AUV,而AUV在第132s才探测到目标,于第321s时完成打击任务.以上结果和分析表明,所建立的模型与提出的协同航迹规划算法能够解决这一问题.该方法的优势将会在后续的对比如仿真实验中进一步进行验证.

4.2 水下目标初始位置为(-720, -700, -50)时仿真结果

本算例中水下目标的初始速度、俯仰角、偏航角设置与4.1节中相同.得到的载运工具三维航迹与相互间距离如图5和图6所示.

从以上结果可以看出,与4.1节不同的是本算例中AUV首先探测到水下目标.因此,在目标搜索阶段结束后就无需再关注USV的航迹.4.1节和4.2节

中的算例覆盖了目标搜索阶段所有可能出现的情况. 本算例中的重要数据结果列于表3中.

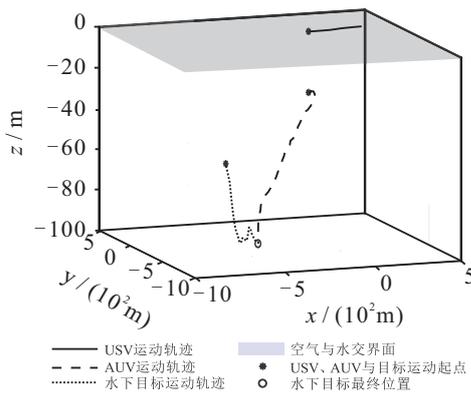


图5 情形2下载运工具运动航迹

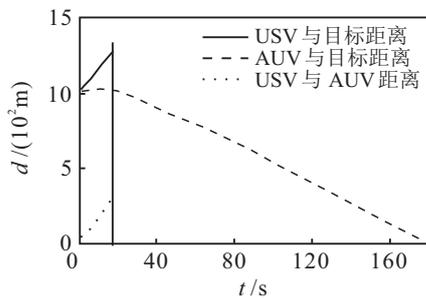


图6 情形2下载运工具间距离随时间变化

表3 情形2下搜索与打击任务重要结果数据

项目	数据
探测到目标时刻/s	AUV: 18
任务结束时刻/s	178
与目标末端位置误差/m	1.75

同样,AUV能够顺利完成打击任务. 对比表2与表3的数据可以发现,情形2下完成任务的时间较短,这是因为情形2中AUV发现目标后可直接对其进行打击,无需像情形1那样在目标打击阶段还进行信息的相互传递,省去了大量的时间. 通常情况下,USV由于运动速度快,在相同的时间内能够搜索到的空间体积也较大,故其首先发现目标的概率较大. 当水下目标的初始位置与AUV初始位置间的距离越小时,AUV有相对更大的概率首先探测到目标;否则USV更有可能首先探测到目标. 但是,当USV首先探测到目标时,整个任务的完成时间会增加.

4.3 目标打击阶段集中式决策与分布式决策的对比

在目标搜索阶段,由于优化指标中包含了USV和AUV的位置信息,采用集中式决策. 而在目标打击阶段,优化指标不涉及到USV与AUV位置信息的综合,因此理论上集中式与分布式两种决策方式均可以采用. 4.1节和4.2节均为采用分布式决策的结果,下面将采用集中式决策的方法求解4.1节和4.2节中目

标打击阶段的航迹,并与分布式决策的结果进行对比.

集中式决策中,在采样时刻 k ,只有一个统一的优化指标,设计如下:

$$J_{2C} = \min(d_{U-T}(k+1)), \quad (18)$$

其中 $d_{U-T}(k+1)$ 是 $k+1$ 时刻AUV与目标间的距离. 这表明,当USV探测到目标后,此时希望AUV也尽量探测到目标,从而完成打击任务. 由以上优化指标和4.1节、4.2节中的初始条件得到集中式决策下目标打击阶段仿真结果如图7~图9所示.

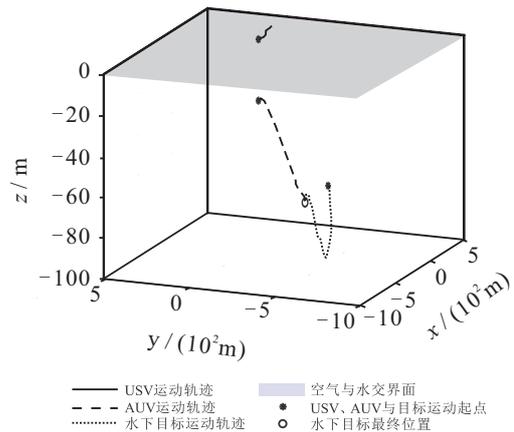


图7 集中式决策下情形2载运工具运动航迹

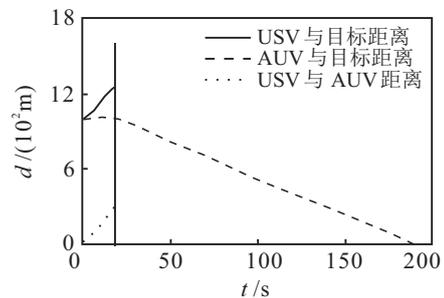


图8 集中式决策下情形2载运工具间距离随时间变化

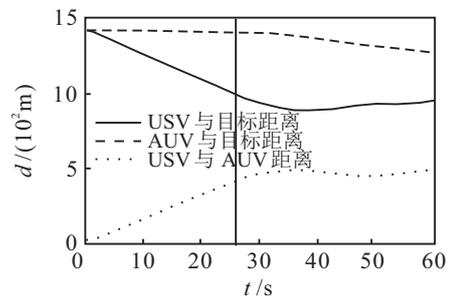


图9 集中式决策下情形1载运工具间距离随时间变化

从图7和图8的结果可以看出,集中式决策下,情形2中AUV首先探测到目标并且最终能够成功完成打击任务. 图9中,在USV首先探测到目标后,将目标位置信息发送给AUV. 在集中式决策下,在AUV探测到目标前,USV不仅需要使其与目标的距离保持在探测范围内,而且还要保持与AUV的通信. 在求解

USV 下一时刻航迹时需同时满足以上两个约束条件. 当 $t = 60\text{ s}$ 时, $d_{S-U} = 494.5\text{ m}$, $d_{S-T} = 948.8\text{ m}$, USV 与 AUV 间的距离已接近其最大通信距离临界值, 此时算法不能为 USV 计算出一条在下一时刻满足所有约束条件的航迹. 就本质而言, 在集中式决策下, 所有约束条件都必须在一次优化过程中同时满足, 这增加了规划失败的概率, 特别是当某些约束条件的值已经十分接近约束条件阈值时. 在分布式决策下, 这些约束条件可以被分散到几个子优化问题中, 每个子优化问题需要满足相对少的约束条件, 这样的机制能够减小任务失败的可能性. 图 7~图 9 中的重要结果数据总结在表 4 中.

表 4 集中式决策下搜索与打击任务重要结果数据

项目	数据
探测到目标时刻/s	情形 1: 失败; 情形 2: 18
任务结束时刻/s	情形 1: 失败; 情形 2: 191
与目标末端位置误差/m	情形 1: 失败; 情形 2: 1.27

与 4.2 节中的结果相比, 情形 2 下, 目标打击阶段采用集中式决策时, 任务的完成时间将增加. 这说明虽然在情形 2 下采用两种决策方式中的任何一种 AUV 均能最终完成任务, 但是采用分布式决策得到的优化结果优于集中式决策.

总结以上结果, 在协同搜索与打击任务中, 集中式决策能够处理一些简单的情况, 但是当情况变得复杂时, 集中式决策将不再有效. 分布式决策在各种情况下都能够保证任务的成功执行, 并且所得到的结果优于集中式决策.

5 结论

本文研究水下目标协同搜索与打击航迹规划问题, 此任务由 USV&AUV 系统执行. 首先介绍了 UAV & AUV 系统的结构, 定义了各载运工具的功能与信息传递方向. 在数学模型中, 描述了载运工具的运动, 而目标的位置由卡尔曼滤波方法进行预测. 约束条件包括可行域、运动速度、末端位置误差、探测距离、通信距离等. 任务的目标是使得搜索空间最大化并且实现对目标的精确打击.

为求解所建立的协同航迹规划模型, 采用了在线滚动优化的方法, 集中式决策和分布式决策被分别用于目标搜索与目标打击两个阶段来生成航迹. 在目标搜索阶段, 基于随机模拟实验的策略减少了在线运算量; 目标打击阶段采用的异步规划策略能够减少航迹规划过程中的冲突.

仿真算例中考虑了不同的任务场景, 所提出的方

法能够成功应付各种情况. 分布式决策的合理性通过与集中式决策相比较得到了验证. 将来, 可考虑用此 USV&AUV 系统执行更加复杂的任务. 另外, 系统的性能也可以通过设计更高效的算法而进一步提高.

参考文献(References)

- [1] 刘重, 高晓光, 符小卫. 基于通信与观测联合优化的多无人机协同目标跟踪控制[J]. 控制与决策, 2018, 33(10): 1747-1756.
(Liu Z, Gao X G, Fu X W. Co-optimization of communication and observation for multiple UAVs in cooperative target tracking[J]. Control and Decision, 2018, 33(10): 1747-1756.)
- [2] Zhen Z, Jiang S, Jiang J. Preview control and particle filtering for automatic carrier landing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(6): 2662-2674.
- [3] 胡腾, 刘占军, 刘洋, 等. 多无人机 3D 侦察路径规划[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(7): 1551-1559.
(Hu T, Liu Z J, Liu Y, et al. 3D surveillance path planning for multi-UAVs[J]. System Engineering and Electronics, 2019, 41(7): 1551-1559.)
- [4] 李绍斌, 姜大立, 杨西龙, 等. 基于混合遗传算法的多基地多无人机战场物资配送任务分配[J]. 装甲兵工程学院学报, 2019, 33(4): 10-19.
(Li S B, Jiang D L, Yang X L, et al. Multi-base and multi-UAV battlefield material distribution task assignment based on hybrid genetic algorithm[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2019, 33(4): 10-19.)
- [5] 杜继永, 张凤鸣, 杨骥, 等. 多UCAV 协同任务分配模型及粒子群算法求解[J]. 控制与决策, 2012, 27(11): 1751-1755.
(Du J Y, Zhang F M, Yang J, et al. Cooperative task assignment for multiple UCAV using particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2012, 27(11): 1751-1755.)
- [6] 杨勇, 丁勇, 黄鑫城, 等. 改进 APF 与 Bezier 相结合的多无人机协同避碰航路规划[J]. 电光与控制, 2018, 25(11): 36-41.
(Yang Y, Ding Y, Huang X C, et al. Multi-UAV cooperative collision avoidance route planning based on improved artificial potential field and bezier curve[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11): 36-41.)
- [7] He S, Wang M, Dai S L, et al. Leader-follower formation control of USVs with prescribed performance and collision avoidance[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(1): 572-581.
- [8] Dai S L, He S, Lin H, et al. Platoon formation control with prescribed performance guarantees for USVs[J].

- IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(5): 4237-4246.
- [9] Liu Y, Song R, Bucknall R, et al. Intelligent multi-task allocation and planning for multiple unmanned surface vehicles (USVs) using self-organising maps and fast marching method[J]. Information Sciences, 2019, 496: 180-197.
- [10] Han G, Long X, Zhu C, et al. A high-availability data collection scheme based on multi-AUVs for underwater sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 19(5): 1010-1022.
- [11] 马朋, 张福斌, 徐德民. 基于距离量测的双领航多 AUV 协同定位队形优化分析[J]. 控制与决策, 2018, 33(2): 256-262.
(Ma P, Zhang F B, Xu D M. Optimality analysis for formation of MAUV cooperative localization with two leaders based on range measurements[J]. Control and Decision, 2018, 33(2): 256-262.)
- [12] Ridao P, Carreras M, Ribas D, et al. Intervention AUVs: The next challenge[J]. Annual Reviews in Control, 2015, 40: 227-241.
- [13] Ni J, Yang L, Wu L, et al. An improved spinal neural system-based approach for heterogeneous AUVs cooperative hunting[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2018, 20(2): 672-686.
- [14] Chen J, Zhang X, Xin B, et al. Coordination between unmanned aerial and ground vehicles: A taxonomy and optimization perspective[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 46(4): 959-972.
- [15] Qin H, Meng Z, Meng W, et al. Autonomous exploration and mapping system using heterogeneous UAVs and UGVs in GPS-denied environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1339-1350.
- [16] Bella S, Belbachir A, Belalem G. A centralized autonomous system of cooperation for UAVs-monitoring and USVs-cleaning[M]. Unmanned Aerial Vehicles. Hershey: IGI Global, 2019: 347-375.
- [17] Bella S, Belbachir A, Belalem G. A hybrid architecture for cooperative UAV and USV swarm vehicles[C]. International Conference on Machine Learning for Networking. Paris: Springer, 2018: 341-363.
- [18] Li Y, Ma T, Chen P, et al. Autonomous underwater vehicle optimal path planning method for seabed terrain matching navigation[J]. Ocean Engineering, 2017, 133: 107-115.
- [19] Shen C, Shi Y, Buckham B. Integrated path planning and tracking control of an AUV: A unified receding horizon optimization approach[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 22(3): 1163-1173.
- [20] Cui R, Li Y, Yan W. Mutual information-based multi-AUV path planning for scalar field sampling using multidimensional RRT[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2015, 46(7): 993-1004.
- [21] Zhu D, Huang H, Yang S X. Dynamic task assignment and path planning of multi-AUV system based on an improved self-organizing map and velocity synthesis method in three-dimensional underwater workspace[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(2): 504-514.
- [22] Shi Y, Eberhart R C. Parameter selection in particle swarm optimization[C]. International Conference on Evolutionary Programming. Berlin: Springer, 1998: 591-600.

作者简介

吴宇(1987—), 男, 讲师, 博士, 从事任务规划与决策技术等研究, E-mail: cquwuyu@cqu.edu.cn;

苏析超(1989—), 男, 讲师, 博士, 从事任务调度与决策技术等研究, E-mail: suiting1012@163.com;

崔佳鹏(1993—), 男, 硕士生, 从事飞行器航迹规划技术的研究, E-mail: cuijiapeng19931222@126.com;

杨戈(1989—), 男, 工程师, 从事航空保障技术的研究, E-mail: yangge048@163.com.

(责任编辑: 闫妍)