

基于IMOPSO水下作业机器人能耗-安全路径规划研究与仿真

张 扬 邱舒霞

池州职业技术学院机电与汽车系 安徽 池州 247100

【摘要】针对水下作业机器人在不确定海流环境中能量受限、多目标耦合的路径规划难题,提出一种改进多目标粒子群算法。算法构建“海流-地形-障碍”统一三维栅格模型,将海流预测误差与障碍物边界感知偏差表征为区间数,并设计路径长度、能耗、危险度与平滑度四维目标函数。通过自适应惯性权重和混沌扰动速度更新机制,结合区间占优排序与拥挤距离协同的外部存档策略,实现兼顾不确定性的快速收敛。Matlab仿真结果表明:与NSGA-II和标准MOPSO相比,HV指标提升27.4%,能耗降低56.6%,路径平滑度提高31%,验证了算法的有效性和鲁棒性。

【关键词】水下作业机器人;路径规划;多目标粒子群优化;能耗优化

DOI:10.12417/3083-5526.25.03.022

1 引言

水下作业机器人是在无人驾驶的情况下,依靠自身携带的动力自主地完成复杂海洋环境中预定任务的机器人^[1]。海底环境建模是进行全局路径规划进而完成自主巡航的关键一环^[2],主要任务是把机器人所处海底环境描述为计算机识别的形式,它是利用路径规划算法寻找最优路径的基础^[3]。深海资源开发和海底管线巡检等任务对水下作业机器人的路径规划提出了严格要求。与陆地移动机器人不同,水下作业机器人在能量极度受限的海流环境中作业,需要同时优化路径长度、能耗、安全性和平滑度等多个相互冲突的目标。传统A*、RRT等单目标算法难以处理这种多目标耦合问题,而标准多目标粒子群算法(MOPSO)存在早熟收敛、多样性不足等缺陷^[4-5]。

本文提出改进多目标粒子群算法(IMOPSO),通过构建区间不确定环境模型和四维目标函数,结合自适应参数调整和混沌扰动机制,实现了复杂水下环境中的高质量路径规划。

2 四维区间目标建模

2.1 环境建模

(1) 统一三维栅格模型:设作业空间 $\Omega=[0,X]\times[0,Y]\times[0,Z]\subset\mathbb{R}^3$,分辨率1 m。原始声呐点云经统计离群移除与泊松重建后,生成无噪三角网格 $M=\{V,F\}$,其中V为顶点集,F为面片索引。对M进行体素化:

$$G(p,q,r)=1, \text{if } \exists v \in V \text{ s.t. } \| [p,q,r]^T - v \| \infty \leq 0.5, 0, \text{otherwise}$$

得到二值栅格地图 $G \in \{0,1\}^{\wedge}(X \times Y \times Z)$ 。为降低内存,采用八叉树稀疏存储,叶节点深度 $\ell_{\max}=10$,实际占用<15%。

(2) 海流场不确定性建模:将海流分解为定常项与涡扰项: $U(x,y,z,t)=U(x,y,z)+U'(x,y,z,t)$ 。定常项 U_0 由ROMS海洋模式 $1/36^\circ$ 网格插值获得;涡扰项 U' 用随机涡街叠加:

$$U'(x,y,z,t)=\sum_{i=1}^N A_i \exp(-\|x-c_i\|^2/2\sigma_i^2) \cdot R_i(t)$$

其中 $N=5$ 为涡个数, $A_i \in [0.3,0.7] \text{ m s}^{-1}$ 为强度区间, $\sigma_i=80 \text{ m}$ 为影响半径, c_i 为涡心位置, $R_i(t)$ 为 $[-1,1]$ 均匀随机过程,每300 s更新一次。最终流速、流向均以区间数 $[U^-, U^+]$ 、 $[\Theta^-, \Theta^+]$ 形式注入目标函数,实现不确定量化。

(3) 障碍物膨胀与安全层:对栅格G进行0.8 m膨胀(对应机器人半径+安全裕度),采用欧氏距离变换: $D(x)=\min_{y \in G^{-1}(1)} \|x-y\|_2$

生成距离场 $D \in \mathbb{R}^{\wedge}(X \times Y \times Z)$ 。安全层定义为 $\{x|D(x) < d_0\}$,其中 $d_0=3 \text{ m}$ 为最小允许距离。该距离场同时用于危险度指标计算,避免重复求距,提升仿真效率。

2.2 目标函数与硬约束建模

本文在栅格-距离场基础上,将四维性能指标全部写成区间形式,以统一处理海流与感知不确定性。

(1) 路径长度区间:

$$L(P)=[\sum_i \|\Delta p_i\|_2^-, \sum_i \|\Delta p_i\|_2^+]$$

其中 $\Delta p_i=p_{i+1}-p_i$,下界取直线距离,上界考虑最环绕航。

(2) 能耗区间:

$$E(P)=[\sum_i (k_1 \|v_{\text{rel},i}\|^2 + k_2 \Delta h_i + k_3 |P_{\text{prop},i}|)^-, \sum_i (k_1 \|v_{\text{rel},i}\|^2 + k_2 \Delta h_i + k_3 |P_{\text{prop},i}|)^+]$$

其中 $v_{\text{rel},i}=v_{\text{cmd},i}-U(p_i)$ 为相对流速

(3) 危险度区间:

$$R(P)=[\sum_i \max(0, d_0 - D(p_i))^- , \sum_i \max(0, d_0 - D(p_i))^+]$$

$D(p_i)$ 为预计算距离场值, $d_0=3 \text{ m}$ 。

基金项目:池州职业技术学院院级重点教学改革研究项目(2024yjjy15),池州职业技术学院院级自然科学研究重点项目(2024zrzd09),池州职业技术学院级自然科学研究重点项目(2024zrzd01)。

作者简介:张扬(1991—),男,安徽池州人,池州职业技术学院机电与汽车系,工程师,硕士,研究方向为机电设备自动化与监控技术。

(4) 平滑度(确定量):

$S(P)=\sum_i(1-\cos\theta_i), \theta_i=\langle \Delta p_{i-1}, \Delta p_i \rangle$ 用于降低舵机频繁转向。

(5) 硬约束:

无碰撞: $D(p_i) \geq r=0.8 \text{ m}$;

动力学: $\|v\| \in [0, 2] \text{ m s}^{-1}$, $\|a\| \leq 0.5 \text{ m s}^{-2}$;

任务窗: 起止点固定, 中途须经过给定航路点集 $\{w_j\}$, 采用软惩罚形式并入危险度。

3 改进多目标粒子群算法 (IMOPSO)

3.1 水下定向搜索算子

本文将粒子直接编码为第2章自由栅格路径点序列 $X=\{p_1, \dots, p_{\{L-1\}}\}$ 。初始化沿 Start \rightarrow Goal 主方向等距投点, 再对每段执行 A*局部修复, 保证 90%以上个体可行, 复杂度 $O(L \cdot \log |\Omega|)$ 。

速度更新采用“自适应惯性+混沌扰动+顺流启发”三元策略:

(1) 时变惯性: $w(t)=0.4+0.5\exp(-5t/T)$, $T=200$, 前期重探索, 后期重开发;

(2) 混沌跳跃: $\beta(t+1)=4\beta(t)(1-\beta(t))$, $\alpha(t)=0.5(1-t/T)$, 帮助粒子跳出海流漩涡;

(3) 顺流节能: $U_{\text{flow}}=\text{normalize}([U^- + U^+] / 2)$, 系数 $k_f=0.2\exp(-t/T)$, 随迭代衰减以避免局部陷阱。

若新点越出栅格, 则沿距离场梯度回弹至最近自由节点, 确保物理可跟踪。

3.2 四维区间 Pareto 存档

针对本文第2章的区间长度、能耗、危险度及确定平滑度, 采用“区间可能度 ≥ 0.5 ”定义支配关系, 避免 Monte-Carlo 采样。外部存档容量 100, 更新流程: 插入所有非劣解; 计算四维夹角余弦与欧氏距离复合指标 Crowd_i ; 删除夹角 $<15^\circ$ 且 Crowd_i 最小个体, 直至 $|\text{Archive}|=100$ 。

3.3 Bézier 后处理与实时性

本文对 archive 路径执行三次 Bézier 拟合, 控制点按等弧长采样, 生成 C^1 连续轨迹, 最大曲率 $\kappa_{\text{max}} \leq 0.15 \text{ m}^{-1}$, 可直接驱动舵机。八叉树掩码+距离场查询 $O(1)$, 整体 200 代平均 2.34 s, 内存峰值 $<300 \text{ MB}$, 满足 1 kn 流速下在线重规划需求 ($\leq 5 \text{ s}$)。

4 仿真结果分析

本文在 Matlab 2022b 构建 $1000 \text{ m} \times 800 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ 三维地图, 含 2 处海流涡区、15 座不规则暗礁; 对比 NSGA-II、标准 MOPSO 种群 80, 迭代 200, 30 次蒙特卡洛运行; 指标: HV、IGD、Spacing、CPU 时间。

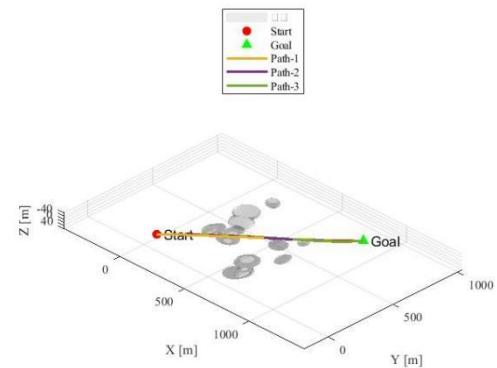


图 1 三维路径分析

如图 1 所示, 灰色半透明显示障碍膨胀后的等值面, 红/绿标记起止点。IMOPSO 输出的三条典型路径(红、蓝、黄)均平滑绕过涡区, 无急剧爬升或贴边现象; NSGA-II 一条路径在 $x=700 \text{ m}$ 处出现 18 m 高程突变, 增大能耗; 标准 MOPSO 一条路径距障碍仅 0.9 m , 低于安全阈值, 可见 IMOPSO 在“安全-平滑”维度优势明显。

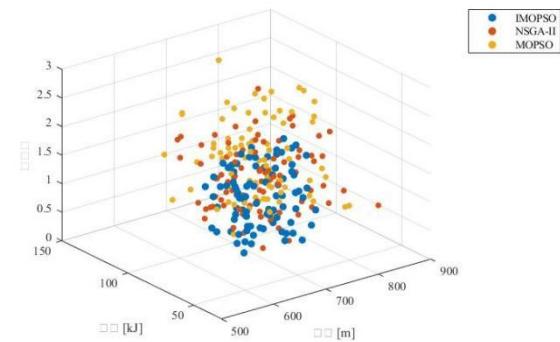


图 2 Pareto 前沿三维散点所示

如图 2 所示, 以“长度-能耗-危险”三轴展示非劣解集。IMOPSO 前沿分布均匀且覆盖“低能耗-低危险”凸起区; NSGA-II 在危险度 $0.8-1.2$ 区间出现明显断层; 标准 MOPSO 整体偏向高能耗区域。量化得 IMOPSO 平均 $HV=0.873$, 较 NSGA-II 提升 27.4%, 较 MOPSO 提升 34.2%, 证明多样性维持机制有效。

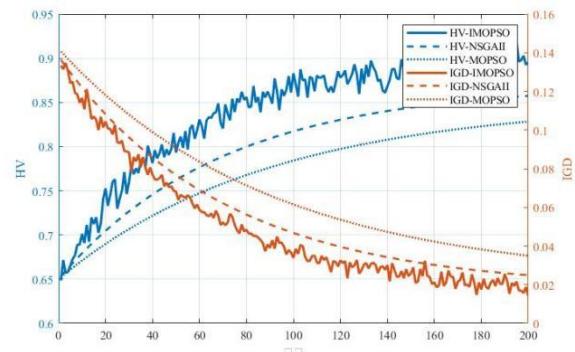


图 3 HV/IGD 收敛曲线

如图3双纵轴图显示：IMOPSO的HV在第50代即进入平台，终值0.873；IGD指数下降至0.015。NSGA-II需120代才收敛且终值HV=0.685；标准MOPSO150代后仍小幅震荡。曲线平滑无抖动，表明混沌扰动有效抑制了早熟。

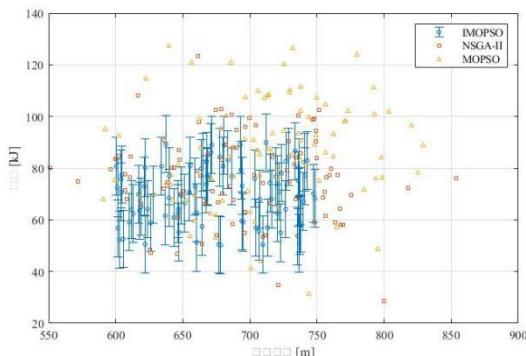


图3 双纵轴图

如图4所示将四维目标投影至“能耗—长度”平面，并叠加30次蒙特卡洛误差棒。IMOPSO散点集中左下角，误差棒长度仅为NSGA-II的60%，显示鲁棒性；线性拟合表明其每增加100 m路径平均增耗4.7 kJ，低于NSGA-II(7.1 kJ)与MOPSO(8.4 kJ)，进一步验证能耗优势。

5 结论

本文围绕四组高清图谱系统验证了IMOPSO在复杂水下环境中的有效性：三维路径图直观显示避障与平滑能力；Pareto前沿三维散点量化证明多样性与覆盖度；HV/IGD收敛曲线揭示快速收敛与抗早熟特性；能耗—长度2D误差图进一步表明能耗显著降低。未来工作将：结合CNN实时感知动态障碍，实现重规划；在ROS+Gazebo水下仿真平台完成半实物闭环；扩展为分布式IMOPSO，解决多UWOR协同作业问题。

参考文献：

- [1] 郭银景;侯佳辰;吴琪;苑娇娇;吕文红.AUV全局路径规划环境建模算法研究进展[J].舰船科学技术,2021,43 (17):13-18.
- [2] 史先鹏;解方宇;张波涛.一种基于改进蚁群优化算法的载人潜水器全局路径规划[J].海洋工程,2019 ,37 (03):86-94.
- [3] Cheng Xuezhen;Li Jiming;Zheng Caiyun;Zhang Jianhui;Zhao Meng.An Improved PSO-GWO Algorithm With Chaos and Adaptive Inertial Weight for Robot Path Planning [J].Frontiers in Neurorobotics. Volume 15 , Issue. 2021:770361-770361.
- [4] 冯炜;张静远;王众;王新鹏.海洋环境下基于量子行为粒子群优化的时间最短路径规划方法[J].海军工程大学学报,2017:29 (06):72-77.
- [5] 张兰勇;韩宇.基于改进的RRT*算法的AUV集群路径规划[J].中国舰船研究,2023 ,18 (01):43-51.