



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402833

引用格式:江亚峰,张亮,袁明新,等.基于社群信息传递机制的AUV路径规划算法[J].科学技术与工程,2025,25(6):2419-2427.

Jiang Yafeng, Zhang Liang, Yuan Mingxin, et al. Path planning algorithm based on community information transmission mechanism for AUV [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2419-2427.

基于社群信息传递机制的 AUV 路径规划算法

江亚峰^{1,2,3}, 张亮^{1,2}, 袁明新^{1,2,3}, 王舜^{1,2}, 刘维⁴

(1. 江苏科技大学机电与动力工程学院, 张家港 215600; 2. 张家港江苏科技大学产业技术研究院, 张家港 215600;
3. 江苏科技大学苏州理工学院, 张家港 215600; 4. 中科探海(苏州)海洋科技有限责任公司, 苏州 215600)

摘 要 为了提高自主水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)的路径规划能力和效率,提出了基于社群信息传递机制的 AUV 路径规划算法。基于社群信息传递机制,首先设计了全局短、长连接算子,实现了已规划路径点邻域内最优点搜索和邻域外概率搜索;然后设计了局部短、长连接算子,实现了路径中心点的四边界衍生点搜索以及衍生点外可行路径连接;最后完成了 AUV 路径规划算法流程设计。6 种模拟和 2 种海底地图仿真测试表明,与其他算法相比,该算法具有规划能力强、规划效率高以及规划路径光滑的优点。

关键词 自主水下机器人; 社群信息; 长连接; 短连接; 路径规划
中图法分类号 TP301.6; **文献标志码** A

Path Planning Algorithm Based on Community Information Transmission Mechanism for AUV

JIANG Ya-feng^{1,2,3}, ZHANG Liang^{1,2}, YUAN Ming-xin^{1,2,3}, WANG Shun^{1,2}, LIU Wei⁴

(1. School of Mechanical & Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China;
2. Zhangjiagang Industrial Technology Research Institute, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China;
3. Suzhou Institute of Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China;
4. T-SEA Marine Technology Co., Ltd., Suzhou 215600, China)

[Abstract] In order to improve the path planning ability and efficiency of AUV (autonomous underwater vehicle), an AUV path planning algorithm based on the community information transmission mechanism was proposed. Firstly, based on the community information transmission mechanism, the global short and long connection operators were designed to achieve the optimal search of the neighborhood of the planned path points and the probabilistic search outside the neighborhood. Then, the local short and long connection operators were designed, which implements the search for four boundary derived points of the path center point and the connections of feasible paths outside the derived points. Finally, the AUV path planning algorithm flow was completed. Six simulation and two seabed map simulation tests show that, compared with other algorithms, the algorithm has the advantages of strong planning ability, high planning efficiency, and smooth planning path.

[Keywords] autonomous underwater vehicle; community information; long connection; short connection; path planning

自主水下机器人因其巡航速度快、机动灵活等优势在水下排雷、环境侦查和水中救援等领域得到广泛应用^[1-2],而路径规划是自主水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)自主导航的关键技术之一^[3]。传统 AUV 路径规划主要有 A* 算法、人工势场法等。任晔等^[4]提出了基于多因素改进 A* 的 AUV 路径规划算法,通过引入障碍物系数,减少搜索节点等措施来提高规划效率和精度,但搜索

节点的减少也会造成优质路径丢失。张强等^[5]通过新增滑移区来替换由障碍物造成的斥力场,提出了基于改进人工势场的 AUV 路径规划方法,但滑移区在复杂地形下存在重叠,易造成路径偏角增大。

传统路径规划通常存在目标不可达、无法获得全局最优等不足,限制了 AUV 的规划性能。随着仿生智能发展,近年来智能规划算法得到了快速发展。Pan^[6]通过精英保留、逆转录等措施改进遗传

收稿日期: 2024-04-18; 修订日期: 2024-12-12

基金项目: 工信部高技术船舶项目([2019]360); 张家港市产业链创新产品攻关计划(ZKC2206); 张家港市产学研预研资金(ZKYY2253, ZKYY2328)

第一作者: 江亚峰(1990—),男,汉族,江苏南通人,硕士,讲师。研究方向: 移动机器人导航、人工智能、装备控制。E-mail: justy90@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

算法,并实现了 AUV 多点路径的最优规划,但其在多障碍复杂环境中的适应性还有待检验;Fan 等^[7]基于差分进化算法开展了动态环境中的 AUV 路径规划,但全局优化能力有待进一步提高。Huang 等^[8]提出了基于强化学习机制的 AUV 粒子群规划算法,但测试环境相对简单,还有待在复杂环境中进一步验证;Li 等^[9]开展了基于改进蚁群算法的 AUV 路径规划方法,但局部路径比较曲折,不利于非完整约束 AUV 的运动控制。相比起传统路径规划,智能规划方法因分布式并行搜索,有助于实现 AUV 的全局路径规划,但如何提高优化效率和路径平滑度,以及如何避免陷入局部极小是智能规划的研究重点。

鉴于此,现引入社群信息传递机制,设计了 AUV 路径规划模型,以提高 AUV 全局规划能力和效率,并采用中心点四边界衍生点优化路径偏角,以提高规划路径的平滑度。

1 社群信息传递路径规划模型

社群结构是复杂网络的重要特征,社群网络中的有效信息传递机制近年来在疾病传播^[10]、污染治理^[11]等领域得到了广泛应用。随着对复杂网络结构的深入了解,以多社群联系形式存在的复杂网络另一特性被发现^[12],即每个社群结构内的个体围绕核心紧密连接,而各社群间的连接则相对稀疏,如图 1 所示,社群之间可以通过这种紧密、稀疏交替方式进行信息的快速传播。

由于基于栅格建模的 AUV 路径规划类似于社群连接,因此为了提高 AUV 的路径规划性能,文中借鉴社群信息传递机制,通过设计连接算子形成如图 2 所示的 AUV 路径规划模型。

由图 2 可以看出,将 AUV 的工作空间通过栅格化建模形成社交网络,环境中栅格中心点 g_i 的四边界上的 8 个邻点定义为衍生点。衍生点周围一定范围内的栅格群构成邻域,邻域内的中心点和衍生点集构成一个社群。基于社群信息传递机制的 AUV

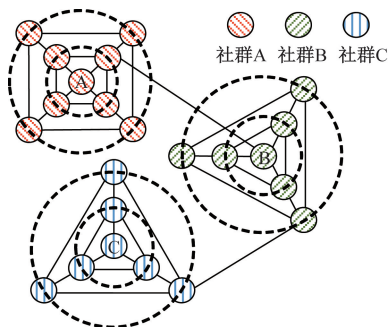


图 1 社群信息传递机制

Fig. 1 Community information transmission mechanism

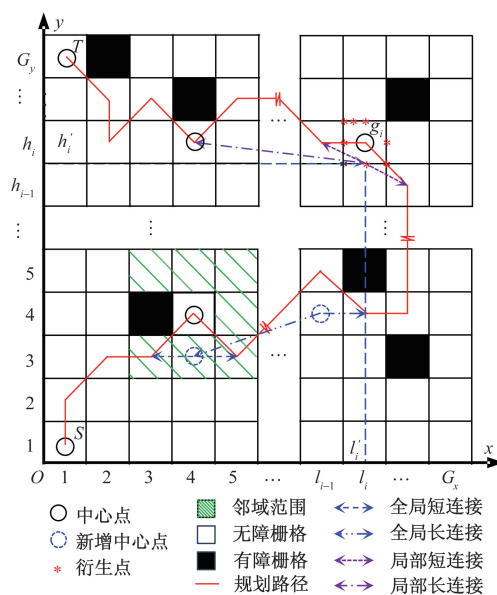


图 2 AUV 路径规划模型

Fig. 2 Model of path planning for AUV

路径规划,即借鉴社群信息传递中的长连接和短连接机理,从起点 S 到目标 T 搜索由若干栅格中心点和衍生点组成的最优无碰路径。

2 环境描述及定义

2.1 环境地图描述

如图 2 所示,设 AUV 环境地图中栅格中心点集合为 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_{x \times y}\}$, x 和 y 分别为栅格的最大列标号和行标号。栅格中心点 g_i 的行列标号分别为 h_i 和 l_i ,对应衍生点的行列标号分别为 h'_i 和 l'_i ,且与栅格编号 g_i 存在如下关系,即

$$l'_i = \text{mod}(g_i - 1, x) + \delta \quad (1)$$

$$h'_i = \text{fix}\left(\frac{g_i - 1}{y}\right) + \delta \quad (2)$$

式中: δ 为调节因子。当衍生点位于当前栅格左侧或下侧边界时 $\delta = -0.5$,其余情况 $\delta = 0.5$ 。

2.2 路径点的邻域定义

邻域是 AUV 进行全局长短连接的关键参数。对于 $\forall m, n \in [1, x \times y]$, 且 $m \neq n$, 栅格中心点 g_m 、 g_n 间邻域长度 $L(g_m, g_n)$ 计算公式为

$$L(g_m, g_n) = \max(|l_n - l_m|, |h_n - h_m|) \quad (3)$$

式(3)中: $\max(\cdot)$ 为最大值函数; $|\cdot|$ 为绝对值函数; (h_m, l_m) 和 (h_n, l_n) 分别为中心点 g_m 和 g_n 的行列标号。

定义栅格中心点 g_m 的 r 邻域中心点集合 $r(g_m)$ 为

$$r(g_m) = \{g_n \mid 0 < L(g_m, g_n) \leq r, g_n \in G\} \quad (4)$$

则栅格中心点 g_m 的非 r 邻域中心点集合

$r(g_m)$ 为

$$r(g_m) = \{g_n | L(g_m, g_n) > r, g_n \in G\} \quad (5)$$

图3所示为栅格中心点 g_m 邻域 r 分别为1、2的示例,衍生点的邻域定义同上。

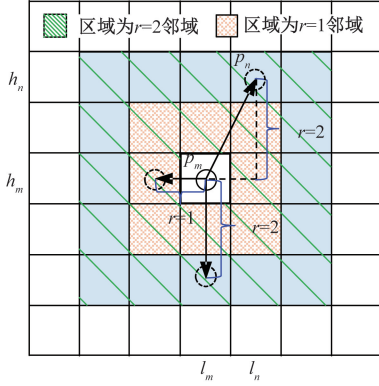


图3 邻域示意图

Fig. 3 Community neighborhood diagram

2.3 适应度函数

在 AUV 路径规划过程中,无论是全局长短连接,还是局部长短连接,评价连接前后路径优劣的适应度函数均建立在路径长度之上。

以某规划路径点的集合为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ 为例,则该路径适应度函数可以定义为

$$F = \frac{\|p_i - p_{i+1}\|}{\sum_{i=1}^{N-1}} \quad (6)$$

式(6)中: $\|\cdot\|$ 为欧式距离。

3 AUV 路径规划主要算子

3.1 全局短连接算子 ψ_G

设 AUV 第 k 代规划路径为 $P(k) = \{p_1(k), p_2(k), \dots, p_N(k)\}$,全局短连接算子 ψ_G 主要实现 $P(k)$ 中路径点在其 r 邻域内向距目标 T 最近点的信息传递,目的是实现 AUV 在局部环境中的高效路径规划。其主要步骤如下。

(1) $\forall i \in [1, N]$,求路径点 $p_i(k)$ 的 r 邻域内无障碍点集合 $C(k) = \{c_1(k), c_2(k), \dots, c_M(k)\}$ 。

(2) $\forall j \in [1, M]$,虚拟顺序连接 $p_{i-1}(k)$ 、 $c_j(k)$ 、 $p_{i+1}(k)$ 并判断是否存在有障碍栅格干涉?若无则求取虚拟连接路径长度适应度 $F[c_j(k)]$,否则适应度为无穷小。

(3) 按照步骤(2),完成 $C(k)$ 中各点与 $p_{i-1}(k)$ 、 $p_{i+1}(k)$ 的虚拟连接及适应度求取,提取适应度最大点 $c^*(k) \in C(k) \cup p_i(k)$,即 $\forall j \in M, F[c_j(k)] \leq F[c^*(k)]$ 。

(4) 利用 $c^*(k)$ 替换 $p_i(k)$,并形成新路径

$$P'(k) = \{p_1(k), p_2(k), \dots, p_{i-1}(k), c^*(k), p_{i+1}(k), \dots, p_N(k)\}。$$

算子 ψ_G 可描述为: $P'(k) \leftarrow \psi_G[P(k)]$ 。

3.2 全局随机长连接算子 Γ_G

全局随机长连接 Γ_G 是在完成全局短连接 ψ_G 后,以 $c^*(k)$ 为起点在 $p_i(k)$ 的非 r 邻域内向距目标 T 最近点进行概率性的远距离信息传递,目的是帮助 AUV 跳出局部极小,提高全局规划能力,步骤如下。

(1) 求路径点 $p_i(k)$ 非 r 邻域内 R 个无障碍点集合 $D(k) = \{d_1(k), d_2(k), \dots, d_R(k)\}$ 。

(2) $\forall j \in [1, R]$,按照概率 γ 进行 $c^*(k)$ 、 $d_j(k)$ 以及 $P'(k)$ 中距离 $d_j(k)$ 最近点的虚拟顺序连接,并判断是否存在有障碍栅格干涉?若无则求取虚拟连接路径长度适应度 $F[d_j(k)]$,否则适应度为无穷小。

(3) 按照步骤(2),完成 $c^*(k)$ 与 $D(k)$ 中各点,以及 $P'(k)$ 中距 $D(k)$ 各点最近点的虚拟连接适应度求取,并提取适应度最大点 $d^*(k) \in D(k)$,即 $\forall j \in [1, R], F[d_j(k)] \leq F[d^*(k)]$ 。

(4) 利用 $d^*(k)$ 替换 $c^*(k)$ 与 $P'(k)$ 中距离 $d^*(k)$ 最近点之间的所有路径点,并形成新路径 $P''(k) = \{p_1, p_2, \dots, c^*, d^*, \dots, p_N\}$ 。

算子 Γ_G 可描述为: $P''(k) \leftarrow \Gamma_G[P'(k)/\gamma]$ 。

3.3 局部短连接算子 ψ_L

局部短连接算子 ψ_L 主要是在全局随机长连接 Γ_G 结束后,实现由规划路径点中栅格中心点向其衍生点的信息传递过程,目的是进一步强化 AUV 局部搜索能力以提高路径光滑性,步骤如下。

(1) 从路径 $P''(k)$ 中提取栅格中心点集 $E(k) = \{e_1(k), e_2(k), \dots, e_p(k)\}$ 。

(2) $\forall i \in [1, P]$,求取 $e_i(k)$ 的衍生点集 $Y(k) = \{y_1(k), y_2(k), \dots, y_8(k)\}$ 。

(3) 选取 $Y(k)$ 中衍生点 $y_j(k)$ 其中 $j \in [1, 8]$,虚拟连接 $y_j(k)$ 、路径 $P''(k)$ 中 $e_i(k)$ 的前后路径点,并判断是否存在有障碍栅格干涉。若无则求取虚拟连接路径长度适应度 $F[y_j(k)]$,否则适应度为无穷小。

(4) 按照步骤(3)完成 $Y(k)$ 中所有衍生点的虚拟连接和适应度求取,通过轮盘赌选取出衍生点 $y^*(k) \in Y(k)$ 。

(5) 利用 $y^*(k)$ 替换路径 $P''(k)$ 中 $e_i(k)$,并形成新路径 $P'''(k)$ 。

算子 ψ_L 可描述为: $P'''(k) \leftarrow \psi_L[P''(k)]$ 。

3.4 局部长连接算子 Γ_L

局部长连接算子 Γ_L 是在局部短连接算子 ψ_L 完成后,以 $y^*(k)$ 为起点向 $P'''(k)$ 中后续路径点的信

息传递,目的是帮助 AUV 删除规划路径上冗余连接,进一步提高全局规划能力。设 $\mathbf{P}''(k)$ 中共 Q 个路径点, $y^*(k)$ 为第 i 个点,即 $\mathbf{P}''(k) = \{p_1(k), p_2(k), \dots, p_{(y^*)}(k), \dots, p_Q(k)\}$, 则算子 Γ_L 操作步骤如下。

(1) 初始化搜索步长 $t=2$ 。

(2) 虚拟连接 $\mathbf{P}''(k)$ 中 $p_i(k)$ 与 $p_{i+t}(k)$ 并判断是否与有障栅格干涉。若有,则结束,否则转步骤(3)。

(3) 删除 $p_i(k)$ 与 $p_{i+t}(k)$ 之间的点,并形成新路径 $\mathbf{P}^{\text{IV}}(k) = \{p_1(k), p_2(k), \dots, p_i(k), p_{i+t}(k), \dots, p_Q(k)\}$ 。

(4) 判断 $t < Q - i$? 若是,则 $t \leftarrow t + 1$ 并转至步骤(2),否则结束。

算子 Γ_L 可描述为: $\mathbf{P}^{\text{IV}}(k) \leftarrow \Gamma_L[\mathbf{P}''(k)]$ 。

4 AUV 路径规划算法流程

(1) 初始化 $N_p, k_{\max}, r, \gamma$ 等参数,令进化代数 $k \leftarrow 0$ 。

(2) 生成 N_p 条路径组成初始种群 $\mathbf{Q}(0) = \{\mathbf{P}_1(0), \mathbf{P}_2(0), \dots, \mathbf{P}_{N_p}(0)\}$ 。

(3) 全局短连接操作 $\psi_G: \mathbf{P}_i'(k) \leftarrow \psi_G[\mathbf{P}_i(k)]$ 。

(4) 全局随机长连接操作 $\Gamma_G: \mathbf{P}_i'(k) \leftarrow \Gamma_G(\mathbf{P}_i'(k)/\gamma)$ 。

(5) 局部短连接操作 $\psi_L: \mathbf{P}_i''(k) \leftarrow \psi_L[\mathbf{P}_i'(k)]$ 。

(6) 局部长连接操作 $\Gamma_L: \mathbf{P}_i^{\text{IV}}(k) \leftarrow \Gamma_L[\mathbf{P}_i''(k)]$, 并完成路径更新 $\mathbf{P}_i(k) \leftarrow \mathbf{P}_i^{\text{IV}}(k)$ 。

(7) 判断是否完成第 k 代所有路径的全局和局部长短连接? 若是则获得种群 $\mathbf{Q}(k+1)$ 并转步骤(8),否则转步骤(3)。

(8) 基于适应度计算,筛选出种群 $\mathbf{Q}(k+1)$ 中的最优路径 $\mathbf{P}^*(k+1)$ 。若 $F[\mathbf{P}^*(k+1)] > F[\mathbf{P}^*(k)]$,则保留种群 $\mathbf{Q}(k+1)$,否则 $\mathbf{Q}(k+1) \leftarrow \mathbf{Q}(k)$ 。

(9) 判断是否达到结束条件: $k = k_{\max}$? 若是则结束并输出最优路径,否则 $k \leftarrow k + 1$ 并转步骤(3)。

5 仿真与结果分析

为了验证文中规划算法的有效性,在 CPU i5-11400H,主频 2.7 GHz,内存 16 GB 的计算机上进行了模拟地图和海底地图仿真测试,并将结果与改进蚁群规划算法^[13] (path planning algorithm based on improved ant colony optimization, PPABIACO)、冠状病毒群体免疫规划算法^[14] (path planning algorithm based on coronavirus herd immunity optimization, PPABCHIO) 以及改进粒子群规划算法^[15] (path planning algorithm based on improved particle swarm

optimization, PPABIPSO) 进行了性能比较。本文中 PPABCITM 算法涉及的参数通过算法参数测试得到: $N_p = 30, K_{\max} = 100, r = 3, \gamma = 0.2$ 。另外 3 种算法参数来自相应参考文献。鉴于算法均为概率性搜索,文中对 4 种规划算法分别进行了 30 次独立测试。

5.1 模拟地图测试分析

如图 4 所示,模拟地图根据栅格数量分为 3 类,每一类又根据地图环境的不同分为两种,共 6 种环境。由表 1 可以看出,在 6 种环境地图中,本文中 PPABCITM 的最优路径长度和平均路径长度明显短于 PPABIACO、PPABCHIO、PPABIPSO 的规划长度,前者指标分别平均减少了 6.41%、6.52%、6.76%,后者指标分别平均减少了 6.09%、6.39%、6.70%,这主要得益于全局短连接的强邻域搜索能力,以及局部长连接时冗余路径删除。此外,PPABCITM 的最优和平均路径长度比较接近,但其他 3 种算法各自相差较大,说明了 PPABCITM 全局优化能力强且稳定,这主要得益于全局长连接算子能有效帮助算法跳出局部极小,实现全局路径优化。

由最小和平均收敛代数可以看出,PPABCITM 值都是最小,相比于其他 3 种算法,前者分别平均减少了 39.413%、32.753%、41.698%,后者分别平均减少了 38.383%、35.931%、34.331%,说明了 PPABCITM 收敛速度快,体现出了高搜索效率,这主要得益于全局短连接的强邻域搜索和全局长连接的全局搜索能力。

由代数标准差可以看出,PPABCITM 相比起其他 3 种算法分别平均减少了 38.174%、39.747%、28.087%,说明 PPABCITM 最稳定,能适应不同环境的路径规划。在单位距离转角指标方面,PPABCITM 也明显最小,且相比起其他 3 种算法分别平均减少了 60.940%、63.101%、63.542%,说明由其规划路径总体上最为平滑,这主要得益于局部短连接中衍生点的连接调节了局部路径,以及局部长连接中冗余路径的直连光滑了路径。

如图 4 所示,相比其他 3 种算法因受限需在相邻无障碍格间转移而造成路径多曲折的不足,PPABCITM 算法规划的路径明显更加简洁和平滑,从而验证了 PPABCITM 算法设计的局部短连接和局部长连接算子在降低规划路径长度、提高路径光滑性方面的有效性。

为进一步比较 4 种算法的搜索性能,文中选择在两个最为复杂的 25×25 模拟地图环境进行了算法进化曲线比较。如图 5 所示,从 4 种算法的进化



图 4 6 种模拟地图中各算法最优路径

Fig. 4 The optimal paths of each algorithm in six simulated maps

表 1 6 种模拟地图中的算法测试对比

Table 1 Comparison of algorithm testing in six simulated maps

环境地图	测试算法	最优路径长度/m	平均最优路径长度/m	最小收敛代数	平均收敛代数	代数标准差	单位距离转角/(°)
15 × 15 (I)	PPABCITM	21. 254	21. 747	8	17. 100	9. 245	11. 558
	PPABIACO	22. 728	23. 355	13	24. 567	12. 697	23. 759
	PPABCHIO	22. 728	23. 447	12	26. 500	10. 840	25. 739
	PPABIPSO	23. 314	23. 740	10	19. 767	9. 328	28. 953
15 × 15 (II)	PPABCITM	21. 267	21. 349	7	16. 200	10. 015	5. 941
	PPABIACO	22. 728	23. 253	13	33. 367	15. 515	17. 820
	PPABCHIO	23. 314	23. 486	9	29. 567	14. 429	25. 093
	PPABIPSO	22. 728	23. 104	11	25. 333	12. 349	21. 779
20 × 20 (I)	PPABCITM	28. 132	28. 893	11	22. 567	11. 691	6. 775
	PPABIACO	29. 799	30. 090	15	34. 067	15. 102	16. 611
	PPABCHIO	29. 799	30. 326	12	25. 033	15. 936	18. 121
	PPABIPSO	30. 385	30. 443	20	33. 767	13. 019	17. 772
20 × 20 (II)	PPABCITM	28. 269	28. 754	9	19. 400	9. 115	7. 139
	PPABIACO	29. 799	30. 207	16	27. 400	12. 392	13. 591
	PPABCHIO	30. 385	30. 443	19	32. 500	16. 714	19. 253
	PPABIPSO	29. 799	30. 354	15	28. 067	14. 100	18. 121
25 × 25 (I)	PPABCITM	34. 970	35. 929	7	18. 800	8. 771	5. 887
	PPABIACO	37. 456	37. 724	13	32. 033	18. 587	22. 827
	PPABCHIO	36. 870	37. 539	15	34. 133	20. 604	15. 867
	PPABIPSO	36. 870	37. 976	17	34. 267	14. 401	18. 308
25 × 25 (II)	PPABCITM	35. 695	36. 461	11	20. 500	6. 761	7. 318
	PPABIACO	38. 870	39. 607	17	36. 733	19. 079	21. 996
	PPABCHIO	38. 042	39. 382	15	34. 067	18. 597	17. 744
	PPABIPSO	38. 627	40. 625	22	38. 867	18. 822	17. 475

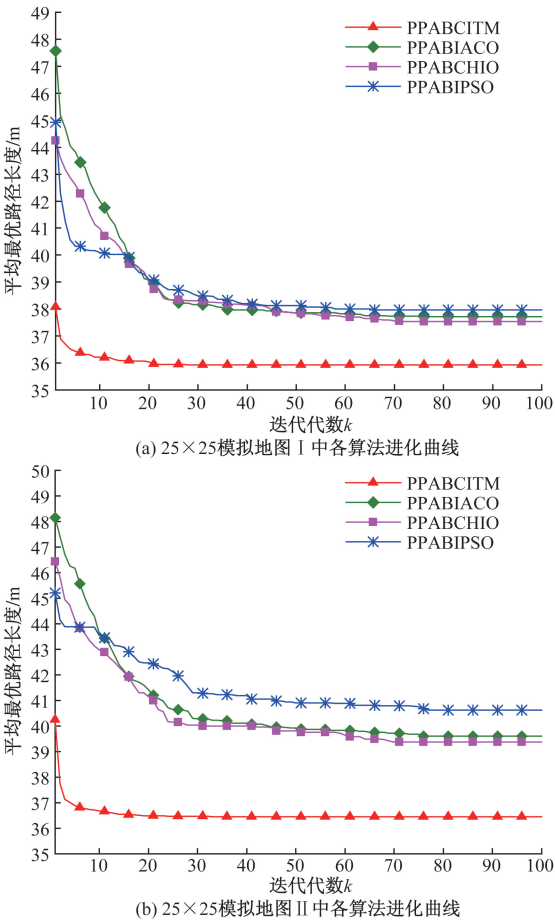


图 5 两个 25 × 25 模拟地图中各算法最优规划路径的进化曲线
Fig. 5 Evolution curves of optimal path planning for each algorithm in two 25 × 25 simulated maps

曲线可以看出,本文提出的 PPABCITM 算法不仅收敛速度最快,而且平均最优路径长度最短,此外,其余 3 种算法进化过程中均表现出了一定的振荡特性,而文中算法的搜索稳定性表现优异,从而进一步验证了本文算法的快速性、稳定性和准确性。

5.2 海底地图测试分析

为了进一步验证本文提出的 PPABCITM 在实际海底地图中路径规划的有效性和优越性,选取两处海底地图进行了相同上述 4 种规划算法的测试对比。海底地图 I 位于智利西部海域,地形以分散的山丘为主,其海域经纬度为: -73.370 4°W, -73.132 7°E, -42.880 4°S, -42.653 7°N。海底地图 II 位于澳大利亚东部海域,地形以较为集中的礁盘为主,海域经纬度为:146.452 9°W, 146.719 5°E, -17.935 6°S, -17.694 9°N。首先对地图进行膨化处理,并分别在海底地图 I 水下 120 m 和海底地图 II 水下 35 m 的定深平面进行算法测试。

表 2 给出了 4 种规划算法在两种海底地图中的测试对比,由表 2 同样可以看出,针对 6 种测试性能指标,PPABCITM 算法同样是 4 种算法中性能最优的。相比于其他 3 种规划算法,PPABCITM 的最优路径长度分别平均减少了 9.006%、6.164%、6.737%,平均最优路径长度分别平均减少了 11.682%、8.996%、11.089%,验证了本文算法在障碍范围更大、形态更加丰富的海底地形中仍能规划出最优路径。在最小收敛代数方面,本文算法与其

他 3 种算法相比分别平均减少了 66.435%、51.190%、57.519%,平均收敛代数分别平均减少了 67.919%、59.796%、52.063%,代数标准差分别平均减少了 34.200%、35.957%、34.247%,验证了本文算法面对大尺寸复杂地形仍能保持较高收敛性和稳定性。在单位距离转角指标方面,本文算法与其他 3 种算法相比分别平均减少了 76.716%、73.663%、79.926%,验证了本文算法在复杂海底地形中依旧能规划出更光滑路径。海底地图测试对比进一步验证了 PPABCITM 的强规划能力、高规划

效率等优势在实际地图中仍然有效。

两种海底地图中 4 种算法的最优规划结果如图 6 所示,相比起其他 3 种算法存在的规划路径点偏多、路径段跨度小等不足,PPABCITM 算法所规划路径节点少、路径段跨度大,有利于 AUV 实际导航时的持续平滑航行。图 7 所示为 4 种算法在两种海底地图中的最有规划路径的进化曲线比较图,由图 7 可以看出,本文 PPABCITM 算法收敛曲线收敛速度最快、振荡最小,且最优路径长度最短,进一步验证了本文算法在实际海底环境中进行路径规划的先进性和有效性。

表 2 两种海底地图中的算法测试对比

Table 2 Comparison of algorithm testing in two types of underwater maps

环境地图	测试算法	最优路径长度/m	平均最优路径长度/m	最小收敛代数	平均收敛代数	代数标准差	单位距离转角/(°)
海底地图 I (智利西部海域)	PPABCITM	56.619	56.721	9	20.233	12.398	1.712
	PPABIACO	61.941	64.817	24	61.667	22.143	6.516
	PPABCHIO	60.527	63.363	14	52.867	21.989	6.601
	PPABIPSO	61.113	65.002	21	48.967	23.425	8.100
海底地图 II (澳大利亚东部海域)	PPABCITM	85.441	86.463	8	21.967	15.437	2.162
	PPABIACO	94.326	97.012	27	70.067	20.417	10.653
	PPABCHIO	90.770	93.483	24	52.133	21.529	8.086
	PPABIPSO	91.012	95.474	19	40.267	19.645	11.372

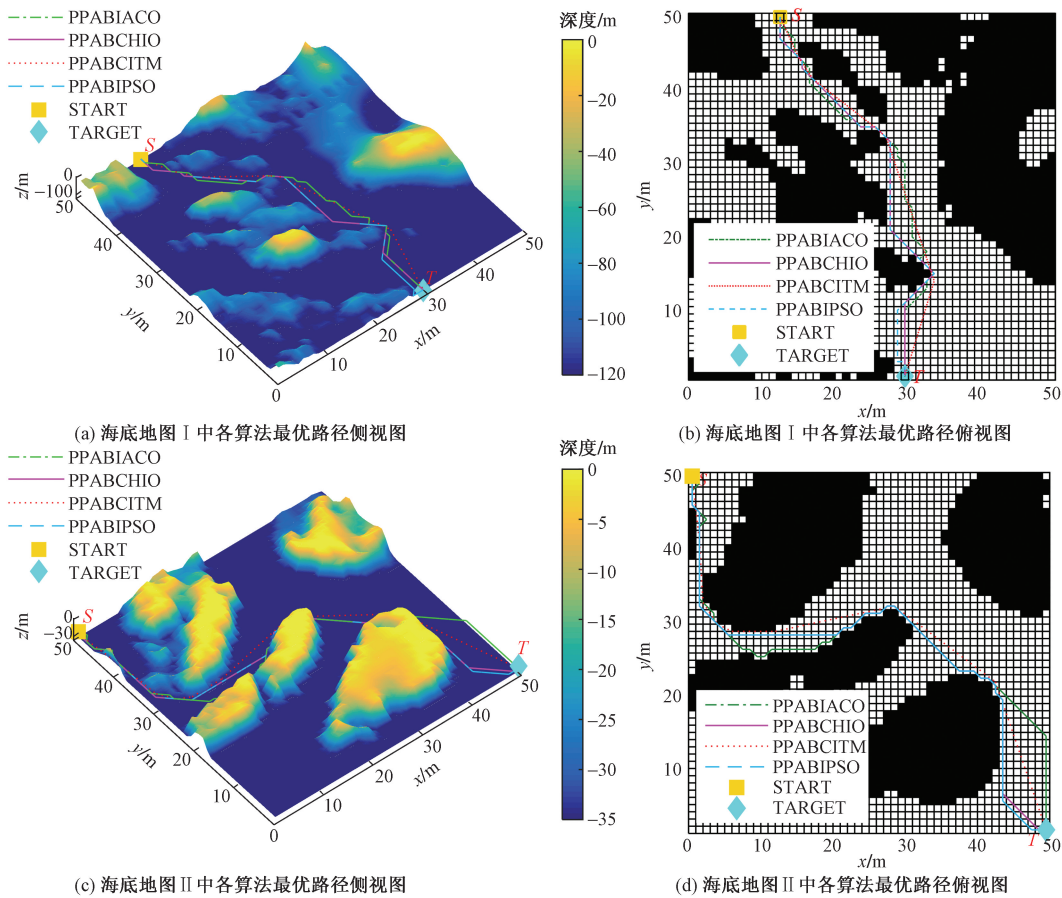


图 6 两种海底地图中各算法的最优规划路径

Fig. 6 The optimal paths of each algorithm in two types of underwater maps

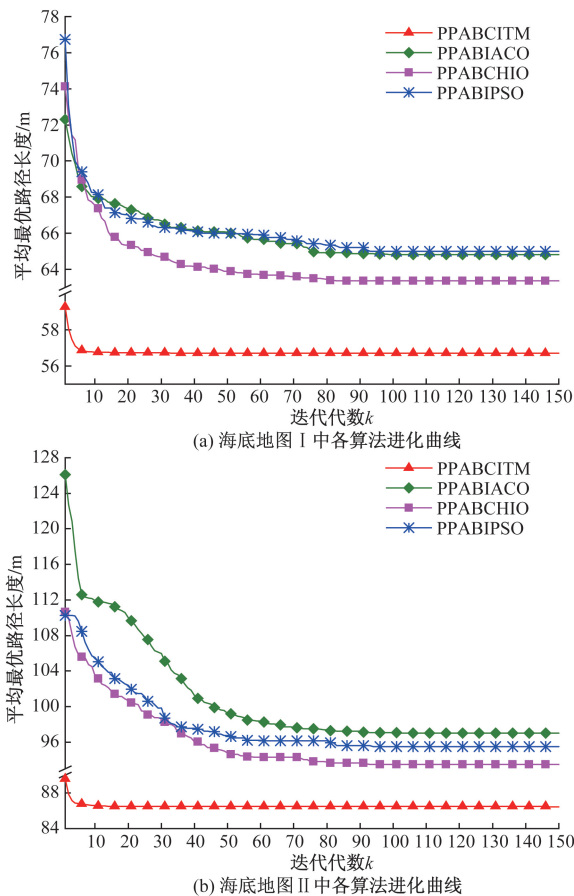


图7 两种海底地图中各算法最优规划路径的进化曲线
Fig. 7 Evolution curves of optimal path planning for each algorithm in two types of underwater maps

6 结论

为了提高复杂环境中 AUV 的路径规划能力和效率,借鉴社群网络中的有效信息传递机制,提出了一种新的 AUV 路径规划方法,通过理论分析和仿真测试可以得出以下结论。

(1)基于栅格法进行 AUV 环境构建,通过路径点邻域以及衍生点集来模拟多社群结构,再借鉴社群信息传递机制设计长、短连接算子,有效实现 AUV 从起点到目标的路径信息传递,进而实现复杂地形中路径的最优和高效规划。

(2)全局短连接实现了所规划路径点邻域内最优路径搜索,强化了算法的局部规划能力,而全局随机长连接实现了路径点邻域外的搜索,能有效帮助算法跳出局部极小,实现全局最优路径规划。

(3)局部短连接中基于栅格中心点的八衍生点实现了规划路径的局部调整,提高了路径光滑性,而局部长连接实现了规划路径中冗余路径的剔除,在减少路径规划距离同时也提高了路径光滑性。

参考文献

- [1] 康帅,俞建成,张进. 微小型自主水下机器人研究现状[J]. 机器人, 2023, 45(2): 218-237.
Kang Shuai, Yu Jiancheng, Zhang Jin. Research status of micro autonomous underwater vehicle [J]. Robot, 2023, 45(2): 218-237.
- [2] 杨冠军,王伟然,闫景昊,等. 水下多电机协同推进及其动态面反步滑模控制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 3982-3990.
Yang Guanjuan, Wang Weiran, Yan Jinghao, et al. Underwater multi-motor cooperative propulsion and its dynamic surface backstepping sliding mode control [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(10): 3982-3990.
- [3] Zong G D, Sun H B, Sing K N. Decentralized adaptive neuro-output feedback saturated control for INS and its application to AUV [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021(99): 5492-5501.
- [4] 任晔,王俊雄,张小卿. 基于多因素改进 A* 算法的 AUV 路径规划研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(11): 58-62.
Ren Ye, Wang Junxiong, Zhang Xiaoqing. Research on AUV path planning based on multi-factor improved A* algorithm [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(11): 58-62.
- [5] 张强,刘晓宇,张南庆,等. 基于改进人工势场算法的 AUV 路径规划[J]. 中国航海, 2021, 44(2): 134-141.
Zhang Qiang, Liu Xiaoyu, Zhang Nanqing, et al. An improved artificial potential field algorithm for AUV path planning [J]. Navigation of China, 2021, 44(2): 134-141.
- [6] Pan F. Research on path planning of AUV based on improved genetic algorithms[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Computer, Control and Robotics (ICCCR). Shanghai: IEEE, 2021: 26-29.
- [7] Fan J K, Qu L D. Innovative differential evolution algorithm with double-layer coding for autonomous underwater vehicles path planning in complex environments[J]. Ocean Engineering, 2024, 303. DOI:10.1016/j.oceaneng. 2024.117806.
- [8] Huang H Q, Chao J. A novel particle swarm optimization algorithm based on reinforcement learning mechanism for AUV path planning [J]. Complexity, 2021(12): 1-13.
- [9] Li J, Wang H X. Research on AUV path planning based on improved ant colony algorithm[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Beijing: IEEE, 2020: 1401-1406.
- [10] Liu Q H, Yuan S Y, Wang X S. A SEIARQ model combine with logistic to predict COVID-19 within small-world networks [J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2023, 20(2): 4006-4017.
- [11] 宿兵畅,张亚娟,张素琪. 基于社区网络的大气污染源定位算法[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(2): 341-349.
Su Bingchang, Zhang Yajuan, Zhang Suqi. Location of air pollution sources based on community network [J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(2): 341-349.
- [12] Newman M E J. Detecting community structure in networks [J]. The European Physical Journal, 2004, 38(2): 321-330.
- [13] 邵琪,时维国. 基于改进蚁群算法的机器人路径规划研究

- [J]. 现代制造工程, 2023(6): 46-51.
- Shao Qi, Shi Weiguo. Research on robot path planning based on improved ant colony algorithm[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(6): 46-51.
- [14] Dalbah L M, Al-Betar M A, Awadallah M A, et al. A modified coronavirus herd immunity optimizer for capacitated vehicle routing problem[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2022, 34(8): 4782-4795.
- [15] 王飞, 杨清平. 基于改进粒子群算法的城市物流无人机路径规划[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(30): 13187-13194.
- Wang Fei, Yang Qingping. Route planning of urban logistics unmanned aerial vehicle based on improved aerial vehicle based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(30): 13187-13194.