

文章编号:1672-3961(2024)01-0074-09 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.159

基于改进 Bi-RRT 算法的机器鱼路径规划方法

黄健堃^{1,2,3}, 薛钢^{1,2,3,4}, 刘延俊^{1,2,3,4*}, 王雨^{1,2,3}, 李厚池^{1,2,3}, 白发刚^{2,3,4}

(1.山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061; 2.山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061; 3.山东大学机械工程专业国家级实验教学示范中心, 山东 济南 250061; 4.山东大学海洋研究院, 山东 青岛 266237)

摘要:为提高机器鱼的水下路径规划效率,更好地完成水下工作,提出一种基于改进双向快速搜索随机树(bidirectional rapidly-exploring random trees, Bi-RRT)算法的机器鱼路径规划方法。以研制的混合驱动机器鱼为研究对象,介绍其结构模型和运动控制模式,为后续试验验证提供物理样机。针对 Bi-RRT 算法存在的采样随机、路径冗余、效率不高等问题,融合生长引导机制和连接强化机制改进 Bi-RRT 算法,加入生长引导机制,改善随机树生长随机、两树连接慢的问题;加入连接强化机制提高算法搜索速度。对搜索路径进行优化处理,通过剔除冗余节点、插入优化节点,改善路径质量,对路径进行平滑处理,使路径更适合机器鱼航行,实现机器鱼路径规划任务。仿真结果表明,与传统 Bi-RRT 算法及其他衍生快速搜索随机树(rapidly-exploring random tree, RRT)算法相比,改进的 Bi-RRT 算法相较于改进前节点数减少约 50.8%,路径长度缩短约 19%,搜索时间减少约 65.3%。

关键词:机器鱼; Bi-RRT 算法; 路径规划; 节点简化; 路径平滑

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

引用格式: 黄健堃, 薛钢, 刘延俊, 等. 基于改进 Bi-RRT 算法的机器鱼路径规划方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(1): 74-82.

HUANG Jiankun, XUE Gang, LIU Yanjun, et al. Robot fish path planning method based on improved Bi-RRT algorithm[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(1): 74-82.

Robot fish path planning method based on improved Bi-RRT algorithm

HUANG Jiankun^{1,2,3}, XUE Gang^{1,2,3,4}, LIU Yanjun^{1,2,3,4*}, WANG Yu^{1,2,3}, LI Houchi^{1,2,3}, BAI Fagang^{2,3,4}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Key Laboratory of High-Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 4. Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, Shandong, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of underwater path planning for robotic fish and better complete underwater work, a path planning method for robotic fish based on improved bidirectional rapidly-exploring random trees (Bi-RRT) algorithm was proposed. A hybrid drive robotic fish was developed as the research object, and its structural model and motion control mode were introduced, which provided a physical prototype for subsequent experimental verification. In response to the problems of sampling randomness, path redundancy, and low efficiency in the Bi-RRT algorithm, a growth guidance mechanism and connection strengthening mechanism were integrated to improve the Bi-RRT algorithm, and a growth guidance mechanism was added to improve the problem of random tree growth and slow connection between two trees; added connection reinforcement mechanism to improve algorithm search speed. The search path was optimized by removing redundant nodes and inserting optimization nodes to improve path quality. The path was smoothed to make it more suitable for robot fish navigation and to achieve robot fish path planning tasks. The simulation results showed that compared with the traditional Bi-RRT algorithm and other derived rapidly-exploring random tree (RRT) algorithms, the improved Bi-RRT algorithm reduced the number of nodes by about 50.8%, the path length by about 19%, and the search time by about 65.3% compared to the previous one.

Keywords: robotic fish; Bi-RRT algorithm; path planning; node simplification; path smoothing

收稿日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52001186); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE292); 崂山实验室科技创新资助项目(LSKJ202203505-3)

第一作者简介: 黄健堃(1999—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究方向为机器人路径规划及水下仿鱼机器人。

E-mail: huangjiankun123@163.com

* 通信作者简介: 刘延俊(1965—), 男, 山东济南人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为自动化机械系统、流体动力控制、波浪能发电技术、深海探测技术与装备。E-mail: lyj111ky@163.com

0 引言

随着海洋探索的不断深入,海洋资源成为人类可持续发展的重要支撑。水下机器人是探索海洋的关键核心装备,也是开发利用海洋资源的基本保障。其中,仿生水下机器鱼具有推进效率高、机动性强、隐蔽性好、生物欺骗性高、噪声低、对周围环境影响小等特点,能够在复杂的水下环境中灵活自主运动,可以完成海洋环境监测^[1]、管道检查^[2]、海洋设备巡检^[3]、智慧型海洋牧场运维^[4]等多种任务。国内外学者已经研究了机器鱼的驱动方式与推进机构^[5]、运动效率^[6]、机械结构^[7]及外形材料^[8]等多个方面,机器鱼相关问题的研究已成为水下机器人发展的一个重要分支。

由于海洋环境存在大量未知地形和障碍物,对机器鱼的水下游动与探测造成很大困难。因此,规划出一条稳定、安全、高效的运动路径,使机器鱼在海洋环境中安全可靠地完成既定任务尤为重要。文献[9]提出将遗传算法应用于机器鱼的路径寻优,将路径搜索时间缩短了 30% 以上,但是难以建立描述复杂环境的准确数学模型,路径规划能力有待提高;文献[10]基于自适应蚁群算法提出面向动态环境的多机器鱼路径规划方法,通过自适应调整信息素浓度形成正反馈,快速获得全局路径最优解,但此类算法需要进行大量的参数调整和迭代,求解速度较慢;文献[11]使用动态优化方法实现机器鱼局部路径优化,有效解决了不规则障碍物环境下的避障问题。此外,人工势场法^[12]、A* 算法^[13]、强化学习算法^[14]等方法也已经应用于机器鱼路径规划领域,减少了路径规划时间,缩短了路径长度,为机器鱼路径规划提供了多种思路。

快速搜索随机树 (rapidly-exploring random tree, RRT) 算法是一种基于随机采样的规划算法^[15],通过在整个工作空间随机采样实现树状路径快速拓展,探索工作空间内的未知区域,找到可行路径。在路径搜索过程中,通过对状态空间内的随机点进行碰撞检测,避免复杂的系统建模和搜索区域的几何划分^[16],具备快速有效的空间搜索能力。

然而,RRT 算法在生长随机性、搜索效率、路径稳定性等方面还有待提高^[17],许多学者针对 RRT 算法进行了改进:文献[18]采用偏置采样的方法降低随机树的搜索成本;文献[19]针对 RRT 算法只能找到可行路径而无法保证最优路径的问题,建立 RRT* 算法,在找到初始路径后通过不断迭代、不断局部更新随机树优化路径;文献[20]提出 Quick-

RRT* 算法,将三角不等式融入 RRT* 算法中,通过改进父节点的选择及路径重新布局改进处理时间;文献[21]基于双向搜索的思想提出双向快速搜索随机树 (bidirectional rapidly-exploring random trees, Bi-RRT) 算法,通过构造 2 个生长树进行路径搜索,大大缩短了搜索时间;文献[22]将人工势场法与 Bi-RRT 算法结合,通过势场的方向引导随机树的生长方向,降低随机树生长的随机性;文献[23]将 RRT* 算法与动态窗口法融合,实现了在复杂动态变化环境下的路径规划;文献[24]针对电磁驱动机器鱼提出一种改进的 RRT 算法,通过添加目标导向,人为引导随机点的生成,加快算法搜索速度,生成满足机器鱼运动性能约束的较优路径。

上述对 RRT 算法的优化达到了降低生长树生长随机性、改善路径搜索质量的效果,但仍存在生长树搜索重复、搜索速度较慢等问题。为匹配机器鱼机动性好、效率高的特点,需要缩短路径规划时间,更好地发挥其性能。因此,本研究针对螺旋桨和仿生摆动混合驱动的高机动性机器鱼,提出一种改进的 Bi-RRT 算法对路径进行快速规划,加入生长引导机制增强生长趋向能力,引入连接强化机制提高搜索速度,对得到的路径进行节点简化、路径优化和路径平滑操作,并对整个算法进行仿真分析,检验算法的有效性。

1 机器鱼模型

本研究以山东大学和青岛森科特智能仪器有限公司联合开发的混合驱动机器鱼为研究对象,整体结构如图 1 所示。混合驱动机器鱼具有螺旋桨推进和尾鳍摆动推进 2 种模式,当机器鱼需要获得较大的瞬时动力及快速升潜时,采用螺旋桨推进模式;当机器鱼进行高效率、低扰动作业时,采用尾鳍摆动推进模式。根据不同的工作环境选择不同的驱动方式,使机器鱼兼顾机动性、快速性、隐蔽性等特点,具有更好的水下运动性能。



图 1 机器鱼整体结构图

Fig.1 Overall structure diagram of robotic fish

混合驱动机器鱼由头部组件、控制元件耐压仓、螺旋桨推进机构、尾鳍摆动推进机构、胸鳍机构、侧线系统及流线型外壳构成。机器鱼头部组件

搭载水下双目相机,头部外壳采用透明亚克力材料,可通过相机实时获取外界信息。树莓派、单片机、电力载波等器件密封在控制元件耐压仓中,均匀分布在鱼体两侧的6对压力传感器构成侧线系统,通过感知压力变化获取外界水流信息。

胸鳍机构由4个舵机驱动,如图2所示,可使胸鳍进行旋转和摆动。

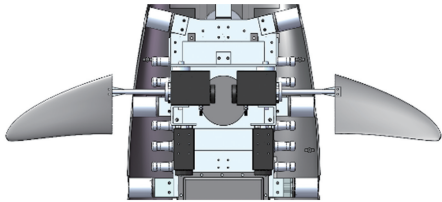


图2 机器鱼胸鳍机构图

Fig.2 Diagram of the pectoral fin mechanism of robotic fish

螺旋桨推进机构由3个螺旋桨推进器组成,如图3所示。2个推进器控制机器鱼在水平方向的前进和后退,1个推进器控制机器鱼在垂直方向的升降。

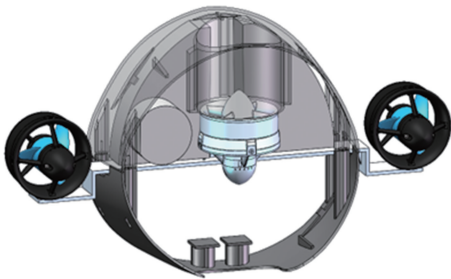


图3 螺旋桨推进机构

Fig.3 Propeller propulsion mechanism

尾鳍摆动推进机构由3个水下防水舵机驱动,如图4所示,通过控制3个舵机的输出摆角模拟仿生摆动产生推力,同时配合胸鳍机构实现上浮下潜。

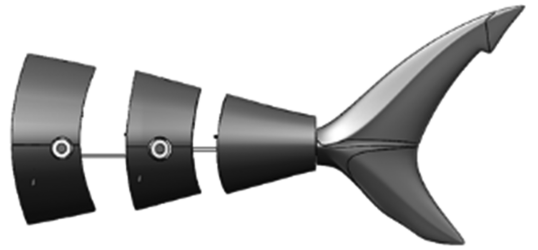


图4 尾鳍摆动推进机构

Fig.4 Tail fin swinging propulsion mechanism

机器鱼控制系统如图5所示,包括STM32单片机、树莓派、电机控制器、舵机控制器、串口转网络模块、交换机、电力载波、数据采集器、姿态传感器、WIFI模块。STM32单片机生成控制信号,电机控制器驱动3个螺旋桨推进器,舵机控制器驱动7个水下舵机,树莓派处理双目相机的信息。机器鱼具备有缆和无缆2种通信方式,在浅水环境中采用无缆模式,通过WIFI模块进行机器鱼与上位机之间的数据传输;在深水环境中采用有缆模式,机器鱼通过电缆与水面浮球进行数据交互,水面浮球再通过WIFI信号与上位机进行数据交互。

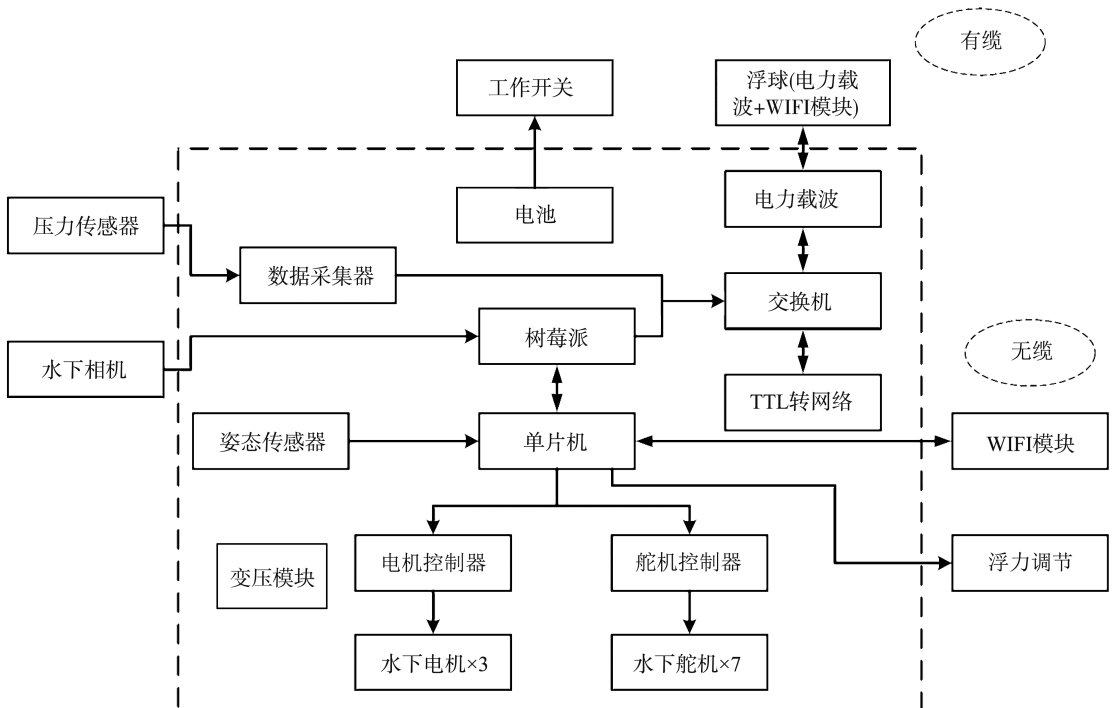


图5 机器鱼控制系统

Fig.5 Robot fish control system

2 基础 Bi-RRT 算法

由于 RRT 算法在随机树的拓展过程是随机的,搜索过于盲目,路径中含有大量冗余点,效率不高。针对 RRT 算法耗时较长、效率不高的问题,Bi-RRT 算法采用生成 2 个随机树的方法实现快速搜索。Bi-RRT 算法构建 2 个随机树 T_a 和 T_b ,分别从起始点 q_{start} 和目标点 q_{goal} 进行拓展,每个树的生长方式和 RRT 算法相同,当树 T_a 上新生成的点到树 T_b 上的节点距离小于步长时,两树相连,搜索结束,完成路径规划。Bi-RRT 算法基本原理如图 6 所示。

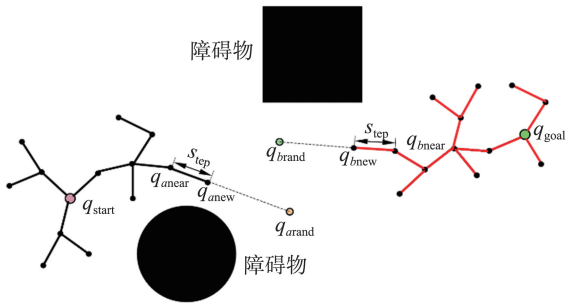


图 6 Bi-RRT 基本原理图

Fig.6 Basic schematic diagram of Bi-RRT

Bi-RRT 算法的主要流程如下:以起始点 q_{start} 为根节点构建随机树 T_a 本体,以目标点 q_{goal} 为根节点构建随机树 T_b 本体;在工作空间内随机选点 q_{arand} 引导随机树 T_a 的生长;遍历随机树 T_a 上所有节点,找到距离随机点 q_{arand} 最近的树节点 q_{aneur} ;沿点 q_{aneur} 到 q_{arand} 方向按照指定步长 S_{step} 生成新节点 q_{aneu} ;进行碰撞检测,判断新节点是否可行,若不可行则放弃此点,若可行则添加到树节点;随机树 T_b 按照同样的方式生成新节点 q_{bneu} ;判断 2 个随机树新节点之间的距离是否小于设定值,若小于则搜索结束,否则循环进行上述操作,使随机树进行生长;从目标点 q_{goal} 向起始点 q_{start} 回溯得到规划路径。

3 改进 Bi-RRT 算法

改进的 Bi-RRT 算法流程图如图 7 所示。确定起始点和目标点后,在生长引导机制的作用下引导随机树生长。其中,生长吸引建立两树之间联系,生长导向降低 Bi-RRT 算法的随机性。同时,加入连接强化机制提高算法搜索速度,利用路径简化机制去除初始路径上的大量冗余点,并对规划出的路径进行优化处理。此外,对路径进行平滑处理,优化路径上的拐点,得到适合机器鱼航行的路径。

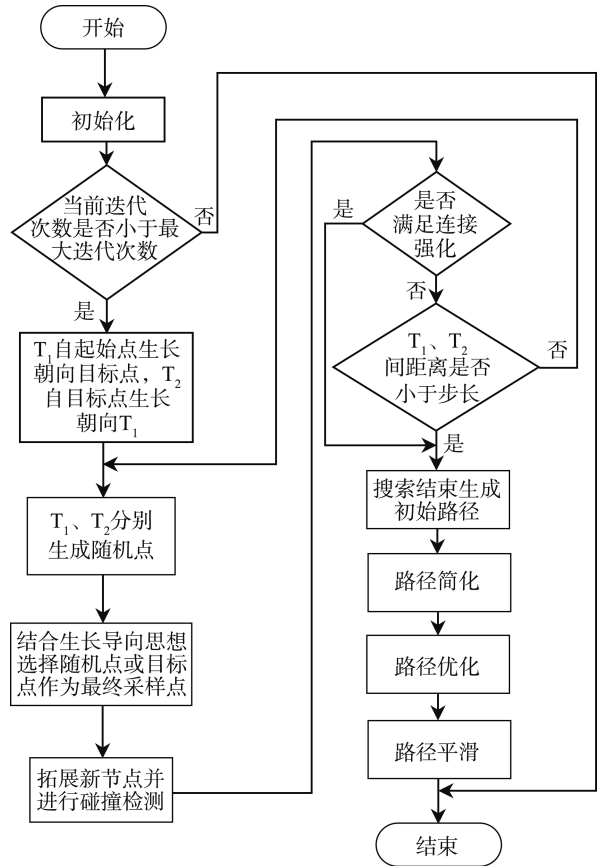


图 7 改进的 Bi-RRT 算法流程图

Fig.7 Improved Bi-RRT algorithm flowchart

3.1 生长引导机制

在 Bi-RRT 算法的随机树生成过程中,两树分别以彼此的起点作为目标进行拓展。 T_1 朝着 q_{goal} 生长, T_2 朝着 q_{start} 生长,当两树距离小于预设步长时结束搜索。两树的生长拓展方向可能发生偏移,导致无法快速连接,从而扩展出更多的节点,降低整个算法的搜索效率。因此,本研究算法采用生长吸引机制,引导两树进行相遇(如图 8 所示),使 T_2 的生长方向面向 T_1 ,减少节点数量,加快搜索速度。

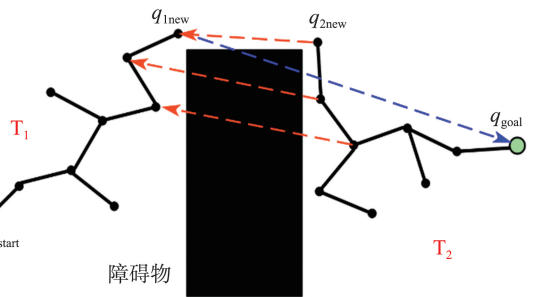


图 8 生长吸引原理图

Fig.8 Growth attraction principle diagram

T_1 从起始点 q_{start} 开始生成,将目标点 q_{goal} 作为拓展目标,保证顺利到达目标。 T_2 从目标点 q_{goal} 开始生长,以 T_1 最新添加的节点作为拓展目标,保证

两树快速相连。当两树之间距离小于步长时停止节点拓展,完成路径规划。目标导向强化机制的引入使随机树的拓展更有针对性,降低了两树的节点数量,使路径规划快速高效。

在随机树生长过程中采样点的选取完全随机,使随机树在工作空间内漫无目的地随机生长,产生大量无效搜索,导致路径规划算法效率很低。本研究算法引入生长导向函数,设置生长导向概率因子 p_g ,引导随机树生长(如图9所示)。当随机概率 $p > p_g$ 时,在工作空间内随机取点;当随机概率 $p < p_g$ 时,选取目标点作为新的采样点。加入生长导向函数后,可以保证随机树以一定概率向着目标点生长,减少无效搜索,提高搜索效率。生长导向函数为:

$$X_{\text{rand}} = \begin{cases} X_{\text{goal}}, & p < p_g \\ X_{\text{random}}, & p > p_g \end{cases}, \quad (1)$$

式中, X_{rand} 为新的随机点坐标, X_{goal} 为以目标点作为新的采样点得到的随机点坐标, X_{random} 为以工作空间内随机取点作为新的采样点得到的随机点坐标。

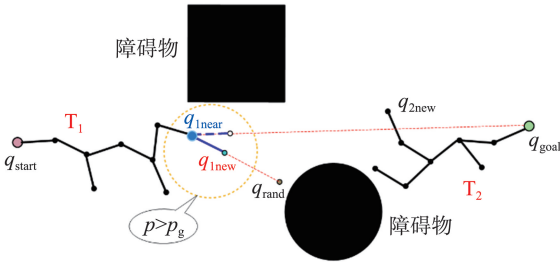


图9 生长导向原理图

Fig.9 Growth oriented schematic diagram

生长吸引确保两树生长方向相互吸引,使两树快速连接。生长导向降低 Bi-RRT 算法的生长随机性,使随机树具有向目标点方向生长的能力,两者共同组成生长引导机制。利用生长引导机制建立两个随机树之间的联系,提高算法搜索速度。

3.2 连接强化机制

两个随机树在工作空间内进行随机生长时, T_1 与 T_2 都是以一定的步长在生长引导机制的引导下朝向目标点生长。然而,当两个随机树新节点之间没有障碍物时,按照固定步长逐步靠拢的时间成本较高,降低了算法搜索效率。因此,本研究算法引入连接强化机制(如图10所示),在每次生成新节点后进行连接尝试,具体原理如下: T_1 与 T_2 分别拓展新节点; T_2 生成新节点后尝试与 T_1 的最新节点相连;对连接的路径进行碰撞检测,若连接路径与障碍物发生碰撞,则放弃该相连,再次进行节点拓展,若未发生碰撞,则停止节点拓展,完成路径规划。

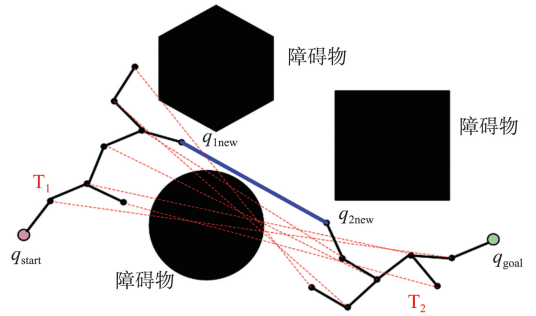


图10 连接强化原理图

Fig.10 Schematic diagram of connection reinforcement

3.3 路径简化与路径优化

完成路径搜索后,从目标点 q_{goal} 向起始点 q_{start} 回溯得到原始规划路径。受搜索步长及随机点生成位置的限制,初始路径中存在大量冗余节点,增加了路径长度,降低了路径质量。因此,本研究算法对路径进行简化处理,去除冗余节点。路径简化原理如图11所示,从起点开始依次与路径上的节点进行连接并进行碰撞检测,直到相连路径与障碍物发生碰撞,将碰撞节点记为 q_p ,连接起点与 q_{p-1} ,舍弃起点到 q_{p-1} 之间的节点形成新的路径;重复进行此操作,从 q_{p-1} 节点开始分别与路径上后续节点相连,直到与终点相连结束,得到简化后的新路径。

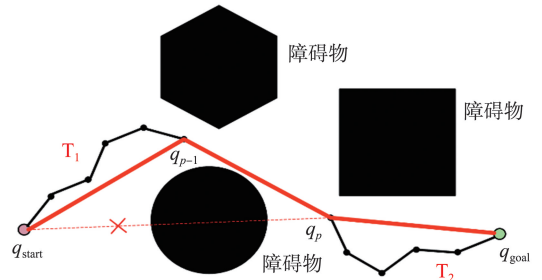


图11 路径简化原理图

Fig.11 Schematic diagram of path simplification

从图11中可以看出,简化后的路径并不完全靠近障碍物,仍然存在一些不必要的路径。针对路径非最优甚至非次优的问题,对简化出的路径进行优化处理,在简化路径的基础上重新生成新的采样点,使新的采样点在不发生碰撞的前提下更加靠近障碍物。

简化后的原始路径为 $P_{\text{ATH}} = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}$,各点之间距离的累加

$$A_{\text{di}} = \begin{cases} 0, & i = 1 \\ \sum_{i=2}^n \lambda_i, & i = 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

式中 λ_i 为第 i 个点到第 $i-1$ 个点之间的距离。

在整个路径中随机采样 2 个距离 S_1, S_2 :

$$\begin{cases} S_1 = \text{rand}(0, 1) A_{\text{dn}} \\ S_2 = \text{rand}(0, 1) A_{\text{dn}} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\text{rand}(0, 1)$ 为 0~1 之间的随机数, 保证 $S_1 < S_2$ 。

将 S_1 、 S_2 在整个路径中进行比较, 找到满足 $A_{di} \leq S_1 \leq A_{di+1}$ 且 $A_{dj} \leq S_2 \leq A_{dj+1}$ 的 i 和 j 。在 q_i 和 q_{j+1} 之间的区域生成新的采样点 q_{n1} 和 q_{n2} , 对加入 q_{n1} 和 q_{n2} 后的路径进行碰撞检测:

$$\begin{cases} q_{n1} = (1 - \frac{S_1 - A_{di}}{A_{di+1} - A_{di}})q_i + \frac{S_1 - A_{di}}{A_{di+1} - A_{di}}q_{i+1} \\ q_{n2} = (1 - \frac{S_2 - A_{dj}}{A_{dj+1} - A_{dj}})q_j + \frac{S_2 - A_{dj}}{A_{dj+1} - A_{dj}}q_{j+1} \end{cases}, \quad (4)$$

式中, q_i 、 q_{i+1} 、 q_j 、 q_{j+1} 分别为路径上的第 i 、 $i+1$ 、 j 、 $j+1$ 个点。

机器鱼转弯角度如图 12 所示, 机器鱼在转弯时受到自身结构的限制, 无法实现小角度转弯。因此, 在生成路径点时要考虑相邻两段之间的角度 (本研究机器鱼模型最小转弯角度取 45°)

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|}\right), \quad (5)$$

式中, \mathbf{a} 为 q_b 到 q_a 方向的向量, \mathbf{b} 为 q_b 到 q_c 方向的向量。在生成采样点 q_{n1} 和 q_{n2} 后, 需要判断从 q_{n1} 到 q_i 方向与 q_{n1} 到 q_{i+1} 方向、从 q_{n2} 到 q_j 方向与 q_{n2} 到 q_{j+1} 方向之间的夹角, 若满足最小角度要求, 则保留, 否则舍弃, 重新选取新的采样点。

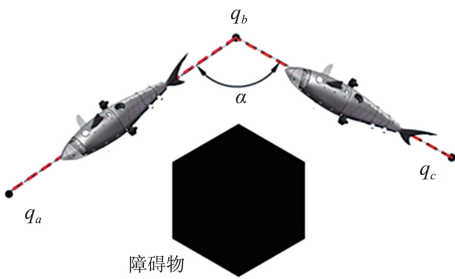


图 12 机器鱼转弯角度

Fig.12 Turning angle of robotic fish

第一次优化后的路径为 $P_{ATH_NEW} = \{q_1, q_2, \dots, q_i, q_{n1}, q_{n2}, q_{j+1}, \dots, q_n\}$, 在新优化路径的基础上继续重复上述操作, 直到达到设置的迭代次数。路径优化效果如图 13 所示, 红色路径为第一次简化后的路径, 蓝色路径为最终优化后的路径, 通过路径优化进一步降低了路径长度。

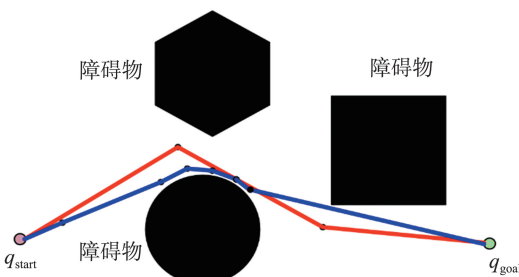


图 13 路径优化原理图

Fig.13 Schematic diagram of path optimization

3.4 路径平滑

在机器鱼路径规划过程中, 要考虑路径的平滑性。由于 RRT 算法在进行路径规划时随机采样点存在离散性和非连续性, 生成的路径可能存在拐角锐利或反复曲折的现象, 导致机器鱼只能以较慢速度通过这些拐点, 甚至无法按期望路径游动。因此, 需要对规划后的路径进行路径平滑操作。

三次样条曲线要求经过给定的离散路径点, 并且在每个路径点处一阶、二阶连续, 具有高阶连续性和光滑性, 能够使路径更加自然平滑, 是常用的路径平滑方法, 可以保证曲线与原始路径点拐角处误差较小。利用分段函数表达三次样条曲线

$$S(x) = \begin{cases} S_0(x) = a_0 + b_0(x-x_0) + c_0(x-x_0)^2 + d_0(x-x_0)^3, & x_0 \leq x \leq x_1 \\ S_1(x) = a_1 + b_1(x-x_1) + c_1(x-x_1)^2 + d_1(x-x_1)^3, & x_1 < x \leq x_2 \\ \dots \\ S_{n-1}(x) = a_{n-1} + b_{n-1}(x-x_{n-1}) + c_{n-1}(x-x_{n-1})^2 + d_{n-1}(x-x_{n-1})^3, & x_{n-1} < x \leq x_n \end{cases}, \quad (6)$$

式中, a_{n-1} 、 b_{n-1} 、 c_{n-1} 、 d_{n-1} 为多项式系数。

路径处理过程如图 14 所示。

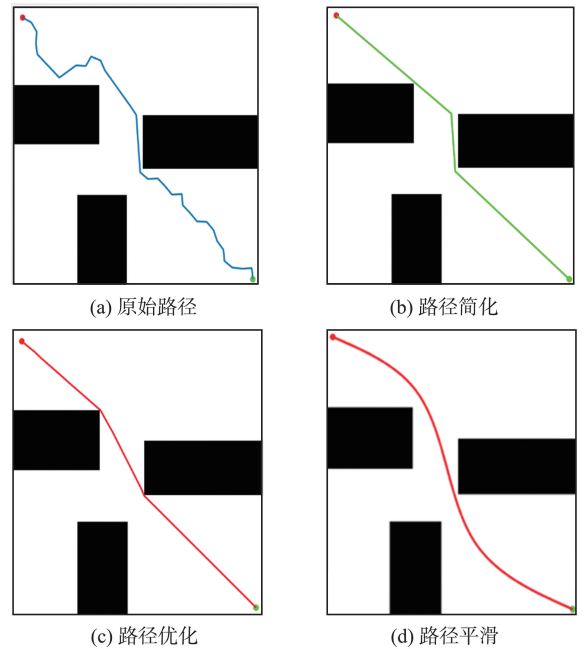


图 14 路径处理过程

Fig.14 Path processing process

4 仿真与验证

采用仿真分析方法验证改进后 Bi-RRT 算法的有效性, 采用 MATLAB R2020a 实现算法仿真, 仿真平台

CPU为Intel(R) Core(TM) i9-12900H 2.50 GHz。

在仿真过程中,地图空间为 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$,机器鱼的运动起点坐标设置为 $(10, 10)$,目标点坐标设置为 $(490, 490)$,步长 S_{ep} 设置为20,最大迭代次数设置为5 000。分别在基本地图、迷宫地图及拥有狭窄环境地图中进行仿真,对比RRT算法、RRT*算法、Bi-RRT算法与本研究算法的路径规划效果。其中,RRT算法通过单棵随机树在地图空间内随机生长进行路径搜索;RRT*算法在RRT算法的基础上通过对搜索路径进行节点的重新选择,不断迭代产生更优的路径完成路径规划。每种算法分别选择100次规划成功的路径,对每种算法的搜索时间、路径长度、规划路径的节点数进行对比分析。仿真分析结果如图15~17和表1~3所示。其中,基本地图环境下的路径规划用于验证在常规环境下的路径规划效果,迷宫地图下的路径规划用于分析障碍物布局复杂、空间不连续情况下算法的搜索时间和规划的路径长度,狭窄环境地图下的路径规划用于验证随机树在狭窄环境下的拓展能力。

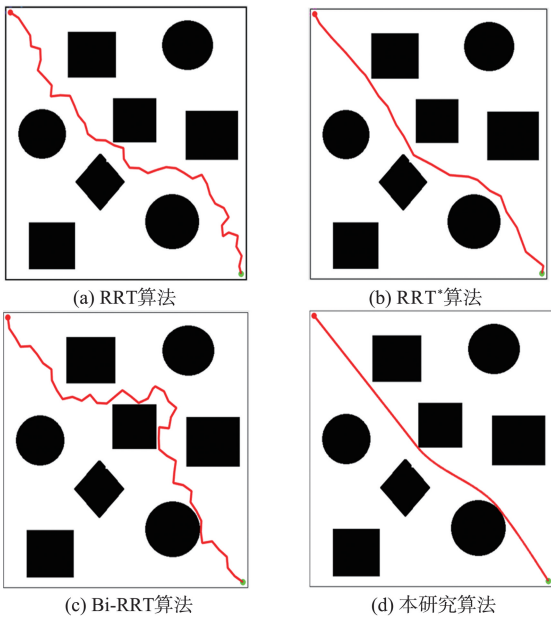


图15 基本地图路径规划
Fig.15 Basic map path planning

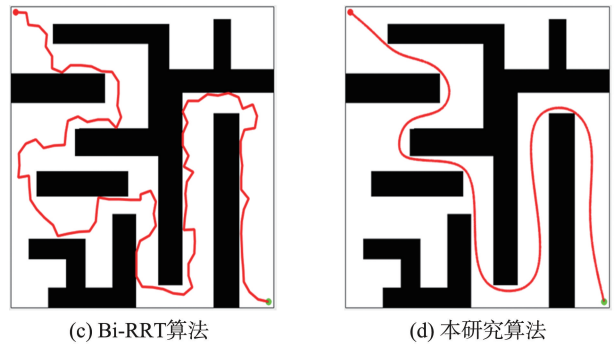
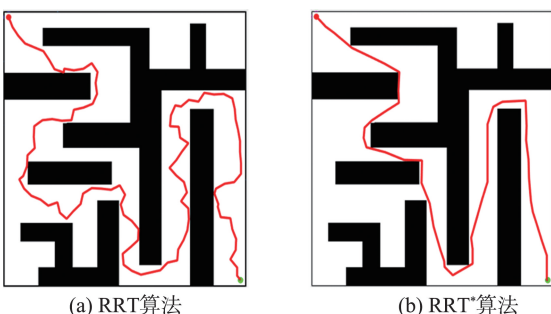


图16 迷宫地图路径规划
Fig.16 Maze map path planning

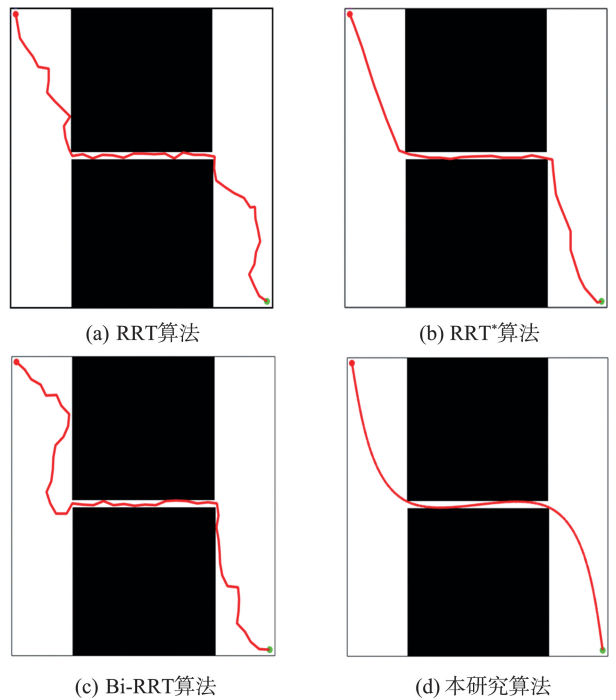


图17 狭窄环境地图路径规划
Fig.17 Narrow environment map path planning

表1 基本地图下仿真结果

算法	节点数/ 个	路径长度/ mm	搜索时间/ s
RRT	46.5	889.7	12.1
RRT*	25.4	785.5	17.3
Bi-RRT	44.2	865.9	1.1
本研究算法	24.6	673.9	0.4

表2 迷宫地图下仿真结果

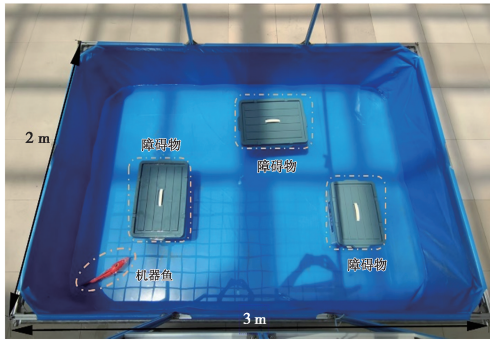
算法	节点数/ 个	路径长度/ mm	搜索时间/ s
RRT	100.7	1 933.1	60.5
RRT*	50.9	1 685.3	101.7
Bi-RRT	97.5	1 939.6	3.2
本研究算法	37.3	1 521.4	1.2

表 3 狭窄环境地图下仿真结果

Table 3 Simulation results in narrow environment map

算法	节点数/个	路径长度/mm	搜索时间/s
RRT	50.5	956.7	13.5
RRT*	30.2	870.1	25.4
Bi-RRT	46.9	918.3	2.0
本研究算法	25.0	795.7	0.6

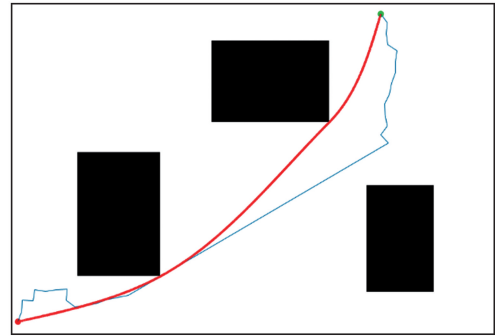
从仿真结果可知,RRT* 算法在经过多次路径迭代后,路径长度和节点数量明显提升,但受迭代的影响,整个搜索时间显著延长;Bi-RRT 算法在搜索时间上大大缩短,但在路径长度和节点数量上没有明显提升。相较于其他 3 种算法,本研究算法加入生长引导机制和连接强化机制,加快了算法搜索速度,加入路径简化及路径优化,减少了节点数量,缩短了路径长度,并进行了路径平滑处



(a) 试验模型

理。仿真结果表明,本研究算法相较于改进前的 Bi-RRT,节点数减少约 50.8%,路径长度缩短约 19.0%,搜索时间减少约 65.3%。仿真结果表明,本研究算法在节点数、路径长度、搜索时间方面有着良好表现。

为验证本研究算法在实际环境中的可靠性,在水池内搭建了试验模型进行算法验证,如图 18 所示。水池长 3 m、宽 2 m,地图设置 3 个矩形障碍物。根据试验模型绘制工作地图,选取起点坐标(20, 20)、终点坐标(190, 230)进行路径规划,试验结果如图 18(b)所示。蓝色路径表示加入生长引导机制和连接强化机制后的初始路径,红色路径为优化后的最终路径。试验结果表明,本研究算法可适用于实际环境中的路径规划。



(b) 路径规划结果

图 18 简单地图试验验证

Fig.18 Simple map experiment verification

5 结论

为适应机器鱼的运动特性,提高机器鱼的水下路径规划效率,本研究在 Bi-RRT 算法的基础上,提出一种改进的 Bi-RRT 算法,在两随机树连接、去除路径冗余节点、实现路径平滑处理等方面进行创新。加入生长导向机制、连接强化机制,缩短路径搜索时间;引入路径简化与优化机制、路径平滑机制,剔除冗余节点,改善路径质量,使路径更适合机器鱼航行;进行仿真验证,分析结果表明,改进后的算法节点数减少约 50.8%,路径长度缩短约 19%,搜索时间减少约 65.3%。本研究成果有利于机器鱼快速高效进行水下路径规划,具有良好应用前景。

参考文献:

[1] KATZSCHMANN R K, DELPRETO J, MACAURDY R, et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish[J]. Science Robotics, 2018, 3(16): eaar3449.

[2] HU S, FENG A, SHI J, et al. Underwater gas leak detection using an autonomous underwater vehicle (robotic fish)[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 167: 89-96.

[3] CHEN G, SUN Y, HUANG J, et al. Wireless power and data transmission system of submarine cable-inspecting robot fish and its time-sharing multiplexing method[J]. Electronics, 2019, 8(8): 838.

[4] 王懿德,夏英凯,朱明,等.水产养殖机器鱼设计与三维路径跟踪控制[J].华中农业大学学报,2022,41(4): 259-270.
WANG Yicai, XIA Yingkai, ZHU Ming, et al. Aquaculture robot fish design and 3D path tracking control[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(4): 259-270.

[5] ZHAO Q, LIU S, CHEN J, et al. Fast-moving piezoelectric micro-robotic fish with double caudal fins[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 140: 103733.

[6] YAN S, WU Z, WANG J, et al. Efficient cooperative structured control for a multijoint biomimetic robotic fish[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020,

- 26(5): 2506-2516.
- [7] CHEN B, JIANG H. Body stiffness variation of a tensegrity robotic fish using antagonistic stiffness in a kinematically singular configuration[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(5): 1712-1727.
- [8] HESS A, TAN X, GAO T. CFD-based multi-objective controller optimization for soft robotic fish with muscle-like actuation[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2020, 15(3): 035004.
- [9] 李连鹏, 苏中, 解迎刚, 等. 基于遗传算法的机器鱼水中路径规划[J]. *兵工自动化*, 2015, 34(12): 93-96.
LI Lianpeng, SU Zhong, XIE Yinggang, et al. Robot fish underwater path planning based on genetic algorithm[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2015, 34(12): 93-96.
- [10] CAI W, DENG Y. Global path planning of multi-robot fish based on adaptive ant colony algorithm in dynamic environment[C]//*Proceedings of the 4th International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology*. Shenzhen, China: Atlantis, 2017: 74-78.
- [11] TIAN Q, WANG T, WANG Y, et al. A two-level optimization algorithm for path planning of bionic robotic fish in the three-dimensional environment with ocean currents and moving obstacles[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112829.
- [12] YANG W, WU P, ZHOU X, et al. Improved artificial potential field and dynamic window method for amphibious robot fish path planning[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(5): 2114.
- [13] HONG Q, CHEN M X, DENG Y S. Multi-robot fish path planning based on the modified A* algorithm[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 568/569/570: 1054-1058.
- [14] HU J, MEI J, CHEN D, et al. Path planning of robotic fish in unknown environment with improved reinforcement learning algorithm[C]//*International Conference on Internet and Distributed Computing Systems*. Tokyo, Japan: Springer, 2018: 248-257.
- [15] LAVALLE S M. Rapidly-exploring random trees: a new tool for path planning[R]. Iowa, USA: Computer Science Department, Iowa State University, 1998.
- [16] CUI J. An overview of unmanned vehicle path planning algorithms[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1345(4): 042092.
- [17] 陈秋莲, 蒋环宇, 郑以君. 机器人路径规划的快速扩展随机树算法综述[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(16): 10-17.
CHEN Qiulian, JIANG Huanyu, ZHENG Yijun. Overview of fast expanding random tree algorithms for robot path planning[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(16): 10-17.
- [18] FERGUSON D, STENTZ A. Anytime RRTs[C]//*Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing, China: IEEE, 2006: 5369-5375.
- [19] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Incremental sampling-based algorithms for optimal motion planning[J]. *Robotics Science and Systems VI*, 2010, 104(2): 267-274.
- [20] JEONG I B, LEE S J, KIM J H. Quick-RRT*: triangular inequality-based implementation of RRT* with improved initial solution and convergence rate[J]. *Expert Systems with Applications*, 2019, 123: 82-90.
- [21] LAVALLE S M, KUFFNER J J. Rapidly-exploring random trees: progress and prospects[J]. *Algorithmic & Computational Robotics New Directions*, 2001, 20(5): 303-307.
- [22] 张一帆, 史国友, 徐家晨. 基于人工势场法引导的 Bi-RRT 的水面无人艇路径规划算法[J]. *上海海事大学学报*, 2022, 43(4): 16-22.
ZHANG Yifan, SHI Guoyou, XU Jiachen, et al. A Bi-RRT based path planning algorithm for surface unmanned vehicle guided by artificial potential field method[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2022, 43(4): 16-22.
- [23] 张瑞, 周丽, 刘正洋. 融合 RRT* 与 DWA 算法的移动机器人动态路径规划[J/OL]. *系统仿真学报*. (2023-03-24) [2023-05-14]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1543>.
- [24] 朱红秀, 郑权, 杜闯, 等. 改进 RRT 算法用于电磁驱动机器人鱼路径规划[J]. *火力与指挥控制*, 2020, 45(10): 100-105.
ZHU Hongxiu, ZHENG Quan, DU Chuang, et al. Improved RRT algorithm for path planning of electromagnetic driven robotic fish[J]. *Fire Control and Command Control*, 2020, 45(10): 100-105.

(编辑:孙亚彤)