

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209355

改进 RRT 的机器人路径规划算法^{*}侯宇翔^{1,2} 高焕兵^{1,2} 汪子健^{1,2} 杜传胜^{1,2}

(1. 山东建筑大学信息与电气工程学院 济南 250101; 2. 山东省智能建筑技术重点实验室 济南 250101)

摘要: 针对快速扩展随机树算法(RRT)在机器人路径规划中随机性强、转折点多、存在大量冗余点的缺点,提出了一种基于单元分解法的改进 RRT 算法。首先在算法初始阶段,利用单元分解法将地图划分为可行区域与障碍区域;后根据区域与区域之间邻接关系,将随机采样点的选择固定在邻居区域内,直至扩展到目标点所在区域;并对搜索到的最终路径进行优化处理,改善路径转折点过多的问题。仿真结果表明,改进 RRT 算法生成的路径长度更短、消耗时间更少,最后将改进 RRT 算法应用在实际移动机器人中,进一步证明改进算法的实用性和有效性。

关键词: 路径规划;快速扩展随机树算法;单元分解;随机采样

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6099

Improved RRT for mobile robot path planning algorithm

Hou Yuxiang^{1,2} Gao Huanbing^{1,2} Wang Zijian^{1,2} Du Chuansheng^{1,2}

(1. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Shandong Key Laboratory of Intelligent Building Technology, Jinan 250101, China)

Abstract: To address the shortcomings of Rapidly-Exploring Random Tree algorithm (RRT) in the path planning of mobile robots, with many turning points and a large number of redundant points, an improved RRT algorithm based on cell decomposition method is proposed. Firstly, in the initial stage of the algorithm, the cell decomposition method is used to divide the map into feasible regions and obstacle regions; later, according to the neighboring relationship between regions, the selection of random sampling points is fixed in the neighboring regions until it is extended to the region where the target point is located; and the final path searched is optimized to improve the problem of too many path turning points. Simulation results show that the path generated by the improved RRT algorithm is shorter in length and consumes less time. Finally, the improved RRT algorithm is applied to the actual mobile robot to further prove the practicality and effectiveness of the improved algorithm.

Keywords: path planning; rapidly-exploring random tree; cell decomposition; random sampling

0 引言

随着科学技术的发展,路径规划算法一直是众多学者广泛研究的课题^[1-2]。路径规划算法可以在复杂的环境中,为移动机器人快速的规划出一条最短或最优的无碰撞路径^[3-6]。近年来,国内外诸多学者提出了多种路径规划算法如 A* 算法^[7-8]、跳点搜索算法(jump point search, JPS)^[9]、人工势场法(artificial potential field, APF)^[10-11]、快速搜索随机树(rapidly-exploring random tree, RRT)^[12]、遗传算法(genetic algorithm, GA)^[13]等。

其中 RRT 算法是由 LaValle 提出的快速搜索算法,其具有随机采样节点、增量式增长、搜索能力强等特点,该算

法为移动机器人路径规划开辟了一种新的解决方法^[14]。但 RRT 算法由于节点扩展随机性强、缺乏路径导向性,导致路径规划效率低,并且搜索到的最终路径存在转折较多,距离较长的问题。为此,国内外许多学者对其开展了许多研究,陈侠等^[15]将 RRT 算法与人工势场法融合改进算法(APF-RRT),增加引力分量来改进 RRT 算法随机性强的缺点,但是并没有考虑障碍物斥力的作用,一定程度增加了路径规划失败的概率;为了寻找 RRT 算法的最优路径, Karaman 等^[16]提出了 RRT* 算法,通过重选父节点、剪枝优化和渐进寻优获得最佳路径,但其运算效率较低。黄壹凡等^[17]提出了 RRT-connect 算法,对新节点引入重选父节点的环节,同时加入动态步长策略来提高收敛速度,但找到

收稿日期:2022-03-21

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61903227)、山东省重点研发计划项目(2019GGX104105)资助

的最终路径依然存在许多的转折点,影响实际机器人稳定性;Klancar 等^[18]利用贝塞尔曲线进行路径点拟合,保证了生成路径的连续性,但在狭窄通道或复杂环境中供车辆通行的空间较小,改进 RRT 的优化效果不佳;Mashayekhi 等^[19]针对 RRT 搜索路径时的收敛效率以及优化路径耗时问题,提出了一种 Hybrid-RRT; Nasir 等^[20]提出 RRT* Smart 算法,改变采样方式从而提高 RRT* 算法的搜索效率? 虽然上述文献对传统 RRT 算法做出了改进,并且取得了很大的改进,但并未很好的改进路径随机性和转折点较多的问题。

针对以上问题,本文提出一种改进 RRT 算法,首先采用单元分解法将地图划分成自由区域和障碍区域;在算法随机采样节点环节,利用区域之间的邻接关系,将随机采样区域控制在某个区域;此外,对搜索到的路径节点进行简化处理,解决了算法全图随机采样问题,提高了搜索效率,并且最终路径长度更短,转折点更少。

1 RRT 算法

RRT 算法是一种常见的机器人路径规划算法,它由 Steven M. LaValle 教授在 1998 年提出。RRT 算法从搜索空间中随机抽取样本逐步生成的,其本质更倾向于向大部分未探测区域生长一种随机生成的数据结构树。算法的扩展示意图如图 1 所示。RRT 算法的伪代码如表 1 所示。

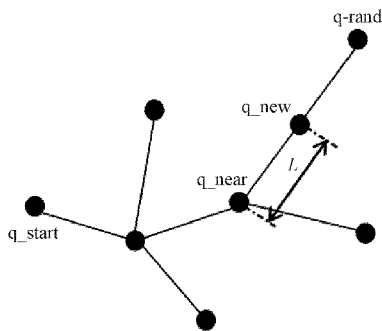


图 1 扩展示意图

图 1 中, q_{start} 为起始点, q_{rand} 代表空间中随机采样点, q_{near} 为搜索树中的最近邻点, q_{new} 是扩展后生成的新节点, L 为扩展步长。 q_{start} 作为扩展树根节点, 随机采样获得 q_{rand} , 然后在扩展树中找到距离 q_{rand} 最近的点 q_{near} , 在 q_{rand} 和 q_{near} 连线方向上按照固定步长 L 扩展新节点 q_{new} , 判断 q_{near} 与 q_{new} 之间是否存在障碍物, 若存在, 舍弃该点重新采样扩展新节点, 反之将该节点加入到随机树中, 直至找到目标点。

RRT 算法因其简单性和成功地解决了复杂的路径规划问题, 使其应用广泛。但由于传统的 RRT 算法以相等的概率从空间中生成采样点, 这意味着当工作空间包含狭窄的区域时, RRT 的效率就会降低。此外, 算法自身也存在一些不足, 比如缺乏路径导向型, 搜索时间较慢, 路径距离较长等。

表 1 RRT 伪代码

RRT 算法: RRT($q_{start}, q_{goal}, L, K$)	
1	InitializeTree()
2	for $i \leftarrow 0$ to K do
3	$q_{rand} \leftarrow \text{Random}(i, \text{map});$
4	$q_{near} \leftarrow \text{findqnear}(q_{rand}, \text{vertices});$
5	$Q_{new} \leftarrow \text{findqnew}(q_{near}, q_{rand}, \text{delta}q);$
6	if checkcollision(q_{new}) then
7	$\text{vertices} \leftarrow \text{vertices} \cup \{q_{new}\};$
8	$\text{edges} \leftarrow \text{edges} \cup \{q_{new}, q_{near}\};$
9	if checktogoal(q_{new}, q_{goal}) then
10	$\text{path} \leftarrow \text{findpath}(\text{edges}, \text{vertices});$
11	break;
12	end if
13	end if
14	end if

2 改进 RRT 算法

2.1 地图分解

使用单元分解法将地图划分为可管理的区域, 这些区域可被分为两类: 位于障碍空间中的区域(障碍单元)和位于自由空间中的区域。单元分解法使用一条垂直于 x 轴的虚拟扫描线从左到右的扫描地图, 通过判断扫描线的连通性变化来生成区域, 当扫描线经过障碍物时, 扫描线的连通性会发生变化, 构筑单元之间的连接关系的图形, 如图 2 所示为单元分解法的一个例子, 将一个带障碍的地图分解为多个区域, 图 3 为图 2 中示例的邻接图。

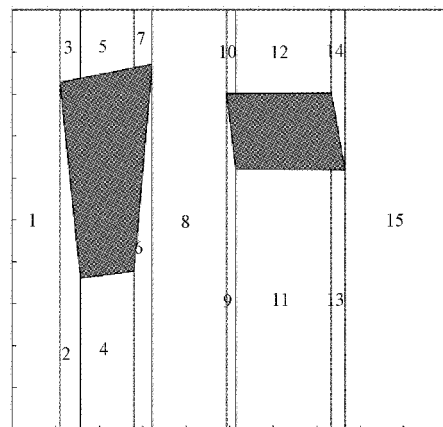


图 2 单元分解法

2.2 算法改进

传统 RRT 算法在扩展随机树的过程中, 节点的选择随机性太强, 会产生许多无用的节点, 大大增加了路径规划的时间, 并且搜索到的路径不一定是最短路径。因此, 本文对传统的 RRT 算法做出改进, 在扩展随机树的过程中既要满

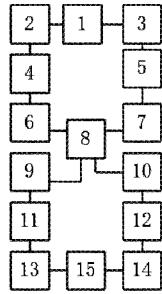


图3 单元邻接图

足节点具有一定随机性,确保复杂环境中的搜索能力,也要尽可能保证找到的最终路径为最优路径。

1) 采样优化

传统的 RRT 算法中,由于 q_rand 在整个地图中随机采样生成,所以会产生大量无用的随机采样点。针对此类问题,本文对 q_rand 选取做出了改进,算法初始阶段通过单元分解法将地图分解成若干个关联的采样区域(如图 2 所示),在每次生成随机采样点时,都可将其控制在某个区域中,很大程度避免许多冗余节点的产生。

如图 4 所示, q_start 设置在区域 1 中,将 q_goal 设置在区域 15 中,将区域 1 标记为已遍历的区域,将区域 15 为目标区域。根据地图分解产生的单元邻接关系(如图 3 所示),依次在未遍历的邻接区域内随机产生 q_rand 。以 q_start 为扩展树的根节点,在邻接并且未遍历的区域 2、3 中产生 q_rand ,然后在扩展树上寻找与目标点最近的叶节点 q_near ,沿直线 q_near 和 q_rand 以一定步长 L 得到一个新的叶节点 q_new ,检测 q_near 到 q_new 之间是否存在障碍物,若没有障碍,将 q_new 插入树中,反之舍弃;若 q_new 到达未遍历区域,将此区域标记为已遍历区域,则 q_rand 在下一邻接未遍历区域产生,直至 q_new 到达目标区域,则 q_rand 在目标区域随机产生直至 q_new 与终点 q_goal 之间无障碍物且距离小于步长 L ,将 q_goal 插入树中,随机树构造完成。

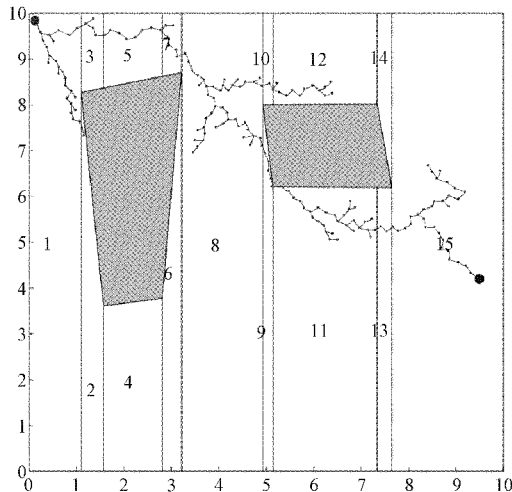


图4 采样优化示意图

2) 路径优化

RRT 算法在生成路径之后,由于自身的随机性导致最终路径由连续的曲折线段组成,这将会影响真实机器人应用的稳定性,因此需要对最终路径进行优化处理。

根据上述描述,对路径转折点进行裁剪,以进一步提高路径平滑性,对于所有转折点(P_0, P_1, P_2, \dots),如果相邻转折点形成的线 P_{n-1}, P_n 和 P_n, P_{n+1} 的斜率不同,则连接 P_{n-1} 和 P_{n+1} 。如果 P_{n-1}, P_{n+1} 没有通过障碍物,则丢弃原来的 P_{n-1}, P_n 和 P_{n-1}, P_n ,保留 P_{n-1}, P_{n+1} ,然后通过比较 P_{n-1}, P_{n+1} 和 P_{n+1}, P_{n+2} 来简化路径。重复上述步骤直至到达目标节点。

如图 5 所示,从 q_start 开始,分别连接 P_1, P_2, P_3, P_4 ,在连接 P_4 时中间存在障碍物,故舍弃 q_start 到 P_3 中间的所有冗余点,连接 q_start 和 P_3 ,然后从 P_3 开始连接 P_1, P_5, q_goal, P_3 到 q_goal 中间存在障碍物,共连接 P_3 到 P_5 ,去除中间所有冗余点 P_3 。最终原本的路线 $p_start, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, q_goal$ 简化为 $p_start, P_3, P_5, q_goal$ 。

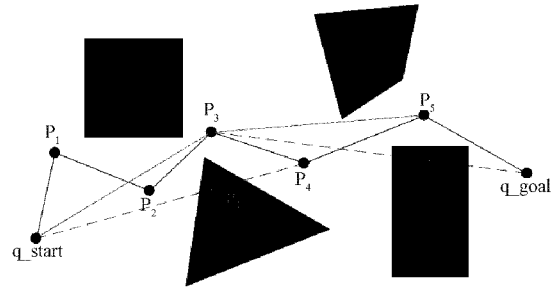


图5 路径简化示意图

改进算法大体流程如图 6 所示。

3 仿真及实验验证

3.1 仿真分析

验证改进算法的可行性及路径规划的效果,在联想拯救者 R7000P,载有 2020H、2.90 GHz 处理器上利用 Matlab R2018a 进行仿真实验。在简单环境与复杂环境下分别对本文改进算法(记作 A-RRT)、文献[15]中的 APF-RRT 算法、文献[16]中的 RRT* 算法、文献[17]中的 RRT-connect 算法、进行比较,实验数据如图 7、8 和表 2 所示。

仿真地图设置为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的二维空间。本文算法规划结果,黑色线段为简化之后的最终路径。在图 7 和图 8 中可以看出,由于 RRT-connect 和 RRT* 基于随机采样点规划路径,导致消耗大量内存储存无用冗余节点,并且最终路径存在多个转折点;APF 算法基于引力与斥力的合力采样节点,虽能快速找到路径,当遇到复杂环境时,人工势场法的缺陷就会展现出来导致路径规划失败。

通过对不同地图的多次仿真实验,相比 RRT-connect 与 RRT*,改进 RRT 算法约束了随机采样点产生的区域,大大减少了随机采样点个数与迭代次数;最后对最终路径

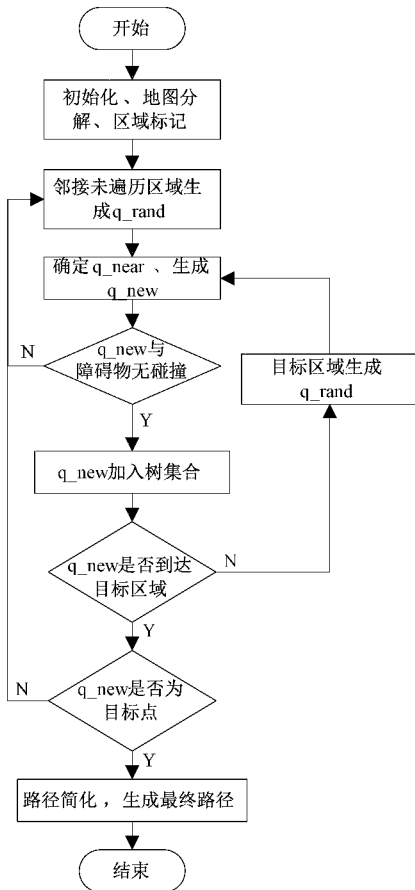


图 6 改进算法流程

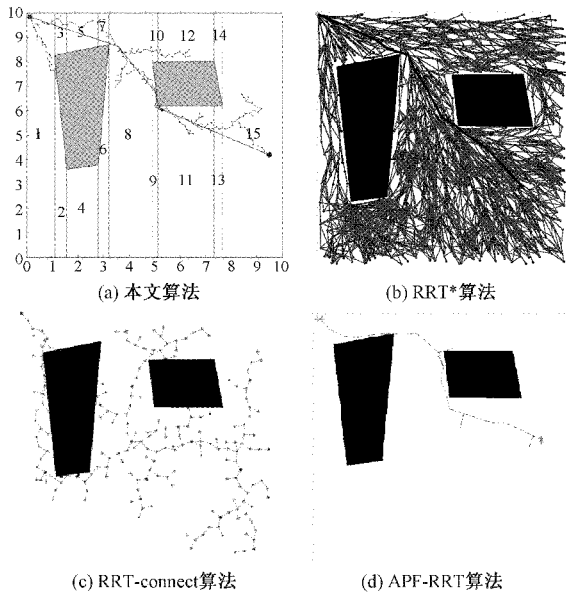


图 7 简单环境仿真结果

的简化处理,使路径的转折点数很大程度减少了,进而缩短了平均路径的长度,本文改进算法在路径转折与路径长度方面更加有优势,确保机器人运动的平稳性,使之更快到达目标点。

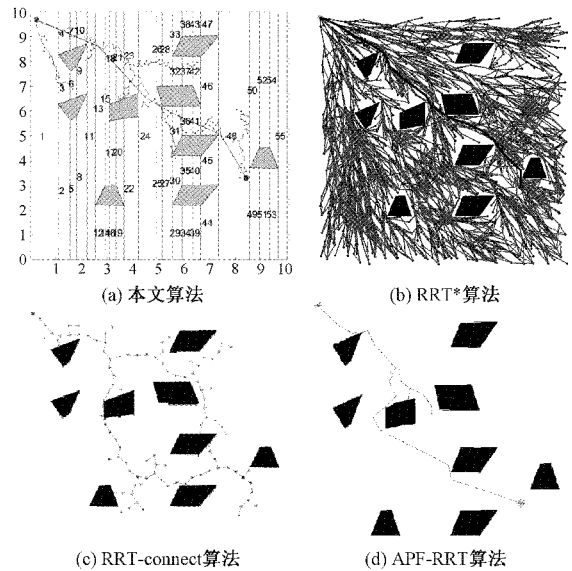


图 8 复杂环境仿真结果

表 2 30 次实验平均值

算法	平均采样 点个数	平均运行 时间/s	平均迭代 次数	平均路径 长度
本文算法	257	0.368	182	98.23
RRT*	2 036	3.374	1 536	95.89
RRT-connect	1 063	2.081	1 036	103.24
APF-RRT	179	0.496	319	98.56

3.2 实验验证

为验证改进 RRT 算法在真实移动机器人中是否可行,将改进 RRT 算法应用到四轮独立驱动的移动机器人(图 9 所示)中。移动机器人配备激光雷达、IMU、编码器、摄像头等传感器,由工控机(在试验台上的电脑)和 NXP 控制板构成两层控制结构,工控机上运行 ROS(机器人操作系统),承担路径规划的计算任务;NXP 控制板通过 WiFi 与工控机通信,接收工控机下发的路径信息。移动机器人采用激光雷达、IMU、编码器、摄像头获取外界信息,利用航迹推算算法得到底盘的里程计信息。工控机利用 ROS 的 amcl 和 gmapping 模块完成定位和二维地图的构建,然后通过 move_base 模块中的 global planner 和 local planner 分别实现全局和局部路径规划。将 global planner 模块中的默认路径规划算法更改为改进算法进行全局路径规划。

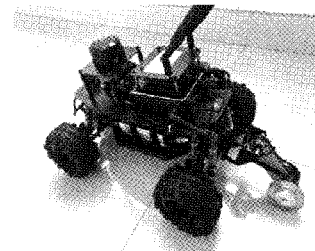


图 9 移动机器人

实验场景为实验室,图 10 为移动机器人构建出的二维地图。图 11 为移动机器人在不同起始点的情况下的路径规划结果(灰色线条为路径规划结果)。结果表明改进 rrt 算法能够在复杂的环境中有效的实现路径规划。

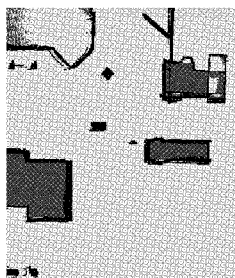
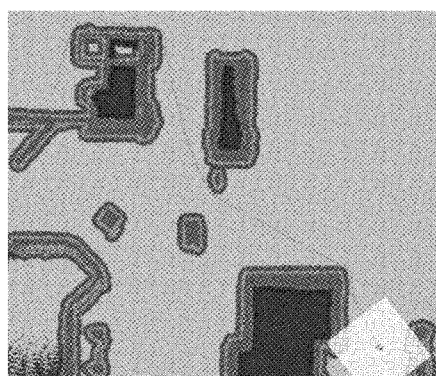
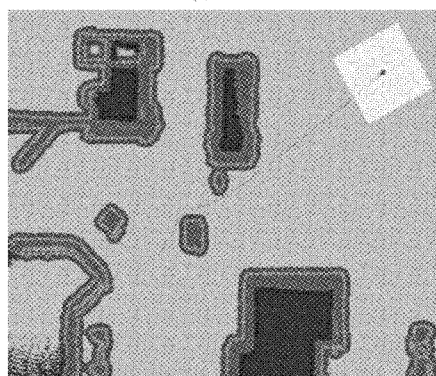


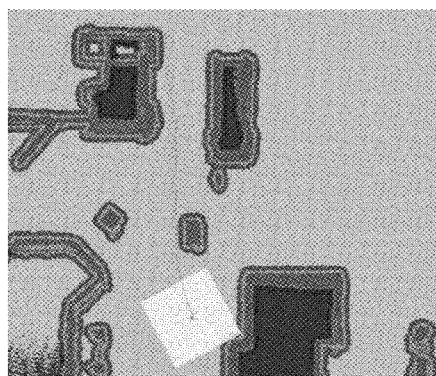
图 10 二维建图



(a) 路径1



(b) 路径2



(c) 路径3

图 11 路径规划结果

4 结 论

针对 RRT 存在的问题,提出了一种改进 RRT 算法,采用单元分解将地图划分成可行区域与不可行区域,并且根据区域与区域之间邻接关系,约束了随机采样点的选择区域,降低了规划中搜索的随机性;并在最后对搜索到的路径进行优化处理,减少了路径中不必要的转折点,提高了路径平滑度。虽然改进 RRT 算法在路径长度,算法运行时间方面取得了比较好的成果,但并未得到理论上的最优结果。未来,进一步对 RRT 深入研究具有很重要的意义。

参考文献

- [1] 杨立炜,付丽霞,王倩,等. 多层优化蚁群算法的移动机器人路径规划研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(9): 10-18, DOI:10.13382/j.jemi.B2104304.
- [2] AJEIL F H, IBRAHEEM I K, AZAR A T, et al. Grid-based mobile robot path planning using aging-based ant colony optimization algorithm in static and dynamic environments [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(7), DOI:10.3390/s20071880.
- [3] 孙雷,张丽爽,周璐,等. 一种基于 Bezier 曲线的移动机器人轨迹规划新方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(3): 962-968, DOI:10.16182/j.issn1004731x.joss.201803024.
- [4] 徐喆,柳新. 基于城市车道撒点策略的 RT-RRT* 智能车局部路径规划[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 137-143, DOI:10.19652/j.cnki.femt.2002009.
- [5] HAN J, SEO Y. Mobile robot path planning with surrounding point set and path improvement [J]. Applied Soft Computing, 2017, 57: 35-47.
- [6] 林依凡,陈彦杰,何炳蔚,等. 无碰撞检测 RRT* 的移动机器人运动规划方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 257-267, DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2006856.
- [7] 赵晓,王铮,黄程侃,等. 基于改进 A* 算法的移动机器人路径规划[J]. 机器人, 2018, 40(6): 903-910.
- [8] 陈继清,谭成志,莫荣现,等. 基于人工势场的 A* 算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机科学, 2021, 48(11): 327-333.
- [9] 张庆,刘旭,彭力,等. 融合 JPS 和改进 A* 算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(11): 2233-2240.
- [10] PARK M G, JEON J H, LEE M C. Obstacle avoidance for mobile robots using artificial potential field approach with simulated annealing [C]. ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings, IEEE, 2001, 3: 1530-1535.
- [11] 赵明,郑泽宇,么庆丰,等. 基于改进人工势场法的移动机器人路径规划方法[J]. 计算机应用研究, 2020,

- 37(S2):66-68,72.
- [12] LAVALLE S M. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects [M]. Cleveland: Algorithmic and Computational Robotics New Direction,2000.
- [13] 魏彤,龙琛. 基于改进遗传算法的移动机器人路径规划[J]. 北京航空航天大学学报,2020,46(4):703-711, DOI:10.13700/j. bh. 1001-5965. 2019. 0298.
- [14] DU M, CHEN J, PAN Z, et al. An improved RRT-based motion planner for autonomous vehicle in cluttered environments[C]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2014.
- [15] 陈侠,刘奎武,毛海亮. 基于 APF-RRT 算法的无人机航迹规划[J/OL]. 电光与控制: 1-7 [2022-03-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.TN.20220106.1741.010.html>.
- [16] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Incremental sampling-based algorithms for optimal motion planning [C]. Robotics: Science and Systems,2010.
- [17] 黄壹凡,胡立坤,薛文超. 基于改进 RRT-Connect 算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机工程,2021,47(8): 22-28,DOI:10.19678/j. issn. 1000-3428. 0060192.
- [18] KLANAR G, SEDER M, BLAI S, et al. Drivable path planning using hybrid search algorithm based on E* and bernstein-bézier motion primitives[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, PP(99):1-15.
- [19] MASHAYEKHI R, IDRIS M, ANISI M H, et al. Hybrid RRT: A semi-dual-tree RRT-based motion planner[J]. IEEE Access, 2020, 8:1-1.
- [20] NASIR J, ISLAM F, MALIK U, et al. RRT* -Smart: A rapid convergence implementation of RRT* [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10 (7), DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/56718>.

作者简介

侯宇翔,研究生,主要研究方向为智能机器人控制。

E-mail:1025732970@qq.com

高焕兵,博士,副教授,主要研究方向为智能机器人控制。

E-mail:gohuanbing@126.com

汪子健,研究生,主要研究方向为智能机器人控制。

杜传胜,研究生,主要研究方向为智能机器人控制。