

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210893

基于改进 JPS 的移动机器人路径规划算法*

陈奕虎 苏珉 闵金杰 梁艳 李廷会
(广西师范大学电子与信息工程学院 桂林 541004)

摘要: 在移动机器人的路径规划技术中,跳点搜索算法(JPS)因具备简单、快速、易实现的特性而被广泛使用。然而,传统的 JPS 算法由于启发式函数搜寻效率低导致其搜索的节点数量冗余,而且难以有效兼顾规划路径的安全性。针对该问题,本文提出了一种改进的 JPS 算法。该方法设计了一种由对角线距离和方向信息结合的启发式函数用于提高寻路效率,并且进一步对规划路径进行平滑处理以有效兼顾规划路径的安全可靠性。移动机器人在复杂障碍物环境下的路径规划仿真实验表明,相较于 JPS 算法,本文改进后的 JPS 算法平均规划时间减少了 13.4%,平均路径长度减少了 3.1%,平均危险点数量降低了 83.3%。

关键词: 移动机器人;路径规划;跳点搜索;启发式函数;平滑处理

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Path planning algorithm of mobile robot based on improved JPS algorithm

Chen Yihu Su Min Bi Jinjie Liang Yan Li Tinghui

(College of Electronic and Information Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: In the application of path planning for mobile robots, jump point search (JPS) is widely used because of its simple, rapid- and easy-to-implement characteristics. However, the standard JPS algorithm with a low efficiency of heuristic function is prone to hold redundant nodes in the planned path. Besides, the JPS often neglects the path security. To address these issues, this paper proposes an improved JPS algorithm. The proposed algorithm designs a novel heuristic function combining diagonal distance and direction information to improve the path-finding efficiency, and further smooths the planned path for guaranteeing safety and reliability. The path-planning experiment for mobile robot in the obstacle environments demonstrates that our algorithm obtains higher path-search efficiency with reducing the planning time and improving the safety effectively, compared with other advanced path planning algorithms.

Keywords: mobile robots; path planning; jump point search; heuristic function; smooth processing

0 引言

随着电子技术的快速发展,移动机器人在生活中已经变得随处可见,如仓储物流机器人、餐厅服务机器人等。路径规划技术作为移动机器人的关键技术,一直是机器人研究的热点和难点。路径规划旨在考虑时效性的前提下规划出一条从起点到目标点的安全无碰撞路径,根据算法实现的特点,可分为全局路径规划和局部路径规划两类^[1]。在实际应用中,一般使用全局路径规划和局部路径规划相结合的方法,全局规划为局部规划提供路线指引,避免陷入局部最优点当中,局部规划又可以为全局规划提供应对动态环境的实时避障能力^[2]。

全局路径规划算法可分为两类,一是传统算法,其中传

统算法又分为基于图搜索的 Dijkstra 算法^[3]、A* 算法^[4]等和基于采样的 RRT 算法^[5]、PRM 算法^[6]、RRT* 算法^[7]等;二是智能算法,主要有蚁群算法^[8]、粒子群算法^[9]、强化学习算法^[10]、神经网络算法^[11]等。

A* 算法由于其简单、易实现的特点,在全局路径规划中被大量使用,但是当路径规划的地图较大、环境较复杂时,大量冗余节点的遍历会导致 A* 算法的内存消耗变大、计算速度降低,从而导致规划时间增加。为解决这一问题,Harabor 等^[12]提出了一种跳点搜索算法(jump point search, JPS),挑选出具有代表性的跳点节点,从而避免了大量冗余节点的计算,有效的提升了计算速度。但 JPS 算法仍然存在启发式函数效率较低,路径点较多,规划的路径存在安全隐患等问题。在 JPS 的基础上,张庆等^[13]提出用

收稿日期:2022-07-30

* 基金项目:广西自然科学基金青年基金(2020GXNSFBA297119)项目资助

切比雪夫距离代替欧氏距离作为启发式函数,进一步提高了跳点搜寻的效率。黄智榜等^[14]则改进了跳点的搜索策略,有效地提高了规划路径的安全性。为了同时兼顾跳点搜索的效率和规划路径的安全性,进一步提升路径规划的实际效用性,受到上述工作的启发,本文针对传统 JPS 算法存在的问题提出了一种改进 JPS 算法:

1)改进启发式函数的计算方式,使用对角线距离代替欧氏距离,并加入节点方向信息,提高节点的搜索效率。

2)对生成的路径进行安全平滑处理,消除冗余节点与危险点,提高路径的安全性。

1 JPS 算法原理及其不足

1.1 JPS 的原理

JPS 算法是基于 A* 算法的一种改进算法,它的高效性在于独特的裁剪规则和跳跃规则。

裁剪规则用于筛选出需要拓展的节点,具体规则如图 1~2 所示, $P(x)$ 表示父节点, x 表示当前节点,白色栅格为自然节点,拓展过程中只需要查询自然节点。从图 1 可以得出,当节点周围不存在障碍物时的裁剪规则可用以下公式表示:

1)水平移动时,自然节点为:

$$\text{len}(\langle P(x), x, n \rangle) < \text{len}(\langle P(x), \dots, n \rangle | x) \quad (1)$$

2)对角移动时,自然节点为:

$$\text{len}(\langle P(x), x, n \rangle) \leq \text{len}(\langle P(x), \dots, n \rangle | x) \quad (2)$$

其中,不等式左边表示从父节点 $P(x)$ 经过 x 到达节点 n 的代价距离,右边表示从父节点 $P(x)$ 经过其他节点到达节点 n 的代价距离。若 n 满足式(1)或(2),则 n 为自然节点。

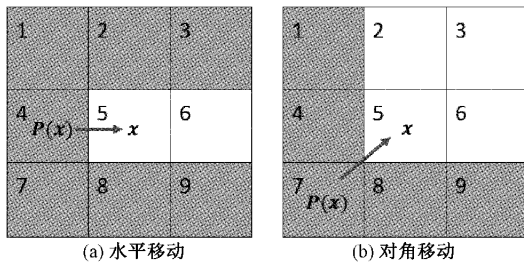


图 1 节点周围无障碍物时的裁剪规则

当前节点 x 的周围存在障碍物时,如图 2 所示,黑色栅格表示障碍物,此时除自然节点外还需多查询一个节点,称之为强迫节点,强迫节点不是 x 的自然节点,且其满足式(1),即图 2 中的红色栅格节点。

跳跃规则即根据裁剪得到的自然节点和强迫节点进行直线跳跃和对角跳跃。当前节点 x 满足以下 3 个条件之一即为跳点:

1)节点 x 是起点或终点;

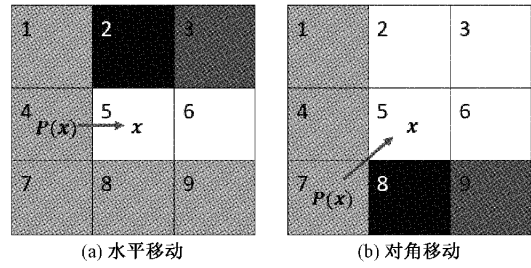


图 2 节点周围有障碍物时的裁剪规则

2)节点 x 至少有一个强迫节点;

3)如果父节点 $P(x)$ 在对角方向,节点 x 的水平或垂直方向上有满足条件 1)、2)的点。

JPS 算法通过探索当前节点的后继跳点,并将后继跳点中评价函数估计值最小的跳点再进行拓展,最后利用得到的跳点在栅格地图上构建出一条起始点到目标点的无碰撞最优路径。JPS 总是先搜寻水平、垂直方向的跳点,然后再搜寻对角方向上的跳点,图 3 为 JPS 算法的跳点搜寻示例,图 3 中 y 节点为跳点, z 节点是满足上述条件 3)的节点。

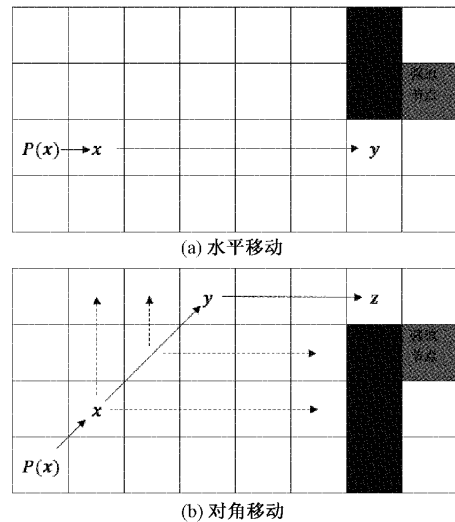


图 3 JPS 算法中的跳点示例

1.2 JPS 的不足

JPS 算法根据评价函数 $f(n)$ 的值来选择下一个跳点,评价函数的表达式为:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (3)$$

其中, $g(n)$ 为起点到当前节点 n 的实际代价, $h(n)$ 为当前节点 n 到目标节点的预估代价, $h(n)$ 也称为启发式函数,启发式函数决定了节点的拓展是否高效。传统 JPS 算法的 $h(n)$ 通常使用欧氏距离进行计算,但是在栅格地图中一般采用八连通(可通过 8 个方向移动,即上、下、左、右、左上、右上、左下、右下,本文算法均采用八连通规则)的方式对栅格进行拓展,而欧氏距离计算的是两个点直接连接的最短距离,因此使用欧氏距离计算出来的预估代价会低于实际的路径成本,导致启发性降低。

此外, JPS 算法在障碍物的拐角处, 容易产生危险路径点, 导致机器人与障碍物发生碰撞。如图 4 所示, 红圈位置即为危险点。

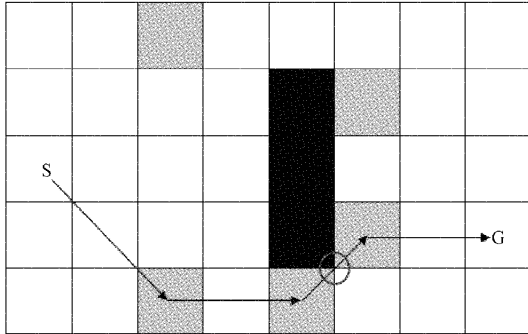


图 4 JPS 路径中的危险点

2 改进 JPS 算法

2.1 启发式函数的改进

针对上述 JPS 的启发式函数效率较低问题, 本文基于对角线距离^[15]和方向信息, 提出新的启发式函数 $h(n)$, 如式(4)所示。

$$h(n) = iL - j \cos\alpha \quad (4)$$

其中, i, j 分别为距离信息和方向信息的权重, 本文算法的 i, j 取值为 1.0、2.0。 L 为当前节点到目标节点的对角线距离估计。 L 的计算公式如式(5)所示。

$$L = |xn - xg| + |yn - yg| + (\sqrt{2} - 2) \times \min(|xn - xg|, |yn - yg|) \quad (5)$$

式中: (xn, yn) 和 (xg, yg) 分别表示当前节点 n 的坐标和目标节点 g 的坐标。

本文使用对角线距离来代替传统 JPS 的距离计算方式, 两种距离的对比图如图 5 所示, 对角线距离(橙线)表示栅格在八连通规则下两点的最短距离。欧氏距离(绿线)是指欧氏空间中两点的直线距离。

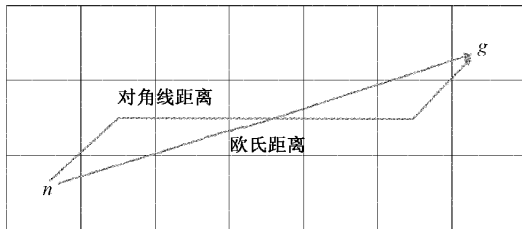


图 5 两种距离计算方式的对比图

在 JPS 算法中, 要满足算法的完备性, 启发式函数 $h(n)$ 与空间中两点的真实最短距离 $h^*(n)$ 需满足以下关系:

$$h(n) \leq h^*(n) \quad (6)$$

$h(n)$ 愈趋近于 $h^*(n)$, 启发式函数的效率愈高, 在理想无障碍物环境下, 对角线距离的估计值等于真实最短距离, 而欧氏距离的估计值明显小于真实最短距离, 因此使用

对角线距离计算得到 $h(n)$ 更趋近于 $h^*(n)$ 。在实际应用中, 因为障碍物的存在, 对角线距离的估计值往往是远小于真实最短距离的, 因此本文加入了方向信息以加强启发性。

式(4)中 $\cos\alpha$ 为方向信息, α 表示父节点与当前节点、父节点与目标节点形成的夹角, 如图 6 所示。当两个方向相同时, $\cos\alpha$ 值为 1, 相反时值为 -1。当 α 越小, 当前节点到目标节点的预估代价值就越低, 反之则越高, 这样使得节点拓展的方向更加倾向于目标节点方向。 $\cos\alpha$ 计算公式如式(7)所示。

$$\cos\alpha = \frac{(xn - xs) \times (xg - xs) + (yn - ys) \times (yg - ys)}{\sqrt{(xn - xs)^2 + (yn - ys)^2} \times \sqrt{(xg - xs)^2 + (yg - ys)^2}} \quad (7)$$

式中: (xn, yn) 、 (xs, ys) 、 (xg, yg) 分别为当前节点 n 、父节点 s 、目标节点 g 的坐标。

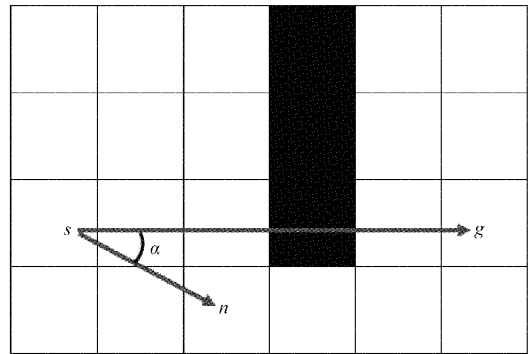


图 6 方向信息示意图

2.2 安全平滑策略

本文基于对路径安全性的考虑, 对 JPS 算法得到路径进行安全平滑处理, 将路径中障碍物拐角处的两个跳点结合形成一个新的中转点, 中转点如图 7 绿色栅格所示。则原有路径 $x \rightarrow n$ 变为 $x \rightarrow \text{new} \rightarrow n$ 。

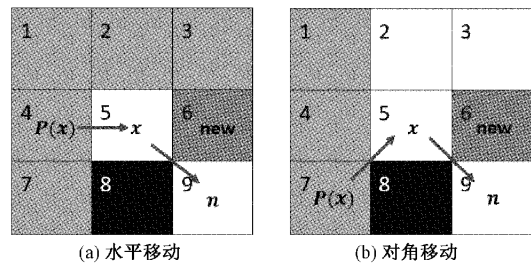


图 7 中转点结合示意图

得到加入了中转点的路径后, 再利用插点法^[16]的思想去除路径中的冗余节点。如图 8 所示, 对于路径 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$, 令 A 与 B 连接, 若 A 与 B 之间不存在障碍物, 继续令 A 与 C 连接, 若 A 与 C 之间不存在障碍物, 继续令 A 与下一个节点 D 连接, 此时 A, D 之间存在障碍物不可通行, 所以退出迭代, A 的下一个节点为 C, B 为冗余节点。因此路径可简化为 $A \rightarrow C \rightarrow D$ 。

综上, 改进后的 JPS 算法如算法 1 所示。

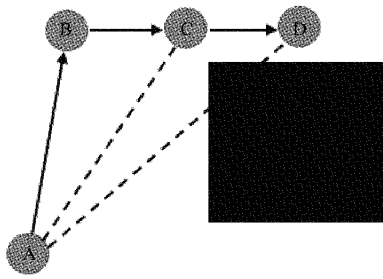


图 8 插点法示意图

算法 1	改进 JPS 算法
输入:	栅格地图 起点 B 终点 F
输出:	路径 P
步骤 1	添加起点 B 到搜索节点 $S(n)$; 基于启发函数式(4),利用评价函数式(3)计算所有搜索节点 $S(n)$ 的代价值,记最小代价值节点为 n ,将 n 设为当前节点,判别 n 是否为 F ,是则从终点 F 开始在临时路径 $T(n)$ 中依次回溯输出各节点的父节点,直到起点,记录回溯节点组成的路径为 P ,执行步骤 7,否则执行步骤 3;
步骤 2	当前节点是否为 B ,是则执行步骤 4,否则执行步骤 5;
步骤 3	沿所有方向搜寻水平、垂直、对角方向上的跳点,执行步骤 6;
步骤 4	根据父节点的方向,搜寻水平、垂直、对角方向上的跳点,执行步骤 6;
步骤 5	添加所有搜寻到的跳点到 $S(n)$,将当前节点设为其搜寻到的跳点的父节点,将父节点加入临时路径 $T(n)$,执行步骤 2;
步骤 6	对 P 进行安全平滑处理,并输出为最终路径。

3 仿真实验与分析

为验证本文所改进的 JPS 算法的有效性,分别采用不同环境的栅格地图进行仿真实验,仿真使用的设备配置为:Windows 7 专业版,处理器为 Intel Core i3-7100,运行内存为 16 GB。仿真运行平台为 MATLAB R2018a。

图 9 为 20×20 简单栅格地图下 JPS 与改进 JPS 的路径规划对比。其中黑色为障碍物,白色为可通行区域,绿色栅格为起点,红色栅格为终点,紫色虚线为 JPS 算法,蓝色实线为改进 JPS 算法,红圈为危险点,从图中可以看出,改进后的 JPS 算法可以有效的规避危险点。

两种算法的规划性能对比如表 1 所列,仿真数据表明,在相同环境下,两种算法的路径长度变化不大,本文改进算法的拓展节点更少,搜索效率更高,改进 JPS 算法相较于于

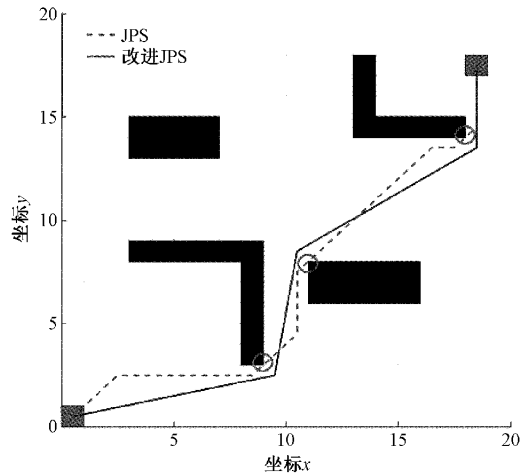


图 9 20×20 简单栅格地图算法对比图

统 JPS 算法,规划时间减少了 17.45%,并且通过安全平滑策略,冗余节点减少了 58%,危险点减少了 100%。

表 1 20×20 地图仿真结果对比

地图	算法	拓展节点数量	规划时间/ms	路径长度/m	路径节点个数	危险点个数
20×20	JPS	30	3.294 3	29.556 3	12	3
	改进 JPS	28	2.719 6	29.736 3	5	0

图 10 为 3 种不同复杂环境(仓库、室内、迷宫)在 100×100 栅格地图下,对 A*、JPS、文[13]算法、改进 JPS 算法的仿真实验对比,其仿真数据如表 2 所列。从表中可以看出,JPS 类算法的性能相较于 A* 算法有极大的提高。在 3 种地图中,改进 JPS 相较于传统 JPS,拓展节点的数量分别减少了 37.96%、8.11%、5%,规划时间分别减少了 31.34%、3.26%、5.55%,路径长度分别减短了 3.89%、3.06%、2.22%,路径节点个数分别减少了 63.63%、62.5%、56.52%,危险点个数分别减少了 100%、66.67%、83.33%,室内、迷宫地图无法完全消除危险点是由于存在长距离的对角跳跃,而本文算法消除的是两个相邻对角点产生的危险点。另一方面,相较于文献[13]提出的算法,在仓库地图中,本文算法拓展节点减少了 19.28%,规划时间减少了 14.95%;在室内、迷宫地图中,本文算法拓展节点数量与文献[13]算法一致,但规划时间平均增加了 2.02%,这是由于加入了安全平滑策略导致的,不过本文方法规划的路径节点数更少,且减少了危险点个数和路径长度。

综上,仿真结果表明,本文改进的 JPS 算法有效减少了拓展节点的数量,缩短了规划时间,大幅减少了路径节点和危险点的数量,寻路性能优于 JPS 算法。

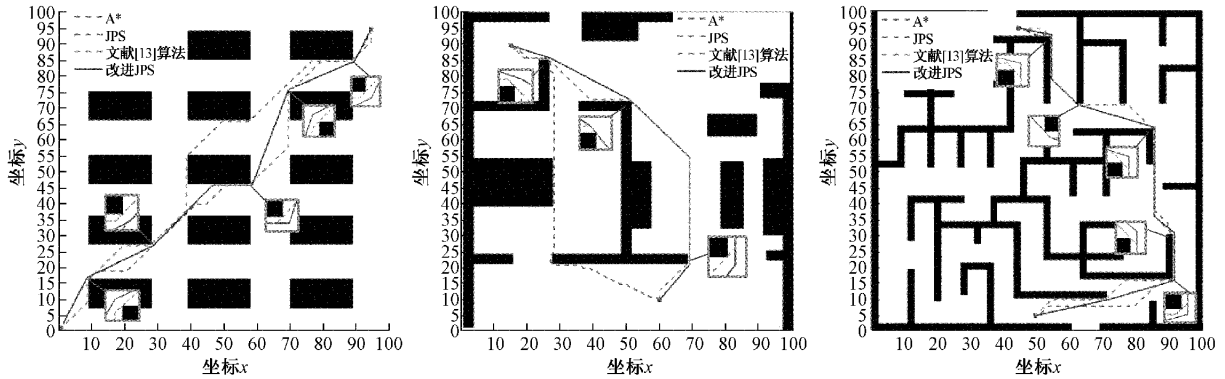


图 10 3 种环境地图的路径对比

表 2 3 种环境的仿真结果对比

地图	算法	拓展节点 数量	规划时间/ ms	路径长度/ m	路径节点 个数	危险点 个数
仓库	A*	3 613	783.338 510	150.338 1	123	5
	JPS	108	15.019 528	150.338 1	22	5
	文献[13]算法	83	12.126 190	150.338 1	22	5
	改进 JPS	67	10.312 830	144.486 9	8	0
室内	A*	3 641	875.950 240	116.870 1	109	3
	JPS	37	5.879 850	118.225 4	16	3
	文献[13]算法	34	5.562 860	118.225 4	16	3
	改进 JPS	34	5.687 920	114.612 3	6	1
迷宫	A*	4 902	1 214.891 080	158.325 9	143	4
	JPS	80	8.632 869	158.325 9	23	6
	文献[13]算法	76	8.009 786	158.325 9	23	6
	改进 JPS	76	8.153 509	154.805 3	10	1

4 结 论

传统 JPS 算法存在启发式函数效率低、规划的路径存在安全隐患的问题,针对以上问题,本文对 JPS 算法进行改进,从启发式函数、路径安全性两个方面对 JPS 算法进行优化,设计了新的启发式函数,并且加入安全平滑策略。在保证路径长度的前提下,提高了路径规划的速度和安全性。通过在 MATLAB 平台设置不同的栅格地图进行仿真实验,证明改进 JPS 算法能够有效提升寻路效率,并且提高了规划路径的安全质量,充分表明本文改进 JPS 算法在启发式函数搜索效率和路径安全性能方面都优于传统 JPS 算法。在解决移动机器人的路径规划问题上展示了本文算法良好的应用潜力。

参考文献

[1] 赵鑫. 移动机器人路径规划算法研究综述[J]. 电子元件与信息技术, 2021, 5(7): 239-240.
 [2] 王洪斌, 尹鹏衡, 郑维, 等. 基于改进的 A* 算法与动态窗口法的移动机器人路径规划[J]. 机器人, 2020,

42(3): 346-353.

[3] GUO Q, ZHANG Z, XU Y. Path-planning of automated guided vehicle based on improved Dijkstra algorithm [C]. Control & Decision Conference. Chongqing, China: IEEE, 2017: 7138-7143.
 [4] 张建光, 张方, 陈良港, 等. 基于改进 A* 算法的自动引导车的路径规划[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(1): 123-128.
 [5] WU Z, MENG Z, ZHAO W, et al. Fast-RRT: A RRT-based optimal path finding method[J]. Applied Sciences, 2021, 11(24): 11777.
 [6] CAO K, CHENG Q, GAO S, et al. Improved PRM for path planning in narrow passages[C]. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Tianjin, China: IEEE Press, 2019: 45-50.
 [7] GAMMELL J D, SRINIVASA S S, BARFOOT T D. Informed RRT*: Optimal sampling-based path planning focused via direct sampling of an admissible

- ellipsoidal heuristic[C]. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, IL, USA: IEEE, 2014: 2997-3004.
- [8] 肖金壮,余雪乐,周刚,等.一种面向室内AGV路径规划的改进蚁群算法[J].仪器仪表学报,2022,43(3):277-285.
- [9] 封建湖,张婷宇,封硕,等.面向机器人路径规划的改进粒子群算法[J].机械设计与制造,2021(9):291-294,298.
- [10] 尹旷,王红斌,方健,等.基于强化学习的移动机器人路径规划优化[J].电子测量技术,2021,44(10):91-95.
- [11] 王军,杨云霄,李莉.基于改进深度强化学习的移动机器人路径规划[J].电子测量技术,2021,44(22):19-24.
- [12] HARABOR D, GRASTIEN A. Online graph pruning for pathfinding on grid maps[C]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Palo Alto, CA: AAAI Press, 2011: 1114-1119.
- [13] 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.
- [14] 黄智榜,胡立坤,张宇,等.基于改进跳点搜索策略的安全路径研究[J].计算机工程与应用,2021,57(1):56-61.
- [15] 魏博闻,严华.一种面向非结构化环境的改进跳点搜索路径规划算法[J].科学技术与工程,2021,21(6):2363-2370.
- [16] 张志文,张鹏,毛虎平,等.融合改进A*算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J].电光与控制,2021,28(9):39-43.

作者简介

陈奕虎,硕士研究生,主要研究方向为移动机器人路径规划。

E-mail:772704446@qq.com

苏珉,博士,讲师,主要研究方向为目标电磁散射特性建模计算及其数据分析、校验与评估研究。

E-mail:sumin0303@163.com

闭金杰,硕士,高级实验师,主要研究方向为智能检测与控制。

E-mail:bjj9217@gxnu.edu.cn

梁艳(通信作者),硕士,讲师,主要研究方向为智能检测与控制。

E-mail:liangyan@gxnu.edu.cn

李廷会,博士,教授,主要研究方向为大数据相关应用与智能计算等。

E-mail:tinghuili@gxnu.edu.cn