

基于射线模型的改进全局路径规划算法

蒋 林^{1,2}, 方东君¹, 周和文³, 黄惠保³

(1. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北武汉 430081; 2. 武汉科技大学机器人与智能系统研究院, 湖北武汉 430081; 3. 珠海市一微半导体有限公司, 广东珠海 519000)

摘 要: 针对目前服务于移动机器人的全局路径规划算法存在拐点多、耗时长或递归计算复杂等问题, 本文提出一种基于射线模型的改进全局路径搜索算法. 利用形态学滤波处理障碍物栅格地图, 并引入碰撞估值增加靠近障碍物的栅格的代价值, 形成梯度代价栅格地图. 结合射线模型从起点向终点进行射线搜索, 并在搜索过程中通过逆向优化算法优化路径. 通过实验证明该全局路径规划算法比 A* 算法拥有更好的平滑性、灵活性、稳定性以及更短的路程, 且搜索速度比 A* 快 50%, 移动机器人可以更安全、简洁的路径向目标点移动.

关键词: 全局路径规划; 射线模型; 逆向优化; 移动机器人; 改进 A* 算法

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)03-0548-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210307

Improved Global Path Planning Algorithm Based on Ray Model

JIANG Lin^{1,2}, FANG Dong-jun¹, ZHOU He-wen³, HUANG Hui-bao³

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

2. Institute of Robotics and Intelligent Systems, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

3. Zhuhai A Micro Semiconductor Co. Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000, China)

Abstract: Aiming at the problems of many inflection points, long time consuming and complex recursive calculation in the global path planning algorithms currently used for mobile robots, an improved global path search algorithm based on ray model is proposed. Morphological filtering is used to process the raster map of obstacles, and collision estimation is introduced to increase the generation value of the raster near the obstacles, and the gradient cost raster map is formed. Combined with the ray model, ray search is carried out from the beginning to the end, and the path is optimized by the inverse optimization algorithm during the search process. Experiments show that the global path planning algorithm has better smoothness, flexibility, and stability. Our algorithm not only has shorter moving distance, but also has 50% faster search speed than A* algorithm. The mobile robot can move to the target point in a safer and simpler path.

Key words: global path planning; ray model; reverse optimization; mobile robot; improved A* algorithm

1 引言

路径规划算法^[1]的目标是为移动机器人在障碍物地图中规划出一条可行的移动路径, 该路径对移动机器人导航效果有着至关重要的作用. 目前主流的路径规划算法有 Dijkstra^[2]、A*^[3](A Star)、人工势场法^[4]、遗传算法^[5]、粒子群算法^[6]、视觉图法^[7]等算法.

其中, A* 作为目前最为经典的路径搜索算法广泛应用于各种移动机器人导航场景中^[8], 但由 A* 得到的

路径存在大量冗余节点、拐点多、拐角大、折线多且离障碍物较近, 这些缺陷严重降低了路径质量, 且不利于移动机器人的控制, 甚至会发生碰撞. 故此, 在漫长的移动机器人路径规划算法发展史中, 国内外学者提出了很多路径规划算法^[9], 在以 A* 为基础的 8 大变种中, 以 JPS^[10](Jump Point Search) 搜索效果最优, 用跳点搜索的方式实现了高效计算, 但随着地图复杂度增加, 递归层次加深会导致计算量呈指数增长. 张哲等^[11]在 A* 的基础上引入大于 1 的加权因子以增加算法搜索深度

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-03-19; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2019YFB1310000); 武汉市应用基础前沿项目(No.2019010701011404); 湖北省重点研发计划项目(No.2020BAB098)

和改变单步扩展搜索方式来保证最优解,但合适的单步扩展形状又取决于机器人前面的障碍物环境,这会导致每次改变位姿都要重新求解单步扩展形状,无法适应复杂的环境.王洪斌等^[12]提出结合 A*和人工势场算法对局部路径进行优化,提高路径的平滑性,但二次 A*算法平滑处理和 B样条曲线优化^[13]类似,在实际应用中对机器人的控制要求很高.王中玉等^[14]用不同的搜索矩阵处理不同的位置关系,提高了工作效率和平滑性,但该算法效果主要依赖搜索矩阵的效果,需要引入采样函数^[15]进行辅助,且不适用于复杂或者差异较大的环境.

针对上述所提到的问题,本文提出一种基于射线模型的全局路径搜索算法.该搜索算法以射线模型作为主要搜索方案,更快速、精确地朝目标点进行探索,此外,还对每个路径节点根据射线模型进行逆向优化,以代价最小的方式实现路径的整体优化,实现了拥有更少折点、更小转角、路程更短、更安全的移动路径规划.

2 基于射线模型的路径搜索

该全局路径规划算法是基于已知环境障碍物信息的环境地图运行的,在此基础上,该算法以射线模型为核心,从起点开始不断向终点发射射线,以更高效率的搜索方式实现更优质的路径搜索.

2.1 地图的预处理

由于栅格地图^[16]拥有简单实用且容易实现的特点,本文采用栅格地图对目标环境进行建模.栅格地图由多个代表地图点的小栅格组成,普通搜索算法按照此地图进行搜索时,容易忽视小栅格的尺寸,从而导致实际机器人本体在行驶到某栅格点时与附近障碍物栅格点发生碰撞.图 1 是常见栅格地图上的路径简图,蓝圆表示起点,绿圆表示终点,红色表示路径,黑色表示障碍物,从图 1 可以看出,红色路径从栅格顶角处跨越了黑色障碍物,在实际环境中,由于移动机器人本体有一定尺寸,故在执行该段路径时必然会与障碍物发生碰撞.此外,在狭窄的巷道区域会存在仅能通过机器人本体的环境,若笼统地对障碍物边缘进行扩展会导致原本可通过的路径不可通过.

针对上述问题,本文算法采用的是结合机器人尺

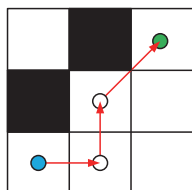


图 1 常见栅格路径示意图

寸先对地图进行形态学处理,将部分极危险区域变成不可行区域,然后根据距离对临障区域进行代价估值.该方法不同于普遍的对整幅地图做腐蚀处理,将前面所述的障碍物邻近区域运行成本增加,使得此区域是“不建议走”而非“不能走”,从而限制在仅当其余路径成本过高的情况下才走这部分与障碍物相近但不会发生触碰的区域,这样既可以提高远离障碍物的栅格的搜索优先性,也可以确保机器人能在狭窄的巷道中搜索出可移动路径.

2.2 射线模型

图 2 表达了当障碍物存在时射线的状态,其中蓝圆表示发射点,绿点表示接收点,从图 2 可以看出,当无障碍物时,绿点可以直接接收到射线;当有障碍物阻挡时,射线会被障碍物挡住,得到碰撞点的位置.



图 2 射线模型简图

这种方法可以在无障碍的两点之间找出最短的路径,只保留起点和终点.本文提出的路径规划算法将该模型应用于各子路径搜索,最终快速搜索出简捷、平滑的完整路径.

模型应用:从当前点向目标点发出射线,若无障碍则直行,若有障碍则返回碰撞点并向周围扩散,直到到达下一个障碍物或者目标点.

图 3 简要表达了该搜索模型的应用,其中①—⑤表示在起点与目标点之间有障碍物的环境下搜索过程,⑥表示在起点与终点之间无障碍的环境下搜索过程.在有障碍时,经过路径①到达碰撞点,再以碰撞点为中心向周围未搜索过的方向扩散出②③④个路径,仅存在路径④可以离开障碍物,然后以路径⑤到达目标点,最终得到路径为①→④→⑤,在无障碍时,可以从起点直接到达目标点,最终路径为⑥.

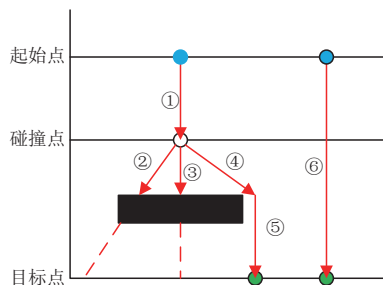


图 3 射线搜索示意图

2.3 路径搜索

射线模型为点到点之间的搜索提供了便利,但当

射线遇到障碍后需要从周围的区域找到合适的避障点,此处需要根据符合条件的栅格节点的成本大小进行辨识,从而找出更合适的路线.本文在A*的代价函数^[17]基础上引入一个碰撞估值,具体成本计算方法如下:

$$C_i = \begin{cases} -\frac{255}{\tau} \lambda_i^2 + 255, & 0 \leq \lambda_i < \tau \\ 0, & \lambda_i > \tau \end{cases} \quad (1)$$

$$F_i = G_i + H_i + C_i \quad (2)$$

$$H_i = \sqrt{(x_i - x_{\text{goal}})^2 + (y_i - y_{\text{goal}})^2} \quad (3)$$

$$G_i = G_{i-1} + \sqrt{(x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2} \quad (4)$$

其中, λ 为地图中无障碍栅格与最近障碍物栅格之间的曼哈顿距离, τ 是设定的估值函数覆盖范围, C 为地图中栅格的碰撞估值, F 为总成本, G 为已有成本, H 为启发成本, x, y 为过程节点的坐标, $x_{\text{goal}}, y_{\text{goal}}$ 为目标点的坐标.

栅格地图中每个栅格的碰撞估值均在预处理中完成,当无障碍栅格离障碍栅格越近时,由式(1)计算出的估值越高,反之越小,当与障碍物的距离超过设定的覆盖距离 τ 后,估值为0,由此可为障碍物附近的区域设置梯度估值.

当路径搜索至障碍物附近的栅格时,若该栅格碰撞估值不为0,但小于255,则表明该区域可走但附近有障碍物,且值越高,离障碍物越近,此时非0估值的加入会提高该处的行走成本,仅当其他路径的成本均高于该处成本时,才走该区域.这种方式可以按照需求对临近障碍物的区域进行梯度赋值,以提高行走代价的方式保留该区域的可行性和远离障碍物的优先性.

该成本计算方法充分考虑了远离障碍物和可穿越狭窄区域这两类情形,解决了常见路径算法在避障和通过狭窄区域之间只能满足一项的问题,使路径规划更灵活,能满足机器人在复杂环境下的路径搜索.

射线模型的应用需要遍历一条射线经过的所有栅格值,并从起点开始直到障碍物或者目标点,这才满足搜索的严谨性,在本文中使用的直线函数以及遍历步长计算如下:

$$\frac{x - x_{\text{now}}}{x_{\text{goal}} - x_{\text{now}}} = \frac{y - y_{\text{now}}}{y_{\text{goal}} - y_{\text{now}}} \quad (5)$$

$$\Delta x = |x_{\text{now}} - x_{\text{goal}}|, \Delta y = |y_{\text{now}} - y_{\text{goal}}| \quad (6)$$

$$d = \begin{cases} \Delta x, & \Delta x > \Delta y \\ \Delta y, & \Delta x < \Delta y \end{cases} \quad (7)$$

其中, x, y 为节点坐标, $\Delta x, \Delta y$ 分别为横纵坐标的差值, d 为遍历步长.步长 d 的选择对能否成功遍历该射线所涉及的每个栅格值有至关重要的作用,而且应进行归一化后投入函数计算.当 d 为纵坐标差值时,应先计

算纵坐标,然后根据新的纵坐标结合直线函数计算新的坐标点,反之则先计算横坐标,在该处不能混淆步长的计算,否则会导致跨越障碍物、误判等问题.该计算方式能提升路径搜索的判断精确性,确保路径的每个节点是安全可行的.

图4简要展示了射线搜索策略从蓝色起点到绿色目标点的搜索过程,其归纳如下:

步骤1:从起点向终点发射一条射线,若存在障碍物则到达首个碰撞点,反之直接抵达目标点,如图4中过程①;

步骤2:以当前碰撞点为中心并将其标记为路径节点,检索八邻域非障碍物且未确定为路径节点的子节点,采用曼哈顿距离计算各子节点的成本;

步骤3:选择邻域中成本最小的子节点作为新的路径节点并向终点进行延伸,若存在障碍物则重复步骤2、步骤3,如图4过程②;

步骤4:直到当前搜索节点与终点之间没有障碍物时,到达目标点,如图4中过程③.

在上述过程中,每个碰撞点会被标记,用于解决在某一障碍物处反复碰撞导致迷路的搜索问题;在计算上,除了对必要的路径节点进行父节点和成本等计算外,仅需要对当前点和目标点之间形成的射线所经过的栅格判断是否为障碍物,并启发式地由当前点开始向目标点检索,这可以大幅减少搜索过程中的计算损耗,从而提高路径搜索的速度.

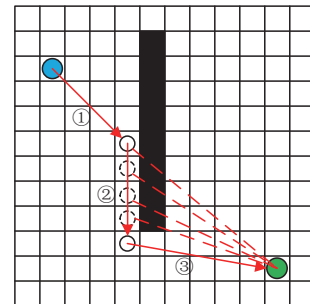


图4 射线搜索过程图

3 逆向路径优化

常见的路径规划算法所求出的路径总会存在很多不必要的拐点,于图4而言,若能直接从起点到达障碍物下方的拐点再到达终点会更有利于机器人的控制,也能节省不少运动成本,在这将提出一种逆向优化算法,旨在进一步减少移动路径中不必要的拐点,以更安全、平滑的路径和更少的转向控制节点来提高机器人移动效率.

图5展示了一条路径的逆向优化过程,其中①—③指蓝色起点和绿色当前点之间的中间节点,红色路径表示优化前(后)的路径,归纳如下:

步骤 1:以当前点为中心,向起点发射射线,图中路径显示有障碍,如图 5(a)的浅蓝虚线;

步骤 2:以当前点为中心,向节点①发射射线,图中所示无障碍,如图 5(a)的浅蓝实线;

步骤 3:删除中间节点②、③,新的路径为:起点→①→当前点,至此完成该段路径的路径优化,如图 5(b)中红色路径.

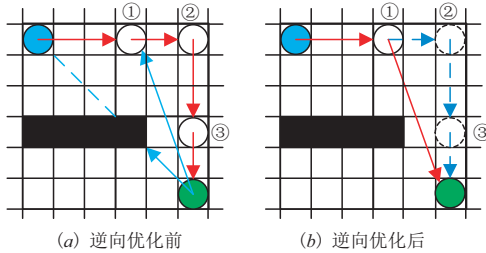


图 5 逆向优化过程图

综合步骤 1~3 可将逆向优化总结为:以当前节点为中心,按顺序依次向当前节点之前的节点逐个发射射线检测是否可直行,直到检测到当前节点的前一节点,在这一过程中若发现存在可直行的直线则删除被检测到的可行节点与当前点之间的中间节点,新的路径为:起点到被检测出的可行节点的路径加上当前节点.

将该优化加入射线搜索策略中,可以在求解路径的同时将路径优化,保证整体最优性. 该逆向优化是在已求解出的路径基础上依靠射线函数和检测途经栅格是否为障碍物进行实现,若某段路径的节点数为 n ,最大检测数为 m ,其计算关系如式(8)所示.

$$m = n \cdot (n + 1) / 2 \quad (8)$$

由于该优化与路径搜索同时进行,单次优化需要检测的过程节点定然不会太多,故能避免增加额外的计算负担. 此外,该优化还为前文的路径搜索添加闭环检测,解决局部最优问题^[18]. 经过这两者的融合,本文算法在路径搜索过程中不用再对地图上明显不是障碍物的节点进行成本计算以及对连接顺序的更替判断,取代的是仅读取该节点的地图值(0/1),无论是搜索效率还是路径效果上都有很大的提升.

图 6 所示路径为图 4 障碍环境经完整的本文算法搜索过后的路径效果,从该效果可以看出,本文所实现的全局路径规划算法不仅计算量小,而且得到的路径更简洁,没有多余的拐点,更利于机器人安全、高效地移动.

综上所述,本文所提出的全局路径规划算法整体流程归纳如图 7 所示. 此外, A* 由于始终以八邻域扩展方式从一个栅格节点中心向邻近栅格点的中心搜索,这类“井”字格局必然会限制 A* 得到的路径拐角一定是

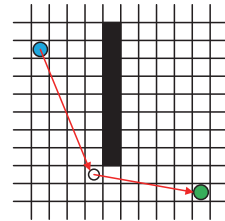


图 6 路径搜索结果展示

45°的倍数,这不仅局限了搜索的方向还降低了整体路径的灵活性,而本文算法则打破了这种 45°转角限制,以点到点的方式实现任意转角,解决了在栅格地图中以栅格为基求解的算法在角度上对路径的局限问题,更全面地提升路径搜索的效率和路径质量. 下文将进行多组仿真实验和实际机器人运行检测该算法的搜索效果.

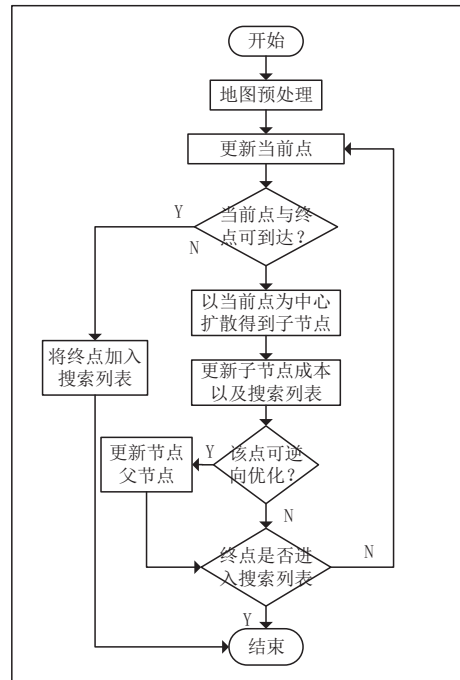


图 7 路径搜索总流程图

4 实验与结果

为在多环境下验证本文算法的路径规划效果,该实验采用常规房间地图以及 AIID 2010 STARCRAFT^[19] 竞赛中使用的三个 STAR CRAFT 地图,如图 8 所示,结合 opencv3 与 Vistudio2015 对地图进行预处理,并模拟出机器人在对应环境地图中用本文搜索算法得到的移动路径,最后提炼出时间、路程、拐点等多个参数进行数据分析比对.

4.1 本文路径规划效果

在进行预处理后,对同一地图划分出简单、一般以及复杂 3 个等级的路径情况,分别在 4 张地图中验

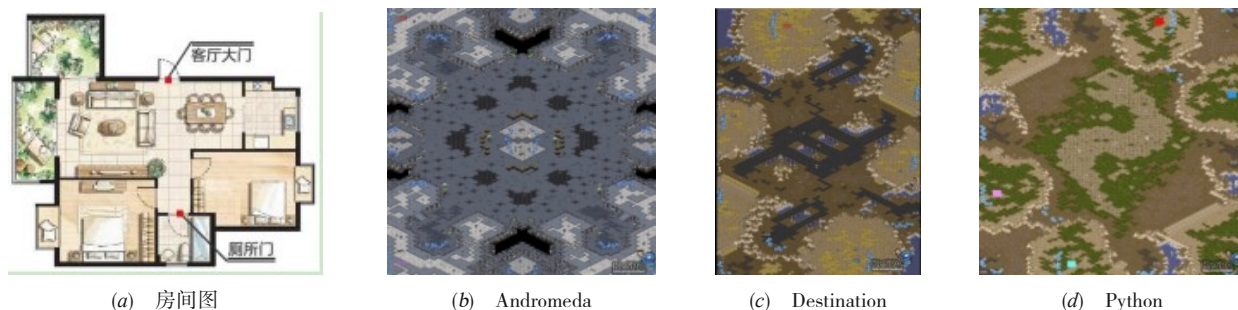


图8 原始实验地图

证该搜索算法的路径效果、适应性以及稳定性。其中，简单路况是指起点和终点间障碍物较少且路径较短的环境；一般路况指两点之间路径较长、障碍物较少

的环境；复杂路况则是指路径长、障碍物多的环境。本文算法在上述3种环境下的路径搜索效果如表1所示。

表1 三种复杂程度下各地图中的路径效果

路径条件	房间图	Andromeda	Destination	Python
简单				
一般				
复杂				

由表1可以看出,无论是路径复杂程度的变化还是环境的变化,本文算法都能有效地搜索出可行的移动路径,而且从红色路径效果上看,该路径全程仅保留了必要的拐点,其余均以直线的方式行驶,由起点十分简洁、高效地到达目标点。

故此,本文算法可以适应多种环境,适应性和稳定性强,且得出的路径简洁、安全,全程以最简便的方式直行,仅保留必要的转向节点。

为进一步分析本文算法的搜索效果,对其搜索出的路径进行参数提炼,如表2所示。其中,时间指路径搜索时间;路程指得出的路径距离;节点指得出的路径中需要停顿调整的控制点数;拐点指路径中需要拐弯的控制点数;角度是指机器人在走该路径过程中需要的最大转弯角度。

结合表1和表2可以看出,本文的全局路径规划算法搜索速度快,可以适应多种不同复杂度的地图和搜索环境,所得到的路径短且没有多余的路径控制节点,转弯节点少且全程保持着安全距离,每个节点的转向

表2 三种复杂程度下各地图中的路径参数

路径条件	地图	时间(s)	路程(像素)	节点(个)	拐点(个)	角度(°)
简单	房间图	0.01532	143.091	5	3	37.566
	Andromeda	0.00427	149.345	3	1	59.076
	Destination	0.00576	129.683	5	3	63.435
	Python	0.04883	153.609	6	4	54.462
一般	房间图	0.15442	230.088	10	8	50.974
	Andromeda	0.03622	161.822	6	4	28.301
	Destination	0.6698	154.907	6	4	30.237
复杂	Python	0.22352	248.713	9	7	32.150
	房间图	0.26322	332.248	10	8	52.421
	Andromeda	0.00576	189.917	6	4	40.022
	Destination	0.31711	243.809	9	7	71.880
	Python	0.18687	132.644	7	5	78.972

角均为锐角,便于移动机器人转向控制。

4.2 与A*路径搜索算法比对

本文算法与A*在相同条件下搜索出的路径效果

对比如表3所示. 其中红色代表本文算法, 蓝色代表 A*算法, 在进行多次试验后, 取在相同条件下运行多次的参数平均值, 并在表4中对两种路径的参数进行对比.

表3 本文算法与 A*路径效果对比

路径条件	本文算法	A*	对比
简单			
一般			
复杂			

表4 本文算法与 A*路径参数对比

路径条件	搜索算法	时间 (s)	路程 (像素)	节点 (个)	拐点 (个)	拐角 (°)
简单	A*	0.06881	175.782	154	57	45
	本文算法	0.03947	111.594	5	3	20.318
一般	A*	0.21615	234.955	207	65	45
	本文算法	0.13321	191.655	5	3	38.326
复杂	A*	0.43107	294.635	248	71	90
	本文算法	0.17451	255.907	10	8	59.909

结合表3和表4可以看出, A*得到的路径在任意环境下均有贴行障碍物的路段, 实际机器人执行该段路径时极易发生碰撞, 而且整体路径蜿蜒曲折, 十分耗费机器人控制资源. 而本文算法得到的路径相比之下更安全, 除了在必要的拐点外, 大部分区域是与障碍物相隔了一定距离, 而且路径更平滑, 减小了机器人的控制负担. 此外, 在相同条件下本文算法的搜索速度比 A*快约 50%, 路程减少约数十个像素点, 全程需调整姿态的控制节点数极少, 且本文路径突破了 45° 倍数角的

约束, 转向角比 A*小.

由此可得, 本文算法得到的路径比 A*更为简洁、安全且易于控制. 而且在路程、控制节点数以及路径平滑性等方面比 A*拥有明显的优势.

5 扫地机器人实验

5.1 机器人实验场地介绍及试验

在本实验中使用一台直径 0.32 m、高 0.09 m 且配有摄像头和雷达等传感器的扫地机器人作为测试设备, 测试环境为长 50 m、宽 40 m 的室内环境, 设置有各类障碍物和巷道, 足以考验路径规划算法的各方面性能, 环境如图 9(a) 所示. 测试步骤如下: (1) 将本算法程序烧录至扫地机器人, 使其按照本算法进行路径规划; (2) 实现测试环境的地图构建, 图 9(b) 所示为该实验环境经过地图建模后得到的栅格环境地图, 栅格大小为 0.05 m × 0.05 m; (3) 在地图中指定起点和终点, 让移动机器人搜索路径并执行; (4) 整理实验数据进行分析.



(a) 实际环境



(b) 栅格地图

图9 实验环境

基于上述环境,使机器人从当前点移动到目标点,并记录规划出的路径.图10展示了6种路径,其中红点表示机器人当前所在位置,黄标表示目标点,黄色的虚线表示机器人规划出来的整体路径.

从图10中可以看出,本文算法搜索出的路径始终

与障碍物保持着安全的距离,拐点少,整体路径简洁.为了证明本文算法的灵活性,在图10(f)中添加了两处虚拟障碍墙进行测验,结果显示本文算法拥有较强的适应性,可以在多种复杂程度的环境中成功搜索适合机器人执行的移动路径.

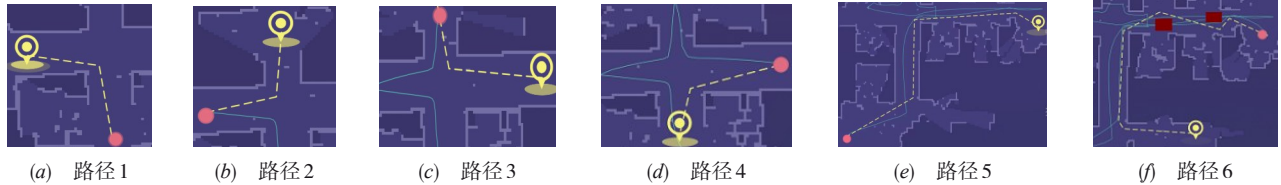


图10 机器人实际运行展示

5.2 真实环境中与A*运行对比

以上述运行环境为基础,此处将提取局部路径搜索细节,更细致地展现本文算法与A*在实际运行中的效果差异.如图11所示,橙色点为起点,绿色点为终点,青色点为在路径中需要停顿、调整位姿或在搜索过程中占用计算较大的节点.

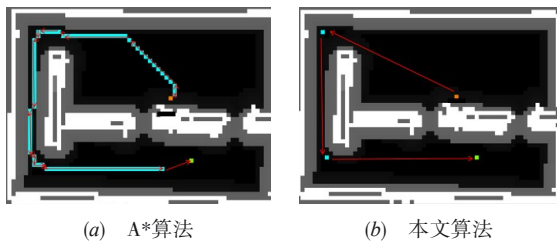


图11 本文算法与A*在搜索过程中的细节对比

由图11可见,A*得到的路径中占用计算较大的点和需要机器人改变位姿的点明显比本文算法得到的路径结果多.本文仅使用了两个过渡节点和三段直线即完成了从起点到终点的规划任务,而A*在图中的青色节点近乎遍布了整体路径的90%,故本文算法得到的路径相对更加简洁且执行时更为简便.

A*虽然考虑了路径最短以及方向两个问题^[20],但是其对每个节点进行八邻域搜索必然会进行许多不必要的计算,浪费计算资源.此外,在障碍物边缘进行八邻域搜索必然导致得到的路径节点与障碍物较近,而本文算法主要以射线模型为基础进行搜索,没有局限于八邻域搜索和相邻节点之间的运动,以检索射线所经过的栅格标记值代替直接对各栅格的成本等计算,在路径安全性、简洁性以及搜索效率等多方面相比于A*有明显的优势.

5.3 导航过程效果观察

图12和图13展示了图10(f)路径的机器人实际运

行情况,从中可以看出,机器人在移动过程中没有触碰障碍物,即便在拐角处也保留了一定的安全距离,证明经本文算法求解出的移动路径实际可行且安全可靠.



图12 路线图

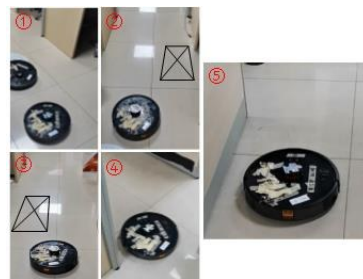


图13 实际机器人导航图

6 结论

本文针对传统路径规划算法得到的路径平滑性低且搜索速度慢等问题,通过射线搜索提高了搜索速度,结合碰撞估值使机器人既可优先远离障碍物行走也可通过狭窄的巷道区域,并用逆向优化策略对路径进一步优化,解决局部最优问题,增强路径的平滑性,提高了路径的整体质量和算法的搜索效率.

参考文献

[1] 化建宁,赵忆文,等.一种新的移动机器人全局路径规划

- 算法[J]. 机器人, 2006, 28(6): 593-597.
- HUA Jian-ning, ZHAO Yi-wen, et al. A new global path planning algorithm for mobile robot[J]. Robot, 2006, 28(6): 593-597. (in Chinese)
- [2] 劳彩莲, 李鹏, 等. 基于改进 A* 与 DWA 算法融合的温室机器人路径规划[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 14-22.
- LAO Cai-lian, LI Peng, et al. Path planning of greenhouse robot based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 14-22. (in Chinese)
- [3] 王晓燕, 吕金豆. 基于改进 A* 势场法的机器人动态路径规划研究[J]. 制造业自动化, 2021, 43(1): 83-87.
- WANG Xiao-yan, LÜ Jin-dou. Research on robot dynamic path planning based on improved A* and artificial potential field method[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(1): 83-87. (in Chinese)
- [4] 马小陆, 梅宏. 基于改进势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划[J]. 机械工程学报, 2021, 57(1): 19-27.
- MA Xiao-lu, MEI Hong. Global path planning for mobile robots based on improved potential field ant colony algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 19-27. (in Chinese)
- [5] 赵珊珊, 何宁, 等. 基于 SIFT 特征的铁路扣件状态检测算法[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(11): 148-150, 154.
- ZHAO Shan-shan, HE Ning, et al. Railway fastener state detection algorithm based on SIFT feature [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(11): 148-150, 154. (in Chinese)
- [6] 蒋林, 向超, 等. 加载语义似然估计的粒子滤波重定位[J]. 电子学报, 2021, 49(2): 315-323.
- JIANG Lin, XIANG Chao, et al. Particle filter relocation with semantic likelihood estimation[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(2): 315-323. (in Chinese)
- [7] LV T Z, FENG M Y. A smooth local path planning algorithm based on modified visibility graph[J]. Modern Physics Letters B, 2017, 31(19-21): 17400917.
- [8] 程传奇, 郝向阳, 等. 融合改进 A* 算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11): 137-143.
- CHENG Chuan-qi, HAO Xiang-yang, et al. Global dynamic path planning based on improved A* algorithm and dynamic window method [J]. Xi'an Jiaotong University Xuebao, 2017, 51(11): 137-143. (in Chinese)
- [9] 张家旭, 周时莹, 等. 基于高斯伪谱法的汽车弯道超车路径规划与跟踪控制[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(04): 397-404.
- ZHANG Jia-xu, ZHOU Shi-ying, et al. Path planning and tracking control of vehicle overtaking on curves based on gaussian pseudo-spectral method[J]. Journal of Tianjin University (Science And Technology), 2021, 54(04): 397-404. (in Chinese)
- [10] 马小陆, 梅宏. 基于 JPS 策略的 ACS 移动机器人全局路径规划[J]. 机器人, 2020, 42(04): 494-502.
- MA Xiao-lu, MEI Hong. Global path planning of ACS mobile robot based on JPS strategy [J]. Robot, 2020, 42(04): 494-502. (in Chinese)
- [11] 张哲, 吴剑, 等. 基于改进 A* 算法的多无人机协同战术规划[J]. 兵工学报, 2020, 41(12): 2530-2539.
- ZHANG Zhe, WU Jian, et al. Cooperative tactical planning for Multi-UAVs based on improved A* algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(12): 2530-2539. (in Chinese)
- [12] 王洪斌, 郝策, 等. 基于 A* 算法和人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 中国机械工程, 2019, 30(20): 2489-2496.
- WANG Hong-bin, HAO Ce, et al. Path planning of mobile robot based on A* algorithm and artificial potential field method[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(20): 2489-2496. (in Chinese)
- [13] 韩亚军, 刘家英. 基于 B 样条曲线的工业机器人运动轨迹误差优化研究[J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(03): 199-204.
- HAN Ya-jun, LIU Jia-ying. Research on motion trajectory error optimization of industrial robot based on B-spline curve [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2020, 18(03): 199-204. (in Chinese)
- [14] 王中玉, 曾国辉, 等. 基于改进双向 A* 的移动机器人路径规划算法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(11): 141-143, 147.
- WANG Zhong-yu, ZENG Guo-hui, et al. Path planning algorithm for mobile robot based on improved bidirectional A*[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(11): 141-143, 147. (in Chinese)
- [15] 闫文健. 动态场景下基于采样的移动机器人路径规划算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- YAN Wen-jian. Research on Sampling-based Motion Planning Algorithm for Robots in Dynamic Scene[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] 岳伟韬, 苏婧, 等. 占据栅格地图的最佳栅格大小与地图精度[J]. 机器人, 2020, 42(02): 199-206.

YUE Wei-tao, SU Jing, et al. Optimal grid size and map accuracy for rastering map [J]. Robot, 2020, 42(02): 199-206. (in Chinese)

- [17] 梁焰松. 室内导航路径规划算法的实现研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

LIANG Yan-song. Research on Implementation of Indoor Navigation Path Planning Algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

- [18] 李宁. 面向家庭环境的移动机器人局部路径规划算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

LI Ning. Research on Local Path Planning Algorithm for Mobile Robots Oriented to Home Environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)

- [19] YAP P. Any-angle path planning for computer games[C]// Proceedings of the Seventh AAAI Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference. Stanford, California, USA: AAAI Press, 2011: 201-207.

- [20] 聂铭远. 改进的蚁群 3D-PTV 匹配算法[C]//北京力学学会第 26 届学术年会论文集. 北京: 北京力学学会, 2020.

NIE Ming-yuan. Improved ant colony 3D-PTV matching algorithm[C]//Proceedings of the 26th Annual Conference of Beijing Society of Physical Mechanics. Beijing: Beijing Society of Physical Mechanics, 2020. (in Chinese)

作者简介



蒋林 男, 1976 年 12 月生于湖北荆门. 现为武汉科技大学教授、博士生导师. 主持在研国家重点研发计划项目, 完成国家自然科学基金及省部级项目多项. 在国内外发表学术论文 SCI/EI 论文 40 余篇.

E-mail: jianglin76@wust.edu.cn



方东君(通讯作者) 男, 1996 年 10 月生于重庆, 硕士. 主要研究方向为单目视觉移动机器人导航.

E-mail: 729851238@qq.com



周和文 男, 1981 年出生于广东湛江. 现为珠海市一微半导体有限公司产品总监、武汉科技大学兼职教授, 主要研究方向为室内移动机器人定位与同步建图、导航规划、运动控制等.

E-mail: howen@amicro.com.cn



黄惠保 男, 1986 年生于广东珠海. 现为珠海一微半导体视觉算法工程师, 主要研究方向为机器人 SLAM、导航.

E-mail: huibao.huang@amicro.com.cn