

7-15-2024

Path Planning for Mobile Robot Based on Angle Search

Yaru Wang

Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China, 884683524@qq.com

Dexin Yao

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

Zengli Liu

Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China, 2285383243@qq.com

Yi Peng

Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Path Planning for Mobile Robot Based on Angle Search

Abstract

Abstract: The angle search algorithm for angle-controlled robots is proposed to increase the path search speed and optimize the path length. The algorithm effectively finds a path in static surroundings by performing an efficient search in a specific dimensional range based on the position of the robot and the target point. Firstly, search angles are predetermined according to the characteristics of the environment in the grid map. Then, the estimated angle of the robot's surrounding grid is computed. Finally, a new extension point is chosen by comparing the estimated angle to the search angle, demonstrating the usefulness and viability of the suggested algorithm. The proposed algorithm is compared with the Dijkstra and A* algorithms on two types of maps with different levels of complexity. The path finding time of the proposed algorithm is reduced by 19.44% and 12.23% respectively, and the number of turns is reduced by 28.6% and 54.5% respectively. The path length is reduced by 9.28% and 6.53% respectively compared with the A* algorithm on the two maps, and the dynamic avoidance of local obstacles is realized in simple scenes. The proposed algorithm is then applied to the ROS-based Turtlebot2 mobile robot, and the experimental results reveal that it is smoother and more stable than the A* algorithm in the same map environment, proving its viability and effectiveness.

Keywords

path planning, estimated angle, mobile robot, search angle, ROS

Recommended Citation

Wang Yaru, Yao Dexin, Liu Zengli, et al. Path Planning for Mobile Robot Based on Angle Search[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1643-1654.

基于角度搜索的移动机器人路径规划方法

王雅如¹, 姚得鑫², 刘增力^{1*}, 彭艺¹

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 为提升路径搜索速度, 优化路径长度, 提出一种用角度控制机器人的寻路算法—角度搜索算法。该算法根据机器人位置与目标点位置进行一定维度的高效搜索, 从而实现在静态环境中有效寻路。根据所用栅格地图的环境特点, 提前设定搜索角; 计算机器人周围栅格的预估角; 将预估角与搜索角进行比较选出新的扩展点, 在扩展过程中排除重复路径的扩展和搜索角范围内无可行点的情况, 直到找到目标点生成最终路径。通过仿真测试, 将提出算法与 Dijkstra、A* 两种算法在复杂程度不同的两种地图上进行比较, 所提算法寻路时间分别最大减少了 19.44% 和 12.23%, 转折次数分别最大减少了 28.6% 和 54.5%, 路径长度较 A* 算法在两种地图上分别减少了 9.28% 和 6.53%, 且在简单场景中实现了对局部障碍物的动态规避。将所提算法应用到基于 ROS 的移动机器人 Turtlebot2 上, 实验结果表明, 在相同地图环境中, 所提算法较 A* 算法路径更加平滑稳定, 验证了所提算法的有效性和可行性。

关键词: 路径规划; 预估角; 移动机器人; 搜索角; ROS

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)07-1643-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0407

引用格式: 王雅如, 姚得鑫, 刘增力, 等. 基于角度搜索的移动机器人路径规划方法[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(7): 1643-1654.

Reference format: Wang Yaru, Yao Dexin, Liu Zengli, et al. Path Planning for Mobile Robot Based on Angle Search[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1643-1654.

Path Planning for Mobile Robot Based on Angle Search

Wang Yaru¹, Yao Dexin², Liu Zengli^{1*}, Peng Yi¹

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The angle search algorithm for angle-controlled robots is proposed to increase the path search speed and optimize the path length. The algorithm effectively finds a path in static surroundings by performing an efficient search in a specific dimensional range based on the position of the robot and the target point. Firstly, search angles are predetermined according to the characteristics of the environment in the grid map. Then, the estimated angle of the robot's surrounding grid is computed. Finally, a new extension point is chosen by comparing the estimated angle to the search angle, demonstrating the usefulness and viability of the suggested algorithm. The proposed algorithm is compared with the Dijkstra and A* algorithms on two types of maps with different levels of complexity. The path finding time of the proposed algorithm is reduced by 19.44% and 12.23% respectively, and the number of turns is reduced by 28.6% and 54.5% respectively. The path length is reduced by 9.28% and 6.53% respectively

收稿日期: 2023-04-10 修回日期: 2023-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(61761025)

第一作者: 王雅如(1997-), 女, 硕士生, 研究方向为移动机器人路径规划。E-mail: 884683524@qq.com

通讯作者: 刘增力(1966-), 男, 教授, 硕士, 研究方向为计算机科学、无线传感器网络与智能信息处理等。E-mail: 2285383243@qq.com

compared with the A* algorithm on the two maps, and the dynamic avoidance of local obstacles is realized in simple scenes. The proposed algorithm is then applied to the ROS-based Turtlebot2 mobile robot, and the experimental results reveal that it is smoother and more stable than the A* algorithm in the same map environment, proving its viability and effectiveness.

Keywords: path planning; estimated angle; mobile robot; search angle; ROS

0 引言

路径规划作为移动机器人研究领域的一项重要技术,一直被学术界广泛研究并实际应用,同时也是机器人实现自主导航和执行多项任务的关键^[1-3]。路径规划是指,在有障碍物环境中依照一定的评价标准(距离、时间、代价等),搜索出一条从起始位置到目标点位置的无碰撞路径^[4-6]。路径规划本质上是一个优化问题,具有复杂性、非线性、约束等特点^[7]。优良的路径不仅可以降低机器人的能量损耗,同时也可以让机器人的运动更加平稳。

常用的传统路径规划算法有人工势场法^[8]、模糊逻辑法^[9]、栅格法^[10]、自由空间法^[11]等。其中,人工势场法计算简便,得到路径平滑,在机器人的实时避障和平滑轨迹控制等方面得到广泛应用,但其通常存在局部极小点,导致机器人无法到达目标,尽管也有不少针对局部极小的优化方法^[12],但到目前为止,仍未找到比较满意的方案。随着人工智能技术的快速发展,许多启发式算法被成功应用于解决路径规划问题,如A*算法^[13-14]、遗传算法(GA)^[15]、模拟退火法(SA)^[16]、蚁群算法(AOC)^[17]和粒子群算法(PSO)^[18]等。启发式算法能够在可接受的时间内给出一个较优解,从而规划出路径,但不能实时保证找到全局最优解,缺乏稳定性^[19-20]。

针对现有算法的不足,提出一种角度搜索算法,其目的是减少计算量和搜索时间,以生成较平滑且不会陷入局部最优的路径。在搜索角的制约下,控制搜索维度的同时提供一定范围内的可行区域。在简单和复杂两种静态环境下,通过终止重复路径的扩展,将提出的角度搜索算法与

Dijkstra^[21]、A*两种经典算法进行仿真对比,所提算法具有更快的收敛速度及灵活性。最后在Turtlebot2实验中,该算法能够在较短的时间内得到平滑的路径,从而证明了算法的可行性。

1 地图场景构建

在进行移动机器人路径规划之前,需要对机器人所在的工作环境建立合适的环境模型,选择合适的环境建模方法对后续的路径规划算法选择有很大的影响,这将有助于更加清晰地展示寻径环境的相关信息,提升规划路径的精度。目前,路径规划中经典的环境地图建模方法有栅格地图、可视图、拓扑地图^[22]。常用的栅格地图将机器人工作场景分割成若干大小相同且相互连接的栅格,每个栅格代表可通行区域或障碍物^[23]。该方法简单有效,通过利用不同大小的栅格对工作区域划分,以作出对实际环境中障碍物的稀疏程度较为准确的描述,显著降低了环境的复杂程度。

合理地选取栅格地图尺寸是保证路径规划算法性能的关键,如果栅格划分较小,此时环境空间划分得更加精细,路径规划的精度更高,但是栅格数量较多,搜索空间大,路径规划算法的运行速度降低;如果栅格划分得较大,环境空间划分得不够精细,路径规划精度差,只能表达现实空间环境的模糊信息,不利于规划出高效的路径,但是栅格数量较少,搜索空间小,路径规划算法的速度随之加快。因此,本文采用边长为1 m的栅格组成的地图来构建移动机器人的运动环境。

图1为机器人运动环境的栅格地图,白色栅格代表可通行区域,黑色栅格代表障碍区域。本文采用直角坐标系和序号法相结合的方法识别网

格^[24], 以地图左上方为起点采用序号法按自上而下(x)、从左到右(y)的顺序对地图中每一个栅格进行编号, 每个栅格都有唯一的序号和相应的坐标。坐标与其序号之间的换算关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} r_x = C - rows(r_y - 1) \\ r_y = ceil(C/rows) \end{cases} \quad (1)$$

式中: rows 为栅格地图中任意一列垂直方向的栅格数; (r_x, r_y) 为栅格地图中任意一个栅格的行列位置坐标; C 为该栅格在地图中的序号; ceil 为向上取整运算符。

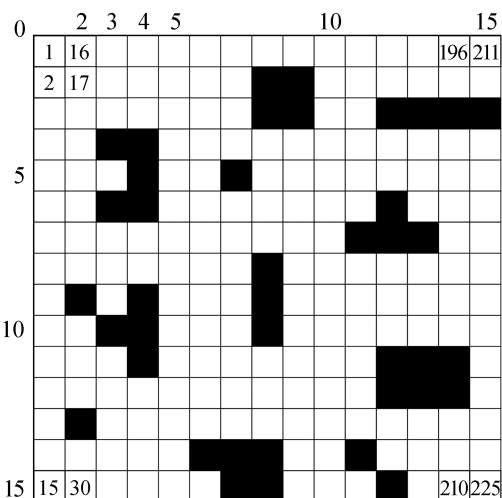


图1 栅格地图
Fig. 1 Grid map

为了便于研究和实验的进行, 本文做出以下合理的假设:

- (1) 地图和每个障碍物占据的栅格数量及边界是考虑了机器人自身尺寸的情况下建立的。
- (2) 在栅格地图中, 当机器人的周围没有障碍物且超出边界的情况下, 共有 8 个可移动方向, 分别为左前、左后、右前、右后 4 个斜方向和前后左右 4 个直行方向。机器人每次只能从一个栅格中心移动到另一个栅格中心, 如图 2 所示, p 点所在栅格代表机器人所在位置。
- (3) 机器人在栅格地图运动过程中, 地图环境不发生变化。

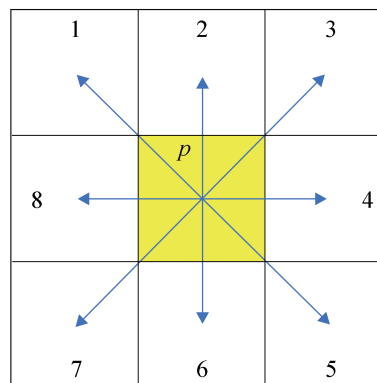


图2 机器人移动方向
Fig. 2 Robot moving direction

2 角度搜索

为解决现有的传统路径规划算法中出现的局部最优、搜索速度慢、路径不平滑等问题, 本文提出的角度搜索策略通过角度的控制在减少搜索维度的情况下找到一条平滑的安全路径。

2.1 角度搜索策略

为了使机器人以较快的速度从起始位置到达目标位置, 在路径规划中通常选择机器人所在位置与目标点位置相连直线(理想路径)或该直线向外扩展较小范围内的空白栅格作为可通行区域。如图 3 所示, 绿色栅格表示机器人起始点位置 s, 红色栅格表示目标点位置 g, 路径 l_1 为机器人从起始点到目标点的理想路径, l_2 为任意一条机器人从起始点到目标点的实际路径, 若 l_2 越靠近 l_1 则实际路径 l_2 就越优。

受此启发, 本文提出一种角度搜索策略, 所谓的角度搜索策略就是机器人在路径搜索过程中控制好搜索的角度进而选择合适的栅格进行迭代, 最终得到安全的路径。如图 4 所示, 分别计算机器人所在位置到邻近 8 个栅格的中心方向连线与机器人所在位置到目标栅格的中心方向连线所形成的夹角, 即预估角 θ 。如果机器人周围栅格位于障碍区或超出地图边界, 那么将该预估角 θ 设为无穷大, 图中仅标出由位置 p 出发, 下一可能移动栅格 5 方向的预估角 θ 。

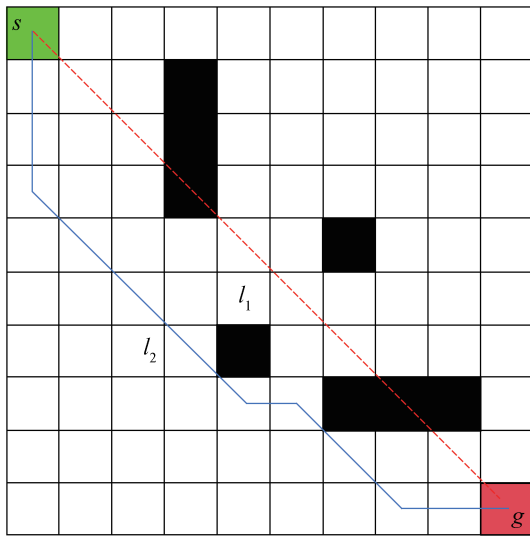


图3 路径搜索引导图
Fig. 3 Path searching guidance

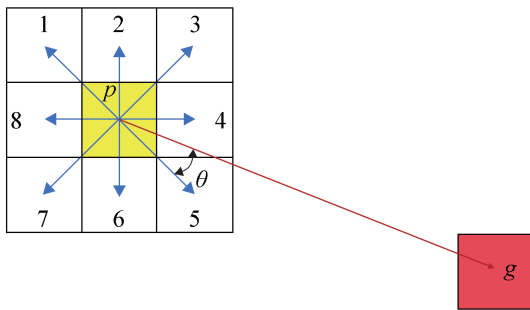


图4 角度搜索策略中的预估角
Fig. 4 Estimated angle in angle search strategy

如图4所示, p 点所在的栅格为机器人所在位置, 其坐标为 (p_x, p_y) ; g 点所在栅格为目标点所在位置, 其坐标为 (g_x, g_y) ; 机器人邻近8个节点所在任意栅格坐标为 (n_{x_i}, n_{y_i}) , $i \in [1, 8]$ 。预估角 θ 的计算公式为

$$\theta = \frac{180}{\pi} \times \arccos\left(\frac{\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2}{|\mathbf{v}_1| \cdot |\mathbf{v}_2|}\right) \quad (2)$$

机器人当前所在栅格与邻近8个节点所在任意栅格的坐标差为

$$\mathbf{v}_1 = (n_x - p_x, n_y - p_y) \quad (3)$$

机器人当前位置与目标点所在栅格的坐标差为

$$\mathbf{v}_2 = (g_x - p_x, g_y - p_y) \quad (4)$$

机器人当前所在栅格到邻近8个节点所在任意栅格的欧几里得距离为

$$|\mathbf{v}_1| = \sqrt{(n_x - p_x)^2 + (n_y - p_y)^2} \quad (5)$$

机器人当前位置到目标点所在栅格的欧几里得距离

$$|\mathbf{v}_2| = \sqrt{(g_x - p_x)^2 + (g_y - p_y)^2} \quad (6)$$

这里需要规定一个不变的搜索角 φ , 用预估角 θ 与 φ 来进行大小比较, 如果机器人邻近8个节点所在任意栅格的预估角 θ 中有小于 φ 并且该栅格不为障碍物的, 则将这些满足要求的栅格作为迭代栅格, 如果没有满足要求的空白栅格, 为了路径搜索不会中断, 需选取机器人周围预估角最小的空白栅格作为迭代栅格, 接着重复这一过程直到找到目标点, 这就是角度搜索策略。

2.2 搜索角选取

用搜索角控制机器人寻路过程中的搜索范围, 需要确定合适的搜索角大小。如果搜索角选取过大, 那么每次迭代都会产生大量的迭代栅格, 使得扩展过程中的计算量和存储量大大增加, 降低了路径搜索速度; 如果搜索角度过小, 则可能出现每次迭代只能从机器人周围选出一个迭代栅格, 若碰到机器人周围障碍物较多的场景甚至无法选出迭代的栅格, 很可能出现局部锁死或者达不到全局最优。

如图5所示, 根据目标点与机器人常出现的4个相对位置, 即目标点在机器人的左上方 g_1 、右上方 g_2 、右下方 g_3 、左下方 g_4 , p 为机器人当前所在位置, 可将机器人周围分为4个区域, 每个区域为弧线所覆盖的3个栅格的部分, 例如, 目标点在 g_2 时, 机器人从 p 到达 g_2 时则会优先考虑序号②区域中的3个灰色栅格情况, 从而挑选合适的扩展方案。因此, 在搜索角选定的时候, 尽可能控制在搜索角所覆盖的栅格数最多不超过3个。本文中机器人共有8个移动方向, 任意2个相邻移动方向之间夹角为 45° , 根据前文预估角的形成方

法, 机器人若想在预估角范围内满足不多于 3 个栅格, 搜索角需要不小于 45° 。为了将角度取整而又不会影响所选栅格数量, 本文选取搜索角 $\varphi=50^\circ$ 。

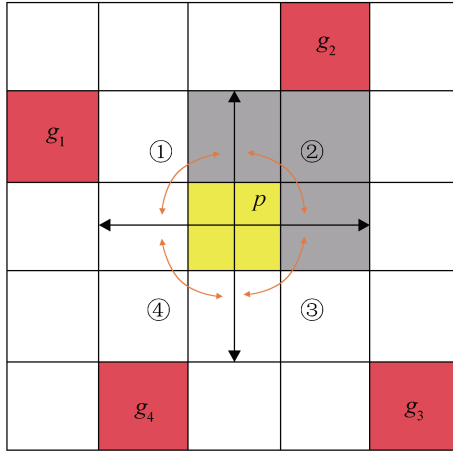


图 5 机器人搜索范围
Fig. 5 Robot's search range

2.3 搜索过程中的场景处理

为了减少计算量以及去除不必要的栅格, 本文根据实际情况针对不同场景给出处理方案。

case 1: 搜索范围中无满足要求的栅格

在实际场景下, 机器人有时会遇到在搜索范围中没有可行栅格。如图 6 所示, 在机器人搜索角 φ 范围中(图 6 中 2 个黑色双向箭头指向区域)有 b3、c3 栅格, 而这 2 个栅格均为障碍物所以无法通行, 为了寻路继续进行, 对于这种情况给出的解决方案: 选择机器人邻近节点预估角中最小值 $\min p_\theta$ 所对应的栅格作为扩展点。图 6 中的 c2 即为机器人下一次扩展的栅格, 对应的路径分别为 $p \rightarrow c2$, 如蓝色箭头所示。

case 2: 寻路过程中重复出现的栅格

如图 7 所示, 此时机器人在搜索范围中第一次扩展得到满足要求的 b2、b3 栅格, 对应的两条路径为: $p \rightarrow b2$ 和 $p \rightarrow b3$, 然后分别用 b2、b3 栅格进行第二次扩展。在第二次扩展中 b2 栅格在搜索范围中得到新的栅格 b3, 对应的路径为 $p \rightarrow b2 \rightarrow b3$, 此时可以发现 b3 栅格在第一次扩展时已经得

到, 这里把 b3 称为重复栅格, 如果路径 $p \rightarrow b2 \rightarrow b3$ 继续扩展就会重复路径 $p \rightarrow b3$ 的第二次扩展过程, 因此, 为减少计算量且考虑路径搜索速度, 对于这种后一次扩展得到的栅格在前一次扩展中已经出现的情况, 本文采取的解决方案: 终止后一次得到重复栅格的路径继续扩展(橙色虚线箭头), 而保留前一次扩展得到重复栅格的路径。

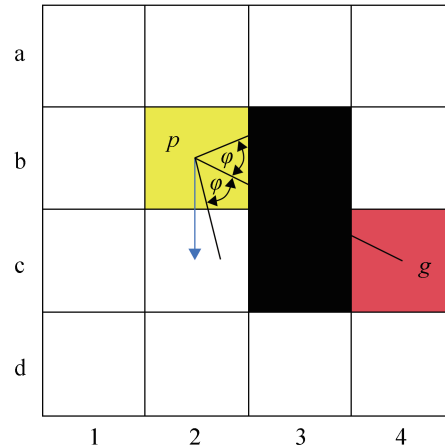


图 6 机器人搜索范围中无可通行栅格
Fig. 6 Impassable grid within robot's search range

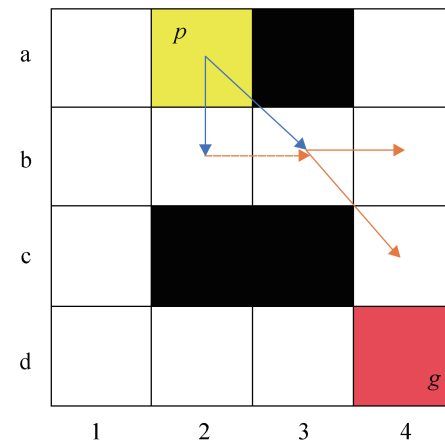


图 7 机器人搜索范围中出现重复栅格
Fig. 7 Repeated grid in robot's search range

case 3: 机器人搜索范围中存在预估角相同的栅格

当机器人搜索范围中存在可通行栅格的预估角一样时, 为了可以多维度搜索路径, 本文采取将预估角相同的栅格都作为扩展过程中的迭代点。

如图8所示,此时在机器人搜索角 φ 范围中(如图8中两个黑色双向箭头指向区域)可行的栅格为a2、c2,并且这2个栅格的预估角一样,都为 45° ,那么这2个栅格都作为机器人的扩展栅格,对应的路径分别为 $p \rightarrow a2$ 、 $p \rightarrow c2$,如图8中蓝色箭头所示。

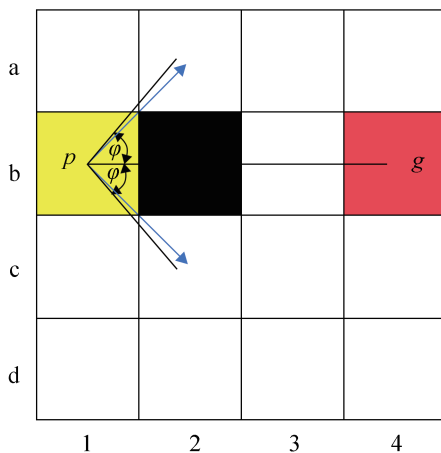


图8 机器人搜索范围存在预估角相同栅格
Fig. 8 Grids with same estimated angle in robot's search range

2.4 角度搜索算法在路径规划中的运用

将角度搜索算法运用于移动机器人路径规划。具体步骤如下。

step 1: 初始化参数。采用栅格法创建机器人工作环境地图,初始化起始点位置 s 、目标点位置 g 、搜索角 φ ,以及地图中每个栅格的序号。

step 2: 计算起始位置邻近8个节点所在栅格的预估角,并挑选出迭代点。利用式(2)~(6)计算起始位置周围栅格的预估角(障碍物栅格的预估角设为无穷大)并放入 θ_s ,如果 θ_s 中的最小值 $\min \theta_s$ 已经满足 $\min \theta_s \geq \varphi$,那么将 $\min \theta_s$ 对应栅格的序号放入IterationList,否则将 θ_s 中小于 φ 的栅格的序号放进IterationList。

step 3: 路径扩展。根据step 2判别方法找出IterationList中每个栅格的搜索范围中满足要求的扩展栅格,并将满足要求的扩展栅格的序号继续放入IterationList,扩展过程中如果出现case 2、3

场景要进行相应的处理,本次扩展完成后IterationList中只保留新增加的栅格序号,其余的栅格序号需要清除掉。

step 4: 形成路径。重复step 3的过程,当IterationList中出现目标位置栅格的序号时,终止迭代,并形成对应的路径。角度搜索流程图如图9所示。

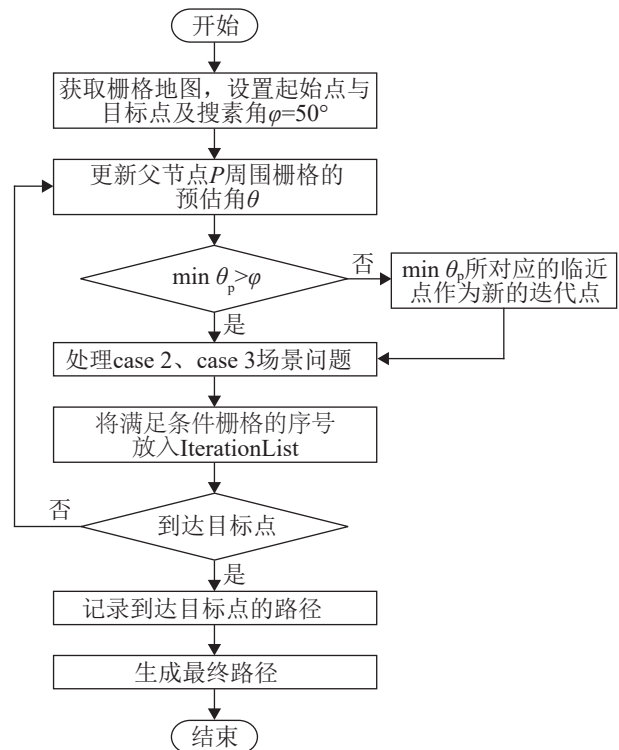


图9 路径搜索流程
Fig. 9 Path searching flow

3 仿真及实验分析

为了验证角度搜索算法在处理机器人路径规划问题中的可行性和有效性,将本文算法与Dijkstra算法和A*算法在静态的简单与复杂两种仿真环境中进行比较,每个算法各运行100次,并记录仿真数据的平均值。将角度搜索算法运用到简单的动态场景中,分析其局部避障能力。在实际场景中,将角度搜索算法与A*算法进行对比,验证了该算法的优越性。算法的运行环境为Windows 10操作系统,处理器为i7-6700,主频为3.40 GHz,运行内存为8 G。

3.1 仿真分析

3.1.1 20×20简单场景下的仿真实验

栅格地图的复杂程度主要由障碍物的数量以及分布的密集程度所决定, 分为简单环境与复杂环境。简单栅格地图不管是在障碍物的数量还是

分布的密集程度都小于复杂环境的栅格地图。

设栅格地图中每个栅格边长为1 m, Dijkstra算法、A*算法和角度搜索算法的路径规划结果如图10所示。其中, 地图中的绿色栅格表示起始位置, 红色栅格表示目标点位置。仿真结果如表1所示。

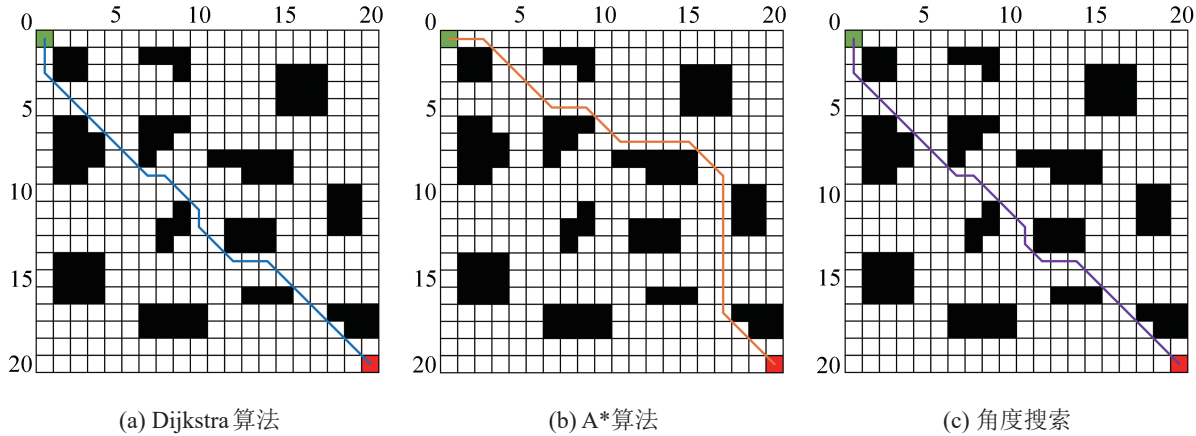


图10 三种算法在简单环境下路径规划结果

Fig. 10 Path planning results of three algorithms in a simple environment

表1 简单栅格地图环境下三种算法仿真结果
Table 1 Simulation results of three algorithms in a simple grid map environment

算法	路径平均长度/m	平均时间/s	迭代次数	转折次数
Dijkstra	28.627	0.064 8	22	7
A*	31.556	0.059 5	27	7
角度搜索	28.627	0.053 6	22	7

从图10和表1可以看出, 在简单的20×20栅格地图中, A*算法与角度搜索算法对路径搜索的效率较高, 平均运行时间均比Dijkstra算法少。相比于A*算法, 角度搜索算法与Dijkstra路径的长度较短, 迭代次数较少且搜索路径较为平滑。结果表明, 角度搜索算法在保证快速寻路的前提下, 能够获得较为平滑的路径, 实现路径规划的综合最优, 体现其实用性与优越性。

图11展示了三种算法在20×20简单场景中分别进行100次仿真实验的耗时情况, 可以看出,

角度搜索算法的运行时间均比Dijkstra、A*算法短, 相较于Dijkstra算法缩短了17.29%, 相较于A*算法缩短了9.88%, 且整体耗时波形相对平缓。结果表明, 角度搜索算法在移动机器人工作效率方面具有一定的优势。

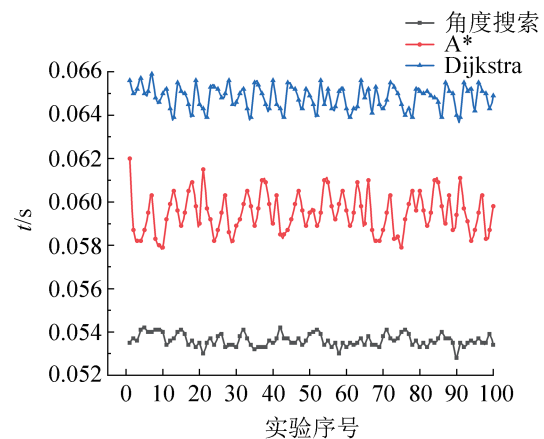


图11 三种算法在简单环境仿真实验耗时情况
Fig. 11 Time consumption of simulation experiments for three algorithms in a simple environment

3.1.2 20×20 复杂场景下的仿真实验

复杂场景下，三种算法的仿真结果如图12所示，在复杂环境下Dijkstra算法能够找出一条较短且较为平滑的路径，但是路径搜索速度要比其他两个算法慢了不少，这是由于Dijkstra算法是求两个节点之间最短路径，还需要计算每一个节点距离

起点的总移动代价，这就会加大计算量。A*算法在路径搜索速度上表现的还不错，但规划的路径长度比角度搜索算法长，且路径折弯较多不够平滑。角度搜索算法由于有了搜索角的存在，使得路径搜索更加具有方向性，在障碍物多的场景中在搜索范围中排除了大量无需考虑的障碍物，因此加快了路径搜索速度。

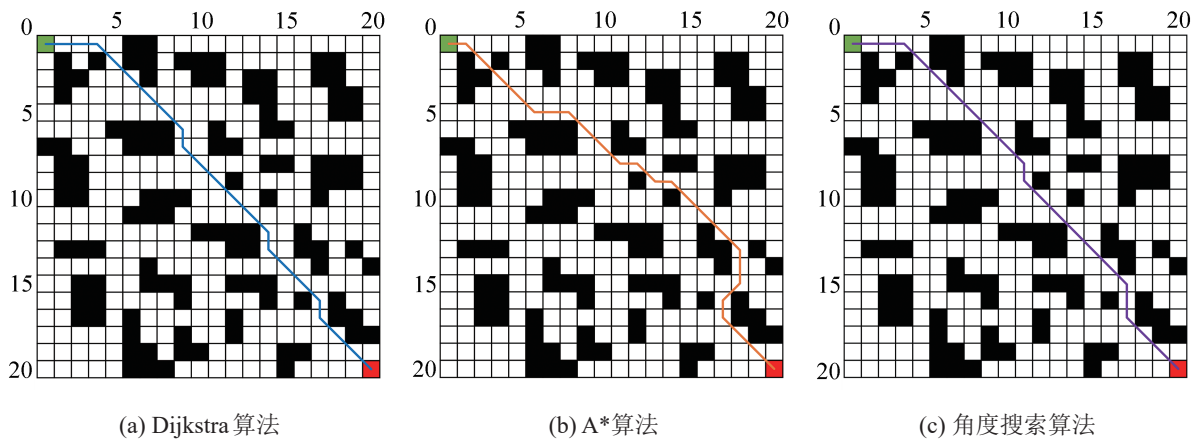


图12 三种算法在复杂环境下路径规划结果
Fig.12 Path planning results of three algorithms in a complex environment

在复杂场景中将三种算法分别进行100次仿真实验，三种算法耗时情况如图13所示，仿真数据如表2所示。

由图13和表2可以看出，角度搜索算法运行时间较短，且波动较小，Dijkstra和A*两种算法在100次仿真实验中运行时间均表现出较大波动性，缺乏稳定性。在运行时间上，角度搜索算法比Dijkstra算法缩短了19.44%，比A*算法缩短了12.23%，且整体波动不大。这表明角度搜索算法的路径搜索速度更快，达到了预期的效果，与简单场景下的耗时情况相比，角度搜索算法在存在相对多障碍物的场景下，搜索路径速度更快。

上述仿真实验结果表明，在两种不同场景下，与Dijkstra算法和A*算法相比，角度搜索算法具有更快的搜索速度且得到的路径折弯数较少、路径更短，这表明角度搜索算法能够更快，更优地规划出一条稳定的机器人路径。

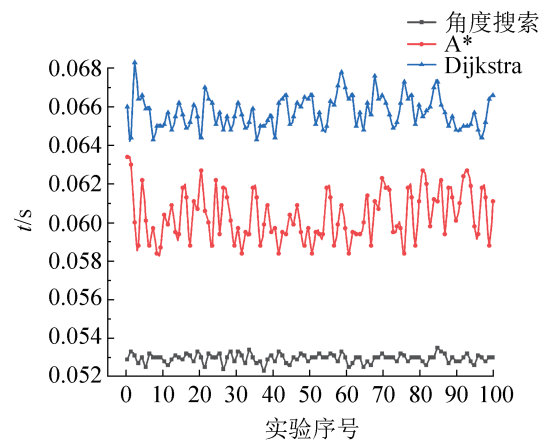


图13 三种算法在复杂环境仿真实验耗时情况
Fig. 13 Time consumption of three algorithms in complex environment simulation experiments

表2 复杂栅格地图环境下三种算法仿真结果
Table 2 Simulation results of three algorithms in complex grid map environment

算法	路径平均长度/m	平均时间/s	迭代次数	转折次数
Dijkstra	28.627	0.065 7	22	7
A*	30.627	0.060 3	24	11
角度搜索	28.627	0.053 0	22	5

3.1.3 20×20简单局部场景下的仿真实验

在20×20简单栅格地图中添加2个未知静态障碍物和一个可全局移动障碍物, 以此来构建简单局部场景。角度搜索算法在简单局部环境下的仿真实验如图14所示, 灰色栅格为静态未知障碍物, 橙色栅格为移动障碍物。图14(a)中紫色路径为未添加静态障碍物之前规划的路径, 红色路径

为添加障碍物后路径发生修改, 且避开障碍物, 可以看出角度搜索算法实现了静态障碍物避障。图14(b)中在遇到动态障碍物后运动轨迹发生变化, 随后回归原轨迹, 实现了动态障碍物避障效果。图14(c)为从起始点到达目标点的路径规划效果图, 可以看出角度搜索算法由于自身具备全局路径的引导和局部避障策略, 可以获得较优路径。

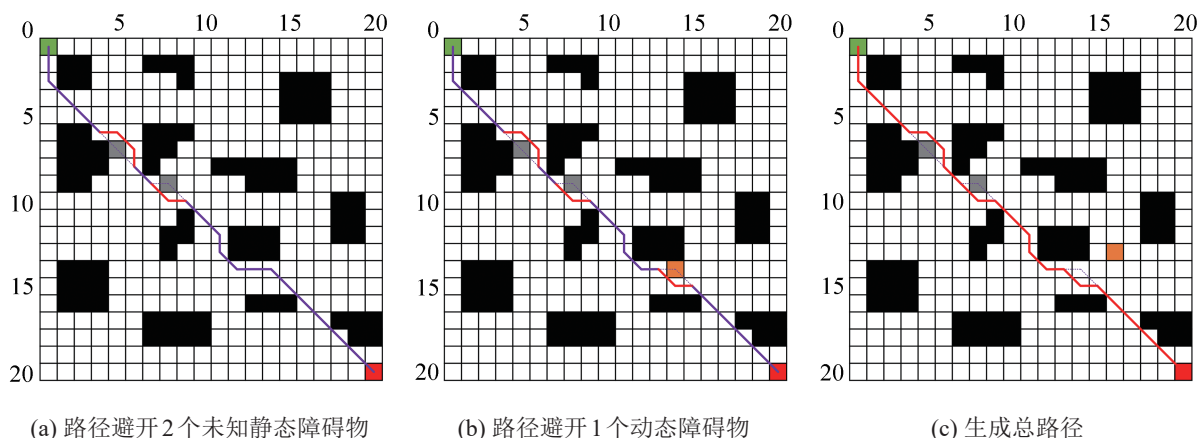


图14 角度搜索算法在简单局部环境下路径规划结果

Fig. 14 Path planning results of angle search algorithm in simple local environments

3.2 实验验证

算法在真实环境中的性能受到许多因素的因素。为了验证角度搜索算法在实际环境中的路径规划效果, 将角度搜索算法应用到实际基于ROS的移动机器人Turtlebot2上。Turtlebot2机器人如图15所示。

Turtlebot2采用激光雷达A2M7获取实验场景信息后利用amcl和gmapping模块进行定位和建图, 然后将本文算法通过plugin插件注册的方式移植进move_base模块中替换global_planner进行全局路径规划。具体实现框架如图16所示。

本实验的场景为实验室楼走廊, 在图17指定位置放置一些纸箱充当障碍物, 图18为实验实际场景。



图15 Turtlebot2 移动机器人

Fig. 15 Turtlebot2 mobile robot

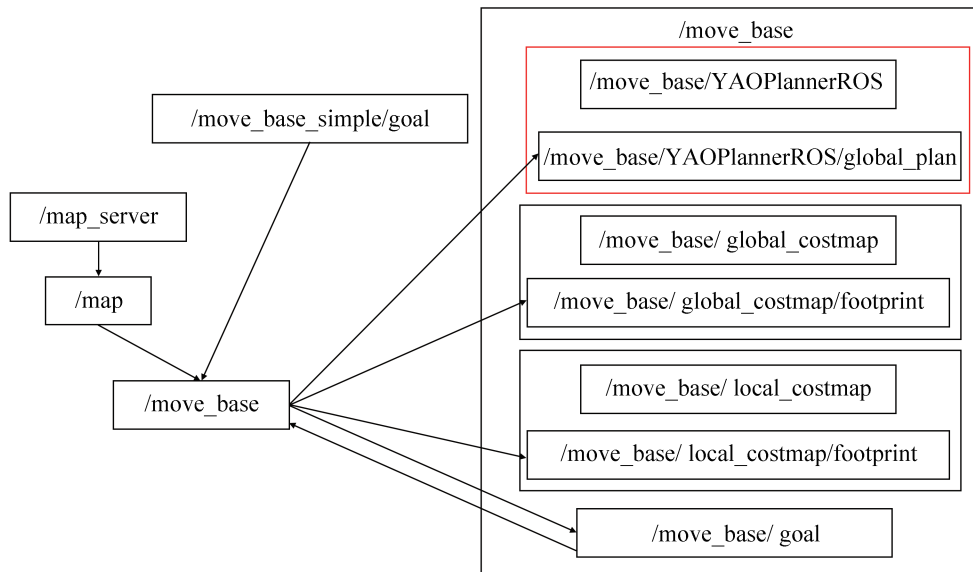


图 16 Lobal_planner 实现框架
Fig. 16 Lobal_planner implementation framework

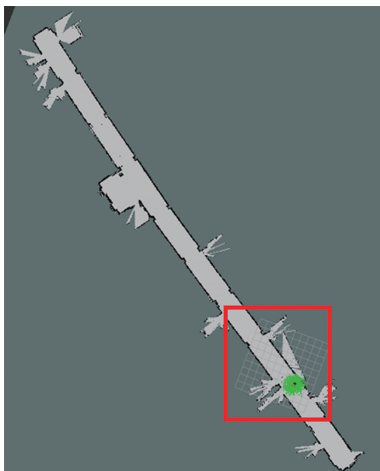


图 17 实验整体环境
Fig. 17 Overall experimental environment



图 18 实验实际场景
Fig. 18 Experimental actual scene

实验整体流程：在实验过程中首先启动键盘控制节点移动 Turtlebot2 构建出该实验场景的二维地图；启动 map_server 模块将地图保存；启动导航节点程序将地图导入，并在 rviz 中使用 2D_Nav_Estimate 功能校准 Turtlebot2 的位置；以当前位置为起点，将起点设置为黄色点，指定红色点为目标点来进行路径规划。由于在实际场景应用中 A* 算法性能较好，在实验中将本文算法与 A* 算法作比较，如图 19 所示。



(a) 角度搜索算法 (b) A* 算法

图 19 Turtlebot2 路径规划结果
Fig. 19 Path planning results for Turtlebot2

由图 19 可以看出，相较于 A* 算法，本文算法在实际应用中得到的路径更加平滑，路径也更短，实验结果证明本文算法能够有效完成移动机器人的路径规划任务。

4 结论

针对一些传统算法在静态栅格地图的路径规划中存在搜索速度慢、路径不平滑、易陷入局部最优等不足, 本文提出一种角度搜索算法。首先, 根据机器人在栅格地图中的移动规则计算机器人周围栅格的预估角 θ , 得到机器通过周围任意一个栅格到目标点的角度代价。然后, 引入搜索角 φ , 使得机器人在路径搜索过程中更加具有方向性, 提高了路径搜索的速度及稳定性。最后, 在寻路过程中针对 case 1、case 2、case 3 三种不同场景给出应对方案, 分别解决了锁死问题、路径重复问题、特殊位置路径选择问题, 实现了路径规划的全局最优。将本文算法与其他算法进行仿真实验对比, 实验表明: 在静态的两种场景中, 角度搜索算法在路径收敛速度及路径折弯数量等指标都有较好提升; 在简单动态环境中也有较好的避障能力。通过搭建实验平台验证了本文算法在实际场景中的可行性及有效性。

本文所提算法是在环境已知和简单局部动态环境中进行的, 目前还未在地图环境信息未知的复杂动态场景中进行研究。未来将考虑结合动态算法对角度搜索算法进行优化, 或与曲线处理策略结合, 在保证局部环境避障能力的同时, 在全局中规划出一条最优路径, 进一步提高路径的平滑性, 使得移动机器人能够适应更多特定的复杂多样地形环境, 更好地完成工作。

参考文献:

- [1] Wu Lei, Huang Xiaodong, Cui Junguo, et al. Modified Adaptive Ant Colony Optimization Algorithm and Its Application for Solving Path Planning of Mobile Robot [J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 215: 119410.
- [2] Giuseppe Fragapane, René de Koster, Fabio Sgarbossa, et al. Planning and Control of Autonomous Mobile Robots for Intralogistics: Literature Review and Research Agenda[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 294(2): 405-426.
- [3] Wu Xiaojing, Xu Lei, Zhen Ran, et al. Biased Sampling Potentially Guided Intelligent Bidirectional RRT* Algorithm for UAV Path Planning in 3D Environment[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 2019: 5157403.
- [4] 曲道奎, 杜振军, 徐殿国, 等. 移动机器人路径规划方法研究[J]. *机器人*, 2008, 30(2): 97-101, 106.
Qu Daokui, Du Zhenjun, Xu Dianguo, et al. Research on Path Planning for a Mobile Robot[J]. *Robot*, 2008, 30(2): 97-101, 106.
- [5] 王殿君. 基于改进A*算法的室内移动机器人路径规划[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2012, 52(8): 1085-1089.
Wang Dianjun. Indoor Mobile-robot Path Planning Based on an Improved A* Algorithm[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2012, 52(8): 1085-1089.
- [6] Kossar Jeddisaravi, Reza Javanmard Alitappeh, Luciano C A Pimenta, et al. Multi-objective Approach for Robot Motion Planning in Search Tasks[J]. *Applied Intelligence*, 2016, 45(2): 305-321.
- [7] Fu Bing, Chen Lin, Zhou Yuntao, et al. An Improved A* Algorithm for the Industrial Robot Path Planning with High Success Rate and Short Length[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 106: 26-37.
- [8] Zhao Tao, Li Haodong, Dian Songyi. Multi-robot Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field and Fuzzy Inference System[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2020, 39(5): 7621-7637.
- [9] Azzeddine Bakdi, Abdelfetah Hentout, Hakim Boutami, et al. Optimal Path Planning and Execution for Mobile Robots Using Genetic Algorithm and Adaptive Fuzzy-logic Control[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 89: 95-109.
- [10] 朱庆保, 张玉兰. 基于栅格法的机器人路径规划蚁群算法[J]. *机器人*, 2005, 27(2): 132-136.
Zhu Qingbao, Zhang Yulan. An Ant Colony Algorithm Based on Grid Method for Mobile Robot Path Planning [J]. *Robot*, 2005, 27(2): 132-136.
- [11] Conn R A, Kam M. Robot Motion Planning on N-dimensional Star Worlds Among Moving Obstacles[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14 (2): 320-325.
- [12] 朱毅, 张涛, 宋靖雁. 未知环境下势场法路径规划的局部极小问题研究[J]. *自动化学报*, 2010, 36(8): 1122-1130.
Zhu Yi, Zhang Tao, Song Jingyan. Study on the Local Minima Problem of Path Planning Using Potential Field Method in Unknown Environments[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(8): 1122-1130.

- [13] Tang Gang, Tang Congqiang, Christophe Claramunt, et al. Geometric A-star Algorithm: An Improved A-star Algorithm for AGV Path Planning in a Port Environment [J]. IEEE Access, 2021, 9: 59196-59210.
- [14] Chen Jiqing, Li Mingyu, Su Yousheng, et al. Direction Constraints Adaptive Extended Bidirectional A* Algorithm Based on Random Two-dimensional Map Environments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2023, 165: 104430.
- [15] 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.
Wei Tong, Long Chen. Path Planning for Mobile Robot Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(4): 703-711.
- [16] 陈凯, 解印山, 李彦明, 等. 多约束情形下的农机全覆盖路径规划方法 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 17-26, 43.
Chen Kai, Xie Yinshan, Li Yanming, et al. Full Coverage Path Planning Method of Agricultural Machinery under Multiple Constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 17-26, 43.
- [17] Fatin Hassan Ajeil, Ibraheem Kasim Ibraheem, Ahmad Taher Azar, et al. Grid-based Mobile Robot Path Planning Using Aging-based Ant Colony Optimization Algorithm in Static and Dynamic Environments[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1880.
- [18] Xu Lin, Cao Maoyong, Song Baoye. A New Approach to Smooth Path Planning of Mobile Robot Based on Quartic Bezier Transition Curve and Improved PSO Algorithm [J]. Neurocomputing, 2022, 473: 98-106.
- [19] 乔乔, 王艳, 纪志成. 基于冲突搜索算法的多机器人路径规划[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(12): 2659-2669.
Qiao Qiao, Wang Yan, Ji Zhicheng. Multi-robot Path Planning Based on CBS Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(12): 2659-2669.
- [20] Wu Zhengtian, Hamid Reza Karimi, Dang Chuangyin. A Deterministic Annealing Neural Network Algorithm for the Minimum Concave Cost Transportation Problem[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, 31(10): 4354-4366.
- [21] Luo Min, Hou Xiaorong, Yang Jing. Surface Optimal Path Planning Using an Extended Dijkstra Algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 147827-147838.
- [22] Li Zhe, Li Yibin, Rong Xuewen, et al. Grid Map Construction and Terrain Prediction for Quadruped Robot Based on C-Terrain Path[J]. IEEE Access, 2020, 8: 56572-56580.
- [23] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 961-967.
Zhu Daqi, Yan Mingzhong. Survey on Technology of Mobile Robot Path Planning[J]. Control and Decision, 2010, 25(7): 961-967.
- [24] Khaled Akka, Farid Khaber. Mobile Robot Path Planning Using an Improved Ant Colony Optimization[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018, 15(3): 1729881418774673.