

基于改进 A^* 算法和再优化的避障路径规划^{*}

高九州 刘育航

(吉林建筑大学 长春 130118)

摘要: 考虑机器人行走过程中自身尺寸与体积因素的影响,给出了防刮碰障碍物的节点扩展方法。将传统的从起点到终点的单向搜索方式变成起点到终点和终点到起点的同步双向搜索方式,并将搜索进程中的“终点”设置为对向同步搜索的当前点,将当前点和当前终点的距离引入评价函数,明显减少了往复搜索的次数和搜索的节点数目,提高了搜索效率。在双向搜索 A^* 改进算法得出的搜索路径基础上,进行路径优化,先后进行路径冗余点的去除和拐点路径的圆弧过渡。仿真结果表明,基于上述方法得到的避障路径搜索面积小,搜索节点少,搜索效率高,路径平滑稳定,易于机器人完成避障路径行走。

关键词: 防刮碰;双向搜索;评价函数;冗余点去除;圆弧过渡

中图分类号: TN965.8;TP249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.1040

Obstacle avoidance path planning based on improved A^* algorithm and re-optimization

Gao Jiuzhou Liu Yuhang

(Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

Abstract: A node expansion method for preventing scratching and collision with obstacles is provided, considering the influence of the robot's own size and volume during its walking process. The traditional A^* search method from the start point to the end point is changed to a simultaneous bidirectional search method from the start point to the end point and from the end point to the start point. The "end point" in the search process is set as the current point of the synchronous search in both forward and reverse directions, and the distance between the current point and the current end point is introduced into the evaluation function, significantly reducing the number of reciprocal searches and the number of search nodes, and improving the search efficiency. Based on the path obtained by the improved bidirectional A^* search algorithm, path optimization is carried out, including the removal of redundant points on the path and the arc transition of the inflection point path successively. The simulation results show that the obstacle avoidance path obtained based on the above method has fewer search nodes, high search efficiency, smooth and stable path, and is easy for the robot to complete the obstacle avoidance path walking.

Keywords: preventing scratching and collision; bidirectional search method; evaluation function; redundancy point removal; arc transition

0 引言

机器人避障路径规划是指机器人行走在有障碍物的空间环境里,以最短路线、最小航时、最少耗能等某一指标为基准,通过对空间环境数据采集、分析、计算与比较,搜寻出一条指标性能最佳的安全无碰撞路线^[1-3]。避障路径的规划按照对空间环境建模的实时性又可以分为静态航线规划和动态航线规划。

静态航线规划^[4]是指机器人的空间环境是固定不变的,通过对行走环境进行建模,再以某一指标为基准,分析、计算与比较得到一条从起点到目标点的最优路线,即行走前主控系统已装载好路径点和路线^[5-8]。

动态航线规划^[9-10]是指行走过程中的空间环境信息是事先未知的,且环境信息可能是动态变化的情况下,通过机器人自身实时感知周边环境信息,建立周边环境的实时动态模型,再通过分析、计算与比较得到一条绕过当前障碍物

的最佳路线,进而引导机器人行走至目标点,即一边行走一边设计当前的避障航线^[11-12]。

A* 搜索算法(A star search, A*)是在迪克斯特拉算法(Dijkstra search, DS)与广度优先算法(breadth first search, BFS)的基础上,兼顾搜索效率与最优路径的一种启发式搜索算法^[13-15]。近些年来,基于 A* 算法的改进型避障算法层出不穷。田华亭、张红梅、赵晓等分别从搜索方向选择、评价函数构建、速度控制等几个方面对 A* 算法进行优化与改进,提高了搜索速度,缩短了路径长度,提高了路径的平滑度^[16-18]。尤其张红梅对传统 A* 算法进行了改进,在估价函数中加入了与障碍物距离成反比的安全威胁代价,使得规划路径尽可能远离障碍物^[17]。张敬寒等^[19]提出一种扩大搜索邻域的改进 A* 算法,提高了算法寻路效率。张帅等^[20]提出圆形节点扩展,实现了变方向和变步长扩展子节点。Kusuma 等^[21-22]通过改进优化函数等到了一种最短路径,提高了搜索效率。杨奇峰等^[23]设计了动态障碍物运动趋势预测算法,提升了动态避障算法的效率与安全性,但却没有考虑机器人本体的体积与尺寸。胡中华等^[24]采用 B 样条曲线插补法优化避障航迹,使整体航迹更加平滑,更有利于机器人运动速度的平稳与协调。

上述研究人员基于 A* 搜索的改进多注重于算法本身,对实际运动过程中机器人都理解为质点,该文首次考虑并解决机器人实际运动过程中由于本身体积与尺寸的原因可能发生与障碍物刮碰的问题。

本文提出防刮碰的子节点扩展方法, A* 改进算法和路径再优化等方法。首先,充分考虑机器人本身的体积与尺寸,在常规 A* 算法的基础上进行子节点扩展方法的改进,保证行走过程始终与障碍物保持一定的安全距离,防止机器人与障碍物发生刮碰。其次,对常规 A* 单向搜索算法进行改进,从起点和终点同步进行对向搜索,双向搜索过程中的当前点分别为对向搜索的当前终点,双向搜索过程中将当前点与当前终点的距离作为评价指标引入评价函数,明显减少了往复搜索的次数,使搜索范围和搜索子节点数量减少。最后,对生成的路径进行再次优化,先消除大量路径冗余点,使总航线变短,再针对路径转折角问题,利用设定切点,求取圆心,生成圆弧的方法将拐角路径圆弧化、平滑化,使机器人更平稳地沿着设定路径路线行走至目标点。

1 A* 基本算法

A* 算法是以计算节点的评价函数为核心,在扩展路径节点的每一步过程中,始终选取评价函数的函数值最小的节点作为子节点,进而再以该子节点作为父节点进行下一步路径节点的扩展与寻优,即依次寻找评价函数值最小的节点,形成寻优航线。首先,创建两个列表 OPEN 和 CLOSE,将起点作为第 1 个节点放入 CLOSE 列表中,计算周围最多 8 个子节点的评价函数(二维平面,且由于行走边界和障碍等原因,周围节点数可能小于 8),并将这些节点

及节点信息放入 OPEN 列表中,若 OPEN 列表中已存在当前节点,则比较该节点的评价函数值,将评价函数值较小的节点的信息更新至 OPEN 列表中。在 OPEN 列表中,选取评价函数值最小的节点作为当前节点的最优“子”节点,由于往复搜索等因素的存在,该最优“子”节点未必是当前点的子节点。下一步,将选中的最优节点作为父节点,同时将其参数信息放入 CLOSE 列表中,使用该点作为新的父节点再进行子节点扩展并计算各“子”节点的评价函数值,通过比较 OPEN 列表中所有节点(不包括已被放入 CLOSE 列表中的节点)的评价函数值得到新的最优“子”节点,依次搜索下去,并不断更新 CLOSE 和 OPEN 列表,直至搜索至目标点。

A* 算法评价函数 $f(n)$ 的表达式为:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

式中: $g(n)$ 为起始节点到当前节点的实际航线代价; $h(n)$ 为当前节点到目标点的估计航线代价。

计算 $g(n)$ 、 $h(n)$ 有 3 种计算方法,分别为曼哈顿距离、欧几里得距离和切比雪夫距离。

$$g(n) = D \cdot (|x_i - x_{start}| + |y_i - y_{start}|)$$

$$g(n) = D \cdot \sqrt{(x_i - x_{start})^2 + (y_i - y_{start})^2} \quad (2)$$

$$g(n) = D \cdot \max(|x_i - x_{start}|, |y_i - y_{start}|)$$

本文采用欧几里得距离作为路径代价的计算方法,其表达式为:

$$g(n) = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2}$$

$$h(n) = \sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2} \quad (3)$$

式中: (x_i, y_i) 为当前点, (x_s, y_s) 为起始点, (x_t, y_t) 为目标点。

A* 算法在搜索过程中需要不断更新 OPEN 和 CLOSE 列表中的节点及其相关节点信息,计算每个节点的评价函数值并通过比较进而选取评价函数值最小的节点作为下一步搜索的父节点,依次搜索直至目标点,形成搜索路径线。因为每一步的搜索代价都是最小的,因此整体搜索路径线也是最优的。但是,在搜索过程中常规 A* 算法也存在一些不足之处:

1) 二维环境信息采用周边 8 节点搜索方法,在路径搜索过程中搜索节点数量过多,每个节点都需要计算其评价函数值,导致计算量过大,计算时间过长,搜索效率较低。

2) 规划得到的路径冗余点过多,路径转折角过多,导致行走路径并非最短且路径平滑度较差,不利于机器人的平稳行走。

3) 在规划路径时,只考虑障碍物节点信息,没有考虑机器人本身具有一定的体积与尺寸,当机器人路径以栅格对角线的形式斜穿障碍物顶点时,其机器人身体边缘可能刮碰到障碍物导致机器人行走不稳,甚至存在翻坠的风险。

2 防刮碰子节点扩展

路径规划是基于空间环境模型的,该文在进行路径规划时采用栅格法进行二维地图建模。

该文对常规A*算法扩展子节点的方式进行了改进,以二维空间环境为例,在扩展子节点时,如果当前节点的X正、X负、Y正、Y负方向上存在障碍物时,则不扩展栅格对角线上的节点作为子节点,即不生成距离障碍物小于1个栅格单位距离的对角线路径线。

如图1所示,假设当前路径点A→B,路径点B的上侧存在障碍物节点,按照常规A*扩展子节点算法,扩展的最佳子节点为B→C→D,但该路径线距离障碍物节点距离小于1个栅格单位的距离,故B扩展子节点时不允许生成子节点C,最佳子节点依次应为B→E→C→D。

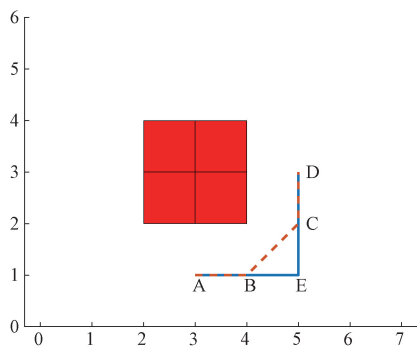


图1 改进扩展子节点方式

Fig. 1 Improved extension child node approach

当前节点的X正方向有障碍节点时,不允许生成X正Y正、X正Y负的子节点;X负方向有障碍节点时,不允许生成X负Y正、X负Y负的子节点;Y正方向有障碍节点时,不允许生成Y正X正、Y正X负的子节点;Y负方向有障碍节点时,不允许生成Y负X正、Y负X负的子节点。每个方向有2种约束可能,4个方向共计16种可能。这样避免了路径线规划中出现对角线方向上的路径线与障碍物发生刮碰的可能,从而保证机器人与障碍物之间始终存在一定的安全距离。

3 双向搜索改进A*算法

双向搜索A*算法是在A*基本算法的基础上进行改进,进行双向搜索,并与评价函数配合,减少搜索区域和搜索节点,提高搜索效率。A*算法实用性及效率由评价函数中的实际代价 $g(n)$ 和启发代价 $h(n)$ 决定。当 $g(n)$ 权重占比较大时,可以优化路径质量,由于 $g(n)$ 权重较大,A*算法更注重已经走过的路径成本,可能更倾向于选择成本较低的路径,从而有助于优化路径质量。由于算法更依赖已知路径成本,可能会减少搜索的节点数量,使算法更快地朝着目标节点搜索。但由于算法更加谨慎地考虑已知路径成本,特别是在启发式代价 $h(n)$ 的估计不够准确时,可能

会导致算法陷入局部最优解,无法找到最优解,或者算法得出的路径长度较长。

当评价函数中,启发代价 $h(n)$ 权重较大时,可以快速收敛,找到目标点。但由于 $h(n)$ 权重较大,A*算法更注重启发代价的估计值,特别是在启发式函数的估计相对准确的情况下,算法会更快地收敛到目标节点附近。但是,由于过度依赖启发式代价 $h(n)$,可能会选择不够优化的路径,导致路径质量降低。同时,由于更快地收敛到目标节点,当启发式代价 $h(n)$ 的估计不够准确时,可能会增加搜索过程中节点的数量。

本文改进为同步双向A*搜索,正反向搜索同时进行且终点是动态变化的,即正向搜索时终点为反向搜索的当前节点,反向搜索时终点为正向搜索的当前节点,并将此信息加入评价函数,作为评价指标之一。

本文设计的评价函数为:

$$F(n) = g(n) + h(n) + c(n) \quad (4)$$

式中: $g(n)$ 是起点到正向搜索的当前节点的实际代价; $h(n)$ 是预估代价,指正向搜索的当前节点到反向搜索的当前节点的欧几里得距离。

$$h(n) = \sqrt{(X_n - X_m)^2 + (Y_n - Y_m)^2} \quad (5)$$

式中: $c(n)$ 是校正因子,正向搜索时的当前节点到终点的欧几里得距离。

$$c(n) = \sqrt{(X_n - X_g)^2 + (Y_n - Y_g)^2} \quad (6)$$

反向搜索时,

$$c(n) = \sqrt{(X_m - X_s)^2 + (Y_m - Y_s)^2} \quad (7)$$

正反向搜索过程中每搜索一次就会更新一次目标点,这样可使正反向搜索路径快速接近。当正向搜索的当前节点遇到了反向搜索的路径点(可能是非当前路径点)或者反向搜索的当前节点遇到了正向搜索的节点(可能是非当前路径点)时,同步双向搜索结束。同步双向的搜索方式在搜索过程中大大缩短了搜索时间,提高了搜索效率,其搜索流程如图2所示。

4 路径再优化

4.1 路径一次优化

该文路径优化基本原理如图3所示,A*基本算法规划出的路径为A→B→C→D→E→F→G→H→T,即每一步只能沿着栅格的横向、纵向或对角线方向移动。但是,节点B和E显然是多余的,可将其优化为路径A→C→D→T,或者路径A→D→T,或者路径A→F→T,或者路径A→G→T,或者路径A→H→T,比较上述几种航迹。路径A→H→T虽然最短,但该路径规划会穿过障碍物区域,会出现撞机,不合理,因此舍弃。路径A→D→T、路径A→F→T、路径A→G→T和路径A→H→T,虽然没有穿过障碍物区域,但是该规划路径没有考虑机器人自身体积和尺寸信息,可能会出现与障碍物边界刮碰,故舍弃。则路径A→C→

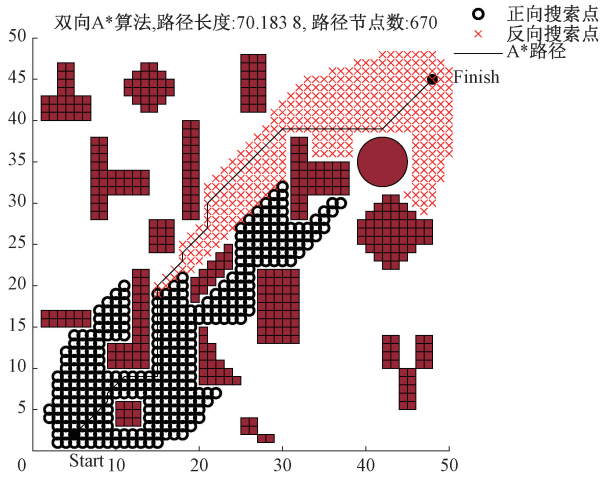


图6 双向搜索A*基本算法路径

Fig. 6 Basic A* algorithm path of bidirectional search

图7为双向搜索A*基本算法一次优化路径,绿色实线为去除路径冗余点后的路径,优化原则保证所有障碍物距离航线的距离要大于设定安全距离,该路径除起点和终点外,每一个路径点均为路径拐点,优化后的路径长度明显比原路径要短。

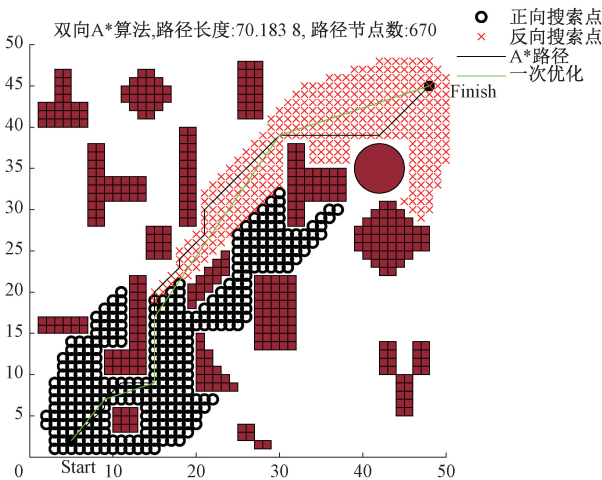


图7 双向搜索A*基本算法一次优化路径

Fig. 7 Path optimized for the first time by basic bidirectional A* algorithm

图8为双向搜索A*基本算法二次优化路径,青色实线为优化后的最终路径,该路径不存在拐点,可以保证机器人速度平稳,行走稳定至目标点。

图9为双向搜索A*改进算法路径,黑色实线为搜索出的路径线,黑色○点为正向搜索并途经过的路径点,红色×点为反向搜索并途经过的路径点,与图6进行比较,总路径没有往复搜索过程,即搜索路径点基本就是最后路径点,搜索区域和搜索路径点显著减少,搜索效率明显提高。黑色○点与红色×点数目相等,即二者步数相同,是总路径节点数的一半。

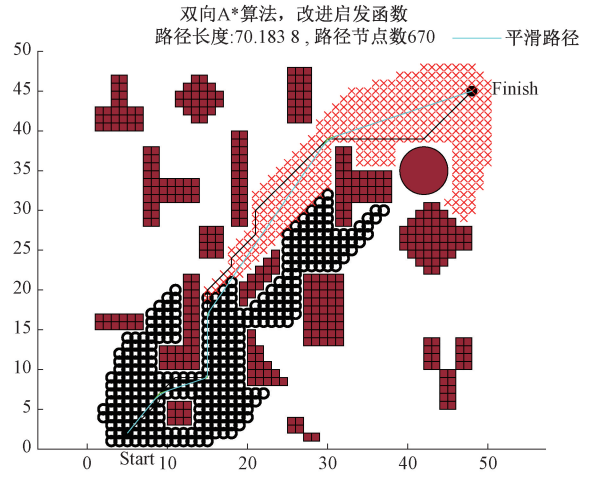


图8 双向搜索A*基本算法二次优化路径

Fig. 8 Path optimized for the second time by basic bidirectional A* algorithm

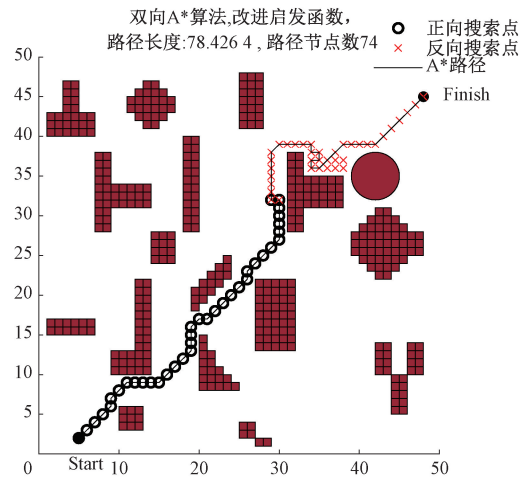


图9 双向搜索A*改进算法路径

Fig. 9 Bidirectional A* improved algorithm path

图10为双向搜索改进A*算法一次优化路径,绿色实线为去除冗余点后的路径,优化原则保证所有障碍物点距离航线的距离要大于设定安全距离,该结果与图7优化结果一致。

图11为双向搜索改进A*算法二次优化路径,青色实线为优化后的最终路径,该结果与图8优化结果一致。同样,该路径不存在拐点,可以保证机器人速度平稳,行走稳定至目标点。

通过上述仿真可知在防刮碰障碍物扩展子节点方法的基础上进行A*算法避障路径设计,双向搜索与单向搜索相比,二者搜索路径长度基本相同,均为70.1838,但双向搜索节点数从901减少到670,明显减少,说明双向搜索比单向搜索效率高。双向搜索改进评价函数相比基础评价函数,或相比文献[14-19]中的A*改进算法生成的路径,虽然长度从70.1813增加到78.4262,有所增加,但搜索节点从

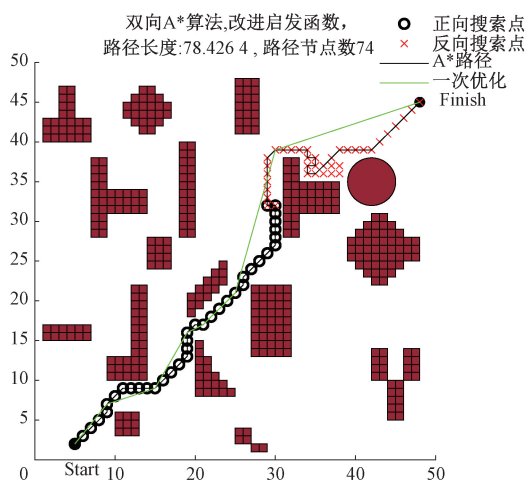


图 10 双向搜索 A* 改进算法一次优化路径

Fig. 10 Path optimized for the first time by bidirectional improved A* algorithm

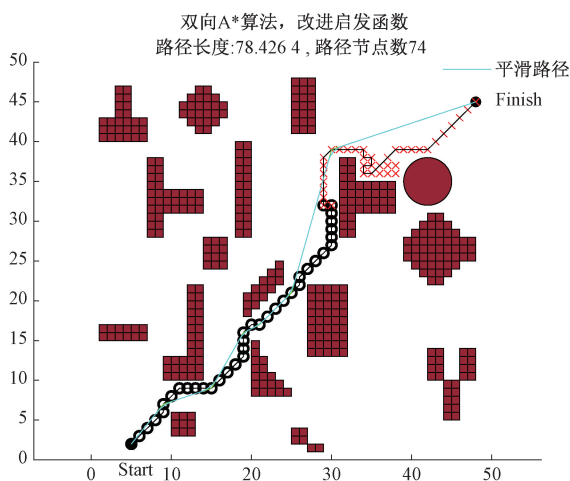


图 11 双向搜索 A* 改进算法二次优化路径

Fig. 11 Path optimized for the second time by bidirectional improved A* algorithm

670 减少到 74, 大量急剧减少, 搜索节点数相比基本算法和文献中的 A* 改进算法生成的路径节点数少一个数量级, 基于双向搜索改进 A* 算法生成的避障路径效率更高。

6 结 论

全文基于 A* 算法, 首先, 在考虑了机器人自身尺寸与体积前提下, 给出了一种防刮碰撞障碍物边界的节点扩展方法。然后, 将 A* 算法的单向搜索改进成起点到终点和终点到起点的同时双向搜索方式, 并将搜索进程中的“终点”设置为正反向同步搜索的当前点, 并将当前点和当前终点的距离引入评价函数。最后, 在双向搜索 A* 改进算法得出的路径基础上, 进行路径优化, 先进行路径冗余点的去除, 再将路径拐点设计成圆弧过渡路径。仿真结果表明, 基于上述方法得到的避障路径搜索面积小、搜索节点少、搜索

效率高, 且路径平滑稳定, 易于机器人完成避障路径行走, 为机器人真实场景避障行走控制系统算法设计提供了理论依据和支持。

参考文献

- [1] 高九州, 徐威峰, 张立辉, 等. 基于改进 A* 算法的无人机避障航线规划[J]. 现代电子技术, 2023, 46(8): 181-187.
GAO J ZH, XU W F, ZHANG L H, et al. Obstacle avoidance route planning of UAV based on optimized A* algorithm[J]. Modern Electronic Journal, 2023, 46(8): 181-187.
- [2] 高九州, 张焯. 基于改进 A* 算法的无人机三维空间避障路径规划[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 203-211.
GAO J ZH, ZHANG ZH. Obstacle avoidance path planning of UAV in 3D space based on improved A* algorithm[J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31(12): 203-211.
- [3] 高九州, 徐威峰. 基于改进 A* 算法的无人机自主避障路径规划[J]. 技术应用, 2024, 31(1): 38-44.
GAO J ZH, XU W F. Obstacle avoidance path planning of UAV based on improved A* algorithm[J]. Technology and Market, 2024, 31(1): 38-44.
- [4] 董箭, 初宏展, 卢杭樟, 等. 基于 A 星算法的无人机路径规划优化模型研究[J]. 海洋测绘, 2021, 41(3): 28-31.
DONG J, CHU H SH, LU Y ZH, et al. Optimization model of UAV path planning based on A* algorithm[J]. Marine Mapping, 2021, 41(3): 28-31.
- [5] 霍凤财, 迟金, 黄梓健, 等. 移动机器人路径规划算法综述[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2018, 36(6): 639-647.
HUO F C, CHI J, HUANG Z J, et al. Review of path planning for mobile robots[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2018, 36(6): 639-647.
- [6] 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.
ZHANG J G, ZHANG F, CHEN L G, et al. Path planning of automatic guided vehicle based on improved A* algorithm[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(1): 123-128.
- [7] 王志明. 无人机路径规划算法研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2019.
WANG ZH M. Research on UAV path planning algorithm[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2019.
- [8] 万怡华, 张雪梅. 混合多策略改进蚁群算法的避障路径

- 规划[J]. 电子测量技术, 2024, 47(2): 69-78.
- WAN Y H, ZHANG X M. Obstacle avoidance path planning of hybrid multi-strategy improved dung beetle optimizer[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(2): 69-78.
- [9] 张志文, 张鹏, 毛虎平, 等. 改进 A* 算法的机器人路径规划研究[J]. 电光与控制, 2021, 28(4): 21-25.
- ZHANG ZH W, ZHANG P, MAO H P, et al. Research on robot path planning with improved A* algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(4): 21-25.
- [10] 王旭扬, 梁志伟, 高翔, 等. 基于改进 DWA 算法的足球机器人局部轨迹规划[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(8): 1-9.
- WANG X Y, LIANG ZH W, GAO X, et al. Local trajectory planning of soccer robot based on improved DWA algorithm[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(8): 1-9.
- [11] ANDRÉS E, GONZÁLEZ-ARRIBAS D, SOLER M, et al. Informed scenario-based RRT for aircraft trajectory planning under ensemble forecasting of thunder storms[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 129: 103232.
- [12] 吴健. 基于 A-star 改进路径规划算法研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.
- WU J. Research on improved path planning algorithm based on A-star[D]. Ma'an Shan: Anhui University of Technology, 2019.
- [13] 宋晓茹, 任怡悦, 高嵩, 等. 移动机器人路径规划综述[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(4): 1-5.
- SONG X R, REN Y Y, GAO S, et al. Path planning of mobile robot [J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(4): 1-5.
- [14] KE D, LIU X Y, ZHANG B. Variable step length A* algorithm for path planning of mobile robot[C]. 2017 29th Chinese Control and Decision Conference. Chongqing: IEEE, 2017: 973-977.
- [15] JING X R, YANG X J. Application and improvement of heuristic function in A* algorithm[C]. 2018 37th Chinese Control Conference, 2018: 483-486.
- [16] 田华亭, 李涛, 秦颖. 基于 A* 改进算法的四向移动机器人路径搜索研究[J]. 控制与决策, 2017, 32(6): 1007-1012.
- TIAN H T, LI T, QIN Y. Research on path Search for four-way mobile robot based on improved A* algorithm[J]. Control and Decision, 2017, 32(6): 1007-1012.
- [17] 张红梅, 李明龙, 杨乐. 基于改进 A* 算法的移动机器人安全路径规划[J]. 计算机仿真, 2018, 35(4): 319-324.
- ZHANG H M, LI M L, YANG L. Safe path planning for mobile robot based on improved A* algorithm[J]. Computer Simulation, 2018, 35(4): 319-324.
- [18] 赵晓, 王铮, 黄程侃. 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.
- ZHAO X, WANG ZH, HUANG CH K. Path planning of mobile robot based on improved A* algorithm[J]. Robot, 2018, 40(6): 903-910.
- [19] 张敬寒, 陶兆胜, 彭澎. 基于扩大搜索邻域 A* 算法的平滑路径规划[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(6): 124-127.
- ZHANG J H, TAO ZH SH, PENG P. Smooth path planning based on extended search neighborhood A* algorithm[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 41(6): 124-127.
- [20] 张帅, 李学仁, 张鹏, 等. 基于改进 A* 算法的无人机航迹规划[J]. 飞行力学, 2016, 34(3): 39-43.
- ZHANG SH, LI X R, ZHANG P, et al. UAV path planning based on improved A* algorithm[J]. Flight Mechanics, 2016, 34(3): 39-43.
- [21] KUSUMA M, MACHBUB C. Humanoid robot path planning and rerouting using A-Star search algorithm[C]. IEEE International Conference on Signals and Systems, Bandung, 2019: 110-115.
- [22] ALAM M A, FARUQ M O. Finding shortest path for road network using Dijkstra's algorithm [J]. Bangladesh Journal of Multidisciplinary Scientific Research, 2019, 1(2): 41-45.
- [23] 杨奇峰, 曲道奎, 徐方. 基于障碍物运动预测的移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(1): 182-188.
- YANG Q F, QU D K, XU F. Path planning of mobile robot based on obstacle motion prediction [J]. Computer Engineering and Design, 2021, 42(1): 182-188.
- [24] 胡中华, 许昕, 陈中. 无人机三维航迹非均匀三次 B 样条平滑算法[J]. 控制工程, 2020, 27(7): 1259-1266.
- HU ZH H, XU X, CHEN ZH. Non-uniform cubic B-spline curves interpolation for UAV 3D track smoothing[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(7): 1259-1266.

作者简介

高九州(通信作者), 博士, 讲师, 主要研究方向为导航制导与控制、自动化控制等。

E-mail: gaojiuzhou@126.com

刘育航, 硕士研究生, 主要研究方向为导航制导与控制。

E-mail: 565182408@qq.com