

改进 A* 算法的仓储 AGV 路径规划研究

陈思颖, 刘为国, 朱洪波

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

摘要:目的 针对仓储 AGV 路径规划, 传统的 A* 算法存在遍历节点数多、转弯次数较多、规划路径过障碍物顶点导致实际环境中容易与障碍物发生碰撞等问题, 提出一种改进的 A* 算法。方法 该算法通过改变存在障碍物邻域时的可扩展节点搜索方向来避免所规划路径经过障碍物顶点, 引入当前节点与目标点之间的障碍率和当前节点与目标点间距离占起始点与目标点间距离的比重来协同动态调节启发函数。利用折线优化法去除路径多余节点, 利用改进二次 Bezier 曲线拟合规划路径, 优化路径平滑度。结果 MATLAB 仿真结果表明: 改进的 A* 算法有效避免接触障碍物, 转折次数更少且路径更加平滑。改进的算法相较于传统 A* 算法, 路径规划效率提高 37.99%, 转折次数减少 41.67%, 遍历节点数减少 8.11%。结论 改进传统 A* 算法可以减少一定的路径规划时间和节点搜索数量, 同时优化 AGV 转弯次数和路径平滑度。利用改进 A* 算法能够使仓储 AGV 在路径规划过程中更具有方向性地向目标点搜索路径。

关键词: 仓储 AGV; 路径规划; A* 算法; 折线优化; Bezier 曲线

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A doi: 10.16055/j.issn.1672-058X.2026.0004.016

Study on Warehouse AGV Path Planning with Improved A* Algorithm

CHEN Siying, LIU Weiguo, ZHU Hongbo

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China

Abstract: Objective In the context of path planning for automated guided vehicles (AGVs) in warehouses, the traditional A* algorithm suffers from several issues. These include a high number of node expansions, excessive turning points, and paths that cut across obstacle vertices, which can easily lead to collisions in real-world environments. To address these problems, an improved A* algorithm is proposed. **Methods** First, to prevent the planned path from passing through obstacle vertices and thus reduce collision risks, the search direction for expandable neighbor nodes was modified when obstacles were present in the neighborhood. The heuristic function was dynamically adjusted through the combination of two factors: the obstacle ratio between the current node and the target node, and the distance ratio of the current-to-target segment to the start-to-target segment. After the initial path was generated, redundant nodes were removed using a polyline optimization method, and the path was smoothed by fitting it with an improved quadratic Bezier curve. **Results** MATLAB simulation results demonstrated that the improved A* algorithm effectively avoided obstacle contact, achieved fewer turns,

收稿日期: 2024-05-08 修回日期: 2024-08-18 文章编号: 1672-058X(2026)04-0119-07

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62003001)。

作者简介: 陈思颖(1998—), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 从事智能机器人技术研究。

通信作者: 刘为国(1977—), 男, 安徽合肥人, 硕士, 副教授, 从事微机监控和火灾报警等研究。Email: weiguoliu327@163.com。

引用格式: 陈思颖, 刘为国, 朱洪波. 改进 A* 算法的仓储 AGV 路径规划研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2026, 43(4): 119-125.

Chen Siying, Liu Weiguo, Zhu Hongbo. Study on warehouse AGV path planning with improved A* algorithm[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2026, 43(4): 119-125.

and produced a smoother path. Compared with the traditional A* algorithm, the improved algorithm achieved a 37.99% increase in path planning efficiency, a 41.67% reduction in the number of turns, and an 8.11% reduction in the number of traversed nodes. **Conclusion** The improved A* algorithm can reduce path planning time and the number of searched nodes to a certain extent, while also optimizing the number of AGV turns and path smoothness. Moreover, it enables warehouse AGVs to search for paths more directionally toward the target point during the path planning process.

Keywords: warehouse AGV; path planning; A* algorithm; polyline optimization; Bezier curve

自动引导车(Automated Guided Vehicle, AGV)是配备电磁、光学或者GPS等导航设备,可在无人操作的情况下,按照既定路线自动行驶的搬运车^[1-2],被广泛应用于仓储、医疗、制造等行业,有广阔的发展前景^[3-5]。近年来,随着社会需求增长,物资生产和运输规模不断扩大,基于仓库物资搬运难、成本高、效率低等问题,仓储AGV的应用需求不断扩大^[6-7]。仓储AGV的工作效率受到多种因素影响,路径规划作为影响因素之一,也是当前AGV研究的热点之一。

目前,遗传算法^[8]、蚁群算法^[9]、人工势场算法^[10]、A*算法^[11]等是国内外研究路径规划的常见算法,这些算法各具优缺点,许多学者对这些算法缺点进行分析、改进以适应不同场合的需求。遗传算法易于并行化处理,能够通过基因交叉和变异操作进行全局搜索最优解,适合解决复杂、多维、非线性问题^[12];蚁群算法具有良好的鲁棒性和自适应性^[13],适用于动态环境下的优化,但是参数设置相对复杂,需要较多的调参和实验^[14];人工势场算法简单直观,能够避开障碍物,具有一定的实时性,但是可能出现局部最优解问题且参数设置和调整相对困难,需要根据具体应用进行优化^[15]。相较于遗传算法、蚁群算法、人工势场算法,A*算法简单且易于实现,可以在较短时间内找到最优路径,一直被广泛应用于各种AGV的路径规划。但是传统的A*算法存在拐点过多、遍历节点数多、转折点过障碍物等问题,且启发式函数的选择可能影响算法的性能。

为了解决传统A*算法的缺点并挖掘其可能的改进方案,许多学者展开了研究。谢春丽等^[16]为了提高搜索效率,通过引入跳点概念进行跳点搜索方式来改进评价函数,通过引入最小堆数据结构方法改良开放列表的最小值运算,进行最小代价值的筛选,以减少计算量,加快算法运算,最后通过改进的贝塞尔曲线对轨迹进行优化,以保证规划的路径满足机器人运动可行性,但是所规划的路径会出现经过障碍物边界的情况,本文通过改进扩展节点搜索方式有效避免路径接触障碍物。缪殷俊等^[17]为了使AGV安全高效到达目标点,通过加入权重系数对启发函数进行改进来动态调节启发函数,对搜索邻域进行优化,根据目标点方向将八方

向搜索变为五方向搜索来提高搜索效率,使用关键点提取策略去除冗余节点,最后对路径过程中的障碍物进行膨胀处理以避免机器人规划路径与障碍物碰撞,但是算法没有对路径进行平滑优化,不能很好地模拟AGV在实际环境中的运行,本文在进行路径规划后利用二次Bezier曲线进行路径平滑优化处理,使AGV行驶路径更加平滑。王迈新等^[18]针对传统A*算法规划路径时存在的问题,引入AGV从起点行驶至当前点的路径长度和起点行驶至当前点的父节点的时间成本对代价函数进行改进,减少转弯次数,搜索节点时去除障碍物顶点的子节点,让AGV与障碍物保持安全距离,利用45°圆弧和90°圆弧代替折线转弯使路径更加平滑,但是没有考虑当前节点与目标点之间障碍物占比对启发函数的影响,本文考虑当前节点到目标点的距离及障碍率对路径规划的综合影响,对启发函数进行改进。

基于以上文献的研究成果,为了解决传统算法存在的问题,提高仓储AGV的工作效率,提出了一种面向仓储AGV路径规划的改进A*算法,模拟仓储环境进行建模,改进启发函数,删除路径上不必要的节点,对规划后的路径进行平滑处理。经过仿真结果对比分析,改进的路径规划算法相比传统的A*算法在进行规划时遍历节点减少,转弯次数减少,路径规划效率提高,并且路径更为平滑。

1 模型建立与算法改进

1.1 环境地图建模

进行移动机器人路径规划的第一步是根据实际地图环境特点选择适合的建模方法来构建环境地图模型。常见的建模方法包括拓扑地图、特征地图和栅格地图等^[19-20]。拓扑地图建模主要是通过点和线的连接来抽象化地图,忽略了地图元素的几何形状等特征,用点来表示真实地图中的重要信息。特征地图建模是利用机器人采集到的真实环境信息,从中提取关键的几何特征信息进行建模。栅格地图建模则是将真实环境地图信息进行栅格化处理,用大小一致的方格模拟真实地图尺寸,通过不同的栅格颜色和相同尺寸的单位栅格组成的不同形状模拟真实地图中的信息。

栅格地图建模简单且方便维护,考虑仓储地图环

境相对简单,本文根据实际仓储货位布局特点,采用栅格地图建模方法模拟实际仓储环境建立地图模型,如图1所示,后续的路径规划在此地图上进行。栅格地图中的黑色区域(不可通行)代表地图中的障碍物,即反映了实际仓储地图环境中的货位布局,不同大小的障碍物对应于不同货物的存放位置,白色区域表示可进行路径规划区域,即仓储机器人的可通行区域,栅格地图的尺寸为 20×20 ,单位栅格的边长为1 m。

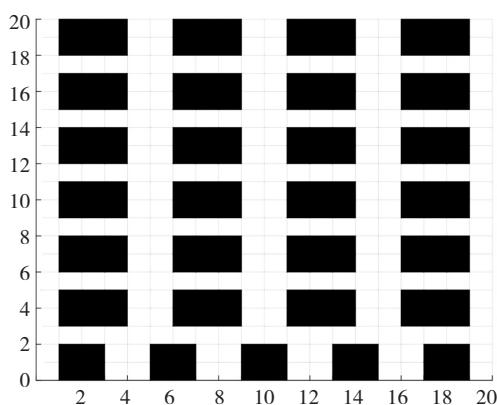


图1 20×20 的栅格地图

Fig. 1 20×20 grid map

1.2 A* 路径规划算法

1.2.1 传统A*算法

A*算法是一种典型的启发式搜索算法,融合了广度优先搜索和深度优先搜索的优点^[21],可以高效地在环境地图中找到起点到目标点的最短路径。传统A*算法的估价函数为

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

式(1)中, $f(n)$ 描述了从起点到达目标点经过点 n 的总路径成本, $g(n)$ 表示从起点到达当前点 n 的实际路程成本,而 $h(n)$ 则估计当前点 n 到目标点的距离代价。不同的估价函数会影响算法的性能和效率,当 $g(n) > h(n)$ 时,算法倾向于找到最短路径,但是效率下降,当 $g(n) < h(n)$ 时,算法的效率增加,但是可能不是最短路径。A*算法在计算距离时常使用曼哈顿距离、切比雪夫距离和欧式距离:

$$d = |x_2 - x_1| + |y_2 - y_1| \quad (2)$$

$$d = \max(|x_2 - x_1|, |y_2 - y_1|) \quad (3)$$

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4)$$

曼哈顿距离适合四个方向搜索的路径规划,即机器人只能沿上、下、左、右四个方向移动;欧式距离适合八个方向搜索的路径规划,即机器人能沿上、下、左、右,以及与竖直方向呈 45° 角斜向上、斜向下的移动,甚

至机器人移动自由度更高的复杂路径规划。本文为八方向搜索路径规划,采用欧式距离进行移动机器人的路径规划。

1.2.2 改进A*算法

(1) 路径远离障碍物顶点改进。本文用传统的A*算法进行八邻域扩展节点路径规划时会出现路径斜穿障碍物顶点的问题,当AGV在实际环境地图中行走时,可能会与障碍物发生碰撞,针对这个问题本文提出改进的远离障碍物顶点的方法。

在当前节点进行邻域扩展时,若邻域节点里存在障碍物点,当存在竖直向上的可扩展节点,则将左上、右上的可扩展节点的 x 坐标和 y 坐标置0;若存在竖直向下的可扩展节点,则将左下、右下的可扩展节点的 x 坐标和 y 坐标置0;若存在水平向左的可扩展节点,则将该扩展节点上方、下方的可扩展节点的 x 坐标和 y 坐标置0;若存在水平向右的可扩展节点,则将该扩展节点上方、下方的可扩展节点的 x 坐标和 y 坐标置0,在选择扩展节点时,不考虑坐标为(0,0)的扩展点。

如图2所示,虚线为未改进算法的规划路径,实线为改进后的规划路径。在起始点进行节点扩展时,未改进算法会选择 $f(n)$ 最小的点,即图中点(2.5, 2.5)作为下一个当前节点,此时路径就会斜穿障碍物顶点。而改进算法将点(2.5, 2.5)的坐标变为(0,0),在进行扩展点选择时,将该点视为不可选择的点,这样就会优先选择图中点(2.5, 1.5)作为下一个当前节点,从而避免路径穿过障碍物顶点,但此改进会增加拐弯次数和路径节点。

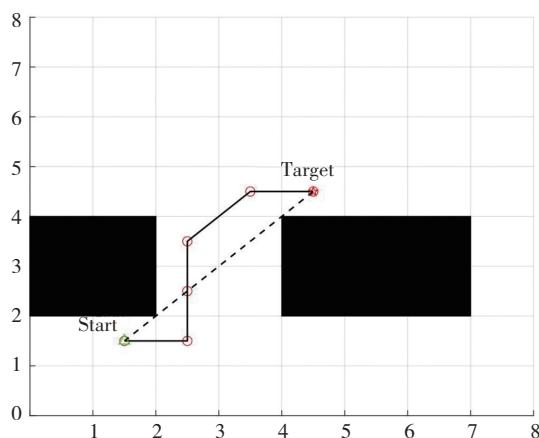


图2 远离障碍物顶点改进

Fig. 2 Improved path planning with obstacle vertex avoidance

(2) 估价函数改进。定义障碍率 P 为以当前节点 n 和目标点为顶点的矩形区域中障碍物所占比例,则:

$$P = \frac{O}{C \times K} \quad (5)$$

式(5)中, C 为当前点到目标点的横向距离, K 为当前点到目标点的纵向距离, 单位障碍物的面积为 1, 障碍物的个数 O 表示障碍物所占面积。定义当前点到目标点的欧几里得距离为 d_1 , 起始点到目标点的欧几里得距离为 d_2 , 则改进后的估价函数为

$$f(n) = g(n) + \left(1 - \lg P - \frac{d_1}{d_2}\right) \times h(n) \quad (6)$$

在为选择的子节点计算扩展点的 $f(n)$ 时,

$$g(n) = g(n-1) + c \quad (7)$$

式(7)中, $g(n-1)$ 为起始点到当前点的实际代价, c 为当前点到扩展点的实际代价。通过增加权重, 可以用障碍率和当前点到目标点的距离变化来协同动态调节综合距离, 当障碍物较多时, 在保证朝着目标点搜索的情况下, 会优先选择障碍率较低的路径。

(3) 折线优化。经过路径无触碰障碍物顶点改进, 路径上不必要的节点和拐弯次数增加, 路径长度也增加, 因此需要对路径进一步优化, 去除不必要的节点, 减少转弯次数, 具体步骤如下:

① 取出路径点集合里的第一个点作为当前点 A , 取出该点的父节点作为父节点 B , 该点的父节点的父节点作为点 C 。

② 比较向量 AB 和向量 BC 之间的夹角 θ 。

③ 若 $\theta=0$, 则 A 、 B 、 C 三点在一条直线上, 删除点 B , 修改点 A 的父节点的父节点 C 为该点的父节点 B ; 若 $\theta \neq 0$, 判断点 A 和点 C 连线之间是否有障碍物, 若有障碍物则设父节点 B 为当前点 A ; 无障碍物则删除点 B , 修改点 A 的父节点的父节点 C 为该点的父节点 B 。

④ 重复以上步骤, 得到新的路径点集合。

(4) 路径平滑处理。经过折线优化后, 所规划路径转折点减少, 为了更好地模拟移动机器人在真实环境中的平滑移动, 本文通过改进二次 Bezier 曲线对路径进行平滑优化处理。Bezier 曲线的数学方程式为

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(t), (0 \leq t \leq 1) \quad (8)$$

$$B_{i,n}(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} \times t^i \times (1-t)^{n-i} \quad (9)$$

式(8)中, P_i 为各顶点位置向量, 式(9)中 $B_{i,n}(t)$ 为曲线的基函数, n 为次数。此时由公式可知, 三个顶点可定义一个二次 Bezier 曲线, 表达式为

$$P(t) = (1-t)^2 \times P_0 + 2t(1-t)P_1 + t^2 \times P_2, (0 \leq t \leq 1) \quad (10)$$

P_0, P_2 表示转折路径的端点, P_1 表示转折点。若以此函数进行拟合, 如图 3 所示的黑色曲线, 此时拟合的曲线只经过路径端点, 不符合实际情况且会经过障碍物。因此本文取转折点两边路径上的两个点 Q_0 和 Q_2 , 进行二次 Bezier 曲线拟合, 如图 3 中红色曲线所示。经过仿真对比得出, 取距顶点 0.5 的两个点既能平滑路径, 又不会经过障碍物。

$$Q_0 = P_2 - \frac{1}{2L_1} \times (P_2 - P_1) \quad (11)$$

$$Q_2 = P_2 - \frac{1}{2L_2} \times (P_2 - P_3) \quad (12)$$

式(11)中, L_1 为线段 P_2P_1 的长, 式(12)中 L_2 为线段 P_2P_3 的长。

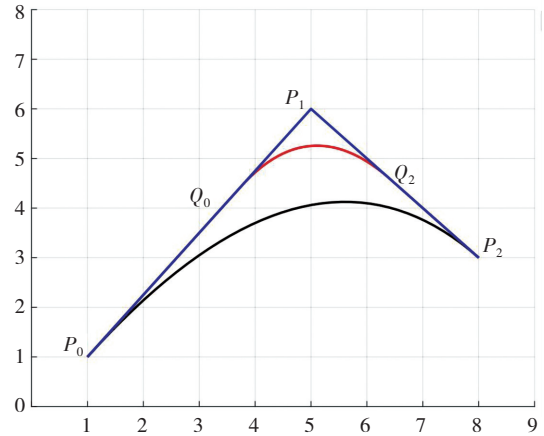


图 3 二次 Bezier 曲线拟合

Fig. 3 Quadratic Bezier curve fitting

2 仿真实验与结果分析

2.1 仿真实验

为了验证改进的 A* 算法在仓储 AGV 路径规划中的有效性, 在 MATLAB 2023b 环境中建立了栅格地图并进行了仿真实验。实验所用的计算机配置为 WINDOWS 11 系统, 搭载 Intel (R) Core (TM) i7 - 12700H 处理器, 主频 2.30 GHz, RAM 16 GB。

图 4 为 20×20 地图规模下传统算法和改进算法的路径规划仿真结果对比图, 图 5 为文献[22]中算法的仿真结果图。在进行地图建模时用 0、1 矩阵进行地图环境设置, 矩阵的行数与列数相等。0 表示可通行区域, 即图中的白色区域; 1 表示障碍物, 设置填充颜色为黑色, 代表实际仓储环境的货位。设置起点位置为第 3 行第 1 列的中点位置, 即图中坐标 (0.5, 2.5); 设置终点位置为第 20 行第 20 列的中点位置, 即图中坐标 (19.5, 19.5)。

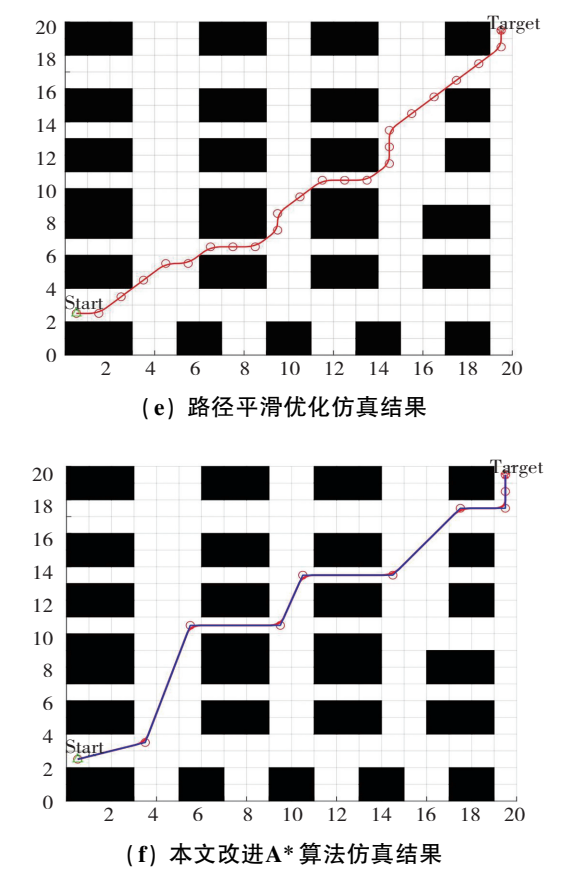
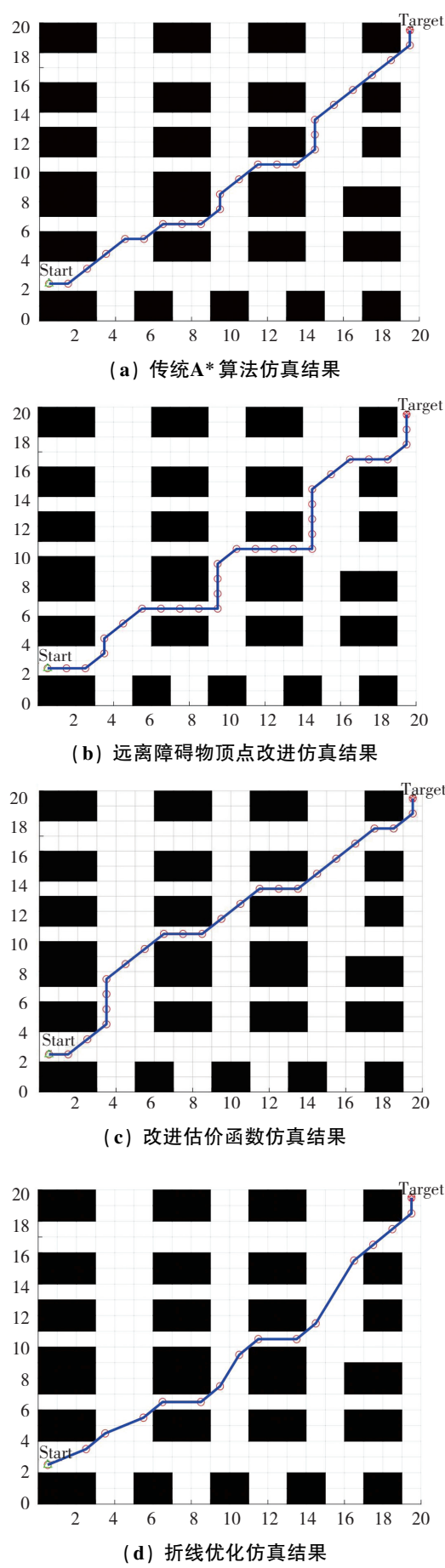


图 4 20×20 地图规模下传统A* 算法与改进A* 算法的路径规划仿真结果

Fig. 4 Comparison of path planning simulation results between the traditional and improved A* algorithms on a 20×20 map

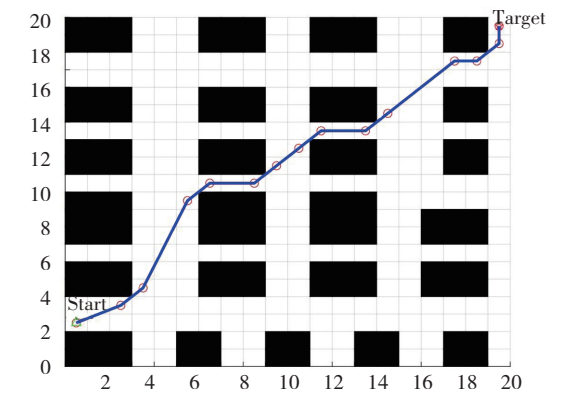


图 5 文献[22]中算法的路径规划仿真结果

Fig. 5 Simulation results of path planning using the algorithm in reference [22]

2.2 结果分析

通过图 4 中的仿真图对比发现,路径远离障碍物点改进能使规划路径很好地远离障碍物顶点,但是会造成拐弯次数、路径长度、遍历节点数和路径节点增加。本文改进后的算法所规划的路径总体上比传统算

法规划的路径转折次数减少,路径更加平滑且远离障碍物顶点。通过图 4 和图 5 仿真结果图对比,本文所规划的路径比文献[22]中的算法所规划的路径更加安全且更加平滑。

表 1 为不同改进方法仿真的路径规划时间、路径长度、转弯数、遍历节点数和路径节点数统计表,表 2 为不同算法的实验结果统计表。通过对表 1 中数据分析,改进估价函数,路径规划的效率提高了 55.32%、转折次数减少 16.67%、遍历节点数减少 4.05%。折线优化使路径规划效率提升 31.44%,路径长度减少 3.14%,路径节点数减少 33.33%。路径平滑优化增加了路径平滑度,使路径长度减少且更好地模拟了 AGV 在实际环境中的转弯运动。通过对表 2 中数据进行分析,本文改进算法比文献[22]中算法的转折次数少,路径节点数少。相较于传统 A* 算法,本文改进算法提高了 37.99% 的路径规划效率,减少了 41.67% 的转折次数,减少了 8.11% 的遍历节点数,虽然路径长度有所增加,但是转折次数的减少会使得 AGV 在实际环境中移动时间更短。

表 1 不同改进方法的实验结果

Table 1 Experimental results of different improved methods

改进方法	规划时间 /s	路径长度 /m	转折 次数	遍历节 点数	路径节 点数
远离障碍物	0.014 871	31.899 5	14	211	30
改进估价函数	0.007 265	28.384 8	10	142	24
折线优化	0.011 147	27.494 0	12	148	16
路径平滑优化	0.017 344	27.783 5	12	148	24

表 2 不同算法的实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results for different algorithms

算 法	规划时间 /s	路径长度 /m	转折 次数	遍历节 点数	路径节 点数
传统 A* 算法	0.016 259	28.384 8	12	148	24
文献[22]算法	0.005 318	27.763 4	10	91	15
本文改进算法	0.010 082	30.604 7	7	136	10

3 结论与展望

3.1 结 论

随着科学技术进步和社会的发展,移动机器人逐渐取代了传统人工作业方式,尤其是在人工作业难和复杂场景中。近些年,AGV 的应用范围和应用规模不

断扩大,AGV 仍然是国内外研究的热点。本文根据仓储环境特点,选择较为简单且便于维护的栅格地图建模方法进行建模,针对仓储 AGV 使用中传统 A* 算法进行路径规划时出现路径斜穿障碍物顶点、路径拐弯次数多和搜索节点数多造成 AGV 工作效率低的问题,对传统算法进行改进。首先对规划路径斜穿障碍物顶点进行改进,其次通过引入当前节点与目标点之间的障碍率和当前节点与目标点间距离与起止点距离的比重来协同动态调节启发函数,然后通过折线优化去除多余节点,减少路径转折次数,最后通过改进二次 Bezier 曲线拟合所规划的路径,提高路径的平滑性。通过对 MATLAB 仿真结果进行对比和分析,改进后的 A* 算法相较于传统 A* 算法避免了与障碍物顶点发生碰撞,减少了路径转折次数和遍历节点数,提高了路径规划的效率和平滑度。在仓储环境下,能够提高 AGV 的工作效率,减少仓储成本。

3.2 展 望

随着人工智能和大数据等技术的发展,自动引导车在仓储中的使用规模逐渐扩大,仓储 AGV 的发展呈现出蓬勃之势。本文对仓储 AGV 路径规划进行了理论上的研究,但仍然存在一些局限:

(1) 在大型仓储环境下,一般是多个 AGV 共同协调调度完成物资的搬运和分拣等,本文只针对单个 AGV 路径规划进行算法改进与仿真分析,具有一定的局限性。多个 AGV 路径规划的优化将影响 AGV 的工作效率和仓储成本,也是未来研究的重点。

(2) 由于条件限制本文只对仓储 AGV 路径规划进行计算机模拟仿真,仅进行了理论上的研究,没有在实际环境下进行运行和分析。

参考文献(References):

- [1] Liang C, Zhang Y, DONG L. A three stage optimal scheduling algorithm for AGV route planning considering collision avoidance under speed control strategy[J]. Mathematics, 2022, 11(1): 138.
- [2] Wang T, Dong R, Zhang R, et al. Research on stability design of differential drive fork - type AGV based on PID control[J]. Electronics, 2020, 9(7): 1072.
- [3] 张千里. 我国 AGV 导航技术研究热点与发展趋势可视化分析[J]. 中国储运, 2023(6): 171-172.
Zhang Qianli. Visual analysis of research hotspots and development trends of AGV navigation technology in China[J]. China Storage & Transport, 2023(6): 171-172.
- [4] 苏庆华, 张娣娣, 吴昊, 等. AGV 导航技术综述[J]. 计算

- 机科学与应用, 2022(8): 1990–1997.
- Su Qinghua, Zhang Didi, Wu Hao, et al. Overview of AGV navigation technology[J]. Computer Science and Application, 2022(8): 1990–1997.
- [5] 李贤杰. 汽车厂内物流 AGV 应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017: 1–7, 12.
- Li Xianjie. Research on Application of AGV in Automotive Manufacturing Logistics[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017: 1–7, 12.
- [6] 郝国笑. 智能仓储多 AGV 的控制策略研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021: 1–9.
- Hao Guoxiao. Research on the Control Strategy of Intelligent Warehousing Multi-AGV[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2021: 1–9.
- [7] 周子杨. 仓储搬运机器人路径规划仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020: 1–2.
- Zhou Ziyang. Research on Simulation of Path Planning for Warehouse Handling Robot[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020: 1–2.
- [8] 黄新林, 张隆飞, 唐小伟. 基于改进遗传算法的家电回收车辆路径规划方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 27–34.
- Huang Xinlin, Zhang Longfei, Tang Xiaowei. Path planning method for household appliance recycling vehicle based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2024, 52(1): 27–34.
- [9] Tan Y, Ouyang J, Zhang Z Q, et al. Path planning for spot welding robots based on improved ant colony algorithm[J]. Robotica, 2022, 41(3): 926–938.
- [10] Luo J, Wang Z X, Pan K L. Reliable path planning algorithm based on improved artificial potential field method[J]. IEEE Access, 2022, 10: 108276–108284.
- [11] Zhang D, Chen C, Zhang G. AGV path planning based on improved A-star algorithm[C]// Proceedings of 2024 IEEE 7th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1590–1595.
- [12] Chen Z Z, Xiao J Z, Wang G F. An Effective Path Planning of Intelligent Mobile Robot Using Improved Genetic Algorithm[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 9590367.
- [13] Gong C, Yang Y, Yuan L, et al. An improved ant colony algorithm for integrating global path planning and local obstacle avoidance for mobile robot in dynamic environment[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2022, 19(12): 12405–12426.
- [14] Cheng J. Dynamic path optimization based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Advanced Transportation, 2023, 2023: 1–11.
- [15] Sun Y, Chen W, Lv J. Uav path planning based on improved artificial potential field method[C]//Proceedings of the International Conference on Computer Network, Electronic and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2022: 95–100.
- [16] 谢春丽, 高胜寒, 孙学志. 融合改进 A* 算法和贝塞尔曲线优化的路径规划算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(7): 177–187.
- Xie Chunli, Gao Shenghan, Sun Xuezhi. Path planning algorithm combining improved A* algorithm and Bezier curve optimization[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(7): 177–187.
- [17] 缪殷俊, 施卫. 基于改进 A 星算法的无人车路径规划研究[J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(3): 4–7.
- Miao Yinjun, Shi Wei. Research on path planning of unmanned vehicle based on improved A-star algorithm[J]. Computer Knowledge and Technology, 2024, 20(3): 4–7.
- [18] 王迈新, 闫莉, 李雨菲. 基于改进 A* 算法的车间 AGV 路径规划[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(11): 45–49, 59.
- Wang Maixin, Yan Li, Li Yufei. Path planning of AGV in workshop based on improved A* algorithm[J]. Automation & Instrumentation, 2023, 38(11): 45–49, 59.
- [19] 孙毛毛. 面向智能仓储的 AGV 路径规划方法研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021: 6–8.
- Sun Maomao. Research on AGV Path Planning Method for Intelligent Warehouse[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2021: 6–8.
- [20] 韩冬冬. 面向智能车库的 AGV 路径规划及停车位分配技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022: 12–14.
- Han Dongdong. Research on AGV Path Planning and Parking Space Allocation Technology for Intelligent Garage[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022: 12–14.
- [21] Wang R L, Lu Z Z, Jin Y F. Application of A* algorithm in intelligent vehicle path planning[J]. Mathematical Models in Engineering, 2022, 8(3): 82–90.
- [22] 宋宇, 张浩, 程超. 基于改进 A* 算法的物流机器人算法研究[J]. 长春工业大学学报, 2023, 44(2): 189–192.
- Song Yu, Zhang Hao, Cheng Chao. Research on algorithm of logistics robot based on improved A* algorithm[J]. Journal of Changchun University of Technology, 2023, 44(2): 189–192.

责任编辑:陈芳