

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407880

# 基于柔绳拉伸机制的 A\* 算法路径改进与 AGV 自主导航\*

陈先益<sup>1,2</sup> 原伟峰<sup>1,2</sup> 罗兴桓<sup>1,2</sup>

(1. 厦门理工学院机械与汽车工程学院 厦门 361024; 2. 厦门市机器人系统与数字制造重点实验室 厦门 361024)

**摘要:** 在多障碍物的复杂环境中,传统 A\* 算法在路径规划中存在冗余转向节点的问题,这既增加了路径的长度和复杂性,也不利于自动引导小车 (AGV) 的平稳行走。为此提出了一种基于柔绳拉伸机制的改进 A\* 算法以减少路径节点、提升平滑性。首先,分析了柔绳拉伸的机制,并提取 A\* 算法路径中的关键节点;其次,对非障碍受力点进行退化以减少冗余转向节点,依次拉伸受力点间的路径,简化路径、提高平滑度;最后,对改进后的 A\* 算法进行仿真实验并在 AGV 上进行路径规划自主导航实验。仿真实验结果表明,采用柔绳拉伸机制改进后的 A\* 算法转弯角度减少 59.2%,拐点数量减少 54.2%,路径长度减少 11%,这大幅度的简化并平滑了路径。在 AGV 行走实验中,优化后的 A\* 算法与传统 A\* 算法相比,平均角速度和行驶转向角分别降低 16% 和 33%,且平均行驶轨迹长度和耗时分别减少 2.4% 和 4%。实验表明 AGV 在改进 A\* 算法规划的路径上行走位姿变换的节点和姿态调整幅度都较小,行走的更加柔顺和高效。

**关键词:** A\* 算法;柔绳拉伸机制;路径规划;AGV 自主导航

中图分类号: TP242;TN964

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.80

## Path improvement of the A\* algorithm based on the flexible rope stretching mechanism and AGV autonomous navigation

Chen Xianyi<sup>1,2</sup> Yuan Weifeng<sup>1,2</sup> Luo Xinghuan<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Xiamen Key Laboratory of Robotics Systems and Digital Manufacturing, Xiamen 361024, China)

**Abstract:** In complex environments characterized by multiple obstacles, the traditional A\* algorithm in path planning presents the problem of redundant turning nodes. This not only increases path length and complexity but also hinders the smooth navigation of the AGV. To address these challenges, this study introduces an improved A\* algorithm predicated on the tensile mechanism of a flexible rope, aimed at diminishing path nodes and augmenting trajectory smoothness. First, the mechanism of flexible rope stretching was analyzed, and critical nodes were extracted from the paths generated by the A\* algorithm. Subsequently, the degeneration of non-obstacle force points was executed to minimize redundant steering nodes, followed by the sequential stretching of paths between force points, thereby streamlining the trajectory and enhancing smoothness. Ultimately, the refined A\* algorithm underwent simulation experiments and was applied to AGVs for autonomous navigation path planning experiments. The simulation outcomes demonstrated that the A\* algorithm, refined with the flexible rope stretching mechanism, achieved a 59.2% reduction in turning angles, a 54.2% decrease in the number of turning points, and an 11% reduction in path length, significantly simplifying and smoothing the trajectory. In the AGV navigation experiments, the optimized A\* algorithm, when compared to the traditional A\* algorithm, registered a 16% decrease in average angular velocity and a 33% reduction in driving turning angles, with average travel trajectory length and time reduced by 2.4% and 4%, respectively. Additionally, the average travel trajectory length and time spent are reduced by 2.4% and 4%, respectively. The experiments results show that the AGV experiences smaller node transformations and posture adjustments while following the paths planned by the improved A\* algorithm, leading to smoother and more efficient movement.

**Keywords:** A\* algorithm; flexible rope stretching mechanism; path planning; AGV navigation

收稿日期: 2024-10-10 Received Date: 2024-10-10

\* 基金项目:福建省自然科学基金(2023J011437)、厦门市自然科学基金(2022FCX012503010090)项目资助

## 0 引言

自动引导小车 (automated guided vehicle, AGV) 集光、电、机多种功能为一体, 目前已经成为仓储物流<sup>[1]</sup>、港口码头<sup>[2]</sup>、智能工厂<sup>[3]</sup>和汽车制造<sup>[4]</sup>等领域不可或缺的自动化设备。自主导航是 AGV 的核心技术之一, 主要分为全局路径规划和局部路径规划<sup>[5]</sup>。全局路径规划是一种根据可用的环境地图信息生成一个安全无碰撞的路径, 是 AGV 自主导航的关键参考。全局路径规划的好坏影响着 AGV 移动到目标点的效率。目前全局算法主要包括启发式搜索算法、采样搜索算法和智能算法。启发式搜索算法包括 Dijkstra 算法<sup>[6]</sup>、A\* 算法<sup>[7]</sup>和动态 A\* 算法 (dynamic a algorithm, D\*)<sup>[8-9]</sup>。基于采样搜索算法有快速探索随机树 (rapidly-exploring random tree, RRT) 及其改进版本 RRT\*<sup>[10-11]</sup>等。智能算法近些年被广泛使用, 如粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO)<sup>[12-13]</sup>、遗传算法 (genetic algorithm, GA)<sup>[14-15]</sup>模拟退火算法 (simulated annealing, SA)<sup>[16-17]</sup>等。启发式算法因其效率高、资源消耗和结果最优性, 被广泛使用。A\* 算法相较于其他启发算法在静态环境中计算效率和最短路径上更有优势<sup>[18]</sup>。

然而传统 A\* 算法存在冗余路径较多, 路径转弯次数频繁等问题, 使得 AGV 在导航过程中不仅增加了行驶时间, 而且还可能导致在复杂环境下导航变得困难, 不符合其实际运动需求。为此, 研究人员提出了多种改进, 确保规划的路径更符合 AGV 实际运动特性。文献[19]提出一种拐点优化算法, 在不增加障碍物成本的情况下减少了转弯次数, 并通过四阶贝塞尔曲线进行路径平滑。文献[20]将 A\* 算法与人工势场法相结合, 在复杂场景下减少了路径的转弯次数, 增强了路径的平滑度。以上两种方法虽然减少了路径的转弯次数, 但是存在冗余路径。文献[21]建立了两个滤波器函数来优化冗余路径, 并且用插值法平滑路径, 但是使用的滤波器功能存在局限性并且不常见。文献[22]通过垂距限值法快速删除路径中的冗余路径, 并通过 B 样条曲线拟合关键节点对路径进行平滑。文献[23]对 A\* 算法判断相邻 3 个路径节点的前后两个节点的连线是否经过障碍物来消除冗余点和最小角点。上述 3 种方法从部分路径入手优化路径, 但从整条路线上看还是存在冗余。上述所有学者都是通过路径上的节点互相连接来优化冗余路径, 路径上节点位于地图上网格的中心。路径节点会受到网格大小的限制, 导致路径不够平滑。

针对传统 A\* 算法的规划路径存在冗余点和转弯次数较多等问题, 本文提出一种柔绳拉伸机制平滑路径, 将 A\* 算法规划出的路线比作柔性绳, 提取了路径中的关键

节点。随后, 对非受力的关键点进行退化, 同时保留有效的受力节点, 通过依次拉伸路径来减少冗余的转向节点, 实现路径的平滑。

## 1 传统 A\* 算法

A\* 算法使用启发式函数从栅格地图中寻找路径。每个节点由地图中的一个方块表示, 节点间的移动会产生代价。从起点到达终点的路径依赖启发函数, 选择代价最低的节点, 直到到达目标点, 而每个节点的成本通过以下函数进行计算:

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

式中:  $f(n)$  是节点  $n$  的综合代价, 在选择下一个节点之前, 首先要计算每一个可选节点的优先级;  $g(n)$  是从路径起点到当前节点的实际代价;  $h(n)$  是从节点  $n$  到目标点的估计代价。A\* 算法节点的选择如图 1 所示。S 为起始点, T 为目标点, 绿色方块为当前节点  $n_3$ , 橙色方块为  $n_3$  的邻居节点。

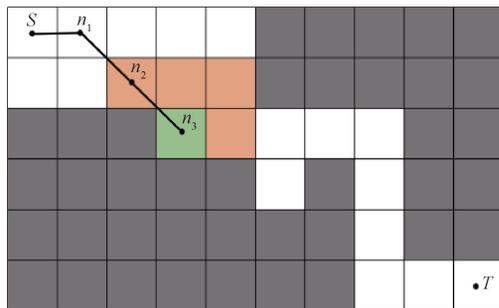


图 1 A\* 算法节点的选择

Fig. 1 Node selection in the A\* algorithm

图 1 中,  $g(n)$  为起始点 S 到当前节点  $n_3$  的代价,  $h(n)$  为前节点  $n_3$  到目标点 T 的估计代价。目前  $h(n)$  常用切比雪夫距离、曼哈顿距离和欧氏距离 3 种计算方式进行计算。然而用这 3 种估计方法与实际代价值存在误差, 可能导致找到的路径冗余, 并且由于地图以栅格形式表示, 寻找的路径往往转弯角度大, 平滑度差, 不利于 AGV 在自主导航平稳移动。

## 2 柔绳拉伸机制改进 A\* 算法

### 2.1 柔绳拉伸机制

柔绳拉伸机制如图 2 所示, 图 2(a) 为柔绳无接触过障碍物的大致形状, 可以看出其折弯点较多, 形状也比较复杂。为了简化该柔绳的形状, 可以在绳子的两端拉伸, 如图 2(b) 所示, 绳子只保留了障碍物的受力点折弯, 而非受力点则被剔除, 并拉伸为直线, 这大幅度减少了折弯

点并简化了柔绳穿过障碍物的形状。

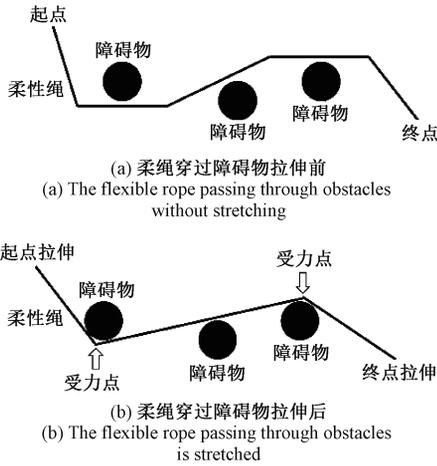


图2 柔绳穿过障碍物拉伸示意图

Fig. 2 Diagram of the stretching of the flexible rope passing through obstacles

图2(a)中柔绳的形状与A\*规划的避障路径相似。为了减少传统A\*算法的路径中的冗余点,提高路径平滑度,通过借鉴柔绳穿过障碍并拉伸简化形状的机制,对A\*路径规划算法进行改进,以简化路径提高平滑度。

### 2.2 A\*算法改进

#### 1) A\*算法关键点提取

A\*算法在地图中得到轨迹如图3所示,S为起始点,T为目标点,路径点集  $N = \{S, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8, n_9, T\}$ 。

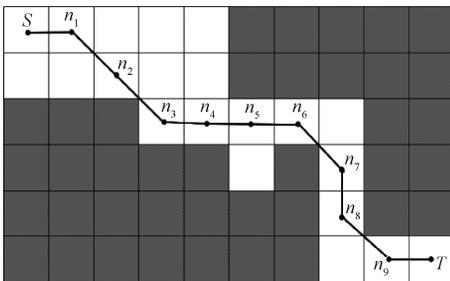


图3 A\*算法规划的路径

Fig. 3 Paths planned by the A\* algorithm

轨迹中存在众多节点,其中只有拐点是关键点,非拐点对路径的影响可以忽略,因此,在轨迹优化过程中,应优先识别并提取拐点。

拐点判定方法如下:设A\*上的任意节点为 $n_x$ ,其前后相邻节点为 $n_{x-1}$ 和 $n_{x+1}$ ,若 $n_x, n_{x-1}$ 和 $n_{x+1}$ 不共线该节点 $n_x$ 为拐点,并将其保留,反之将其剔除。由此,可提取路径上的拐点并组成集合  $M = \{S, n_1, n_3, n_6, n_7, n_8, n_9, T\}$ ,如图4所示。

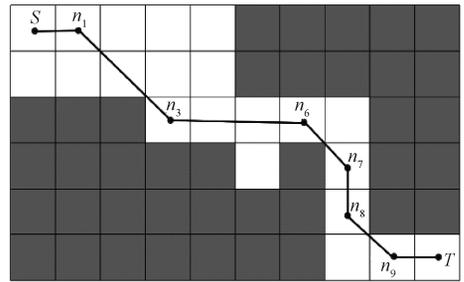


图4 提取关键点结果

Fig. 4 Extraction of key point results

2) 基于柔绳拉伸机制的受力点处理与路径优化  
完成关键点提取之后,根据柔绳拉伸机制对路径中的受力点进行处理,包括非受力点的退化和受力点的补充,以提高路径的合理性。

首先,从起点沿着A\*算法路径进行受力点识别。当检索到的关键点为非受力点时进行退化处理,反之保留。经过该步骤后节点图4中节点 $n_1, n_3, n_6, n_7, n_8, n_9$ 都被剔除。

其次,新增受力点。A\*算法路径上与障碍物的最近点或触碰点为受力点,若受力点为非关键点则在路径上新增受力点。关键点退化后新增受力节点 $k_1, k_2, k_3$ 后的路径如图5所示,其与起、终点S和T共同组成路径点集合  $P = \{S, k_1, k_2, k_3, T\}$ 。

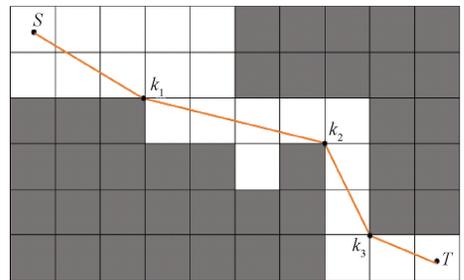


图5 受力点处理示意图

Fig. 5 Force application points processing schematic

完成上述步骤后,虽然已经减少了大量的冗余节点,但仍不够完善。根据柔绳拉伸机制图5中节点S和 $k_2$ 拉伸后 $k_1$ 应该进行退化,以进一步简化路径,此时 $k_1$ 为无效受力点。

无效受力点的退化规则如下(以退化无效受力点 $k_1$ 为例):连接受力点 $k_1$ 两侧的相邻点S和 $k_2$ ,若S和 $k_2$ 组成的线段为无碰撞路径,则 $k_1$ 为无效受力点,将其退化剔除。以此对各受力点进行遍历,最终保留有效受力点。图6所示为最终优化的路径,其路径点集为  $K = \{S, k_2, k_3, T\}$ 。

将柔绳拉伸机制改进A\*算法的整体算法流程如图7所示。

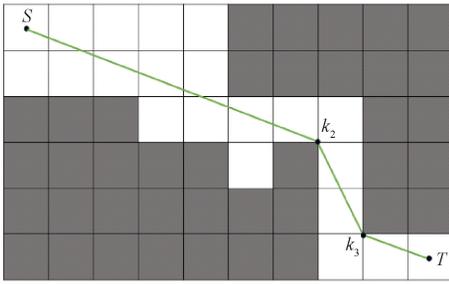


图 6 最终优化路径  
Fig. 6 Final path completion

### 2.3 算法仿真实验

为了验证算法优化思路的有效性,在 i5-8300H 处理器,16 GB 内存的电脑上,使用 MATLABR2023a 平台进行了 3 个不同场景的仿真模拟实验。其中环境使用栅格地图表示,栅格尺寸设为 1,黄色圆圈代表起始点,紫色三角形代表目标点。黑色方块表示障碍物,白色方块表示可行区域。算法的启发函数采用欧氏距离计算方式。将算法运行时间,路径长度,拐点数量,转弯角度作为评价指标。为减少硬件设备对算法运算时间的影响,在每个实验中对各算法进行 10 次仿真运行,取平均值作为最终结果。

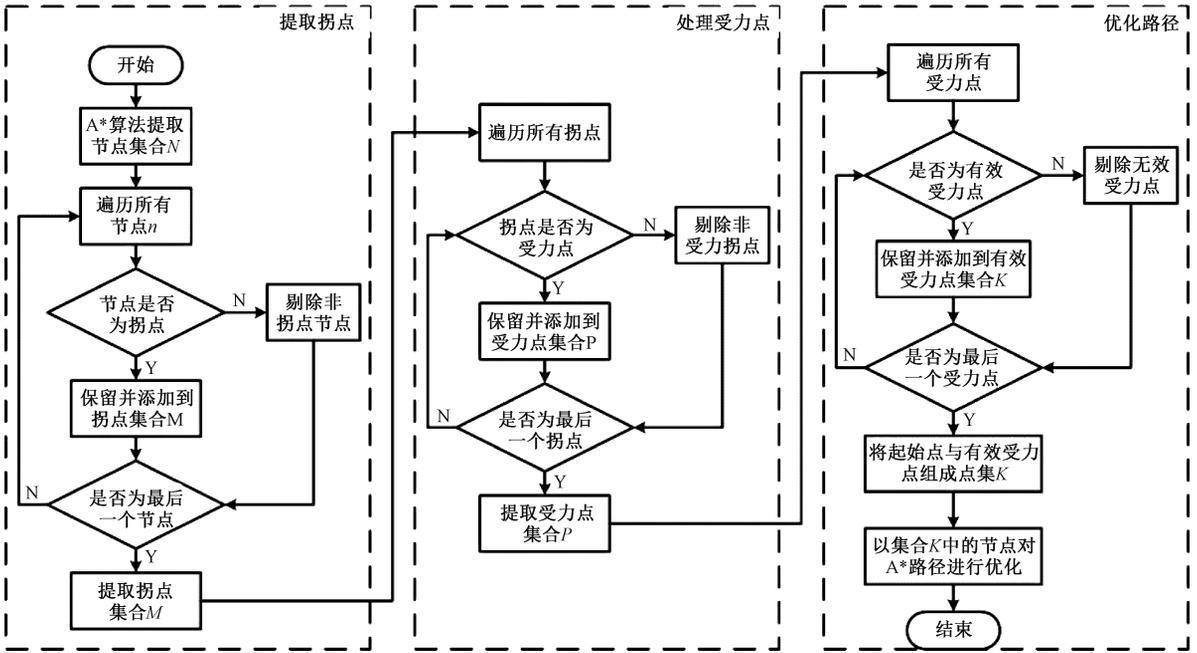


图 7 改进 A\* 算法流程  
Fig. 7 Flowchart of the improved A\* algorithm

连续空间场景实验,采用 40×40 的连续空间障碍地图<sup>[20]</sup>,起点(24,36)至终点(5,35),对比传统 A\* 算法,文献[20]算法以及改进 A\* 算法,结果如图 8 与表 1 所示。

表 1 连续空间障碍地图仿真对比数据

Table 1 Comparative simulation data in continuous obstacle map

算法	运行时间/s	路径长度/m	拐点数量	转弯角度/(°)
传统 A*	2.63	90.67	24	1 080
文献[20]	2.89	90.67	12	540
改进 A*	3.12	85.10	11	441

离散空间场景实验,采用 40×40 的离散空间障碍地图<sup>[23]</sup>,起点(1,38)至终点(38,1),对比传统 A\* 算法,文

献[23]算法以及改进 A\* 算法,结果如图 9 与表 2 所示。

复杂空间场景实验,采用 100×100 的复杂空间障碍地图<sup>[21]</sup>,起点(2,100)至终点(99,5),对比传统 A\* 算法,文献[21]算法以及改进 A\* 算法,结果如图 10 与表 3 所示。

从图 8 与表 1 可以看出,在连续空间场景中,改进 A\* 算法相比传统 A\* 算法在路径长度、拐点数量和转弯角度上分别减少了 11%、54.2%和 59.2%。与文献[20]算法相比,改进 A\* 算法在这些指标上表现更优,显著减少了冗余路径和转弯角度。

在离散空间场景中,由图 9 与表 2 可以看出,与传统 A\* 算法相比,改进 A\* 算法在路径长度、拐点数量和转弯角度上分别减少了 2.1%、70.8%和 66.7%。与文献[23]算法相比改进 A\* 算法同样在上述指标上表现更好,进一

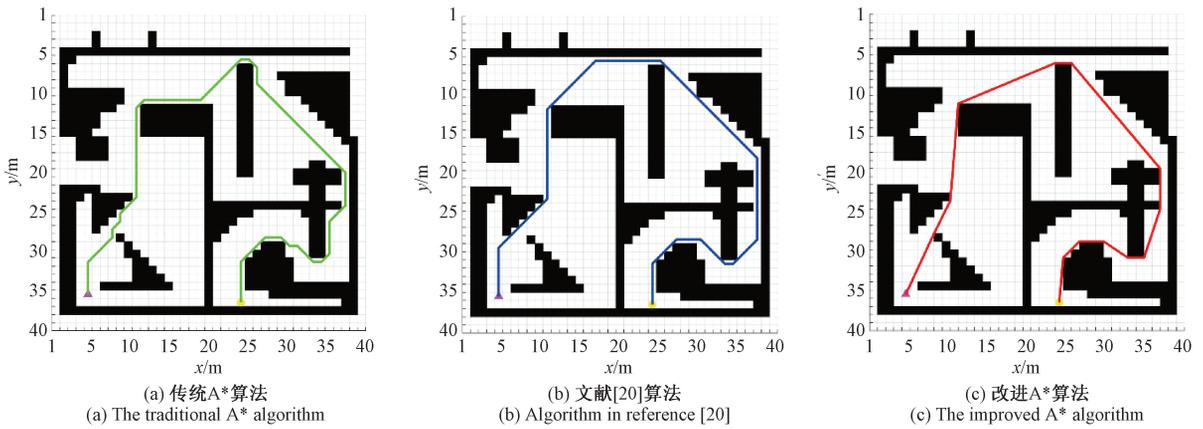


图 8 连续空间障碍地图仿真结果

Fig. 8 Simulation results in continuous obstacle map

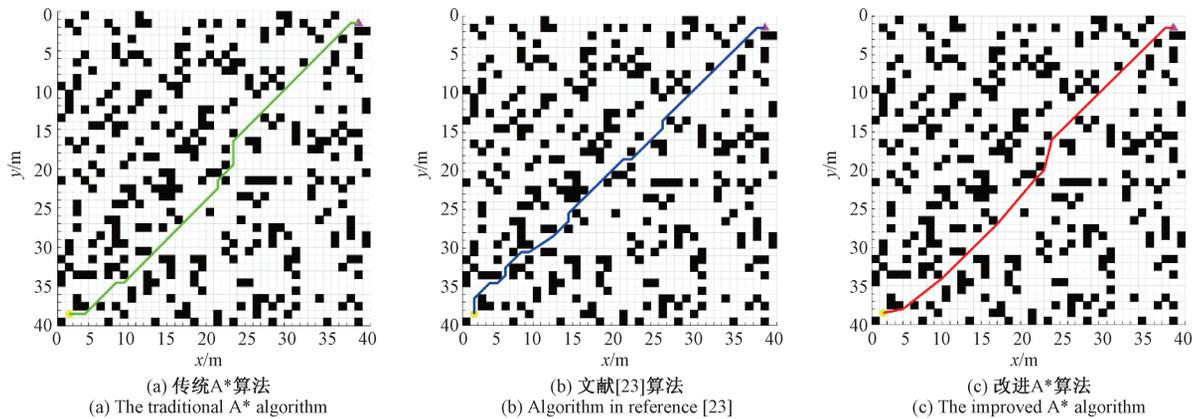


图 9 离散空间障碍地图仿真结果

Fig. 9 Simulation results in discrete obstacle map

步优化了路径质量。

表 2 离散空间障碍地图仿真对比数据

Table 2 Comparative simulation data in discrete obstacle map

算法	运行时间/s	路径长度/m	拐点数	转弯角度/(°)
传统 A*	1.43	54.67	24	360
文献[23]	0.31	55.03	15	630
改进 A*	1.69	53.50	7	120

表 3 复杂空间障碍地图仿真对比数据

Table 3 Comparative simulation data in complex obstacle map

算法	运行时间/s	路径长度/m	拐点数量	转弯角度/(°)
传统 A*	5.72	156.68	36	1575
文献[21]	5.33	147.57	27	1255
改进 A*	6.97	146.91	19	591

在复杂空间场景中,由图 10 与表 3 可以看出,改进

A\* 算法相比传统 A\* 算法在路径长度、拐点数量和转弯角度上分别减少了 6.2%、58.3% 和 62.5%,并且与文献[21]算法相比,改进 A\* 算法同样在这些指标上表现更优,展示了更强的实用性。

综上所述,改进 A\* 算法在不同场景下均表现出减少冗余路径和转弯角度的优势,相较于传统 A\* 算法和其他文献算法具有更好的优化效果。

### 3 实验分析

将改进 A\* 算法和传统 A\* 算法部署在 AGV 上,进行实验验证。首先自主搭建了一个小型 AGV 实验平台,如图 11 所示。

该平台的移动控制器是一台搭载 i5-8300H 处理器的电脑。实验中使用的 ROS 操作系统版本为 Ubuntu 18.04 上的 melodic 版本,所有涉及的算法均基于 C++ 实现。AGV 平台采用阿克曼转向系统,并使用后轮驱动,

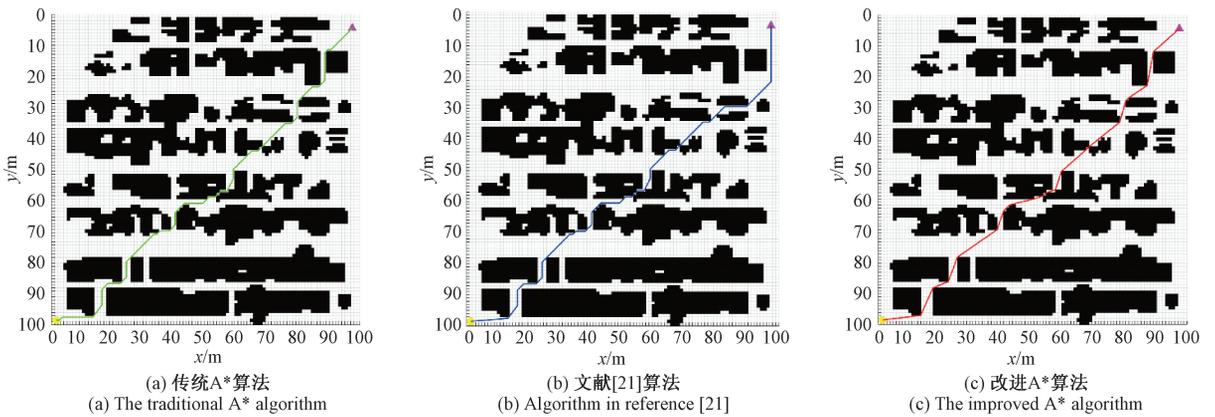


图 10 复杂空间障碍地图仿真结果

Fig. 10 Simulation results in complex obstacle map

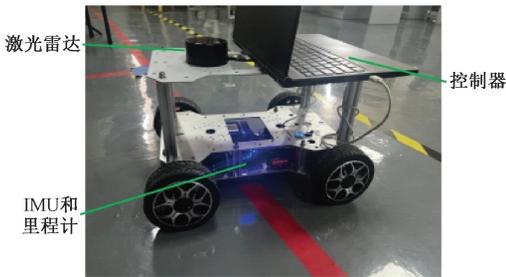
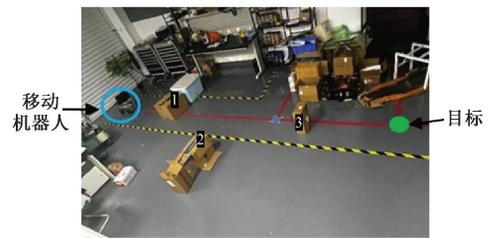


图 11 实验 AGV

Fig. 11 Experimental AGV



(a) 物理实验环境  
(a) Physical experimental environment



(b) 构建环境地图  
(b) Constructing the environmental map

图 12 实验环境及其地图构建

Fig. 12 Experimental environment and map construction

底盘控制器的型号为 STM32F407VET6。AGV 上配备一个 LASERX M10P 的单线激光雷达和惯导系统用于地图构建和自主导航,其中激光雷达具备 12 Hz 扫描速率和  $\pm 3$  cm 测量精度,量程可达 25 m。

为了验证改进 A\* 算法的性能,首先在实验室构建了一个封闭环境,并使用激光雷达和 Cartographer 算法构建二维地图,如图 12 所示。其次,对比传统 A\* 算法与改进 A\* 算法在拐点数量、转弯角度、路径长度和路径生成时间等性能。最后,使用这两种算法分别引导 AGV 自主移动,以观察其对 AGV 的运动性能影响。

### 3.1 两种算法的路线对比分析

首先,分析传统 A\* 算法与柔绳拉伸机制的改进 A\* 算法在规划 AGV 全局路径中的表现。为了进行对比实验,设定相同的起点和终点,图 13 所示为两种算法规划的全局路径,其中绿色线段表示算法规划的路径。

从图 13 可以明显看出,改进 A\* 算法相较于传统 A\* 算法减少了不必要的转弯路径,使路径更加简短且平滑,可以显著提升 AGV 行驶过程中的顺滑度。

记录两种算法在拐点数量、转弯角度、路径生成时间和路径长度的数据,结果如表 4 所示。分析数据可知,改进 A\* 算法相比传统 A\* 算法拐点数量减少了 66.7%,转

弯角度减少了 81.8%,路径长度减少了 7.7%。因此,改进 A\* 算法显著提高了路径的平滑度,并有效减少了冗余路径,使其更适合 AGV 的平稳快速移动。

表 4 全局路径数据对比

Table 4 Global path data comparison

算法	拐点数量	转弯角度/ $^{\circ}$	路径生成时间/ $\mu$ s	路径长度/m
传统 A*	9	526.38	6.75	7.57
改进 A*	2	46.14	7.31	6.49
比较结果	下降 77.8%	下降 9.12%	增长 8.3%	下降 14.3%

### 3.2 两种算法引导 AGV 运动分析

将传统 A\* 算法和改进 A\* 算法作为全局路径规划算法,采用 DWA 算法引导 AGV 跟踪全局路径<sup>[24]</sup>。DWA

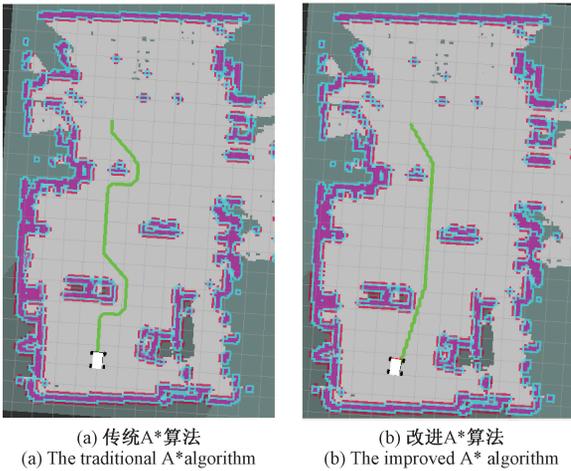


图 13 全局路径对比

Fig. 13 Global path comparison chart

算法作为局部规划算法,通过运动学模型预测 AGV 在一段时间内的运动轨迹。因此,针对阿克曼转向系统的实验 AGV,建立相应的运动学模型。假设实验 AGV 的车身结构为刚体,忽略悬架的耦合动力和轮胎的侧滑问题,以 AGV 后轴中心点为基准,建立 AGV 的车体坐标系,如图 14 所示。以便 DWA 算法能够有效预测 AGV 的运动路径,减少实验过程中的误差。

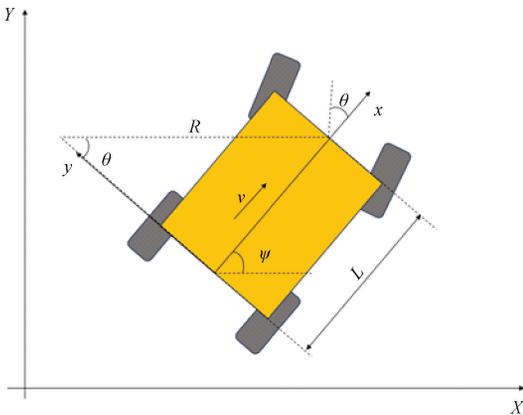


图 14 阿克曼转向 AGV 的运动学模型

Fig. 14 Kinematic model of Ackermann steering AGV

由此,可以得到 AGV 在世界坐标系下的运动学模型。

$$w_f = v/R \tag{2}$$

$$\frac{dX}{dt} = v \cdot \cos\psi \tag{3}$$

$$\frac{dY}{dt} = v \cdot \sin\psi \tag{4}$$

$$\frac{d\psi}{dt} = w = v \cdot \tan\left(\frac{\theta}{L}\right) \tag{5}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{L}{R}\right) = \arctan\left(\frac{w \cdot L}{v}\right) \tag{6}$$

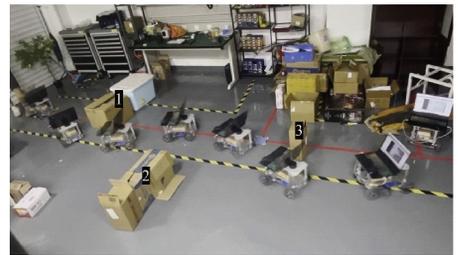
该模型中,AGV 线速度表示为  $v$ ,角速度为  $w$ ,AGV 的转弯半径为  $R$ ,前轮的转向角为  $\theta$ ,方向角为  $\psi$ ,虚拟转向角表示为  $\theta$ ,AGV 前后轴之间的距离为  $L$ 。建立起实验 AGV 的运动学模型后,可以在 DWA 算法中调整运动学模型,使其更适合阿克曼转向的 AGV 进行导航。在实验中 DWA 算法的参数如表 5 所示。

表 5 DWA 算法的参数

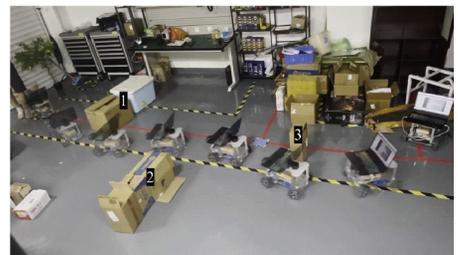
Table 5 Parameters of the DWA algorithm

最大线速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	最大角速度/ ( $rad \cdot s^{-1}$ )	前向模拟 时间/s	最大加速度/ ( $m \cdot s^{-2}$ )	最大角加速度/ ( $rad \cdot s^{-2}$ )
0.5	0.7	1.8	0.5	3.5

分别使用传统 A\* 算法和改进 A\* 算法作为全局路径引导 AGV 导航,并各自进行了 10 次实验,实验效果如图 15 所示。通过对 10 次实验数据的分析,提出平均线速度、平均角速度、线速度方差、角速度方差、行驶的总路程和花费时间 6 个评价指标,具体数据如表 6 所示,用以评估两种全局路径规划算法对 AGV 运动性能的影响。



(a) 传统 A\* 算法与 DWA 算法  
(a) The traditional A\* algorithm and DWA algorithm



(b) 改进 A\* 算法与 DWA 算法  
(b) The improved A\* algorithm and DWA algorithm

图 15 两种 A\* 算法引导下的 AGV 移动情况

Fig. 15 AGV movement under two A\* algorithms

图 15 中,AGV 在避开障碍物时进行了连续转弯。完成第 1 个障碍物避让后,在对第 2 个障碍物避障过程中,改进 A\* 算法引导的 AGV 更靠近外侧的黄色警戒线。与传统 A\* 算法引导的 AGV 相比,改进 A\* 算法引导的 AGV 在连续避障过程中转弯幅度更小,路径更平缓,行驶效率更高。

表 6 10 次实验结果  
Table 6 Results of 10 experimental trials

	平均线速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	平均角速度/( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )	线速度方差	角速度方差	AGV 行驶平均距离/m	平均花费时间/s
传统 A* 算法引导 AGV	0.29	0.06	0.03	0.12	7.02	22.92
改进 A* 算法引导 AGV	0.30	0.05	0.03	0.08	6.85	22.01

通过表 6 的数据分析,使用改进 A\* 算法引导的 AGV 相比传统 A\* 算法引导的 AGV,在相同条件下,平均线速度提升 3%,平均角速度降低 16%,角速度方差降低 33%,平均行驶距离减少 2.4%,花费时间减少 4%。因此,采用柔绳模型简化的 A\* 算法不仅减少了 AGV 姿态调整的频率和幅度,还提升了行驶效率,进一步验证了改进 A\* 算法在减少冗余路径和优化 AGV 整体行驶效率方面的有效性。

## 4 结 论

本文针对复杂多随机障碍环境的机器人自主路径规划问题,仿柔绳拉伸机制对传统 A\* 算法进行优化后,合理缩减了不必要的节点和冗余路径。这不仅能缩短 AGV 行走目标位置的距离,更能提升其局部避障路径的平滑性。再结合 DWA 算法后,AGV 的自主路径规划避障行走显著减少了转弯次数,使其行走更加的柔顺和高效。此外,改进的 A\* 算法有效的减少了传统路径规划中对栅格中心的依赖,使路径规划更加灵活高效。下一步工作将在改进 A\* 规划算法的基础上对随机动态障碍环境的避障行走策略进行研究,进一步提升 AGV 在复杂动态环境的自主避障行走能力。

## 参考文献

[ 1 ] BI H L, KONG M. Design of a logistics automated guided vehicle[J]. Instrumentation, 2022, 9(1): 1-11.

[ 2 ] 梁承姬, 陈登川. 自动化集装箱码头 AGV 配置与调度耦合问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(14): 216-225.

LIANG CH J, CHEN D CH. Research on coupling problem of AGV configuration and scheduling in automated container terminals[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(14): 216-225.

[ 3 ] 李天童, 宁平凡, 牛萍娟. 基于改进遗传算法的工厂 AGV 安全路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(3): 160-163.

LI T T, NING P F, NIU P J. Safe path planning of factory AGVs based on improved genetic algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(3): 160-163.

[ 4 ] 蔡颖杰, 夏韵凯. AGV 在汽车制造领域自动化搬运系统中的应用[J]. 物流技术与应用, 2019, 24(10): 176-179.

CAI Y J, XIA Y K. Application of AGV in automated material handling systems in the automotive manufacturing field [J]. Logistics Technology and Application, 2019, 24(10): 176-179.

[ 5 ] 葛超, 张鑫源, 王红, 等. 改进 Informed-RRT\* 算法的移动机器人路径规划[J]. 电光与控制, 2025, 32(1): 48-53.

GE CH, ZHANG X Y, WANG H, et al. Path planning for mobile robots based on improved Informed-RRT\* algorithm [J]. Electro-Optical and Control, 2025, 32(1): 48-53.

[ 6 ] 张飞凯, 黄永忠, 李连茂, 等. 基于 Dijkstra 算法的货运索道路径规划方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(6): 176-182.

ZHANG F K, HUANG Y ZH, LI L M, et al. Path planning method for freight cableway based on Dijkstra algorithm [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(6): 176-182.

[ 7 ] 王中玉, 曾国辉, 黄勃, 等. 改进 A\* 算法的机器人全局最优路径规划[J]. 计算机应用, 2019, 39(9): 2517-2522.

WANG ZH Y, ZENG G H, HUANG B, et al. Global optimal path planning for robots based on improved A\* algorithm[J]. Computer Applications, 2019, 39(9): 2517-2522.

[ 8 ] 史久根, 刘春霞, 席海强. CA 模型下的改进 D\* 路径规划算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1): 30-37.

SHI J G, LIU CH X, XI H Q. Improved D\* path planning algorithm based on CA model[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(1): 30-37.

[ 9 ] 刘军, 冯硕, 任建华. 移动机器人路径动态规划有向 D\* 算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(2): 291-300.

- LIU J, FENG SH, REN J H. Directed D\* algorithm for dynamic path planning of mobile robots[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(2): 291-300.
- [10] 王萍, 潘树国, 蔚保国, 等. 基于 RSS\_GN RRT 算法的狭长空间路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(1): 72-85.
- WANG P, PAN SH G, YU B G, et al. Narrow and long space path planning based on RSS\_GN RRT algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(1): 72-85.
- [11] 骆海涛, 孙嘉泽, 高鹏宇, 等. 基于改进 RRT\* 算法的智能轮椅全局路径规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 303-313.
- LUO H T, SUN J Z, GAO P Y, et al. Research on global path planning of smart wheelchairs based on improved RRT\* algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 303-313.
- [12] GAD A G. Particle swarm optimization algorithm and its applications: A systematic review [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29(5): 2531-2561.
- [13] 胡章芳, 冯淳一, 罗元. 改进粒子群优化算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(10): 3089-3092.
- HU ZH F, FENG CH Y, LUO Y. Path planning for mobile robots based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Application Research of Computers, 2021, 38(10): 3089-3092.
- [14] 陈高远, 宋云雪. 改进遗传算法在移动机器人路径规划中的应用研究[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(2): 302-307.
- CHEN G Y, SONG Y X. Research on application of improved genetic algorithm in path planning of mobile robots[J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(2): 302-307.
- [15] NAZARAHARI M, KHANMIRZA E, DOOSTIE S. Multi-objective multi-robot path planning in continuous environment using an enhanced genetic algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2019, 115: 106-120.
- [16] MARTÍNEZ-ALFARO H, GÓMEZ-GARCÍA S. Mobile robot path planning and tracking using simulated annealing and fuzzy logic control [J]. Expert Systems with Applications, 1998, 15(3): 421-429.
- [17] 范叶满, 沈楷程, 王东, 等. 基于模拟退火算法的无人机山地作业能耗最优路径规划[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 34-41.
- FAN Y M, SHEN K CH, WANG D, et al. Optimal path planning for UAV mountain operations based on simulated annealing algorithm [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 34-41.
- [18] BASTAPURE A A, CHIDDARWAR S S, GOYAL A. A comparative study of A\*, RRT, and RRT\* algorithm for path planning in 2D warehouse configuration space[C]. Intelligent Control, Robotics, and Industrial Automation. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 95-107.
- [19] 朱胜涛, 戴娟, 刘海涛, 等. Bezier 曲线与 A-Star 算法融合的火星探测器路径规划[J]. 电子测量技术, 2023, 46(19): 69-75.
- ZHU SH T, DAI J, LIU H T, et al. Path planning for mars rover based on Bezier curve and A-Star algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(19): 69-75.
- [20] ZHANG J, WU J, SHEN X, et al. Autonomous land vehicle path planning algorithm based on improved heuristic function of A-Star [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2021, 18(5): 17298814211042730.
- [21] TANG G, TANG C, CLARAMUNT C, 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.
- [22] 姜媛媛, 张阳阳. 改进 8 邻域节点搜索策略 A\* 算法的路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 234-241.
- JIANG Y Y, ZHANG Y Y. Path planning based on improved A\* algorithm with 8-neighbor node search strategy [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 234-241.
- [23] LAI R, WU Z, LIU X, et al. Fusion algorithm of the improved A\* algorithm and segmented Bézier curves for the path planning of mobile robots [J]. Sustainability, 2023, 15(3): 2483.
- [24] JI X, FENG S, HAN Q, et al. Improvement and fusion of A\* algorithm and dynamic window approach considering complex environmental information [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(8): 7445-7459.

### 作者简介



**陈先益** (通信作者), 2019 年于西安交通大学获得博士学位, 现为厦门理工学院讲师、硕士生导师, 主要研究方向为移动机器人设计与定位导航、多传感器融合环境感知、工业自动化、智能生产、人工智能及大数据处理。

E-mail: chenxy@xmut.edu.cn

**Chen Xianyi** (Corresponding author) received his Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 2019. Now he is a lecturer and M. Sc. supervisor at Xiamen University of Technology. His main research interests include mobile robot design and localization navigation, multi-sensor fusion for environmental perception, industrial and agricultural automation, intelligent production, artificial intelligence, and big data processing.



**原伟峰**, 2022 年于运城学院获得学士学位, 现为厦门理工学院硕士研究生, 主要研究方向为 AGV 自主导航。

E-mail: 1468358428@qq.com

**Yuan Weifeng** received his B. Sc. from Yuncheng University in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Xiamen University of Technology. His main research interest includes AGV autonomous navigation.



**罗兴桓**, 2023 年于厦门理工学院获得学士学位, 现为厦门理工学院硕士研究生, 主要研究方向为多传感器融合。

E-mail: 1457518077@qq.com

**Luo Xinghuan** received his B. Sc. degree from Xiamen University of Technology in 2023. Now he is a M. Sc. candidate at Xiamen University of Technology. His main research interest includes multi-sensor fusion.