

# 滑动转向机器人路径规划算法研究

许昕宇, 张延恒

(北京邮电大学现代邮政学院, 北京 100876)

**摘要:** 针对滑动转向机器人转弯时会发生打滑, 导致难以平稳、高效完成导航任务的问题, 提出了针对滑动转向机器人的路径规划算法。在全局规划中采用改进 A-star 算法, 对传统 A-star 算法规划出的路径不平滑的问题进行改进, 采用梯度下降方法进行平滑处理, 并对不同的平滑参数的平滑效果进行对比测试, 获得了适合滑动转向机器人平稳行驶的参数。同时在局部规划中, 对动态圆弧拟合算法进行改进, 加入了动态调节前探距离算法, 使其得到的圆弧更平滑, 使其更加适应滑动转向机器人的运动学特性, 同时拟合全局路径效果更理想, 通过仿真实验, 改进后动态圆弧拟合算法最大能使拟合误差减小了 21.85cm, 证明其有效性。

**关键词:** 路径规划; 滑动转向机器人; 路径平滑; 圆弧拟合路径规划;

**中图分类号:** TP242.6

## Research on Path Planning of Skid-steered Robot

Xu Xinyu, Zhang Yanheng

(Modern Post School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

**Abstract:** Aiming at the problem that the skid-steered robots will slip when turning, which makes it difficult to complete the navigation task smoothly and efficiently, a path planning algorithm for the skid-steered robots is presented. In the global planning, the improved A-star algorithm is used to improve the problem of unsmooth paths planned by the traditional A-star algorithm, and the gradient descent method is used for smoothing, and the smoothing effect of different smoothing parameters is compared and tested. The parameters suitable for skid-steered robots are presented. At the same time, in the local planning, the dynamic arc fitting algorithm is improved, and the dynamic look-ahead distance algorithm is added to make the arc radius larger and smoother, which is more suitable for the structural characteristics of the skid-steered robots, and makes the local path planning can better fit the global reference path. After simulation experiments, the improved dynamic arc fitting algorithm can reduce the maximum fitting error by 21.85cm, which proves its effectiveness.

**Key words:** Path planning; Skid-steered robot; Path smoothing; Arc fitting path planning;

## 0 引言

移动机器人的路径规划是近年来机器人领域的研究热点, 而在众多结构类型的机器人中, 滑动转向机器人因为其良好的越野性能而被广泛应用于室外场景, 但是转向时会打滑的特点使其难以快速、准确地完成任务<sup>[1]</sup>。根据规划的时间顺序可以分为全局路径规划与局部路径规划, 全局路径规划能够基于一张已知或部分已知的地图进行粗略的规划, 全局路径规划

---

**作者简介:** 许昕宇 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 移动机器人路径规划, 运动控制, SLAM  
**通信联系人:** 张延恒 (1978-), 男, 博士, 副教授, 研究领域: 机器人机构, 特种机器人, 智能机器人技术. E-mail: zyh620@bupt.edu.cn

能够为局部路径规划提供初值,保证机器人行驶的效率。而局部路径规划需要考虑机器人行驶的运动学与动力学约束,并且实现控制指令的输出。

全局路径规划通常有采样法和搜索法两种方法,基于采样法的有 RRT<sup>[2]</sup>算法、Real-time RRT<sup>[3]</sup>算法等。但是基于采样的全局路径规划通常规划出的路径质量不高,例如其规划出的路径包含很多折角,不够光滑,由于其规划的特性,也很难得到最优路径。而基于搜索的算法包括 Dijkstra<sup>[4]</sup>算法, A-star 算法<sup>[5]</sup>等。其中 Dijkstra 算法是一种基于图搜索的贪心算法,它基于广度搜索,难以保证运算的快速性,所以不适用需要实时规划的机器人。而 A-star 算法由于其启发值的存在,使其搜索速度会大大加快,但是 A-star 算法仍然存在规划出的路径有直角存在的问题,所以本文基于 A-star 算法进行改进,对传统的 A-star 算法进行平滑优化,使其更加适应滑动转向机器人的运动性能。

主流的局部路径规划如 TEB<sup>[6]</sup>算法与 DWA<sup>[7]</sup>算法,这两种算法均以两轮差速或阿克曼地盘为机器人的运动模型,没有考虑滑动转向机器人的运动特性。对滑动转向机器人的局部路径规划与控制则需要进行特殊规划,使其尽可能缓慢且小幅度的转弯,从而尽可能减少打滑。由于机器人跟踪圆弧轨迹时,具有轨迹连续平滑、输出角速度稳定的优点且能够最大程度上避免滑动转向机器人转弯打滑,因而圆弧拟合法在滑动转向机器人轨迹跟踪中有较大应用潜力。Lepej<sup>[8]</sup>提出了动态圆弧拟合轨迹跟踪算法,考虑了滑动转向机器人的运动特性,但该算法对复杂全局轨迹拟合效果不理想,故本文在此基础上提出改进动态前探距离的局部路径规划算法,使其能够更好的实现局部路径规划。

## 1 基于改进 A-star 的全局路径规划算法

### 1.1 启发式路径搜索方法

A-star 算法是一种启发式的图搜索算法,其代价函数为

$$F(t) = H(t) + G(t) \quad (1)$$

其中 $H(t)$ 为节点的代价值,其含义为从起点至终点的预估代价值。 $G(t)$ 为从起点移动至当前节点所消耗的实际代价值。 $H(t)$ 为启发函数,其含义为从当前节点 $t$ 移动至终点的预估代价值。本文采用欧几里得距离法计算 $H(t)$ ,其计算式如下

$$H(t) = c_{min} \sqrt{((N_x - E_x))^2 + ((N_y - E_y))^2} \quad (2)$$

其中 $c_{min}$ 为移动一个栅格所消耗的代价,通常设 $c_{min} = 1$ 。

在开始搜索前首先对所有的节点进行状态初始化,并设置起点与终点,接下来计算所有节点的 $H(t)$ ,同时把起点加入 open list 中,open list 为一个由栅格所组成的链表结构,在 open list 中的节点为当前待扩展的节点。接下来将考察 open list 中的节点的周围节点,在这里即对起点的周围节点进行计算。本文采用八邻域栅格联通的方式,如图 1 所示。对相邻节点的

$F(t)$ 进行计算，并选择 $F(t)$ 最小的节点加入 open list，同时将起点从 open list 中移除，并加入 close list 中。Close list 为已经走过的节点，则不需要再关注。

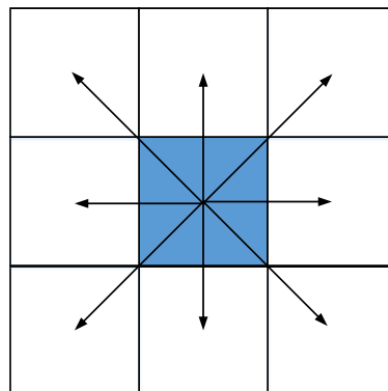


图 1 八邻域栅格联通方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the eight-neighbor connection

接下来会将会把 open list 中具有最小 $F(t)$ 值的节点弹出，将起点存入 close list 中，并且遍历起点的八个邻近节点，若其相邻节点已经在 close list 中，或其相邻节点为障碍物则跳过，若节点不在 open list 中则将其加入 open list。并把我们从刚刚从 open list 中弹出的节点设置为新加入 open list 节点的父节点。若某个相邻的节点已经在 open list 中，则检查当前的路径是否为最短路径，即比较当前节点的  $G(now)$ 与相邻的节点的父节点的 $G(father)$ 的大小关系，保证相邻节点父节点的 $G(t)$ 为最小。综上，搜索流程如图 2 所示。

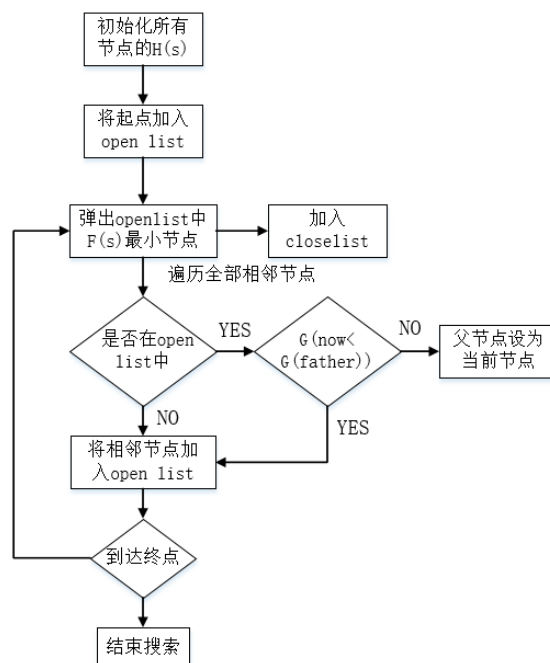


图 2 搜索算法流程图

Fig. 2 Search algorithm flowchart

## 1.2 路径平滑算法

由于 A-star 算法所规划出的路径点均占据栅格的中心，所以路径中会出现折角，这将极大的影响机器人运行的平稳性，所以需要对其进行平滑处理。设原始路径点序列为  $p(i)$ ，平滑优化后的路径点序列为  $q(i)$ 。则路径平滑需求解路径点使其满足下式：

$$\arg \min_i \|p(i) - q(i)\|_2 \quad (3)$$

$$\arg \min_i \|q(i) - q(i+1)\|_2 \quad (4)$$

即最小化目标函数

$$\alpha \cdot (p(i) - q(i))^2 + \beta \cdot (q(i) - q(i+1))^2 \quad (5)$$

其中  $\alpha$  为贴近全局路径的权重， $\beta$  为平滑度权重。

本文采用梯度下降法进行求解，首先对系统进行初始化，如式(6)所示

$$q(i) = p(i) \quad (6)$$

并对系统进行迭代求解：

$$p(i) = p(i) + \alpha \cdot (p(i) - q(i))^2 + \beta \cdot (q(i) - q(i+1))^2 \quad (7)$$

## 2 改进动态圆弧拟合局部路径规划算法

### 2.1 改进动态前探距离算法

动态圆弧拟合局部路径规划算法中的前探距离为固定参数，无法依据环境动态调节，使用固定的前探距离不能适应复杂的全局规划。因为局部路径规划仅能在局部范围内完成规划，无法从全局考虑轨迹跟踪的流畅程度以及决策的合理性，也可能规划出较大曲率的圆弧轨迹，难以适应滑动转向机器人的结构特点。如图 3 所示， $x_2$  与  $x_7$  为全局路径点中的噪点，但拟合过程无法检测到噪点的存在，导致拟合效果不佳。

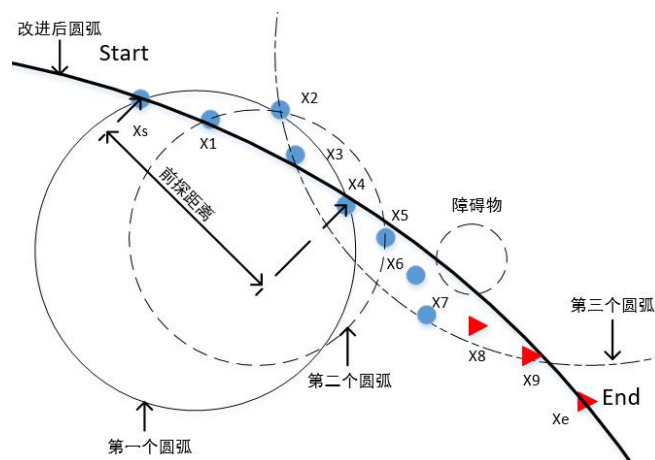


图 3 改进前探距离示意图一

Fig. 3 Improved the look-ahead distance diagram one

所以首先需要对路径点中的噪点、航向突变点以及轨迹的大幅度转弯情况进行检测。记 $\overrightarrow{x_{i-1}x_i}$ 为点 $x_{i-1}$ 和点 $x_i$ 形成的向量。记 $\theta_{x_{i-1}x_i}^{x_i x_{i+1}}$ 为两相邻向量间的夹角，记逆时针为正方向。为检测全局路径点间的噪点与轨迹方向突变，需要计算式(8)(9)，不满足式(8)则认为存在噪点，不满足式(9)则认为存在方向突变，若存在方向突变则需要动态截断路径。

$$|\theta_{x_{i-1}x_i}^{x_i x_{i+1}}| + |\theta_{x_i x_{i+1}}^{x_{i+1} x_{i+2}}| < \theta_{thr1}^{\Delta} \quad (8)$$

$$|\theta_{x_{i-1}x_i}^{x_i x_{i+1}} + \theta_{x_i x_{i+1}}^{x_{i+1} x_{i+2}}| < \theta_{thr2}^{\Delta} \quad (9)$$

式中参数 $\theta_{thr1}^{\Delta}$ 和 $\theta_{thr2}^{\Delta}$ 含义为角度变化阈值，取正常数，本文分别取 $\theta_{thr1}^{\Delta} = 2.1$ ， $\theta_{thr2}^{\Delta} = 1$ ， $\theta_{thr1}^{\Delta}$ 和 $\theta_{thr2}^{\Delta}$ 的取值与对噪点以及轨迹方向突变的容忍程度呈正相关。

检查是否存在轨迹的大幅度转弯情况的计算方法见式(10)

$$|\theta_{x_s}^{x_i} - \theta_{start}| < \theta_{thr}^{all} \quad (10)$$

式中 $\theta_{x_s}^{x_i}$ 代表起点 $x_s$ 与点 $x_i$ 形成的向量方向角， $\theta_{thr}^{all}$ 为角度变化阈值。 $\theta_{start}$ 为起点的方向。

对于全局轨迹航迹点，同时满足式(9)(10)条件的点加入局部路径，在不满足条件时截断路径，之后的点本次拟合过程中暂时不考虑。截断点前的点用于完成本次圆弧拟合。动态增加前探距离情况分析如图3所示，根据上文分析，改进前圆弧如图3中三个圆弧所示，改进前的圆弧受噪点 $x_2$ 的影响拟合效果不佳，而图3中改进后圆弧轨迹更贴近全局路径点。动态减小前探距离情况分析如图4所示，若前探距离为固定值，机器人处于 $x_1$ 位置， $x_1$ 至 $x_7$ 7个路径点在前探距离范围内，则会用于拟合圆弧，拟合得到的圆弧如图4虚线圆弧所示。由于 $x_5$ 处发生方向突变，所以改进前圆弧拟合效果不佳。改进后算法在 $x_5$ 处截断路径，并把原路径划分为两段，更加贴近原始路径。

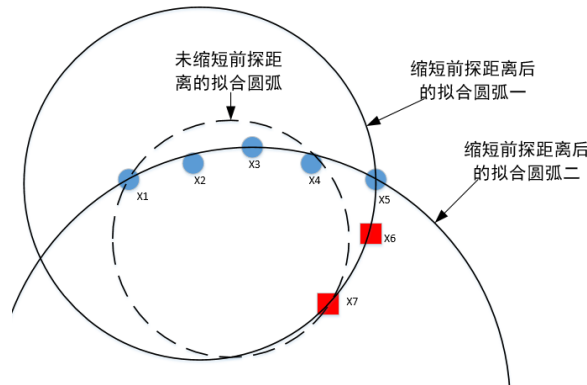


图4 改进前探距离示意图二

Fig. 4 Improved the look-ahead distance diagram two

## 2.2 动态圆弧拟合方法

完成动态前探过程后，将截断点作为局部终点；并求解其他点与起点终点间连线的垂直距离，如图5中所示 $h_w$ 所示，取最长距离用于构造三角形，通过三角形来求解外接圆。

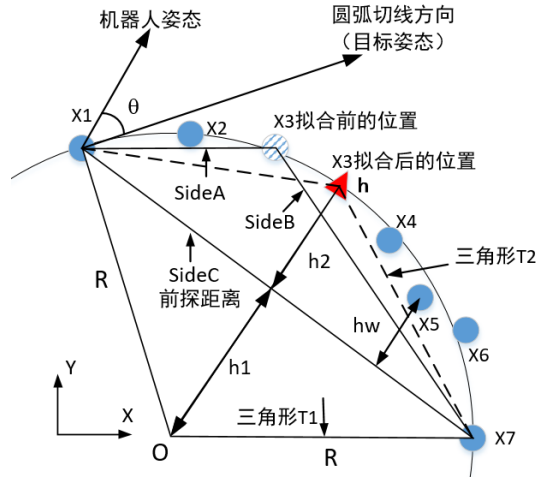


图5 圆弧拟合原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of arc fitting principle

具体求解方法为：首先计算三角形边长side A、side B、side C。以及三角形的半周长 $C_h$

$$C_h = (\text{sideA} + \text{sideB} + \text{sideC})/2 \quad (11)$$

三角形面积 $S_n$ 使用海伦公式计算

$$S_n = \sqrt{C_h(C_h - \text{sideA})(C_h - \text{sideB})(C_h - \text{sideC})} \quad (12)$$

此时得到了离直线 $x_1 - x_7$ 最远的一点 h，将这一点移至起点与局部终点的中垂线上，并保持高度不变，其高度的计算公式为式(13)，并得到图 5 所示情况

$$h = \max_i (2 \cdot S_n / \text{sideC}); h \geq 0 \quad (13)$$

根据起点终点与构造出的 $h_{\max}$ 点，这三个点可以求得唯一的外接圆，并求得外接圆相关数据，三角形 T1 的面积、高度关系见式 (12)(13)

$$S_1 = \frac{1}{2} W h_1 \rightarrow h_1 = 2S_1 / W \quad (14)$$

$$S_1 = W/4 \cdot \sqrt{4R^2 - W^2} \quad (15)$$

145

$$R = h_1 + h_2 \quad (16)$$

联立上式得圆弧半径为

$$R = h/2 + W^2/8h \quad (17)$$

### 2.3 圆弧跟踪控制器

为了使机器人行驶更加稳定，本文使机器人输出稳定的线速度，仅对角速度做调整，根据图 5 中机器人当前姿态与机器人的误差 $\theta$ ，对机器人的姿态进行调整，输出的角速度的计算方法见式(18)

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \theta/\Delta t \quad (18)$$

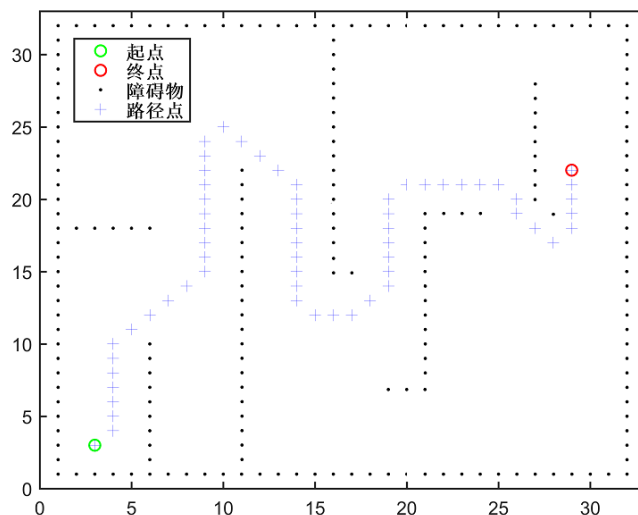
其中 $\omega_{k+1}$ 为这一时刻输出的角速度， $\omega_k$ 为上一时刻输出的角速度， $\Delta t$ 为两时刻的时间间隔。

155

### 3 仿真实验验证

#### 3.1 改进 A\*算法仿真实验

本文在 MATLAB 中对改进 A\*算法进行仿真验证, 首先在 MATLAB 中设置地图与障碍物, 如图 6 所示, 其中蓝色“+”为采用 A\*算法得到的原始路径。

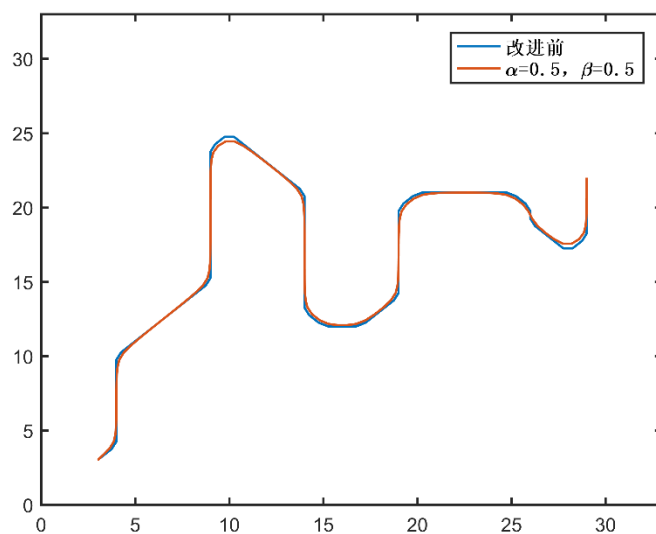


160

图 6 地图、障碍物与原始路径仿真图

Fig. 6 Map, obstacles and original path simulation diagram

本文采用平滑算法对原始路径进行处理, 分别设置不同的系数进行对比, 图 7 为四种不同的参数配置下的平滑效果与改进前路径的对比图。其中图 7 (a) 为  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 0.5$  与改进前路径的对比情况。由图中能够看出改进后路径曲线仍然存在较大的曲率半径。

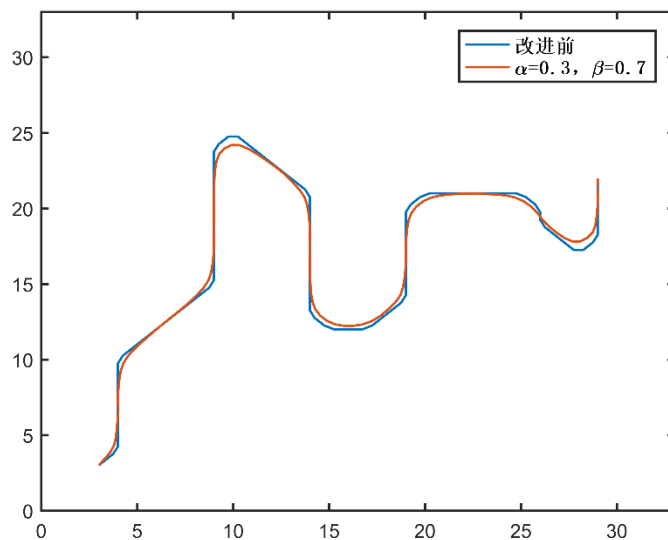


165

(a)  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 0.5$  下的平滑效果对比图

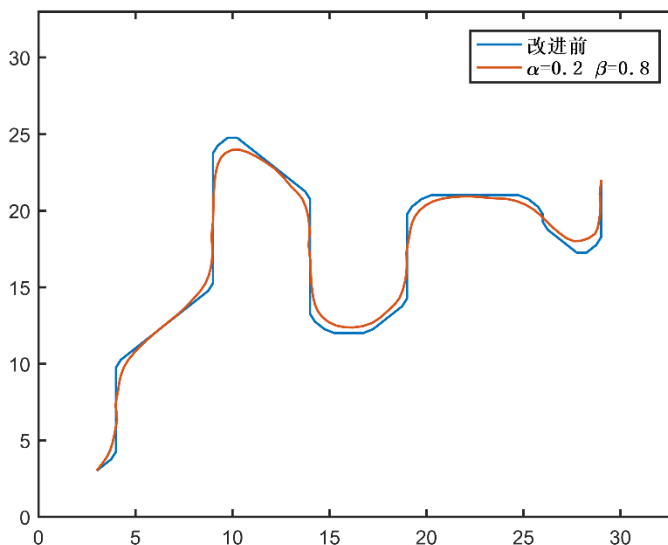


图 7 (b) 为 $\alpha = 0.3$ ,  $\beta = 0.7$ 与改进前路径的对比情况, 由图 7 (b) 可以看出该参数下路径较为平滑, 能够使机器人平稳行驶。



(b)  $\alpha = 0.3$ ,  $\beta = 0.7$ 下的平滑效果对比图

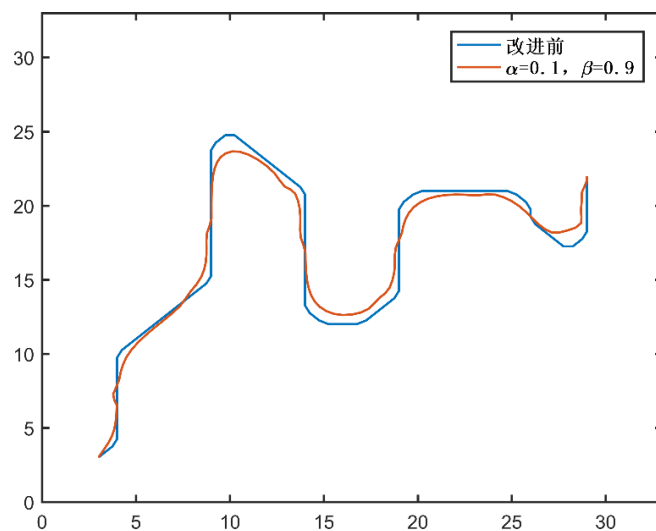
图 7 (c) 为 $\alpha = 0.2$ ,  $\beta = 0.8$ 与改进前路径的对比情况, 平滑程度与 7 (b) 所示情况接近, 但是相较于图 7 (b) 会更偏离原始路径。



(c)  $\alpha = 0.2$ ,  $\beta = 0.8$ 下的平滑效果对比图

图 7 (d) 为 $\alpha = 0.1$ ,  $\beta = 0.9$ 与改进前路径的对比情况, 由图中可以看出, 平滑后路径由于其权重差距过大, 求解时不能得到平滑的结果, 反而会使原始路径变得更加不利于机器人行走, 故该参数不适用于机器人跟踪。综上所述 $\alpha = 0.2$ ,  $\beta = 0.8$ 以及 $\alpha = 0.3$ ,  $\beta = 0.7$ 两个参数比较适合滑动转向机器人的跟踪。





(d)  $\alpha = 0.1, \beta = 0.9$ 下的平滑效果对比图

图 7 不同参数下改进前后路径对比图

Fig. 7 Comparison of paths before and after improvement under different parameters

### 3.2 改进动态前探距离的圆弧拟合仿真实验

为验证改进动态前探距离算法的有效性,本实验通过轨迹推演的方式得到理想拟合轨迹,并根据轨迹贴合全局路径的情况验证算法有效性。本实验在 Gazebo 仿真环境中设置  $5\text{m} \times 3\text{m}$  的矩形区域进行全局规划,利用改进前与本文算法进行轨迹推演,得到理想的圆弧拟合轨迹,如图 11 所示。

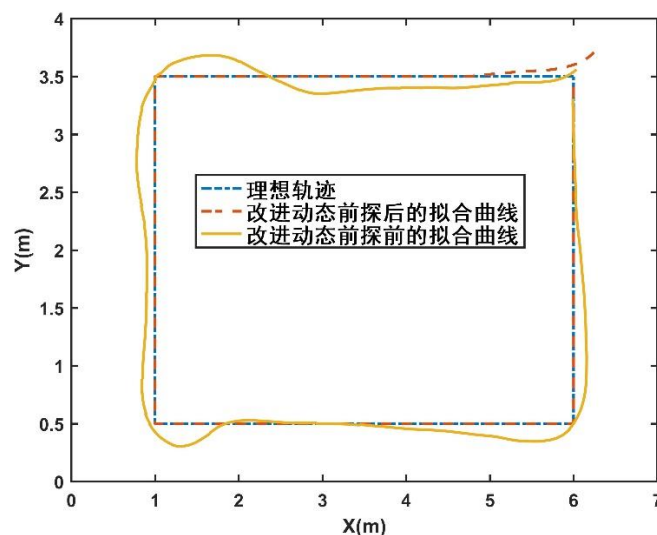


图 8 改进前探距离算法仿真对比图

Fig. 8 Simulation comparison chart of improved the look-ahead distance algorithm

图 8 中实线为改进前动态圆弧拟合算法所拟合的曲线,虚线为本文算法拟合曲线,点划线为理想轨迹。其中本文算法拟合曲线能够贴合直线,改进前的算法在从左至右下的三个

拐点处出现的最大误差分别为 21.85cm, 19.66cm, 15.7cm。改进后算法更贴近全局规划路径点, 拟合效果更好, 证明动态前探距离算法能够使拟合结果更贴近全局规划。

## 4 结论

本文给出了针对滑动转向机器人结构特点所改进的路径规划算法, 包括改进 A-star 算法, 对原本不够平滑的路径进行平滑优化, 使改进前路径中的折角优化为平滑曲线, 并对不同的平滑参数进行仿真实验研究, 得到了更适合滑动转向机器人的参数配置。同时也针对滑动转向机器人的特点对动态圆弧拟合局部路径规划算法进行改进, 加入动态调整前探距离算法, 使其对复杂路径的拟合效果更好, 并在仿真环境中进行对矩形路径进行测试, 所得到的实验结果能够验证改进动态调整前探距离算法的有效性。综上基于改进 A-star 算法的全局路径规划与改进动态圆弧拟合算法的局部路径规划的联合使用更有利于滑动转向机器人平稳、高效的完成导航任务。

### [参考文献] (References)

- [1] 熊光明, 曹晓燕, 高峻峤, 等. 基于速度控制的轮式滑动转向移动机器人航向跟踪[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(8):663-666.
- [2] 尹高扬, 周绍磊, 吴青坡, 等. 基于改进 RRT 算法的无人机航迹规划[J]. 电子学报, 2017, 07(v.45;No.413):223-228.
- [3] Nagata C, Sakamoto E, Aoyagi S. 1A1-A16 Collision Avoidance of Articulated Robot for Unknown Moving Obstacle Using Real-time RRT[J]. The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec), 2008, 2008: 1A1-A16\_1-1A1-A16\_4.
- [4] Sun Y, Fang M, Su Y. AGV Path Planning based on Improved Dijkstra Algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1746(1):012052 (6pp).
- [5] 李晓岩, 苏娜. 基于 A-star 算法控制的井下搬运系统研究[J]. 煤矿机械, 2015(08):284-286.
- [6] Roesmann C, Feiten W, Woesch T, et al. Trajectory modification considering dynamic constraints of autonomous robots[C]// Robotics Proceedings of ROBOTIK 2012 7th German Conference on. VDE, 2012.
- [7] Seder, Marija; Petrović, Ivan. Dynamic window based approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. 0.
- [8] Lepej P, Maurer J, Uran S, et al. Dynamic Arc Fitting Path Follower for Skid-steered Mobile Robots[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2015, 12(10):139-.