

文章编号: 2095-2163(2022)11-0096-07

中图分类号: TP242

文献标志码: A

# 融合改进 A\* 和时间弹性带的移动机器人路径规划算法

沈斯杰<sup>1</sup>, 田昕<sup>2</sup>, 袁千贺<sup>1</sup>

(1 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2 上海理工大学 理学院, 上海 200093)

**摘要:** 针对移动机器人在路径规划中使用 A\* 算法规划的路径不平滑及无法实时避障的问题, 提出一种分层路径规划方法, 将改进的 A\* 算法与时间弹性带(Timed Elastic Band, TEB)算法融合。首先, 在 A\* 算法中, 引入梯度下降的思想, 减少路径中的转折点, 使路径更平滑; 其次, 在 TEB 算法中, 加入路径点与 TEB 轨迹位姿点的约束, 使其规划的路径更好地遵循全局路径; 最后, 将改进的 A\* 算法与 TEB 算法相结合, 使 TEB 算法沿着全局最优路径进行动态路径规划, 从而实时躲避未知的障碍物。仿真实验的结果表明: 改进 A\* 算法可减少 93.69% 的转折点, 同时能缩短 0.9% 的路径长度, 改进后的 TEB 算法能减少偏离全局路径的程度, 两者融合后能够有效躲避未知障碍物。

**关键词:** 移动机器人; 路径规划; 改进 A\* 算法; 时间弹性带算法; 实时避障

## Mobile robot path planning algorithm integrating improved A\* algorithm and time elastic band

SHEN Sijie<sup>1</sup>, TIAN Xin<sup>2</sup>, YUAN Qianhe<sup>1</sup>

(1 School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2 College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**[Abstract]** Aiming at the problem that the path planned by mobile robot using A\* algorithm is not smooth and can not avoid obstacles in real time, a hierarchical path planning method is proposed, which integrates the improved A\* algorithm with the time elastic band (TEB) algorithm. Firstly, in the A\* algorithm, the idea of gradient descent is introduced to reduce the turning points in the path and make the path smoother; secondly, in the TEB algorithm, the constraints of path points and TEB trajectory pose points are added to make the planned path follow the global path in a better way; finally, the improved A\* algorithm is combined with TEB algorithm to make TEB algorithm carry out dynamic path planning along the global optimal path, so as to avoid unknown obstacles in real time. The simulation results show that the improved A\* algorithm can reduce the turning point by 93.69% and the path length by 0.9%. The improved TEB algorithm can reduce the degree of deviation from the global path, and the fusion of the two can effectively avoid unknown obstacles.

**[Key words]** mobile robot; path planning; improved A\* algorithm; Time Elastic Band algorithm; real-time obstacle avoidance

## 0 引言

随着智能制造 2025 和工业 4.0 的提出, 机器人在化工、纺织、食品、电厂、农业等领域应用得越来越多。路径规划是机器人控制系统的基础问题, 是机器人顺利完成各项作业任务的前提条件<sup>[1]</sup>。

按照对周围环境信息的熟悉程度的不同, 路径规划主要可分为 2 类:

(1) 全局路径规划。是指在已知机器人的全局环境信息的条件下, 找到一条起点和终点之间距离最短的路径, 且该路径不经过任何障碍物<sup>[2]</sup>。常见的全局路径规划算法有: D\* 算法<sup>[3-4]</sup>、A\* 算法<sup>[5-6]</sup>、

Dijkstra 算法<sup>[7-8]</sup>等。

(2) 局部路径规划。描述了如何让机器人遵循全局路径, 同时避免未知的障碍物<sup>[9]</sup>。常见的局部路径规划算法有: DWA 算法<sup>[10-11]</sup>、TEB 算法<sup>[12-13]</sup>、人工势场法<sup>[14-15]</sup>等。

在实际应用中, 单一算法在解决路径规划问题时, 具有局限性, 并且无法处理机器人在移动过程中面对的突发情况。因此, 将不同算法进行融合成为当下路径规划中的研究热点, 通过算法之间的优势互补, 从而得到较优的规划结果<sup>[16]</sup>。王志中<sup>[17]</sup>通过融合改进 A\* 算法和人工势场法, 在复杂环境下实现实时避障, 但规划的路径在障碍物处不够平滑,

**基金项目:** 国家自然科学基金(61873169); 上海市“科技创新行动计划”国内科技合作项目(20015801100)。

**作者简介:** 沈斯杰(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 移动机器人定位与导航; 田昕(1993-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 移动机器人定位与导航; 袁千贺(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 移动机器人定位与导航。

**通讯作者:** 沈斯杰 Email: USST193770662@126.com

收稿日期: 2022-03-14

会增加机器人转弯和变速的负担。Dai 等人<sup>[18]</sup>通过将改良的蚁群算法和 A\* 算法融合, 提升算法的收敛速度和全局路径的平滑度, 但是没能顾及机器人在移动过程中出现的未知障碍物。庞磊等人<sup>[19]</sup>提出将 A\* 与 TEB 算法融合, 帮助机器人实现对目标行人的安全无碰撞跟随, 然而 A\* 算法规划出的路径不够平滑, 转折点多, 不适合机器人长距离移动。

针对上述情况, 为了提高 A\* 算法的路径平滑度, 同时满足机器人在复杂环境下实时避障的需求, 提出一种融合改进 A\* 和 TEB 算法的路径规划方法。首先, 通过 A\* 算法进行全局路径规划, 得到适合机器人平稳运行的全局路径。其次, 为了使 TEB 算法更遵循全局路径, 增加了路径点与 TEB 轨迹位姿点的约束条件。最后, 如果机器人在移动时通过自身携带的传感器感知到全局路径上有障碍物出现, 则 TEB 算法能够实时调整局部路径, 从而避开障碍物。完成避障后, 继续沿着全局路径前行至目标点。

本文的贡献可以归纳为:

- (1) 引入梯度下降算法的思想, 减少路径转折点, 从而提高路径平滑度。
- (2) 添加了路径点与 TEB 轨迹位姿点的约束条件, 使 TEB 算法规划的局部路径更好地跟随全局路径。
- (3) 在复杂环境下, 通过将改进 A\* 算法与 TEB 算法相融合, 有效躲避未知的障碍物。

## 1 改进 A\* 算法

### 1.1 A\* 算法

A\* 算法作为一种在全局环境信息已知的情况下寻找最优路径的启发式算法, 从起始点开始, 将起始点作为父节点, 通过向周边扩展, 计算得到周围 8 个子节点的评价函数值, 选取最小值子节点作为下一轮扩展的父节点, 以此往复, 直至到达目标点, 从而得到最优路径。其评价函数为:

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

其中,  $f(n)$  是机器人从起始点经过节点  $n$  到目标点的总代价值;  $g(n)$  是机器人从起始点到节点  $n$  的实际代价值;  $h(n)$  是机器人从节点  $n$  到目标点的估计代价值, 又被称作启发函数;  $n$  是机器人当前所在的节点。

### 1.2 平滑路径

A\* 算法虽然能够在静态环境中得到最优的全局路径, 但规划的路径存在曲折点较多的现象, 会增

加机器人转弯、变速的负担。针对这一情况, 利用梯度下降法对搜索出的路径进行平滑处理, 从而使 A\* 算法规划的路径更适合机器人在实际的场景下运行。

梯度下降法常应用于求解最小二乘法问题, 本文中将对搜索出的路径做平滑处理, 其优点为计算量较少, 能够最小化所有样本损失函数值, 并且使结果为全局最优解或者在最优解附近<sup>[20]</sup>。梯度下降法作为迭代法的一种, 利用逐步迭代的方法得到评价函数的最小值, 从而实现拟合曲线的功能。

首先, 将 A\* 算法规划出的路径近似为曲线, 并采用函数的形式表示:

$$y = \theta_0 x_0 + \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \cdots + \theta_n x_n \quad (2)$$

其中,  $x_n$  为数据样本中第  $n$  个特征值,  $\theta_n$  为第  $n$  个特征值的权重。

接着, 引入一个假设函数  $y'$ , 将一组特征值代入上式中, 因为各个权重值尚未确定, 故  $y'$  不等于  $y$ 。假设函数  $y'$  的表达式为:

$$y' = h_\theta(x) = \sum_{i=0}^n \theta_i x_i \quad (3)$$

然后, 将预测值  $y'$  与真实值  $y$  做差, 为了保证差值是正数, 再对差值取平方, 即可得到损失函数  $\Delta T(\theta)$ , 其表达式为:

$$\Delta T(\theta) = (y' - y)^2 = (h_\theta(x) - y)^2 \quad (4)$$

损失函数的值越小意味着, 预测值和真实值之间的误差越小, 因此损失函数越小越好。针对原始路径的数据样本存在样本数量较大的情况, 采用均方差的形式来表示损失值, 其表达式为:

$$J(\theta) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [h_\theta(x^{(i)}) - y^{(i)}]^2 \quad (5)$$

其中,  $J(\theta)$  为均方差损失, 涵盖了所有样本数据的表现。为了便于后续计算, 在等式的右边乘以二分之一, 即得:

$$J(\theta) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m [h_\theta(x^{(i)}) - y^{(i)}]^2 \quad (6)$$

梯度下降法采用微分的思路进行求解, 将权重  $\theta$  的取值范围分割成无限份, 每一份的宽度为动态  $\partial$ , 其实际宽度由微分步长  $\alpha$  决定, 通过不断改变权重值, 使得损失值  $J(\theta)$  趋近于 0。

由微分公式可以变形为权重  $\theta$  的迭代公式, 其表达式为:

$$\theta_j := \theta_j - \alpha \frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta_j} \quad (7)$$

关于原始路径的样本数据, 仅需要改变权重值

的大小和迭代的频次,就能获得目标函数的最小值,从而达成平滑处理路径的目的,如图1所示。

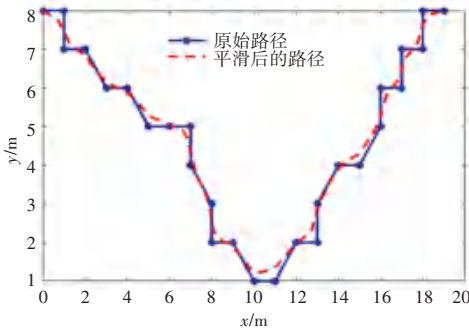


图1 路径平滑处理

Fig. 1 Path smoothing

图1中,蓝色的点划线为原始路径,红色的虚线为通过梯度下降法平滑处理后的路径。从图1中可以明显看出,原始路径转折点较多、不光滑,而利用梯度下降的方法能有效减少转折点,路径平滑度得到大幅提高。

## 2 改进TEB算法

### 2.1 TEB算法

全局路径规划是针对静态环境进行点到点之间的路径规划。如果路径中突然出现障碍物,则无法躲避。而局部路径规划可以通过传感器实时采集周围环境信息,从而知道机器人在静态环境中所处的位置和突然出现的障碍物的分布情况。

TEB算法利用图优化的思想,将影响弹性带形变的机器人位姿点与经过相邻两位姿点所需的运动时间定义为需要优化的节点,并且将路径起始点、机器人的速度、加速度和周围环境信息的约束定义为需要优化的边,采用g2o开源框架进行求解。TEB算法的设计步骤详见如下。

首先,将机器人的位姿定义为:

$$w_i = (x_i, y_i, \beta_i)^T \quad (8)$$

其中,  $x_i$  和  $y_i$  是机器人所处空间的位置坐标,  $\beta_i$  为机器人运动过程中的朝向信息。机器人位姿组成的序列定义为:

$$Q = \{w_i\}_{i=0 \dots n} \quad (9)$$

其次,将机器人经过相邻位姿所花费的时间定义为  $\Delta T_i$ , 由一个个时间间隔组成的序列定义为:

$$\tau = \{\Delta T_i\}_{i=0 \dots n-1} \quad (10)$$

然后,将TEB算法所需要优化的目标表示为:

$$B := (Q, \tau) \quad (11)$$

最后,将加权求和得到的全局约束函数  $f(B)$  对

多目标进行优化,表示形式为:

$$f(B) = \sum_k \gamma_k f_k(B) \quad (12)$$

$$B^* = \operatorname{argmin}_B f(B) \quad (13)$$

其中,  $f_k(B)$  为局部约束函数;  $\gamma_k$  为约束函数所对应的权值;  $B^*$  为TEB算法优化后满足约束函数的最优解。

机器人的位姿与时间间隔的关系,如图2所示。

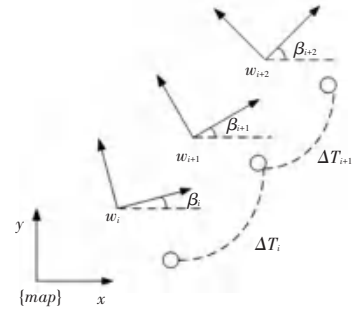


图2 机器人的位姿和时间间隔的关系

Fig. 2 Relationship between pose and time interval of robots

### 2.2 构建TEB超图

超图作为一种特殊的图,可以更加准确地描述多因素关联的对象之间的关系。TEB算法的局部性会导致稀疏性系数矩阵问题的产生。这一问题可以转换成由位姿和时间间隔作为节点、目标函数和约束函数作为边构成的超图<sup>[21]</sup>,如图3所示。这是在路径规划情况下,由TEB算法的约束转变而来的超图。超图的约束主要包含机器人自身的几何约束、速度、加速度、时间最优和相邻障碍物,图3中起始位姿、终点位姿以及障碍物的节点是不能变动的,用双圈表示。

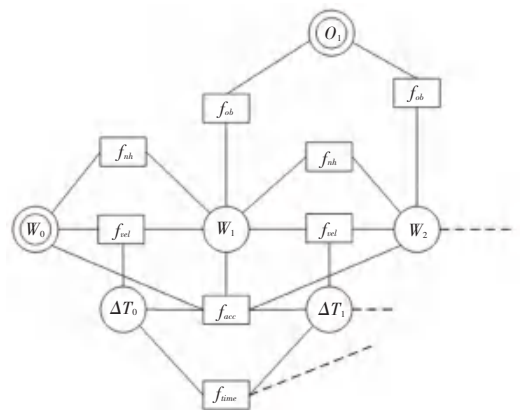


图3 TEB超图

Fig. 3 TEB hyper graph

### 2.3 增加路径点与 TEB 轨迹位姿点的约束

移动机器人在转弯时, TEB 算法规划出的局部路径易偏离全局路径, 与墙面或者障碍物距离较近。这无疑增加了机器人过弯时的危险性。为了缓解这种情况, 在超图中加入路径点与 TEB 轨迹位姿点的约束关系。路径点的集合是在规划范围内全局路径点集合根据相同步长求得的子集合。当 TEB 算法在进行优化时, 将会受到路径点的约束, 需要求解出与各个路径点距离最短的 TEB 轨迹位姿点。因此 TEB 算法规划出的路径更好地遵循全局路径。路径点与位姿点之间的欧式距离, 记作  $d_{r\text{pmin}}$ 。那么路径点的目标函数的表达式为:

$$f_{\text{path}} = \sum_{i=0}^n d_{r\text{pmin}} \quad (14)$$

此时, 将路径点与 TEB 轨迹位姿点加入超图中, 新的超图如图 4 所示。

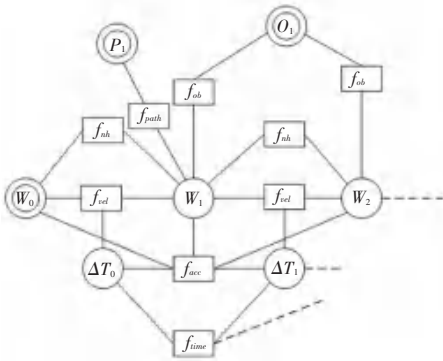


图 4 改进后的 TEB 超图

Fig. 4 Improved TEB hyper graph

### 3 融合算法

A\* 算法可以在静态地图下得到全局最优路径, 但是不能实时躲避未知障碍物。TEB 算法作为局部路径规划算法, 由于缺少全局环境信息, 规划的路径可能不是最优路径, 并且存在得到错误路径的风险。所以, 通过融合改进 A\* 与 TEB 算法, 不仅能够得到全局最优路径, 而且可以实时避障。融合算法的流程如图 5 所示。

由图 5 可知, 首先, 通过改进 A\* 算法对静态地图进行全局路径规划, 得到适合机器人运行的平滑路径。其次, 将规划的路径离散化为时间序列和位姿序列, 并将其作为 TEB 算法的轨迹序列点。然后, 通过 g2o 库求解得到最优路径, 作为局部路径。如果该路径无效, 则重新使用 A\* 算法进行全局路径规划。如果有效, 则将速度指令发送给运动控制单元。最后, 机器人沿着全局路径, 朝着目标点移

动, 如果当前位置为全局目标位姿, 则路径规划任务完成。反之, 则继续进行局部路径规划。

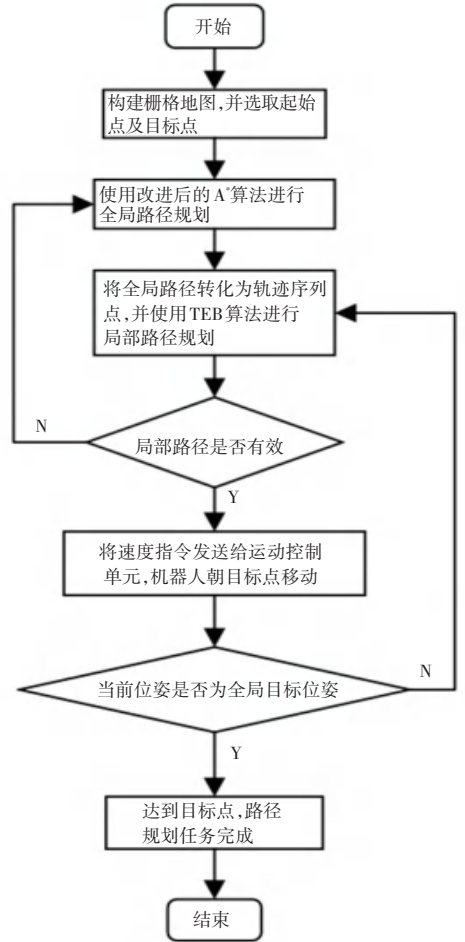


图 5 融合算法流程图

Fig. 5 Flow chart of fusion algorithm

### 4 仿真实验验证

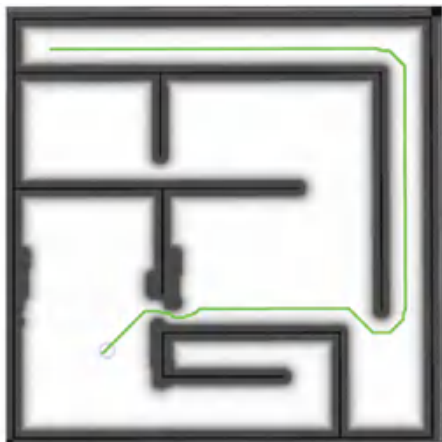
#### 4.1 改进 A\* 算法仿真实验

为了检验改进 A\* 算法的有效性和可行性, 本文在 Ubuntu 系统下对相关算法进行仿真实验。实验平台为戴尔工作站, 配备 Ubuntu16.04 操作系统和 ROS(kinetic) 机器人操作系统。仿真实验所使用的计算机配置为: 处理器是英特尔 Xeon E5-1630 v4, 主频是 3.7 GHz。

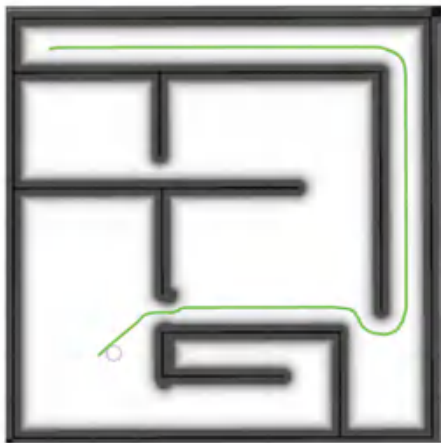
A\* 算法和改进 A\* 算法的路径规划对比图, 如图 6 所示。为了保证实验的可靠性, 进行了多组仿真实验, 将多组数据取均值作为最终的结果, 性能对比结果见表 1。图 6 和表 1 中的结果表明, 未经过梯度下降算法平滑处理的路径, 在拐弯处转折点多, 而通过改进 A\* 算法规划出的路径, 转折点显著



减少,路径平滑度得到大幅提升。同时也缩短了路径长度,更适合机器人运行。



(a) A\* 算法



(b) 改进 A\* 算法

图 6 A\* 算法改进前后对比

Fig. 6 Comparison of A\* algorithm before and after improvement

表 1 A\* 算法与改进 A\* 算法的性能指标对比

Tab. 1 Performance comparison between traditional A\* algorithm and improved A\* algorithm

算法	路径长度/m	转折/个	时间/s
传统 A* 算法	22.116 2	22.2	0.013 409 2
改进 A* 算法	21.916 2	1.4	0.014 093 2
性能优化	0.904 3% ↑	93.693 7% ↑	5.101 0% ↓

### 4.2 改进 TEB 仿真实验

将路径点与 TEB 轨迹位姿点约束加入后,TEB 的轨迹优化如图 7 所示。图 7 中,绿色线段为全局路径,蓝色线段为已行驶轨迹,红色线段是 TEB 算法规划的局部路径,蓝色的小方块是路径点。各路径点的间距为 0.25 m,由这些路径点构成的全局路径的子集的长度不超过 1.5 m。TEB 算法和改进 TEB 算法的移动轨迹对比图,如图 8 所示,算法改进前后与各拐弯处的最短距离,见表 2。图 8 和表 2

中的结果表明,原始 TEB 算法规划的最优轨迹在过弯时,容易偏离全局路径,与墙面距离较近;而改进后的 TEB 算法与全局路径能保持较高的吻合度,在转弯时,也能较好地跟随全局路径,仍与墙面保持了足够的距离。

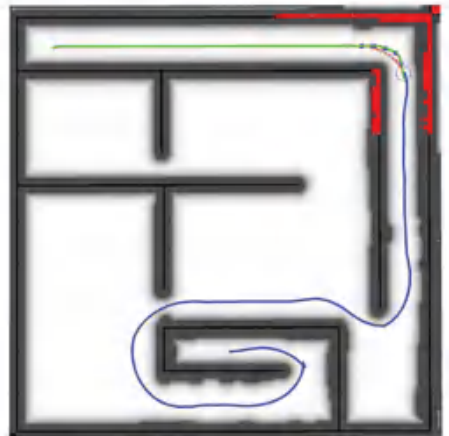
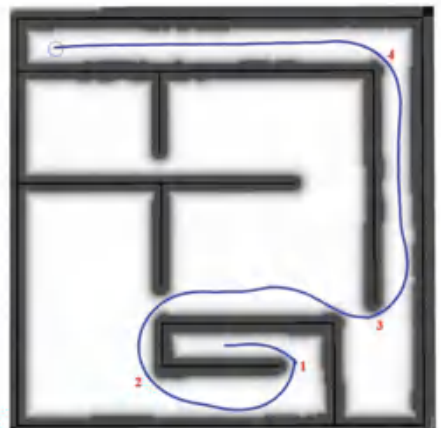
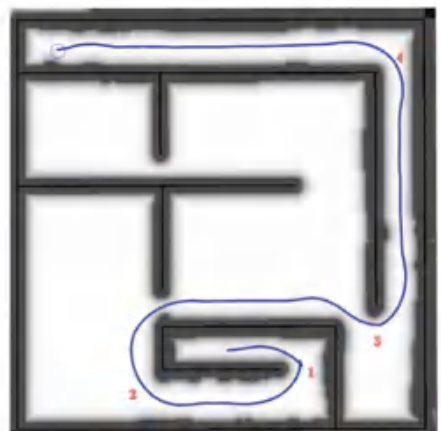


图 7 改进后 TEB 算法路径规划过程

Fig. 7 Path planning process of improved TEB algorithm



(a) TEB 算法



(b) 改进 TEB 算法

图 8 TEB 算法改进前后对比

Fig. 8 Comparison of TEB algorithm before and after improvement

表 2 算法改进前后与转角距离

Tab. 2 Distance from the corner before and after algorithm improvement

算法	转角 1/m	转角 2/m	转角 3/m	转角 4/m
改进 A* 算法	0.48	0.59	0.53	0.56
TEB 算法	0.34	0.37	0.26	0.33
改进 TEB 算法	0.50	0.60	0.39	0.46
性能优化	33.34 ↑	38.98 ↑	24.53 ↑	23.21 ↑

### 4.3 融合算法仿真实验

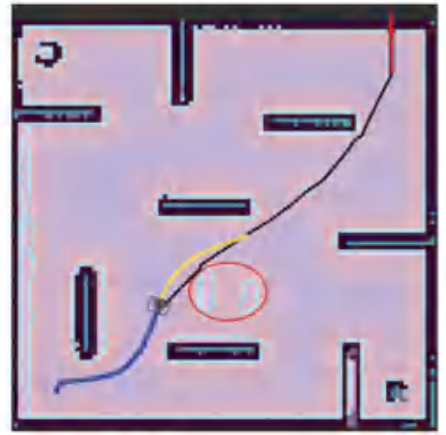
移动机器人的工作场景复杂多变,因此接下去将在仿真环境下,验证融合算法面对未知障碍物时的避障性能。通过改进 A\* 算法得到平滑的全局路径后,将其离散化为时间序列和位姿序列,在此基础上,改进 TEB 算法进行局部路径规划。若携带的激光雷达传感器感知到周围环境中存在未知障碍物,TEB 算法规划的局部路径可修正全局路径,从而达到实时避障的效果。为了检验融合算法的避障能力,在 gazebo 仿真环境下进行移动机器人避障实验,仿真环境如图 9 所示。



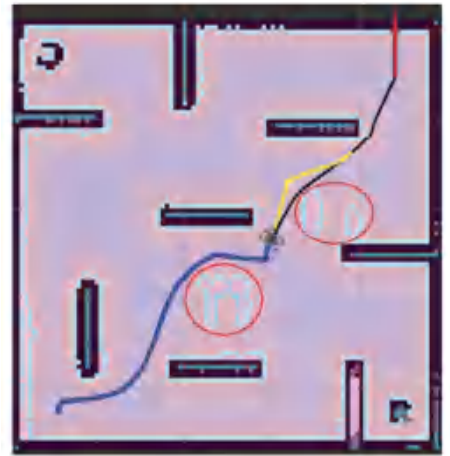
图 9 gazebo 仿真环境

Fig. 9 gazebo simulation environment

仿真实验的过程为:首先确定机器人起始点与坐标点,然后通过 A\* 算法规划得到全局路径,接着,在机器人沿着全局路径前行的过程中,在全局路径上加入 2 个未知障碍物。机器人通过自身携带的激光雷达传感器感知到障碍物,并通过改进 TEB 算法规划局部路径,修正全局路径,绕过障碍物。由于具有不同的路径规划空间,全局路径规划算法以 1 Hz 的频率运行,局部路径规划算法以 5 Hz 的频率运行。移动机器人避障过程如图 10 所示。



(a) 躲避第一个障碍物



(b) 躲避第二个障碍物

图 10 融合算法的避障过程

Fig. 10 Obstacle avoidance process of fusion algorithm

图 10 中,蓝线是机器人已行驶的轨迹,黑线是改进 A\* 算法规划的全局路径,黄线是 TEB 算法规划的局部路径,红圈圈出的是未知的障碍物。可以看到,改进 A\* 算法可以规划出较为平滑的全局路径,使机器人能沿着全局路径移动。当机器人靠近障碍物时,TEB 算法规划的局部路径能够修正全局路径,从而绕过未知的障碍物。最终,机器人顺利到达目标位置。从机器人行驶的轨迹可以看出,融合改进 A\* 和 TEB 的路径规划算法可以规划出最优路径,且能够躲避机器人移动过程中出现的未知障碍物,在躲避障碍物时,与障碍物也能保持足够的安全距离。

## 5 结束语

本文在 A\* 算法的基础上,提出了一种融合改进 A\* 和 TEB 的移动机器人路径规划算法,有效改善了 A\* 算法环境适应性差及路径规划不平滑的问

题。在 A\* 算法中,通过梯度下降算法思想,减少大量转折点,使规划的路径更平滑,更符合机器人实际运行的情况;在 TEB 算法中,通过增加路径点与 TEB 轨迹位姿点的约束,使其规划的路径能更好地遵循全局路径;与 TEB 算法相融合,使其具备了实时避障的能力,面对周围环境中出现的未知障碍物,能够有效避障。仿真实验结果表明,所提出的融合算法在移动机器人路径规划中具有一定的可行性和有效性。

在未来的研究工作中,会考虑减少 TEB 算法中优化变量的数量,以此降低 TEB 算法在局部路径规划中占用的计算资源,并将融合算法应用于实际机器人中。

## 参考文献

- [1] 李靖,杨帆. 复杂障碍物环境下多任务目标遍历路径规划[J]. 现代电子技术,2021,44(07):162-168.
- [2] 康玉祥,姜春英,秦运海,等. 基于改进 PSO 算法的机器人路径规划及实验[J]. 机器人,2020,42(01):71-78.
- [3] 胡立坤,王帅军,吕智林,等. 移动机器人多目标搜寻的 D\* - 蚁群融合算法[J]. 小型微型计算机系统,2020,41(03):471-476.
- [4] SEIFEDINE K, GENNADY A, VIKTOR F. D-star algorithm modification[J]. International Journal of Online and Biomedical Engineering, 2020, 16(08): 108-113.
- [5] 迟旭,李花,费继友. 基于改进 A\* 算法与动态窗口法融合的机器人随机避障方法研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(03):132-140.
- [6] 张智,翁宗南,苏丽,等. 室内机器人避障路径规划[J]. 小型微型计算机系统,2019,40(10):2077-2081.
- [7] KAZUNORI U, LEONARD B. Dijkstra algorithm - based ray tracing for tunnel-like structures[J]. International Journal of Grid and Utility Computing, 2020, 11(01): 84-92.
- [8] LUO Min, HUO Xiaorong, Yang Jing. Surface optimal path planning using an extended Dijkstra algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 147827-147838.
- [9] 何壮壮,丁德锐. 基于 D-star 和 DWA 的改进机器人导航方法[J]. 电子测量技术,2019,42(12):122-128.
- [10] CAO Yi, ZHOU Yi, ZHANG Yabin. Path planning for obstacle avoidance of mobile robot based on optimized A\* and DWA algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(24): 246-252.
- [11] CHANG Lu, SHAN Liang, JIANG Chao, et al. Reinforcement based mobile robot path planning with improved dynamic window approach in unknown environment [J]. Autonomous Robots, 2020, 45: 51-76.
- [12] 李秀智,赫亚磊,孙炎琰,等. 基于复合式协同策略的移动机器人自主探索[J]. 机器人,2021,43(01):44-53.
- [13] BENICE M, NIKOLAOS T, JEREMIE D, et al. Timed-elastic bands for manipulation motion planning [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(04): 3513-3520.
- [14] YANG Wenlin, WU Peng, ZHOU Xiaoqi, et al. Improved artificial field and dynamic window method for amphibious robot fish path planning[J]. Applied Sciences, 2021, 11(05): 2114-2114
- [15] JEANFRANCOIS D, STEPHANE V, PIERRE M. Contributions on artificial potential field method for effective obstacle avoidance [J]. Fractional Calculus and Applied Analysis, 2021, 24(02): 421-446.
- [16] 彭湘,向凤红,毛剑琳. 一种未知环境下的移动机器人路径规划方法[J]. 小型微型计算机系统,2021,42(05):961-966.
- [17] 王志中. 复杂动态环境下自主机器人路径规划研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(01):64-68.
- [18] DAI Xiaolin, LONG Shuai, ZHANG Zhiwen, et al. Mobile robot path planning based on Ant Colony Algorithm with A\* heuristic method[J]. Frontiers in Neurorobotics, 2019, 13: 15.
- [19] 庞磊,曹志强,喻俊志. 基于 A\* 和 TEB 融合的行人感知无碰撞跟随方法[J]. 航空学报,2021,42(04):501-510.
- [20] 刘建宇,范平清. 基于改进 RRT\* -connect 算法机械臂路径规划[J]. 计算机工程与应用,2021,57(06):274-278.
- [21] 文郁,黄江帅,江涛,等. 安全平滑的改进时间弹性带轨迹规划算法[J/OL]. 控制与决策: 1-9[2021-07-01]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0068>.

(上接第95页)

- [9] ZHAN Feiyan. Research on bank fraud transaction detection based on LSTM - Focalloss [C]//ACAI 2020: 2020 3rd International Conference on Algorithms, Computing and Artificial Intelligence. Sanya ,China:ACM ,2020:44.
- [10] 欧阳明哲. 基于 GRU 神经网络的多因子量化选股策略[D]. 武汉:中南财经政法大学,2020.
- [11] 王兴源. 基于图嵌入和 GRU 的兴趣点推荐模型[J]. 计算机系统应用,2021,30(10):40-47.
- [12] PARK J H, CHOI J S, KO J H. Dual-precision deep neural network [C]//AIPR 2020: Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Pattern Recognition. Xiamen, China: ACM,2020:30-34.
- [13] SZE V, CHEN Y H, YANG T J, et al. Efficient processing of deep neural networks [M]. San Rafael, CA, USA: Morgan & Claypool Publishers,2020.
- [14] 吴美林. 基于 DNN 与随机森林特征信息选择的风电功率预测研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- [15] 廖文梯,陈洲,赵瑜馨,等. 利用混合模型 LSTM-DNN 进行全球电离层 TEC map 的中短期预报[J]. 航天器环境工程,2021, 38(03):281-286.
- [16] Max Planck Institute for Biogeochemistry. Exploring the earth system[EB/OL].[2022]. <https://www.bgc-jena.mpg.de/index.php/Main/HomePage>.