

4-15-2024

## Dynamic Path Planning for Mobile Robot Based on RRT\* and Dynamic Window Approach

Rui Zhang

*Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210000, China, 1220617335@qq.com*

Li Zhou

*Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210000, China; Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210000, China; Jiangsu Engineering Research Center on Meteorological Energy Using and Control (C-MEIC), Nanjing 210000, China, lk\_zhouli@163.com*

Zhengyang Liu

*Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210000, China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Dynamic Path Planning for Mobile Robot Based on RRT\* and Dynamic Window Approach

## Abstract

**Abstract:** A dynamic path planning method combining RRT\* and dynamic window approach(DWA) is proposed to realize the obstacle avoidance of mobile robot in complex environment of dynamic obstacles. Improved RRT\* algorithm is used to generate the global optimal safe path based on the known environment information. By eliminating the dangerous nodes generated by RRT\* algorithm, the security of global path is ensured. Greedy algorithm is used to remove the redundant nodes in the path to reduce the length of global path. DWA is used to track along the global optimal path planned by the improved RRT\* algorithm. When static obstacles appear on the global path, the weights of DWA algorithm evaluation function is adjusted twice to avoid the obstacles and return to the original path in time. When moving obstacles is in the environment. By detecting the dangerous distance in advance, changing direction and speeding up, the robot can safely drive away from the area. Simulation experiments verify that the improved fusion algorithm proposed in complex dynamic environment has shorter running time, smaller path cost, and always keeps safe distance from obstacles, which ensures the optimal tracked path while safely avoiding the dynamic obstacles.

## Keywords

mobile robot, path planning, improved RRT\* algorithm, dynamic window approach, dynamic obstacle avoidance

## Recommended Citation

Zhang Rui, Zhou Li, Liu Zhengyang. Dynamic Path Planning for Mobile Robot Based on RRT\* and Dynamic Window Approach[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4): 957-968.

## 融合RRT\*与DWA算法的移动机器人动态路径规划

张瑞<sup>1</sup>, 周丽<sup>1,2,3\*</sup>, 刘正洋<sup>1</sup>(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210000; 2. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210000;  
3. 江苏省气象能源利用与控制工程技术研究中心, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 为实现移动机器人在复杂动态障碍物环境中的避障, 提出一种改进的快速随机扩展树 (rapidly-exploring random tree, RRT\*)与动态窗口法(dynamic window approach, DWA)相融合的动态路径规划方法。基于已知环境信息, 利用改进RRT\*算法生成全局最优安全路径。通过消除RRT\*算法产生的危险节点, 来确保全局路径的安全性; 使用贪婪算法去除路径中的冗余节点, 以缩短全局路径的长度。利用DWA算法跟踪改进RRT\*算法规划的最优路径。当全局路径上出现静态障碍物时, 通过二次调整DWA算法评价函数的权重来避开障碍物并及时回归原路线; 当环境中出现移动障碍物时, 通过提前检测危险距离并转向加速的方式安全驶离该区域。仿真结果表明: 该算法在复杂动态环境中运行时间短、路径成本小, 与障碍物始终保持安全距离, 确保在安全避开动态障碍物的同时, 跟踪最优路径。

**关键词:** 移动机器人; 路径规划; 改进RRT\*算法; 动态窗口法; 动态避障

中图分类号: TP242.6 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)04-0957-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1543

**引用格式:** 张瑞, 周丽, 刘正洋. 融合RRT\*与DWA算法的移动机器人动态路径规划[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(4): 957-968.

**Reference format:** Zhang Rui, Zhou Li, Liu Zhengyang. Dynamic Path Planning for Mobile Robot Based on RRT\* and Dynamic Window Approach[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4): 957-968.

## Dynamic Path Planning for Mobile Robot Based on RRT\* and Dynamic Window Approach

Zhang Rui<sup>1</sup>, Zhou Li<sup>1,2,3\*</sup>, Liu Zhengyang<sup>1</sup>

(1. Nanjing University of Information Science &amp; Technology, Nanjing 210000, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210000, China; 3. Jiangsu Engineering Research Center on Meteorological Energy Using and Control (C-MEIC), Nanjing 210000, China)

**Abstract:** A dynamic path planning method combining RRT\* and dynamic window approach(DWA) is proposed to realize the obstacle avoidance of mobile robot in complex environment of dynamic obstacles. Improved RRT\* algorithm is used to generate the global optimal safe path based on the known environment information. By eliminating the dangerous nodes generated by RRT\* algorithm, the security of global path is ensured. Greedy algorithm is used to remove the redundant nodes in the path to reduce the length of global path. DWA is used to track along the global optimal path planned by the improved RRT\* algorithm. When static obstacles appear on the global path, the weights of DWA algorithm evaluation function is adjusted twice to avoid the obstacles and return to the original path in time. When moving obstacles is in the environment. By detecting the dangerous distance in advance, changing direction and speeding up, the robot can safely drive away from the area. Simulation experiments verify

收稿日期: 2022-12-23 修回日期: 2023-03-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61573190)

第一作者: 张瑞(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为移动机器人路径规划算法。E-mail: 1220617335@qq.com

通讯作者: 周丽(1976-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为非线性控制、智能控制。E-mail: lk\_zhouli@163.com

that the improved fusion algorithm proposed in complex dynamic environment has shorter running time, smaller path cost, and always keeps safe distance from obstacles, which ensures the optimal tracked path while safely avoiding the dynamic obstacles.

**Keywords:** mobile robot; path planning; improved RRT\* algorithm; dynamic window approach; dynamic obstacle avoidance

## 0 引言

由于移动机器人具有自主导航、智能寻路等优点, 所以被广泛应用于工业制造、医疗服务、家庭生活中。其行驶路径的成本、效率、安全等性能指标将直接影响移动机器人的工作质量<sup>[1-2]</sup>。因此, 高效地规划出一条最短的安全路径显得尤为关键, 具有较大的研究意义和实用价值。根据环境信息的完全已知和不完全已知, 可将路径规划分为全局路径规划和局部路径规划。常见的全局路径规划算法包括基于搜索方法的 A\*<sup>[3]</sup>, 基于采样方法的快速搜索随机树(RRT)<sup>[4-5]</sup>。这类算法常常需要基于精确的地图信息, 优点是方法简单, 易于实现。在常见的局部路径规划算法中, 人工势场法利用目标点势场的引力和障碍物势场的斥力共同驱动机器人, 具有良好的实时性<sup>[6]</sup>。而动态窗口法(dynamic window approach, DWA)基于机器人的运动学模型, 考虑其运动特性和环境信息, 利用采样的可行速度组生成轨迹, 再由评价函数得到最优速度, 常用于机器人的动态避障<sup>[7-8]</sup>。

RRT 算法由于其结构简单、概率完备、搜索能力强等优点被广泛运用于机器人的全局路径规划。然而, 现有的 RRT 算法有着规划效率低、路径成本大、路径不光滑等缺点<sup>[9]</sup>。为了解决 RRT 算法存在的问题, 诸多学者提出了改进方法, 文献[10]提出了 RRT-connect 算法, 从起点和终点同时生成两棵随机树, 通过双向扩展的方式减少了路径规划时间, 但算法缺乏对路径成本的考虑。文献[11]提出了 RRT\* 算法, 在传统 RRT 算法的基础之上加入重新选择父节点和重新布线的过程,

可在迭代次数充足的条件下找到最优路径, 但算法搜索时所花费的时间较长。文献[12]提出了 RRT\*-smart 算法, 通过智能采样的方式提高了规划效率, 但对环境的自适应力较差。文献[13]提出了一种强化学习的多路径机器人路径规划方法 LM-RRT, 保证了全局路径规划效率并证明了对狭窄通道单查询路径规划问题的有效性, 但路径不光滑且不最优。文献[14]为了提高 RRT\* 算法规划路径的安全性, 通过将障碍物进行膨胀化处理, 确保路径的安全可行, 但没有考虑到动态避障的问题。动态窗口法(DWA)由于考虑机器人的运动学特性常用于机器人的局部路径规划, 但在复杂的障碍物环境中由于缺少参考路径的引导, 无法获得最优路径。DWA 算法采用固定权重的评价函数筛选出的路径无法适应复杂的动态环境。文献[15]基于强化学习动态调整 DWA 参数, 提高了算法的自适应能力和路径规划的成功率。文献[16]设计自适应规则动态调整 DWA 评价函数的权重, 使机器人更安全、高效地穿越稠密障碍物。目前, 单一改进 RRT 算法确实可以在已知环境中获得最优路径, 但无法避开动态障碍物。而单一改进 DWA 虽然可以有效避开动态障碍物, 但很难获得全局最优路径。因此, 改进这两种算法并实现融合显得尤为重要。文献[17]提出了一种基于 RRT\* 和 DWA 的融合方法。在利用 RRT\* 生成全局路径之后, 引入偏差函数的 DWA 算法跟踪全局路径, 从而获得最优路径, 实现动态避障。但规划的路径对环境的适应性较差。文献[18]切换使用 RRT\* 和 DWA 以适应不同的障碍物环境, 实现了实时计算和全局最优解的平衡。但路径曲折, 安全性得不到保障。

上述文献对全局路径算法 RRT 和局部路径算法 DWA 从不同角度进行了优化, 并提出了融合算法。但并未考虑机器人在复杂动态环境下路径成本的最优性和安全性。针对以上问题, 本文提出一种改进 RRT\* 与 DWA 算法相融合的路径规划方法。主要工作如下:

(1) 针对 RRT\* 算法规划的路径距离障碍物近的问题, 提出一种消除危险节点的方法, 以确保路径与障碍物保持安全距离。为了去除路径中的冗余节点, 利用贪婪算法对路径进行缩短处理, 使全局路径的安全性和路径成本得到了优化。

(2) 针对 DWA 算法缺乏全局路径引导而无法获得最优路径, 固定权重的评估函数无法适应不同障碍环境的问题, 本文利用改进的 RRT\* 算法规划出的路径, 将其作为 DWA 算法的参考路径。如果在沿着全局路径移动过程中遇到突发的静态障碍物时, 可以通过修改评估函数的权重并设计快速返回参考路径的方式实现避障。如果环境中出现移动障碍物, 本文设计一种新型的动态避障策略, 在发生碰撞之前检测危险距离, 然后判断转向并加速驶离该动态障碍物区域, 从而提高了移动机器人在动态环境中的安全性。

## 1 全局路径规划

### 1.1 传统 RRT\* 算法

RRT\* 是一种改良的 RRT 算法, 主要致力于改进路径长度不最优的问题。RRT\* 算法是一种渐进最优算法, 通过在 RRT 算法的基础上加入重新选择父节点和重新布线的过程, 随着迭代次数的不断增加, 得到的路径会越来越优<sup>[18]</sup>。

RRT\* 算法的第一层优化: 重新选择父节点。如图 1 所示, 以  $q_{new}$  为圆心和事先定义好的半径画圆, 找到这个圆内  $q_{new}$  的所有近邻点作为其备选父节点, 分别为点 E、F、H、J。从图中可以看出, A-B-D-K 这条路径为 RRT 算法在规划的初始未优化路径, 其路径成本为 9。当备选父节点连接

到  $q_{new}$  时, 路径分别为 A-E-K, A-B-D-F-K, A-E-H-K, A-B-D-J-K, 路径成本分别为 8、13、12、13。由于路径 A-E-K 的成本最低, 所以, 将路径 A-E-K 替换原路径 A-B-D-K。

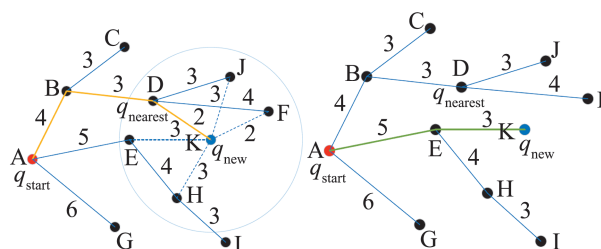


图 1 重新选择父节点  
Fig. 1 Reselect parent nodes

RRT\* 算法的第二层优化: 随机树的重新布线。为了进一步减小路径成本, 为  $q_{new}$  寻找下一个可连接的近邻点, 如若此路径成本小于原先路径到达该点的成本, 则将其替换。如图 2 所示, D、F、H、J 为  $q_{new}$  的近邻点, 其中, 路径 A-E-K-D 的成本为 10, 而原先路径 A-B-D 成本为 7, 不满足要求。同理, 连接到其他近邻点的成本分别为 10、11、11, 与之对应的原先路径成本为 11、9、10。因此, 将路径 A-E-K-F 替换掉原先路径 A-B-D-F, 成为新的随机树。

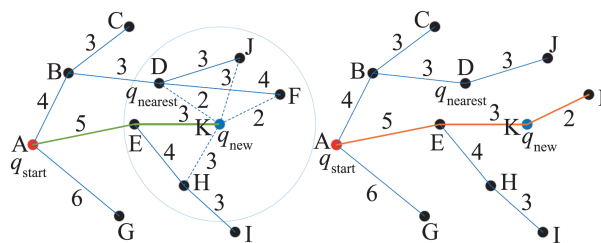


图 2 随机树的重新布线图  
Fig. 2 Rewiring of random trees

### 1.2 改进 RRT\* 算法

#### 1.2.1 剔除危险节点

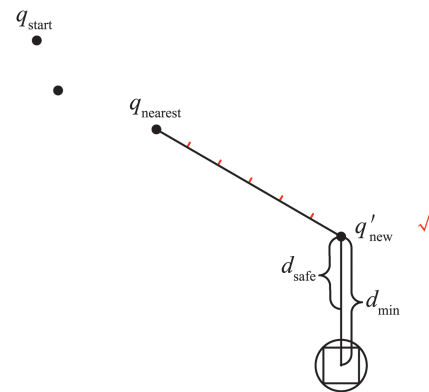
为了获得成本最小的路径, RRT\* 算法会连接靠近障碍物的节点, 虽然路径与障碍物并没有发生碰撞, 但该路径无法保证实体机器人的安全运行。因此, 最终规划出的路径要与障碍物保持一

定的距离。本文通过距离约束剔除靠障碍物近的危险节点，筛选出可用的安全节点。

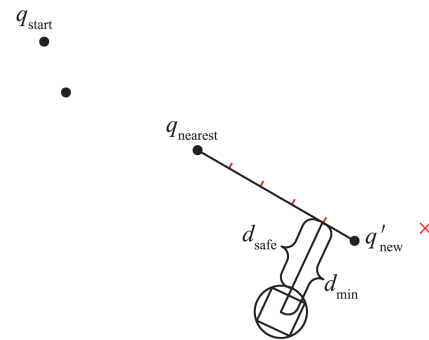
图3为新节点的保留和剔除，图中的小方块是由实验中的障碍物分割而来的，为了方便计算距离，对其做外接圆处理。首先，设置一个安全距离 $d_{safe}$ (实验中为0.5 m)，接着，将扩展树中的最近点 $q_{nearest}$ 与待选新节点 $q'_{new}$ 的连线进行若干等分，得到 $n$ 个点，分别计算这些点到所有障碍物的距离。如果其中到达障碍物的最短距离 $d_{min}$ 小于小方块外接圆的半径 $R_{ob}$ 与安全距离 $d_{safe}$ 之和时，则认定该点是危险节点，将其剔除，反之则保留，最终得到具有距离约束的安全路径。图3(a)将 $q_{nearest}$ 与 $q'_{new}$ 的连线平分分为6段，其中， $q'_{new}$ 是平分线上到达障碍物距离最短的点，此时 $d_{min} > R_{ob} + d_{safe}$ ，认定 $q'_{new}$ 是安全节点，选择保留。图3(b)中，靠近 $q'_{new}$ 一侧的平分点为到达障碍物距离最短的点，此时 $d_{min} \leq R_{ob} + d_{safe}$ ，则认定 $q'_{new}$ 是危险节点，选择剔除。

### 1.2.2 路径缩短处理

虽然RRT\*算法规划的路径相对最优，但依然存在一些冗余节点，从而导致路径较为曲折，因此，在满足避障的同时，去除多余的节点，有利于进一步减小路径成本。路径缩短处理采用贪婪算法，基本原理<sup>[19]</sup>：首先将终点 $q_{goal}$ 和起点 $q_{start}$ 相连，如果无碰撞，最终路径就为起点连接终点的直线，如果有碰撞，选择终点 $q_{goal}$ 的前一个节点和起点 $q_{start}$ 相连，按照这样的方式，依次对各个路径节点和 $q_{start}$ 进行障碍物碰撞判断，直至找到无碰撞的那个路径点，记为新起点 $q'_{start}$ ，重复上述过程，一旦找到能与终点 $q_{goal}$ 直接相连且无碰撞的新起点就结束。最终的优化路径就由起点、中间这些新起点和终点连接而成。图4为路径缩短处理的示意图，其中，黑色图形为障碍物，其他空白区域为可移动区域，蓝色路径为原路径，红色路径为经过缩短处理的路径。



(a) 保留新节点



(b) 剔除新节点

图3 新节点的保留和剔除

Fig. 3 Retain and remove new node

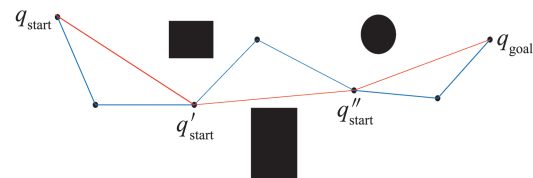


图4 路径缩短

Fig. 4 Shortened path

## 2 局部路径规划

### 2.1 传统DWA算法

DWA是一种基于速度采样的局部路径规划方法，该方法将传统的位置优化问题转化为带约束的速度优化问题。通过在速度空间中采样多组速度，然后模拟机器人在这些速度下一定时间间隔的轨迹，在得到无穷多组轨迹后，根据特定的评价函数，选取最优轨迹对应的速度以驱动机器人运动。

假设  $v(t)$  和  $w(t)$  分别表示移动机器人在世界坐标系下  $t$  时刻的线速度和角速度, 在采样周期  $\Delta t$  内, 位移较小, 近似做匀速直线运动, 则运动学模型的数学表达式为

$$\begin{cases} x(t) = x(t-1) + v(t)\Delta t \cos(\theta(t-1)) \\ y(t) = y(t-1) + v(t)\Delta t \sin(\theta(t-1)) \\ \theta(t) = \theta(t-1) + w(t)\Delta t \end{cases} \quad (1)$$

### 2.1.1 速度采样

速度空间中存在无穷多组速度  $(v, w)$ , 而在实际中, 可以根据环境和机器人自身的约束, 将采样速度控制在一定的范围, 其约束为

$$v_i = \{(v, w) | v \in [v_{\min}, v_{\max}], w \in [w_{\min}, w_{\max}]\} \quad (2)$$

由于受电机的实际转矩影响, 移动机器人存在最大的加速度和减速度, 其速度约束为

$$v_j = \{(v, w) | v \in [v_c - \dot{v}_b \Delta t, v_c + \dot{v}_a \Delta t], w \in [w_c - \dot{w}_b \Delta t, w_c + \dot{w}_a \Delta t]\} \quad (3)$$

式中:  $v_c$ 、 $w_c$  为当前时刻的线速度和角速度;  $\dot{v}_a$ 、 $\dot{w}_a$  为机器人最大加速度;  $\dot{v}_b$ 、 $\dot{w}_b$  为机器人最大减速度。

考虑到机器人在行进过程中的安全性, 在局部环境中避障时, 能够确保与障碍物碰撞前将速度降为0, 其约束为

$$v_k = \{(v, w) | v \leq \sqrt{2 \times d(v, w) \dot{v}_b}, w \leq \sqrt{2 \times d(v, w) \dot{w}_b}\} \quad (4)$$

式中:  $d(v, w)$  为模拟轨迹末端与障碍物的最近距离。

### 2.1.2 评价函数

在  $v_i$ 、 $v_j$ 、 $v_k$  这3种速度的约束下, 空间内存在若干组可行轨迹, 需要利用评价函数对各个轨迹进行评分, 选取其中分值最高的作为最优路径并执行:

$$G(v, w) = \alpha \cdot h(v, w) + \beta \cdot v(v, w) + \gamma \cdot d(v, w) \quad (5)$$

式中:  $h(v, w)$  为机器人方位角评价函数, 表示当前模拟轨迹末端方向与目标方向之间的角度偏差;  $v(v, w)$  为当前模拟速度大小的评价函数;  $d(v, w)$  为

轨迹末端与障碍物的最近距离。

## 2.2 融合算法

由于缺少全局路径的引导, 传统DWA算法往往很难获得理想的最优路径, 尤其是在复杂的障碍物环境中, 容易陷入局部最优。因此, 可以通过融合全局路径RRT\*算法的规划信息, 引导DWA算法在保证局部动态避障的同时, 实现路径的全局最优<sup>[13]</sup>。其评价函数可更改为

$$\begin{cases} G(v, w) = \alpha \cdot h(v, w) + \beta \cdot v(v, w) + d(v, w) \\ d(v, w) = \gamma \cdot d_{\text{obmin}}(v, w) + \theta \cdot d_{\text{global}}(v, w) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $d(v, w)$  为距离评价函数;  $d_{\text{obmin}}(v, w)$  为避障函数, 即当前轨迹与障碍物之间的最短距离;  $d_{\text{global}}(v, w)$  为偏离函数, 即当前轨迹与全局路径的距离。

在上述的融合算法中, 全局路径RRT\*为DWA指明了最优轨迹, 通过增加当前路径与全局路径距离的评价函数, 利用距离越小得分越高, 使DWA算法能够更好地跟踪全局最优路径。该融合算法虽然解决了传统DWA算法路径成本较长和易陷入局部最优的缺点, 但仍然存在以下几点问题:

(1) DWA评价函数的固定权重无法适应不同的障碍物环境, 尤其是当RRT\*算法规划的路径碰撞到未知的障碍物时, 无法兼顾全局最优和安全避障。

(2) 如果在全局路径的两侧出现移动障碍物且存在碰撞的可能, 此时融合算法很难提前做出准确的避障动作, 以较快的速度偏离全局路径避开移动障碍物。

## 2.3 改进融合算法

### 2.3.1 二次调权与路径回正

针对DWA评价函数的固定权重无法自适应环境的问题, 提出一种动态调整权重的方法。首先, 在全局路径穿过和未穿过未知障碍物区域时使用两组不同的权重来调整避障和逼近全局路径之间

的优先权。其次,在避开未知障碍物后,能及时回到初始最优权重以逼近全局路径。

如图5所示,黑色矩形为已知静态障碍物,灰色正方形为未知静态障碍物,蓝色虚线是全局路径,其中, $d_1$ 是当前路径上离机器人最近的障碍物和终点的距离, $d_2$ 是当前路径上机器人的位置和终点的距离。

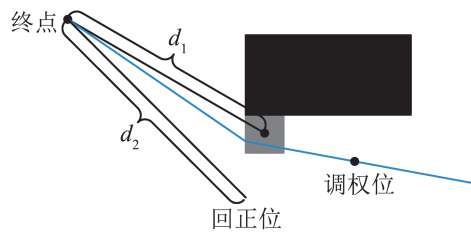


图5 二次调权与路径回正

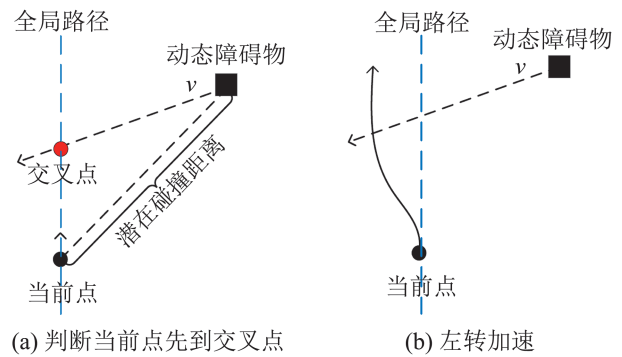
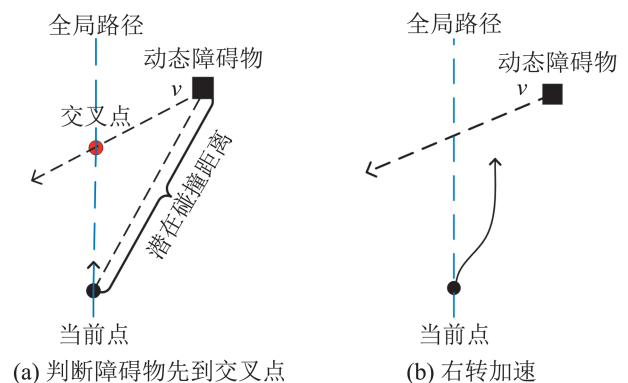
Fig. 5 Secondary weights adjustment and path correction

二次调权与路径回正的原理:为障碍物设置一个检测距离 $d_{det}=2\text{ m}$ ,当机器人与最近障碍物之间的最短距离 $d_{min}\leq d_{det}$ 时(调权位),此时机器人的首要任务是及时做出反应并安全避开障碍物。为了避免陷入局部极小值或无法做出准确的避障动作,需要对DWA算法的评价函数权重做出调整,让偏离函数 $d_{global}(v,w)$ 的权重 $\theta$ 变小,避障函数 $d_{obmin}(v,w)$ 的权重 $\gamma$ 变大。机器人成功躲避障碍物后,选择当 $d_1\geq d_2-D$ 时(回正位),调回原始最优参数,其中 $D$ 是过渡差值,实验为固定值1。通过改变路径回归原始最优路径的时间,避免了在未知障碍物附近路径不优的问题和不能及时避障的缺点。

### 2.3.2 安全动态避障策略

如果环境中出现动态障碍物,且与机器人有碰撞的可能,融合算法由于缺少避障策略,无法提前做出反应并安全驶离动态障碍物区域,因此,提出一种提前检测危险距离并转向加速的避障策略。为了避障的合理性和便捷性,设置动态障碍物从全局路径的一侧匀速驶向另一侧且速度小于DWA的最大速度。

安全动态避障策略如图6~7所示。设置一个潜在的碰撞距离(实验中为4 m),当动态障碍物与当前点的距离 $\leq 4\text{ m}$ 时,比较动态障碍物匀速到达交叉点的时间 $t_1$ 和当前点的速度到达交叉点的时间 $t_2$ 的大小。如果 $t_1\geq t_2$ ,认定在不加任何转向正常行驶时,当前点先于动态障碍物到达交叉点,但此刻即时全力加速,也会存在碰撞的风险,所以,给当前点一个向左的转向并加速,走完一定的步数后,按原有的DWA算法规则回归原航线。从图中可以看出,转向加速的位置要比不加转向的位置更加安全。如果 $t_1<t_2$ ,动态障碍物先于当前点到达交叉点,此时给当前点一个向右的转向并加速,提前做出绕后加速动作,相比于只减速,规划效率更高,而且始终与动态障碍物保持一定的安全距离。

图6 情形I( $t_1\geq t_2$ )Fig. 6 Situation I ( $t_1\geq t_2$ )图7 情形II( $t_1<t_2$ )Fig. 7 Situation II ( $t_1<t_2$ )



### 3 仿真与分析

#### 3.1 静态环境中改进 RRT\* 算法的仿真实验

为了验证本文改进的 RRT\* 算法在静态已知障碍物环境下的优越性, 利用 MATLAB 2014 对提出的算法进行仿真验证。地图大小设置为 40 m × 40 m, 黑色矩形为障碍物, 白色位置为可移动区域, 起点为(40, 2), 终点为(0, 38)。在改进 RRT\* 算法中, 安全距离设置为 0.5 m。传统的 RRT\* 算法和改进 RRT\* 算法的对比仿真结果如图 8 所示, 实验总共运行 50 次, 并记录数据的平均值, 路径长度与安全性能比较如表 1 所示。

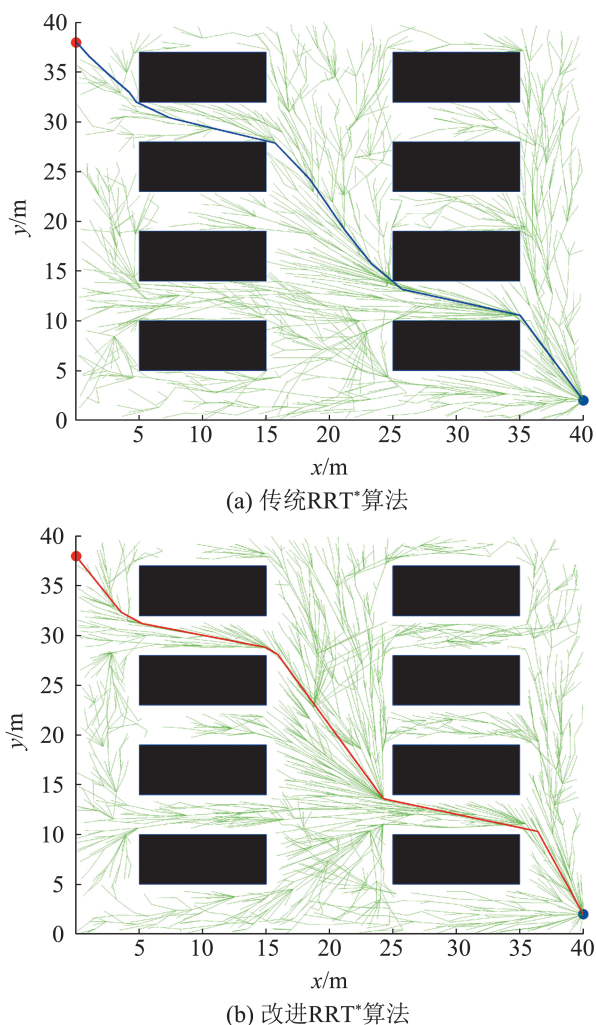


图 8 RRT\* 算法对比

Fig. 8 Comparison charts of RRT\* algorithm

表 1 性能指标数据

Table 1 Performance index data		m
算法	路径规划长度	路径与障碍物的最短距离
传统 RRT*	58.934 3	0.053 87
改进 RRT*	58.932 6	0.560 90

从图 8 和表 1 中可以看出, RRT\* 算法通过全图扩展随机树, 利用自身的重布线特性, 规划出一条较优路径。虽然使用了较多的树节点, 牺牲了规划效率, 但能够保证路径成本达到最小。传统 RRT\* 算法和改进的 RRT\* 方法规划的路径长度几乎相同。从路径的安全性看, RRT\* 算法规划的路径与障碍物的平均最短距离为 0.053 87 m, 显然靠障碍物太近, 此路径无法保证机器人移动的安全性。而本文改进的 RRT\* 算法, 在加入安全距离后, 删除危险节点, 与障碍物的平均最短距离为 0.560 9 m, 大于实验设置的安全距离。改进 RRT\* 算法规划的路径比传统的 RRT\* 算法更安全。

#### 3.2 动态环境中改进融合算法的仿真实验

动态环境仿真实验地图在改进 RRT\* 算法仿真实验的基础上做了 2 点变化: ①在改进 RRT\* 算法规划的路径上先后加入 2 个未知静态障碍物; ②在仿真环境中加入 1 个动态障碍物, 并在全局路径两侧做往复匀速运动。移动机器人的运动学参数: 最小线速度为 0; 最大线速度为 1 m/s; 线加速度为 0.1 m/s<sup>2</sup>; 最小角速度为 -40 rad/s; 最大角速度为 40 rad/s; 角加速度为 40 rad/s<sup>2</sup>。

传统 DWA 算法、融合算法和改进融合算法的评价函数及权重如表 2~4 所示。表 5 记录了这些算法的运行时间、路径长度、与障碍物的最短距离等性能指标。

表 2 DWA 评价函数权重

Table 2 Weights of DWA evaluation function			
参数	固定权重	参数	固定权重
$\alpha$	0.1	$\gamma$	0.4
$\beta$	0.3		

表 3 融合算法评价函数权重  
Table 3 Weights of fusion algorithm evaluation function

参数	固定权重	参数	固定权重
$\alpha$	0.1	$\gamma$	0.4
$\beta$	0.3	$\theta$	0.1

表 4 改进融合算法评价函数权重  
Table 4 Weights of improved fusion algorithm evaluation function

参数	逼近权重	避障权重
$\alpha$	0.4	0.1
$\beta$	0.3	0.3
$\gamma$	0.2	0.4
$\theta$	0.2	0.1

表 5 性能指标对比  
Table 5 Comparison of performance indicators

算法	运行 时间/s	路径 长度/m	路径与静态	路径与动态
			障碍物最短 距离/m	障碍物最短 距离/m
DWA	446	72.859 1	1.139 30	1.054 2
融合算法	547	65.162 1	0.045 90	0.216 4
改进融合算法	270	59.875 6	0.659 68	2.073 5

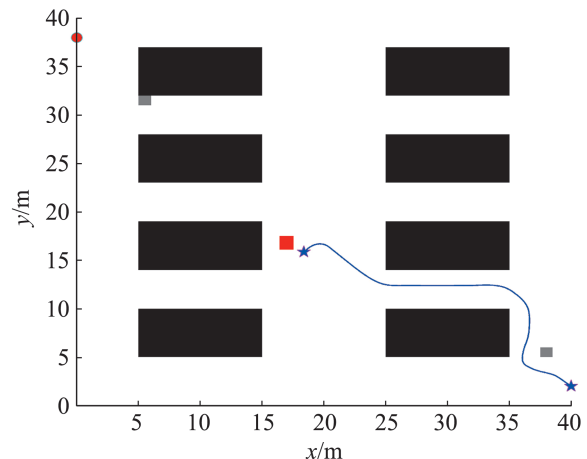
### 3.2.1 传统的DWA算法仿真实验

传统DWA算法仿真实验如图9所示，灰色方块为静态未知障碍物，红色方块为移动障碍物。图9(a)中DWA算法通过“绕大弯”的方式实现静态障碍物避障，通过“跟随同向行驶”方式实现动态障碍物避障。图9(b)为到达目标点的仿真图，可以看出传统的DWA算法由于缺少全局路径的引导和准确的避障策略，无法获得理想的最优路径，避开动态障碍物的效果也很差。

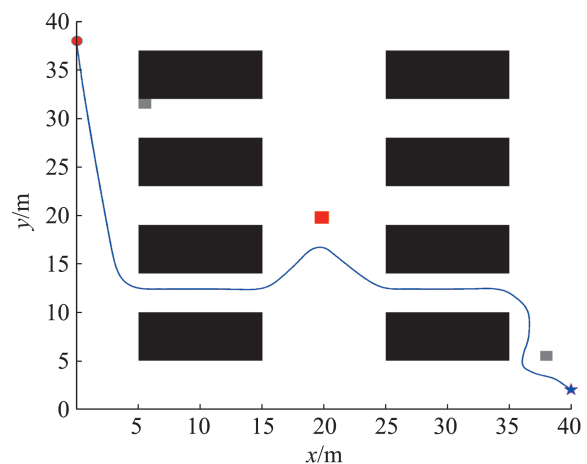
### 3.2.2 融合算法仿真实验

融合算法的仿真实验如图10所示，图10(a)中红色虚线为改进RRT\*算法在静态已知障碍物环境中规划的全局路径。从图中可以看出，全局路径RRT\*算法由于缺少实时规划能力，无法避开未知障碍物。图10(b)为融合算法遇到未知静态障碍物，由于其评价函数为固定权重，不能及时偏离原航线避障，导致路径不安全且不光滑。图10(c)遇到动态障碍物时，该融合算法采取同向跟随并减速的形

式，直到脱离动态区域才回到原航线，导致路径会出现绕弯的现象。图10(d)为完成整个路径规划的效果图，该融合算法虽然能实现动态避障，但路径存在不安全、不光滑、自适应能力差的缺点。



(a) DWA算法避开动态障碍物



(b) 到达目标点

图9 传统DWA算法仿真图

Fig. 9 Simulation diagram of traditional DWA algorithm

### 3.2.3 改进融合算法仿真实验

加入新型避障策略的改进融合算法仿真实验如图11所示，图11(b)是模拟机器人在行进过程中遇到未知障碍物时，由于此前评价函数的固定权重已经不适应突发障碍物环境，需要修改评价函数的权重。使用以避障占主导地位的评价函数权重，达到一定条件后逼近全局路径权重上升以便于回归原航线。本文提出的二次调权和回正机制能够让路径在避障后迅速回到原全局最优路径，

具有良好的环境适应能力。图11(c)为检测到与动态障碍物达到4 m(仿真实验的潜在碰撞距离)的时刻,此时通过计算可知,机器人先于障碍物到达交叉点(全局路径与障碍物行进轨迹的交点)。图11(d)(e)中机器人通过左转加速避开动态障碍物,然后以较快的速度回归原航线。图11(f)为完成整个路径规划的效果图,可以看出路径安全、逼近全局最优、光滑、适应环境能力强。

从上述3种算法的对比实验中可以看出,DWA算法虽然能实现局部动态避障,但是路径成本花费较大。融合算法在静态已知障碍物区域,虽然能够跟踪全局路径,缩短了路径长度,但使用固定权重的融合算法运行效率变低,路径与障

碍物之间的最短距离变近。加入本文提出的新型避障策略后,改进融合算法能够实时检测环境中的障碍物情况,通过调整评价函数权重避开未知静态障碍物,通过提前转向加速避开动态障碍物。改进融合算法的运行时间比DWA算法缩短了39.46%,比融合算法缩短了50.64%;路径长度比DWA算法减少了17.82%,比融合算法减少了3.37%。路径与静态障碍物的最短距离要求大于安全距离0.5 m,而动态障碍物属于不可控因素,需要路径与之保持较大的距离,从这两方面来看本文改进的融合算法安全性更高。改进的融合算法最终规划的路径也兼顾了全局最优和安全避障,同时能适应复杂的动态障碍物环境。

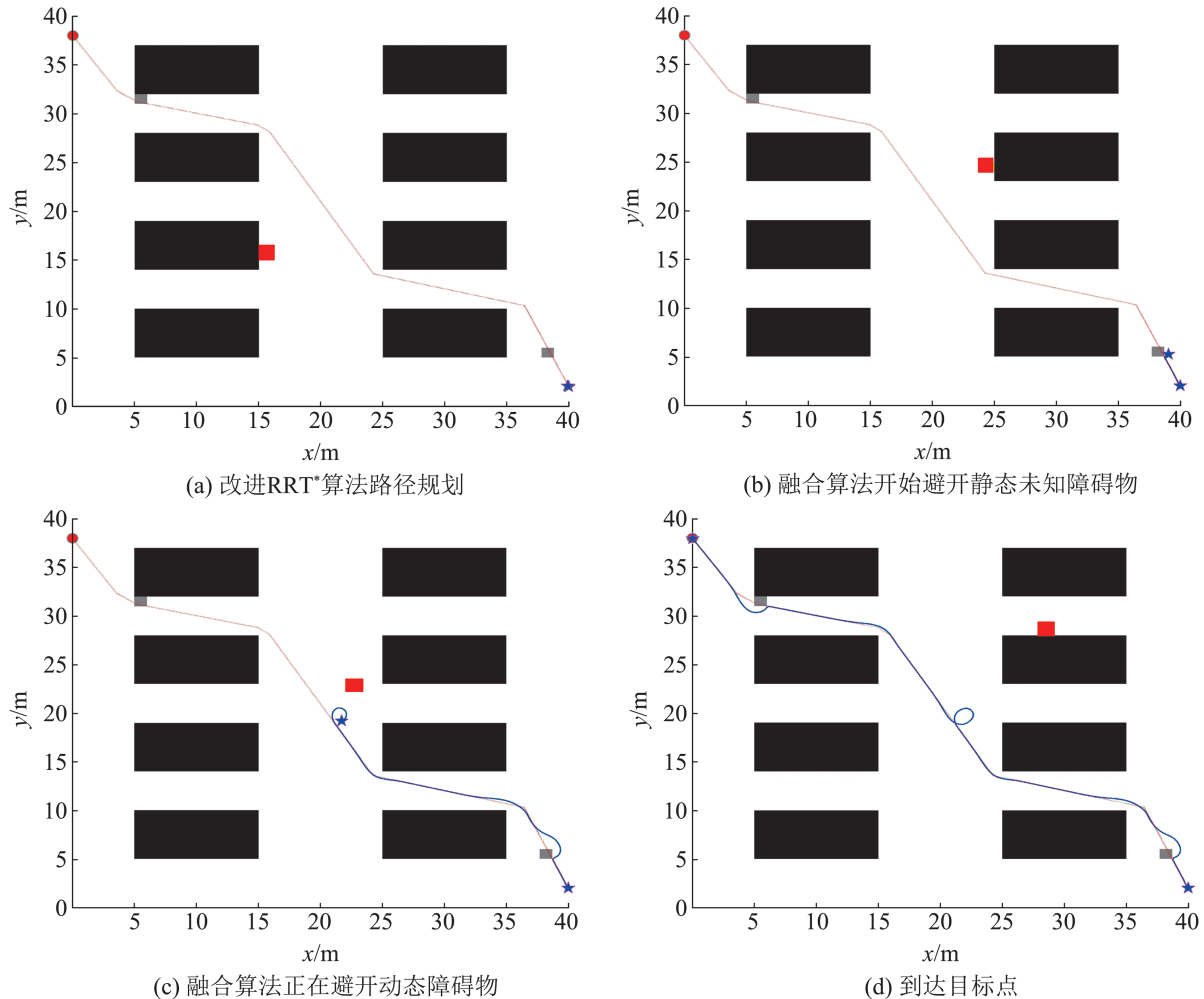


图10 融合算法路径规划仿真图

Fig. 10 Simulation diagram of fusion algorithm

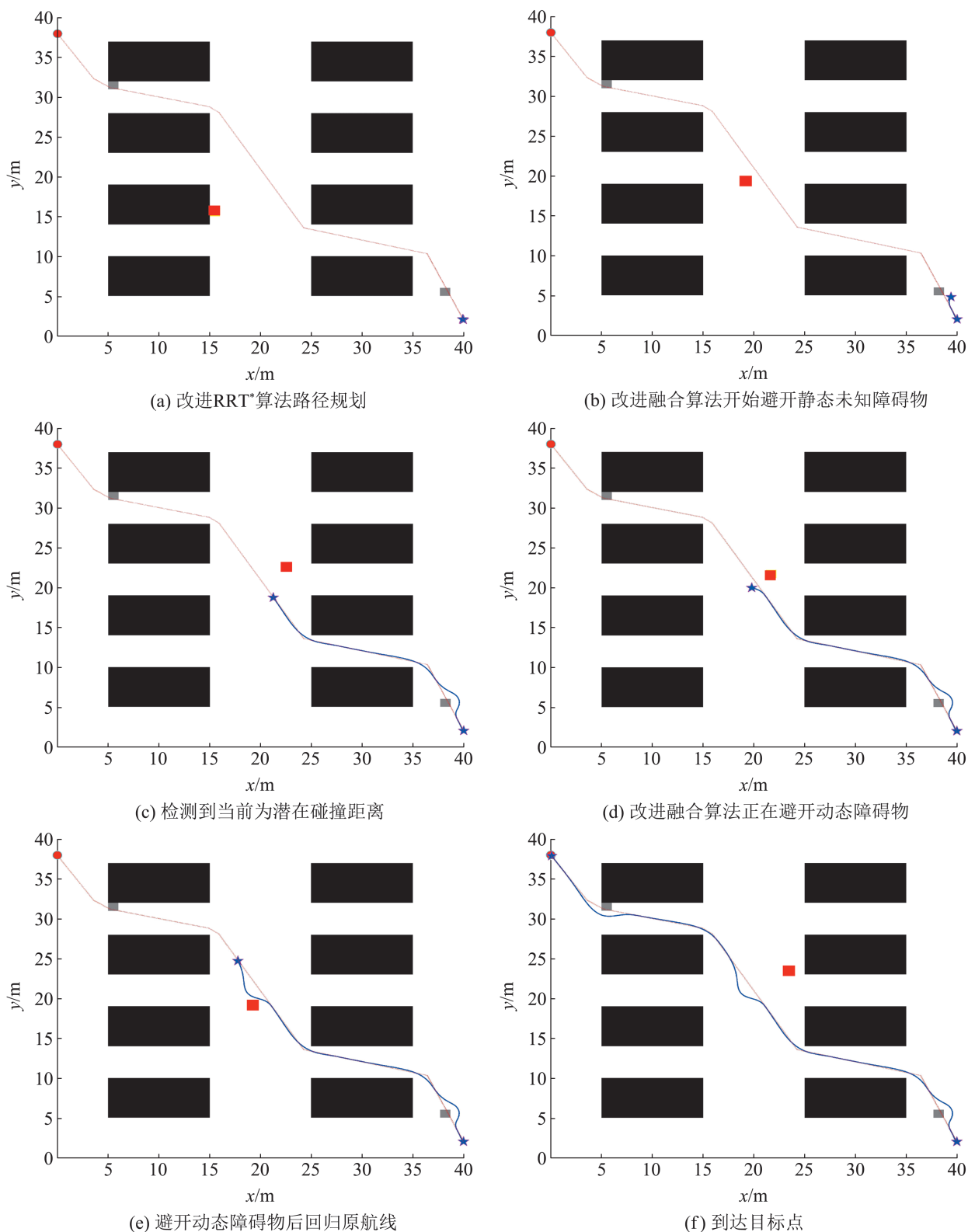


图 11 改进融合算法路径规划仿真结果

Fig. 11 Simulation diagram of improved fusion algorithm

## 4 结论

为了提升在复杂动态障碍物环境下移动机器人的路径规划质量, 提出了一种基于改进RRT\*算法与动态窗口法的融合算法。该算法以引入安全距离的改进RRT\*算法作为参考路径, 确保全局路径的安全性和路径成本的最优性, 同时结合DWA算法, 增加距离评价函数来跟踪参考路径。而对于DWA算法评价函数的固定权重无法适应复杂动态障碍物环境, 容易陷入局部极小值, 本文改进的融合算法在静态未知障碍物碰撞到全局路径区域采用二次调权和路径回正机制, 对移动障碍物区域采用判断转向并加速的安全动态避障策略, 最终规划出一条既能够跟踪全局路径, 又能安全避开动态障碍物的路径。该算法对移动机器人的动态规划具有一定的参考意义。鉴于本文的动态障碍物数量有限, 后续会在更为复杂的动态障碍物环境下做进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 朱久德. 复杂环境下移动机器人的路径规划算法研究[D]. 昆明: 云南大学, 2021.  
Zhu Jiude. Research on Path Planning Algorithm of Mobile Robot in Complex Environment[D]. Kunming: Yunnan University, 2021.
- [2] 吕雪飞. 复杂动态障碍物环境下的移动机器人路径规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.  
Lü Xuefei. Research on Path Planning of Mobile Robot in Complex Dynamic Obstacle Environment[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [3] 张新艳, 邹亚圣. 基于改进A\*算法的自动导引车无碰撞路径规划[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(1): 240-246.  
Zhang Xinyan, Zou Yasheng. Collision-free Path Planning for Automated Guided Vehicles Based on Improved A\* Algorithm[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(1): 240-246.
- [4] 王乐乐, 睦泽智, 蒲志强, 等. 一种改进RRT的多机器人编队路径规划算法[J]. 电子学报, 2020, 48(11): 2138-2145.  
Wang Lele, Sui Zezhi, Pu Zhiqiang, et al. An Improved RRT Algorithm for Multi-robot Formation Path Planning[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(11): 2138-2145.
- [5] 江洪, 蒋潇杰. 基于RRT改进的路径规划算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(7): 10-16, 124.  
Jiang Hong, Jiang Xiaojie. Improved Path Planning Algorithm Based on RRT[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2021, 35(7): 10-16, 124.
- [6] 韩尧, 李少华. 基于改进人工势场法的无人机航迹规划[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(11): 3305-3311.  
Han Yao, Li Shaohua. UAV Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(11): 3305-3311.
- [7] 张瑜, 宋荆洲, 张琪祁. 基于改进动态窗口法的户外清扫机器人局部路径规划[J]. 机器人, 2020, 42(5): 617-625.  
Zhang Yu, Song Jingzhou, Zhang Qiqi. Local Path Planning of Outdoor Cleaning Robot Based on an Improved DWA[J]. Robot, 2020, 42(5): 617-625.
- [8] 常路, 单梁, 戴跃伟, 等. 未知环境下基于改进DWA的多机器人编队控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(10): 2524-2534.  
Chang Lu, Shan Liang, Dai Yuewei, et al. Multi-robot Formation Control in Unknown Environment Based on Improved DWA[J]. Control and Decision, 2022, 37(10): 2524-2534.
- [9] 刘亚秋, 赵汉琛, 刘勋, 等. 一种基于改进的快速扩展随机树的工业机器人路径避障规划算法[J]. 信息与控制, 2021, 50(2): 235-246, 256.  
Liu Yaqiu, Zhao Hanchen, Liu Xun, et al. An Improved RRT Based Obstacle Avoidance Path Planning Algorithm for Industrial Robot[J]. Information and Control, 2021, 50(2): 235-246, 256.
- [10] Kuffner J J, LaValle S M. RRT-connect: An Efficient Approach to Single-query Path Planning[C]//Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 995-1001.
- [11] Karaman S, Frazzoli E. Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(7): 846-894.
- [12] Jauwairia Nasir, Fahad Islam, Usman Malik, et al. RRT\*-SMART: A Rapid Convergence Implementation of RRT\*[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(7): 299.
- [13] Wang Wei, Zuo Lei, Xu Xin. A Learning-based Multi-RRT Approach for Robot Path Planning in Narrow Passages[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2018, 90(1): 81-100.

- [14] 王海芳, 张瑶, 朱亚锟, 等. 基于改进双向RRT\*的移动机器人路径规划算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(8): 1065-1070, 1142.  
Wang Haifang, Zhang Yao, Zhu Yakun, et al. Mobile Robot Path Planning Based on Improved Bidirectional RRT\*[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2021, 42(8): 1065-1070, 1142.
- [15] 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, 2021, 45(1): 51-76.
- [16] 王永雄, 田永永, 李璇, 等. 穿越稠密障碍物的自适应动态窗口法[J]. 控制与决策, 2019, 34(5): 927-936.  
Wang Yongxiong, Tian Yongyong, Li Xuan, et al. Self-adaptive Dynamic Window Approach in Dense Obstacles[J]. Control and Decision, 2019, 34(5): 927-936.
- [17] Zhang Xiaotian, Chen Xiyuan. Path Planning Method for Unmanned Surface Vehicle Based on RRT\* and DWA[C]// International Conference on Multimedia Technology and Enhanced Learning. Cham: Springer International Publishing, 2021: 518-527.
- [18] Jian Xinyu, Zou Ting, Andrew Vardy, et al. A Hybrid Path Planning Strategy of Autonomous Underwater Vehicles[C]//2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 1-6.
- [19] 张瑞, 周丽, 刘震锴. 基于MOBDB-RRT\*算法的移动机器人路径规划[J]. 电光与控制, 2022, 29(7): 12-16, 36.  
Zhang Rui, Zhou Li, Liu Zhenkai. Path Planning of Mobile Robot Based on MOBDB-RRT\* Algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(7): 12-16, 36.