

改进A*算法融合自适应DWA的移动机器人动态路径规划

齐款款, 李二超, 毛玉燕

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要: 为解决传统A*算法和传统动态窗口法(Dynamic window approach, DWA)在移动机器人路径规划中存在的问题, 提出一种改进A*算法和改进DWA相结合的动态路径规划方法。首先, 采用16邻域16方向的路径搜索方式扩大路径搜索视野, 减少节点访问量和转角度数; 其次, 对启发函数进行优化, 增强路径搜索的目的性; 接着, 采用冗余点删除策略, 减少转折点数目, 路径平滑度进一步提高, 再使用B样条曲线对路径拐角进行处理, 得到的路径较为平滑; 然后, 在DWA的评价函数中对障碍物进行分类并区别对待以及添加速度自适应因子, 能够提高避障灵敏度; 最后, 通过与其他算法进行三部分仿真实验以及优先级策略仿真实验, 验证改进A*算法的有效性和融合方法避障的优越性。

关键词: 移动机器人; 动态路径规划; A*算法; 动态窗口法; B样条曲线

中图分类号: TP242

文献标志码: A

Dynamic Path Planning of Mobile Robot Based on Improved A* Algorithm and Adaptive DWA

QI Kuankuan, LI Erchao, MAO Yuyan

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To solve the problems of the traditional A* algorithm and the traditional dynamic window approach (DWA) in mobile robot path planning, a dynamic path planning method combining the improved A* algorithm and the improved DWA is proposed. First, the 16-neighborhood and 16-direction path search method is adopted to expand the path search field and reduce the number of the nodes accessed and the turning angles. Second, the heuristic function is optimized to enhance the purpose of the path search. Next, the redundant point deletion strategy is adopted to reduce the number of the turning points and further improve the smoothness of the path. Third, the path corner is processed by the B-spline curve, and the path is relatively smooth. Then, the sensitivity of obstacle avoidance can be improved by classifying and treating obstacles differently and adding the speed adaptive factor in the evaluation function of DWA. Finally, through three parts of the simulation experiments with the other algorithms, and the priority strategy simulation experiments, the effectiveness of the improved A* algorithm and the superiority of the fusion method in obstacle avoidance are verified.

Key words: mobile robot; dynamic path planning; A* algorithm; DWA; B-spline curve

引 言

目前,移动机器人已广泛应用于各种行业,如果园机器人^[1]、抢险救灾机器人^[2]、医疗服务机器人^[3]和家庭服务机器人^[4]等,而移动机器人路径规划问题是研究移动机器人的核心问题之一。移动机器人路径规划是指在静态已知环境或动态完全未知或部分未知环境下,采用先前给定的路径规划算法,按照某一个或多个指标(如路径最短、时间最短、良好的平滑性等),规划一条从起点到终点的能够躲避各类障碍物的最优路径^[5]。根据对环境信息的掌握程度,路径规划算法可分为环境已知(静态环境)的全局路径规划算法和环境完全未知或部分未知(动态环境)的局部路径规划算法^[6]。全局路径规划算法有A*算法^[7]、蚁群算法^[8]、粒子群算法^[9]和遗传算法^[10]等,局部路径规划算法有人工势场法^[11]、动态窗口法(Dynamic window approach,DWA)^[12]和模糊逻辑法^[13]等。本文主要研究全局路径规划的A*算法与局部路径规划的DWA融合的动态路径规划问题。

A*算法具有快速找到最短路径等优点,普遍应用于全局路径规划,但传统A*算法也存在访问节点多、拐点多、转角大和路径不平滑等问题^[14-15];动态窗口法具有模型简单、得到的路径较为平滑、实时避障功能,考虑了机器人自身的性能等优势,普遍应用于局部路径规划,但传统DWA在较大复杂的地图中,目标点距离过远,引导性较差,容易陷入局部最优,甚至无法抵达终点^[16-17]。针对传统A*算法和传统DWA的不足,不同的学者进行了不同的改进。

岳高峰等^[18]采用双向A*搜索算法,即正向和反向并行搜索,相遇条件为两个方向的关闭列表中存在某一方向的当前点,能够减少访问节点数目,再采用三次贝塞尔曲线对生成的最优路径进行平滑,最终得到的路径较为平滑,但由于平滑前未对冗余点进行删除操作,导致平滑前的路径拐点较多;王洪斌等^[19]采用加权障碍物步长调节算法,即A*算法在寻路时,周围障碍物较多和分布较特殊时,减小路径搜索的步长,提高安全性,当较少的障碍物且分布简单时,加大搜索步长,从而加快搜索速度,最后对A*算法得到的最优路径采用自适应圆弧优化算法平滑转角,得到的路径更为平滑,但未对访问节点数进行研究;劳彩莲等^[20]采用关键点策略的A*算法去除冗余拐点,平滑性和安全性较好,但该方法存在全局路径并非最短,访问节点多问题;吴飞龙等^[21]采用精简路径搜索方向的A*算法,按照目标点所在位置,进行舍弃背离目标点的3个方向,能够减少访问节点数,同时在评价函数的启发函数中添加权重因子,增加启发函数的引导性;赵伟等^[22]采用双层折线优化的A*算法,即第一层采用节点的斜率进行删除路径的冗余点,第二层采用延长路径获得交点的方法,进一步降低转折次数,但过于追求降低转折点导致路径长度的增加;王永雄等^[23]在传统DWA评价函数的速度评价函数中引入自适应动态调整因子,该因子根据机器人前方障碍物的密集程度而定,改进后算法能够很好地穿越障碍物密集区,但未在大尺度环境或动态环境下验证该方法的有效性;为避免由机器人转动过于频繁或转动幅度过大而降低机器人的平稳性和平滑性,张凌云^[24]在传统DWA评价函数中引入曲率评价子函数,为能够适应复杂环境,采用修正局部路径误差策略,但未在动态环境下验证该方案的有效性;王亭^[25]采用模糊控制实时调节传统DWA评价子函数权重,能够适应复杂环境,但需建立模糊规则库,增加一定的难度和复杂度;张志文等^[26]采用Floyd算法优化以跳点为基础的A*算法得到最优路径,并提取该路径的关键点作为传统DWA的中间引导点,该方法既能改善A*算法访问节点多、拐点多、转角大缺陷,又能解决传统DWA容易陷入局部最优的问题,但仅限于静态已知和静态未知环境中验证该方法的有效性;程传奇等^[27]采用关键点选取策略优化改进启发函数的A*算法,结合传统DWA,能够互相取长补短,但未在动态环境下验证方法的有效性。

综上所述,大部分学者要么研究较小复杂度静态环境,要么复杂度较小的静态未知环境,无法得出他们的算法能够很好地适应动态环境或既有静态又有动态的环境。本文对上述存在的问题以及针对

传统 A*算法存在访问节点多、拐点多、转角大和路径不平滑问题和传统 DWA 容易陷入局部最优问题,做出以下改进:首先,采用扩展邻域和方向,增加 A*算法路径搜索视野和移动方向,并对启发函数进行优化;其次,采用冗余点删除策略对全局路径进行一次平滑,采用三次 B 样条曲线对路径进行二次平滑;然后,在 DWA 评价函数中对障碍物进行分类处理,并加入速度自适应因子;最后,将一次平滑后的 A*算法得到的全局路径作为速度自适应的 DWA 的引导路径,并在静态已知、静态未知、动态未知和存在其他机器人环境下仿真验证本文方案的可行性和有效性。

1 问题描述

栅格法是一种目前用来建立移动机器人二维静态或动态运行环境较为普遍适用的方法,该方法建立的栅格地图如图 1 所示。用不同的颜色栅格代表不同的栅格环境,黑色栅格表示静态障碍物栅格,机器人不得穿越该栅格,白色栅格表示可行走栅格,机器人可自由移动,静态未知障碍物、动态未知障碍物和其他机器人的表示方法在实验仿真环节进行说明。

坐标法和序号法为表示栅格最常用的两种方法,坐标法利用横坐标(X轴)和纵坐标(Y轴)相应序号组合表示对应栅格,例如,坐标(7,2)表示栅格 14;序号法是按照一定次序进行一一编号,图 1 中编号次序为从左到右,从下到上的顺序。为方便叙述,本文采用坐标法表示。机器人运行时是以栅格中心点为路径节点,栅格中心点表示方法为

$$\begin{cases} x_i = \begin{cases} \text{mod}(i, n_x) + 0.5 & \text{mod}(i, n_x) \neq 0 \\ n_x + 0.5 & \text{mod}(i, n_x) = 0 \end{cases} \\ y_i = \text{ceil}(i/n_y) + 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

式中: i 表示栅格序号, n_x 为栅格地图的行数, n_y 为栅格地图的列数, mod 为求余运算符, ceil 为向上取整运算符。

为确保机器人运行时的安全性,将障碍物进行膨化处理,处理方式如图 2 所示。当不规则障碍物不满一个栅格,将其填充为一个栅格,再将障碍物整体向外膨化 R 大小, R 为机器人半径,此时机器人作为质点来处理,此外预留一定的安全距离,整体构成了障碍物,假设栅格地图中的每一栅格边长为 1 m。

2 A*算法和动态窗口法

2.1 改进 A*算法

2.1.1 改进启发函数

A*算法是一种启发式搜索算法,该算法由评价函数 $f(n)$ 构成,包括起点 (x_s, y_s) 到当前点 (x_i, y_i) 的真实路径评价函数 $g(n)$ 和当前点到目标点 (x_E, y_E) 的预估路径评价函数 $h(n)$,具体公式为

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (2)$$

式中 $h(n) = \sqrt{(x_i - x_E)^2 + (y_i - y_E)^2}$ 。

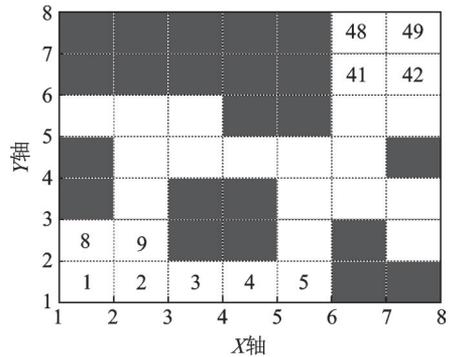


图 1 栅格地图

Fig.1 Grid map

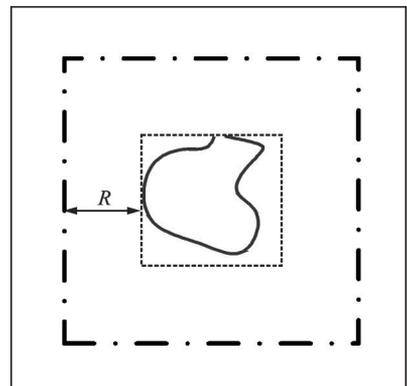


图 2 障碍物膨化处理

Fig.2 Expansion treatment of obstacles

传统算法的 $h(n)$ 并不能够满足实际的需要,选择合适的 $h(n)$ 至关重要,本文结合欧氏距离和曼哈顿距离的优点,提出一种改进的启发函数,再分别给 $G(n)$ 和 $H(n)$ 相应的权重因子 a 和 b ,其中 $H(n)$ 的权重根据起点、终点和当前点的信息动态调节,另外加入适当因子进一步微调,改进评价函数为

$$F(n) = a * G(n) + b * H(n) \quad (3)$$

其中

$$b = [c / (1 - c)] * [(d_{iE} + d_{iS}) / d_{SE}]$$

$$H(n) = \begin{cases} \sqrt{2} * \text{dist}_1 + \text{dist}_2 - \sqrt{3} / 3 * \text{dist}_1 & \text{dist}_2 > \text{dist}_1 \\ \sqrt{2} * \text{dist}_2 + \text{dist}_1 - \sqrt{3} / 3 * \text{dist}_2 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\text{dist}_1 = |x_i - x_E|, \text{dist}_2 = |y_i - y_E|$$

式中: a 为正常数, c 为 $(0, 1)$ 之间的常数, d_{iE} 为当前点到终点的欧氏距离, d_{iS} 为当前点到起点的欧氏距离, d_{SE} 为起点到终点的距离。

为验证该评价函数的可行性和有效性,将文献[16]算法评价函数、文献[27]算法评价函数和传统算法评价函数与改进评价函数进行仿真,仿真结果如图3所示,数据如表1所示。

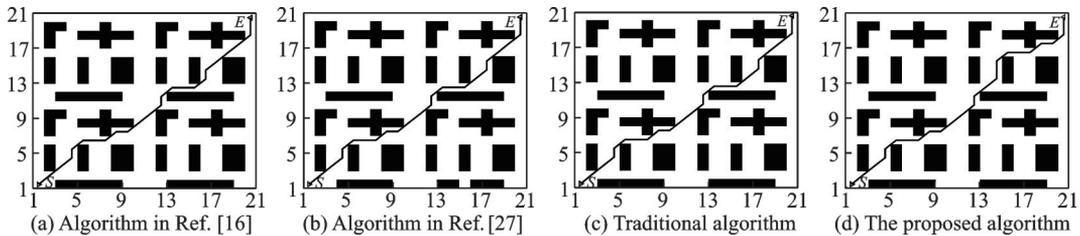


图3 不同算法的评价函数

Fig.3 Evaluation function of different algorithms

表1 仿真数据1

Table 1 Simulation data 1

不同算法评价函数	路径长度/m	运行时间/s	遍历节点数/个	拐点数/个	转角总度数/(°)
文献[16]算法	30.384 8	0.002 5	73	15	675
文献[27]算法	29.799 0	0.003 1	124	13	585
传统算法	29.799 0	0.003 7	149	13	585
本文算法	29.799 0	0.002 9	92	13	585

从图3和表1可以看出,文献[16]算法评价函数得到的遍历点最少、运行时间最短,但距离非最短,拐点较多和转角总度数较大;本文算法、文献[27]算法和传统算法都能得到最短路径 29.799 0 m,相同的拐点数和转角总度数,但本文算法在运行时间和遍历节点数方面最优,验证了本文算法评价函数的可行性和有效性。此外,在上述地图环境中,对改进评价函数系数 a 和 c 进行分析,结果如表2所示。

从表2可得以下结论:

(1) 合理调节系数能够找到最优解。

(2) 当 a 不变,随着 c 不断增加,路径长度逐渐远离平稳的最优解 29.799 0 m,遍历节点随之减少到平稳值,耗时也变短,转角总度数从最小逐渐增大到稳定值。

(3) 当 c 不变,随着 a 不断增加,路径长度越接近最优解,且最终平稳在最优解,遍历节点随之增加,耗时也变长,转角总度数逐渐减少到 585°。

表2 系数a和c分析表
Table 2 Analysis table of coefficients a and c

组别	系数 (a, c)	路径长度/m	运行时间/s	遍历节点数/个	拐点数/个	转角总度数/(°)
1	(0.8, 0.1)	29.799 0	0.007 2	284	12	540
2	(0.8, 0.3)	29.799 0	0.006 9	259	13	585
3	(0.8, 0.35)	29.799 0	0.005 4	203	13	585
4	(0.8, 0.4)	29.799 0	0.002 9	92	13	585
5	(0.8, 0.45)	30.384 8	0.002 2	73	15	675
6	(0.8, 0.65)	32.041 6	0.002 5	73	15	855
7	(0.8, 0.75)	32.041 6	0.002 3	73	15	855
8	(0.1, 0.4)	32.041 6	0.002 4	73	15	855
9	(0.3, 0.4)	31.213 2	0.002 5	73	15	675
10	(0.5, 0.4)	30.384 8	0.002 4	73	15	675
11	(0.85, 0.4)	29.799 0	0.003 9	121	13	585
12	(1.0, 0.4)	29.799 0	0.005 4	187	13	585
13	(1.1, 0.4)	29.799 0	0.006 7	234	13	585
14	(1.3, 0.4)	29.799 0	0.007 0	265	13	585
15	(1.6, 0.4)	29.799 0	0.007 3	284	13	585
16	(1.8, 0.4)	29.799 0	0.007 4	284	13	585

上述静态环境的仿真实验得到了较为合理的参数设置,例如在路径长度最短的条件下,选择运行时间最少的组别为最优参数组合,此处包括后文的实验参数都选择表2中的组别4。在此参数设置不变的情况下,为验证本文的启发函数在不同静态环境下的优越性,将传统算法和本文算法(在传统算法基础上只改进启发函数)在两种不同尺度和不同复杂度的栅格地图环境下进行仿真实验。各算法最优路径规划图分别如图4、5所示,仿真数据如表3所示。

从以上数据可知,由于在实验中已经确定最优参数组合,参数无需根据环境的变化而改变,验证了本文启发函数设计的合理性以及优越性。

2.1.2 优化路径搜索邻域和方向

(1) 路径搜索方式

传统A*算法的路径搜索方式为4邻域4方向和8邻域8方向,分别如图6(a)和图6(b)所示。图6(a)

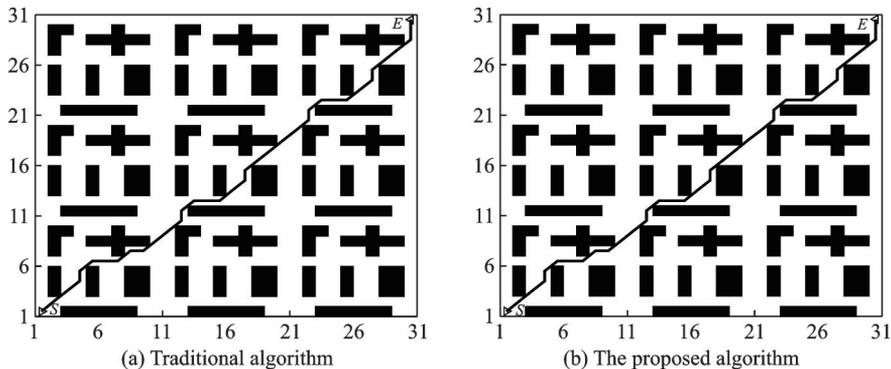


图4 30*30环境下各算法最优路径
Fig.4 Optimal path of each algorithm in 30*30 environment

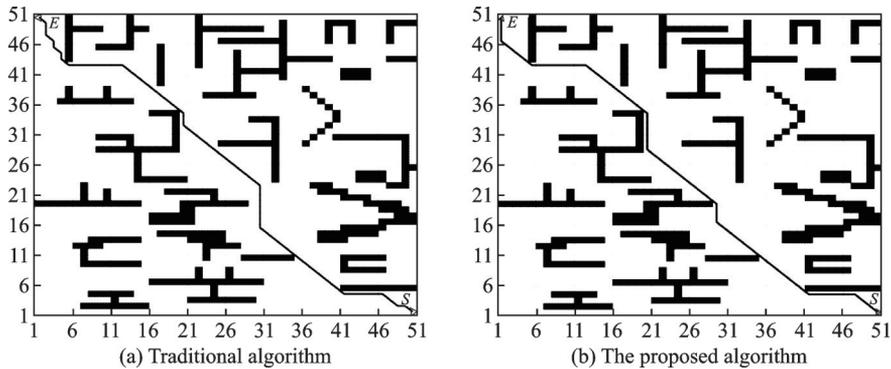


图5 50*50环境下各算法最优路径

Fig.5 Optimal path of each algorithm in 50*50 environment

表3 仿真数据2

Table 3 Simulation data 2

算法	30*30 栅格环境地图			50*50 栅格环境地图		
	路径长度/m	运行时间/s	遍历节点数/个	路径长度/m	运行时间/s	遍历节点数/个
传统算法	45.112 7	0.009 5	305	76.911 7	0.024 4	791
本文算法	45.112 7	0.005 0	146	76.911 7	0.014 7	382

路径搜索只能水平和垂直方向移动,转角只能为90°整数倍,转角较大,移动范围仅为一步;图6(b)路径搜索可斜向移动,转角只能为45°整数倍,视野比前者有所增大;较大的移动范围更有助于发现目标,图6(c)为24邻域16方向,将方向扩展为16个,转角细化为22.5°,有利于搜索更优路径;图6(d)为16邻域16方向,是将图6(c)中的邻域进一步优化,能够更快找到最优解。

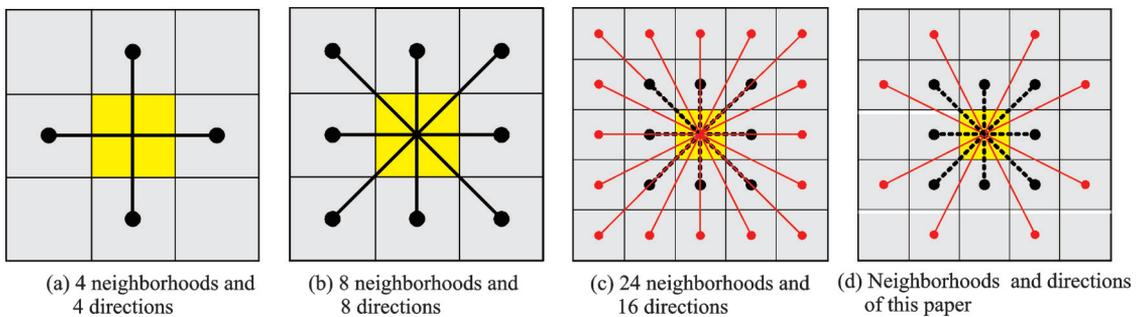


图6 路径搜索方式

Fig.6 Path search mode

(2) 移动规则

图6(d)为两级视野,第一级视野栅格数为8个,第二级视野栅格数为8个。A*路径搜索可直接查看两级视野是否有障碍物以及与当前节点的可连接性,若要连接第二级视野的栅格,则两者的连线经过的栅格不能有障碍物,例如图7为分析第二级视野可连接性,只要A和B两个栅格中至少有一个是障碍物,则不可连接,如图7(b~d),两点的连线穿越障碍物。

(3) 本文路径搜索优势

图 8 可以说明本文路径搜索方式的优势,假设左上角栅格为起点,向右下角栅格(终点)移动,图 8(a)需要搜索 3 次才到达目标点,路径长度为 3.00 m;图 8(b)需要搜索 2 次,路径长度为 2.41 m;图 8(c)需要搜索 1 次,路径长度为 2.24 m。为进一步说明本文优势,在传统算法基础上进行仿真验证,不同路径搜索方式路径规划仿真如图 9 所示,仿真数据如表 4 所示。

由仿真结果可知,4 邻域 4 方向遍历节点多,消耗较多的时间,且得不到最优解;8 邻域 8 方向有所改善,但遍历节点数和运行速度等仍有优化空间,本文方法与 24 邻域 16 方向相比,都能得到相同的最优解,但在遍历节点和时间消耗方面都占有优势,验证了本文邻域和方向的可行性和有效性。

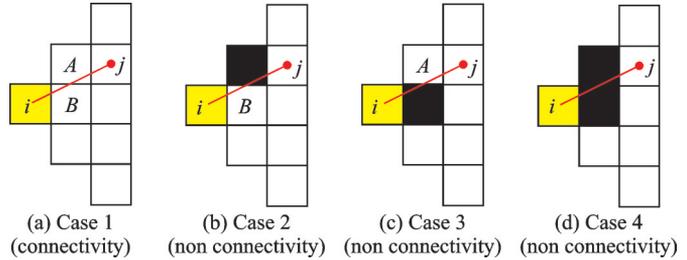


图 7 第二级移动规则

Fig.7 Second level movement rules

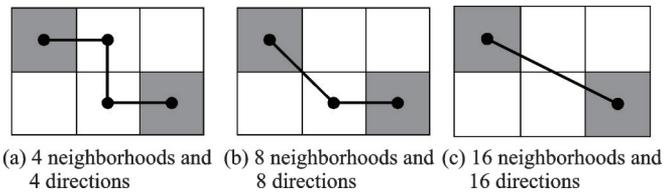


图 8 不同路径搜索方式的路径规划示意图

Fig.8 Path planning of different path search modes

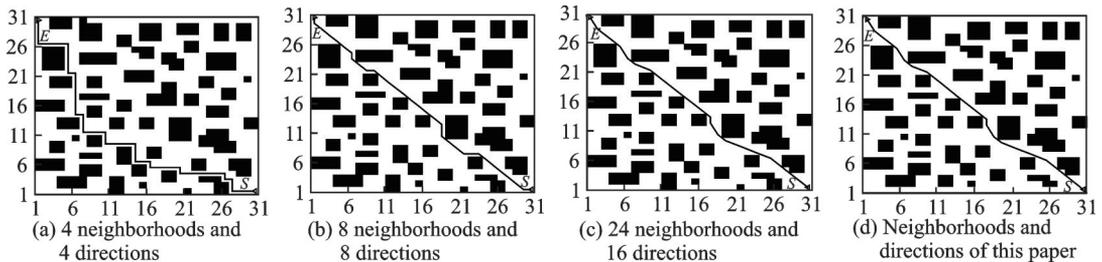


图 9 不同路径搜索方式的路径规划仿真图

Fig.9 Path planning simulation diagrams of different path search methods

表 4 仿真数据 3

Table 4 Simulation data 3

路径搜索方式	路径长度/m	运行时间/s	遍历节点数/个	拐点数/个	转角总度数
4 邻域 4 方向	58.000 0	0.046 6	571	19	1 710
8 邻域 8 方向	43.355 3	0.017 8	216	10	450
24 邻域 16 方向	42.108 3	0.013 6	206	10	219
本文邻域和方向	42.108 3	0.010 1	188	10	219

2.1.3 冗余点删除策略

传统算法规划的路径存在冗余点、拐角大问题,本文通过冗余点的删除策略进行一次平滑,去除不必要的拐点,同时也能减少拐角度数,路径平滑度有所提高。冗余点删除策略步骤如下:

步骤 1 采用 A* 算法规划一条最优路径,并保存该路径的相关信息,如路径长度,路径节点等。

步骤 2 获取路径节点集合 $route = \{S, Point_{(2;n-1)}, E\}$, S 为路径的起点, E 为路径的终点, $Point_{(2;n-1)}$ 为路径中间点。将起点加入构造的必经路径节点集合 $key-points = \{S\}$ 中。

步骤3 从S开始依次连接 $Point_2, \dots, Point_{(m)}, \dots, Point_{(n-1)}$, 判断直线 $S-Point_{(m)}$ 是否穿越障碍物, 如果直线 $S-Point_{(m)}$ 穿越障碍物, 那么中间点 $Point_{(m-1)}$ 为必经路径节点, 将该点加入集合 $key-points = \{S, Point_{(m-1)}\}$ 中; 如果直线 $S-Point_{(m)}$ 没有穿越障碍物, 那么 $Point_2, Point_{(m-1)}$ 为冗余点, 从 $Point_{(m)}$ 开始依次连接 $route$ 集合中剩余节点, 按照上述方法进行判断, 直到连接终点 E 终止, 保存节点集合 $key-points$ 。

步骤4 提取节点集合 $key-points$ 中所有必经路径节点, 依次连接这些点, 得到的路径为最终平滑路径。冗余点删除策略仿真过程如图10所示。

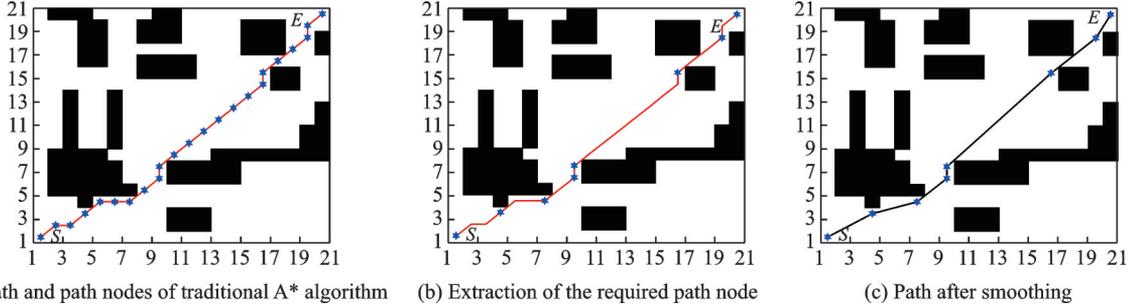


图10 冗余点删除策略仿真过程图

Fig.10 Simulation process diagrams of redundant point deletion strategy

2.1.4 二次路径优化

传统A*算法或改进A*算法生成的最优路径仍不够平滑, 路径中某部分还存在较大转角。因此, 采用三次均匀B样条曲线优化拐点处的路径。

由公式

$$C(x) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(x) \tag{4}$$

可得当 $k=3$ 时的B样条曲线数学表达式为

$$C(x) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,3}(x) \tag{5}$$

$$N_{i,k}(x) = \frac{1}{k!} \sum_{j=0}^{k-i} (-1)^j C_{k+1}^j(x+k-i-j)^k \tag{6}$$

式中: $0 \leq x \leq 1; i = 0, 1, \dots, k-1; C_{k+1}^j = \frac{(n+1)!}{j!(n+1-j)!}$ 。

当三次B样条曲线各节点矢量间插值为常数时为三次均匀B样条曲线, 第 i 段三次均匀B样条曲线数学表达式为

$$C_i(x) = \sum_{i=0}^3 P_i N_{i,k}(x) \tag{7}$$

由式(4,6,7)可得三次均匀B样条曲线的基函数数学表达式为

$$\begin{cases} N_{0,3}(x) = \frac{1}{6} (-x^3 + 3x^2 - 3x + 1) \\ N_{1,3}(x) = \frac{1}{6} (3x^3 - 6x^2 + 4) \\ N_{2,3}(x) = \frac{1}{6} (-3x^3 + 3x^2 + 3x + 1) \\ N_{3,3}(x) = \frac{1}{6} x^3 \end{cases} \tag{8}$$

将式(8)代入式(4)并用矩阵形式表达,可得三次均匀B样条曲线数学表达式为

$$C(x) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & x & x^2 & x^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

图 11 为 B 样条曲线平滑最优路径仿真过程,该平滑策略在拐点附近,以曲线代替折线,得到的路径更短且平滑。

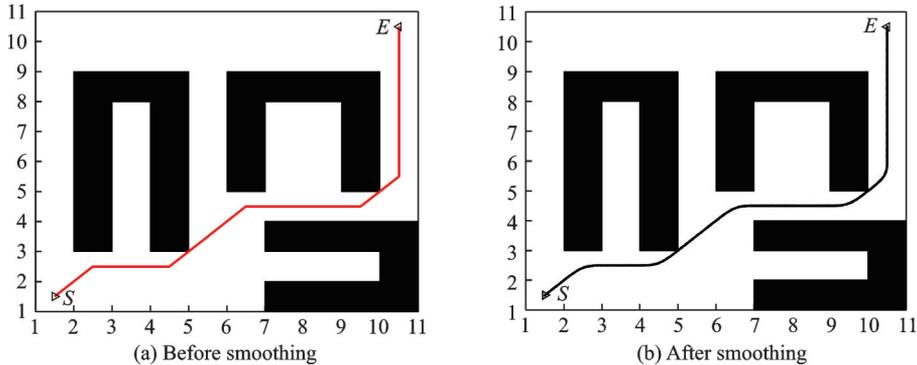


图 11 B 样条曲线平滑最优路径仿真过程

Fig.11 Simulation process of B spline curve smooth optimal path

2.2 改进动态窗口法

DWA 是一种在线的路径规划算法,具有模型简单,得到的路径较为平滑,实时避障功能,也充分考虑机器人自身的性能等优势,成为动态环境下普遍采用的局部避障算法。在路径规划时,该算法将已确定的机器人运动速度范围代入移动机器人运动模型中,模拟出机器人的运动轨迹,通过评价函数对模拟出的若干轨迹进行评价,评分最高的为最优轨迹。

在传统的基础上做出 3 点改进:将传统算法中的模拟轨迹末端方向与目标点之间方向偏差角的评价子函数改进为模拟轨迹末端方向与改进 A*算法规划所提取的关键点之间方向偏差角,大大提高路径搜索的目的性;实时预估路径的弯曲程度,遇到急转弯时,需要提前减速,即定义全局路径弯曲程度参数 $\Delta\eta$,该参数由当前子目标点与该子目标点前后相邻子目标点形成的夹角表示,当夹角为平角时,速度较大,加速通过,若为锐角或直角,则减速通过;对动态障碍物(动态未知障碍物和被视为特殊动态障碍物的其他机器人)和静态障碍物(静态已知和静态未知)进行区别对待,减少相互间的干扰。改进后的评价函数为

$$Cost(v, \omega) = \alpha * \text{Heading}(v, \omega) - \beta \cos \Delta\eta_i * \text{Vel}(v, \omega) + \lambda * \text{Dist}(v, \omega) + \delta * \text{Dist}_d(v, \omega) \quad (10)$$

式中: $\alpha, \beta, \lambda, \delta$ 为评价子函数的权重; $\text{Heading}(v, \omega)$ 为轨迹终点与子目标点之间方向角偏差; $\text{Vel}(v, \omega)$ 为当前估计的运行速度; $\text{Dist}(v, \omega)$ 为轨迹终点与已知静止障碍物之间的最小距离; $\text{Dist}_d(v, \omega)$ 为轨迹终点与动态未知障碍物或被视为特殊动态障碍物的其他机器人或静态未知障碍物之间的最小距离。

采用优先级策略对特殊动态障碍物进行避障,本文只研究环境中存在最多 3 个机器人情况下优先级,3 个机器人及以上的情况,方法和最多 3 个机器人一样。关于优先级的策略,在后文仿真中进行验证说明,设置两种方案:一种为任意默认一个机器人为主要机器人(优先级最大),其他机器人为次要机器人,当其他机器人进入最大优先级机器人安全距离时,就开始停止避让,主要机器人通过安全距离后,

次要机器人再次启动运行;另一种为根据各个机器人剩余距离大小(距离目标点远近)分配优先级,距离越远优先级越大,在根据满足一定安全距离约束条件进行避让,以便于在最短路径条件下,保证所有机器人完成各自的任务后用时最少。

2.3 改进A*算法融合改进动态窗口法

本文采用MATLAB 2016a编程语言,在计算机 Intel(R) Core(TM) i7-10750H CPU @ 2.60 GHz 2.59 GHz, RAM 16.0进行仿真实验。

根据A*算法全局规划能力强和动态窗口法局部避障能力良好的特性,本文将两者的优势结合,取长补短,能够更好地解决动态路径规划问题。图12为算法融合流程图,具体步骤为:

(1) 建立栅格环境地图,并初始化改进A*算法和改进DWA参数。

(2) 选取起点和目标点,在静态已知环境下,采用16邻域16方向和改进启发函数的A*算法快速找到最优解,采用冗余点删除策略优化最优解,使得全局路径拐点数目最少,拐角总度数最小,进而使路径平滑度大大提高,以B样条曲线平滑全局路径拐点处的路径段,曲线过渡折角。

(3) 采用冗余点删除策略优化后的路径作为全局路径(本文中的B样条曲线只用于说明改进A*算法的可行性和有效性,不作为局部路径规划的引导路径),若优化后的路径中出现某一部分关键点间的距离过远,在每段路径上均匀插入适当的点也作为关键点。

(4) 采用改进DWA进行局部路径规划,以全局路径的起点为起点,以全局路径的终点为最终目标点。

(5) 将关键点(除起点和终点外)作为机器人运动的局部目标点,实时预估路径的弯曲程度,遇到急转弯时,需要提前减速,若当前子目标点与该子目标点前后相邻子目标点形成的夹角为平角时,速度较大,加速通过,若为锐角或直角,则减速通过;当机器人与关键点距离小于1 m或静态未知或动态障碍物与机器人和当前关键点距离都小于2 m时,设定下一个关键点作为局部目标点。

(6) 当传感器检测到静态未知或动态障碍物暂时或永久占据规划的全局路径时,改进的动态窗口法根据评价函数得分最高的轨迹选择路径,即机器人与静态已知障碍物最小距离小于0.4 m进行避让,机器人与静态未知或动态障碍物最小距离小于0.8 m,进行避让,对障碍物不同对待能够提高避障的灵敏度,即距离静态已知障碍物不会过远,距离静态未知或动态障碍物不会过近。

(7) 是否到达局部目标点,如果没有到达局部目标点,迭代执行步骤5,直到到达局部目标点。

(8) 是否到达最终目标点,如果没有到达,执行步骤4,通过不断地迭代,直到到达最终目标点。

3 仿真实验

3.1 改进A*算法仿真实验

为验证本文改进A*算法的可行性和有效性,在静态环境下,与传统A*算法、文献[28]算法中的改进A*算法进行对比仿真。仿真结果和数据分别如图13和表5所示。

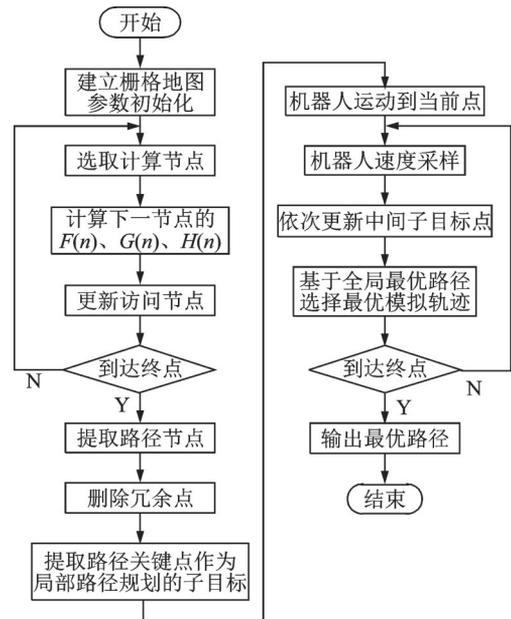


图12 融合算法流程图

Fig.12 Flow chart of fusion algorithm

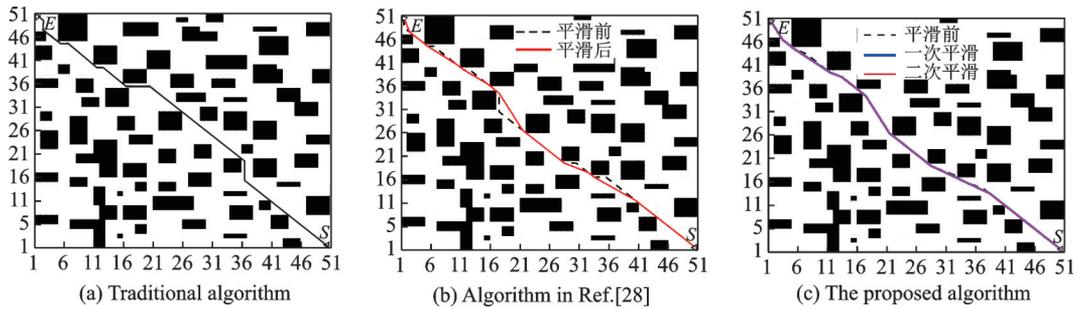


图 13 不同算法最优路径

Fig.13 Optimal path of different algorithms

表 5 仿真数据 4

Table 5 Simulation data 4

算法	路径长度/m		总转角度数/(°)(拐点数)		访问节点数/个	B 样条平滑后 路径长度/m	算法运行 时间/s
	平滑前	平滑后	平滑前	平滑后			
传统算法	72.811 2		450 (10)		652		0.062 7
文献[28]算法	72.811 2	70.525 3	495 (11)	148 (11)	210		0.010 2
本文算法	70.673 4	70.480 0	203 (11)	120 (8)	303	70.353 2	0.015 1

从实验结果可知,传统 A*算法能够找到最优解,但存在节点访问量,转折点多且转角大问题;文献[28]算法平滑前路径长度与传统算法相同,经过 Floyd 算法平滑后的路径长度为 70.525 3 m,优于传统算法,节点访问量和路径平滑度较优;本文改进算法在路径长度、遍历节点数,拐点数以及拐角等方面优于对比算法。由于本文针对传统算法进行研究,与传统 A*算法相比,路径缩短 3.34%,总转角度数(拐点数)减少 73.33%(20.00%),遍历节点数和运行时间分别减少 53.53% 和 75.92%,通过以上论述验证本文改进 A*算法的可行性和有效性。

3.2 改进 A*算法融合 DWA 仿真实验

为验证本文融合算法既能适应静态环境又能很好地适应动态环境,本文进行 3 个方面实验,实验参数为:最大线速度 1.0 m/s,最大角速度 30.0 °/s,最大线加速度 0.3 m/s²,最大角加速度 50.0 °/s²,线速度分辨率 0.01 m/s,角速度分辨率 1.0 °/s,时间分辨率 0.1 s,预测周期 3.0 s,评价函数参数 $\alpha=0.1$ 、 $\beta=0.25$ 、 $\gamma=0.2$ 、 $\delta=0.3$,对比算法参数采用各原文献中的参数。

3.2.1 静态环境下仿真

在静态已知和静态未知环境下,为验证本文融合算法的可行性和有效性,与传统动态窗口法和文献[16]融合算法进行仿真对比。仿真结果和数据分别如图 14 和表 6 所示。其中红色栅格为静态未知障碍物。

由仿真结果可知,由于传统算法未区别对待静态未知和静态已知障碍物,容易距离过远或过近,避障灵敏度较低,导致碰撞或陷入局部最优解;文献[16]融合算法有中间引导作用,但全局路径并非最优且未区别对待障碍物的类型,得到的路径安全性很高,而距离障碍物过远,DWA 规划得到的路径也不是最短。本文算法不仅全局路径长度最短,也对静态障碍物进行区分,路径尽量远离静态未知障碍物和尽量靠近静态已知障碍物,但既不与障碍物碰撞,也不过于远离障碍物,得到的路径安全且最短。因此,在静态环境下,验证了本文算法的可行性和有效性。

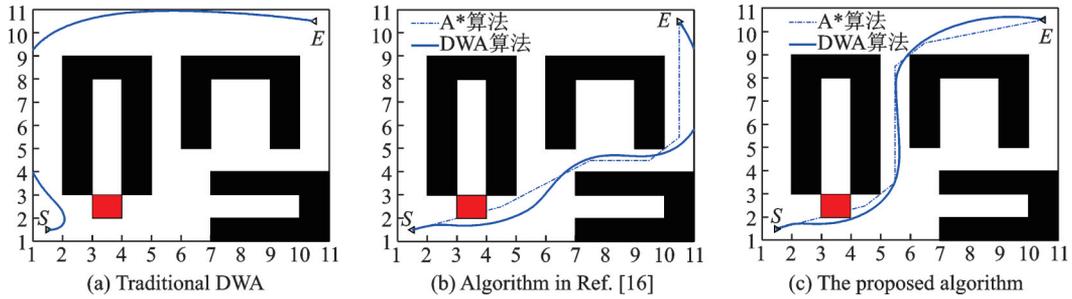


图 14 静态环境下的不同算法路径规划

Fig.14 Path planning with different algorithms in static environment

表 6 仿真数据 5

Table 6 Simulation data 5

算法	全局路径规划(平滑后)			局部路径规划		
	距离/m	拐点数/个	拐角总度数	距离/m	用时/s	到达终点/碰撞
传统DWA				18.576 0	7.556 7	是/否
文献[16]算法	15.182 0	4	139	16.060 2	5.922 0	是/否
本文算法	15.113 8	4	148	15.489 4	5.098 6	是/否

3.2.2 动态环境下仿真

为验证区别对待静态已知与静态未知和动态未知障碍物的可行性和有效性,本文算法与传统DWA和文献[16]融合算法进行仿真对比,仿真结果分别如图15~18和表7所示,其中绿色栅格为做匀速运动的动态未知障碍物。

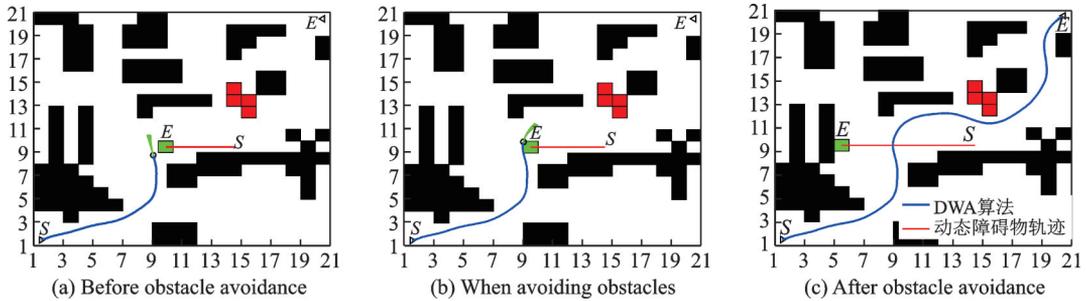


图 15 动态环境下传统DWA的路径规划

Fig.15 Path planning of traditional DWA in dynamic environment

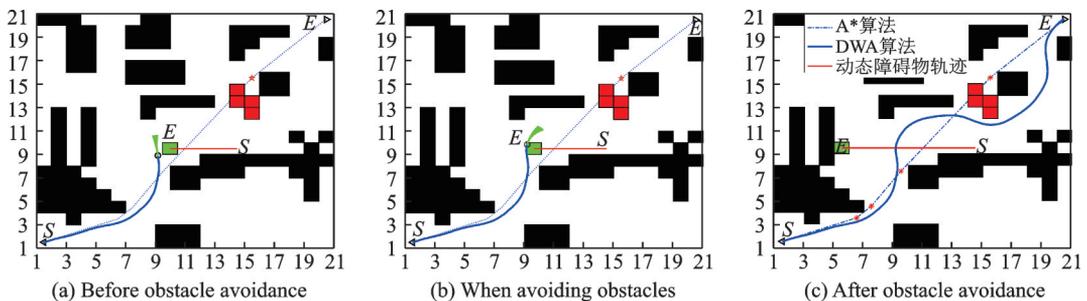


图 16 动态环境下文献[16]算法的路径规划

Fig.16 Path planning of Ref.[16] algorithm in dynamic environment

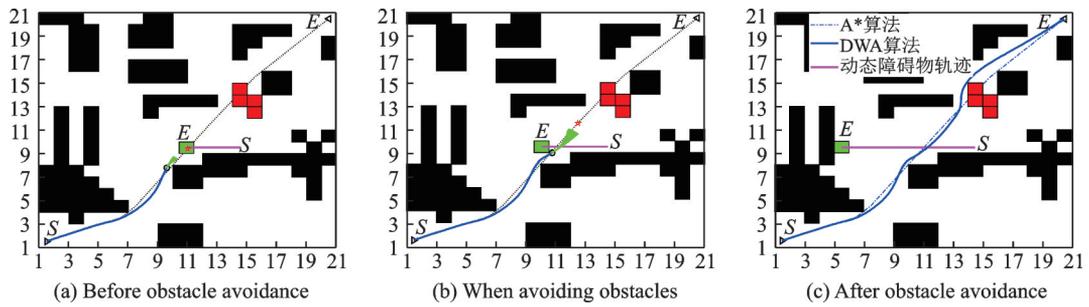


图 17 动态环境下本文算法的路径规划

Fig.17 Path planning of the proposed algorithm in dynamic environment

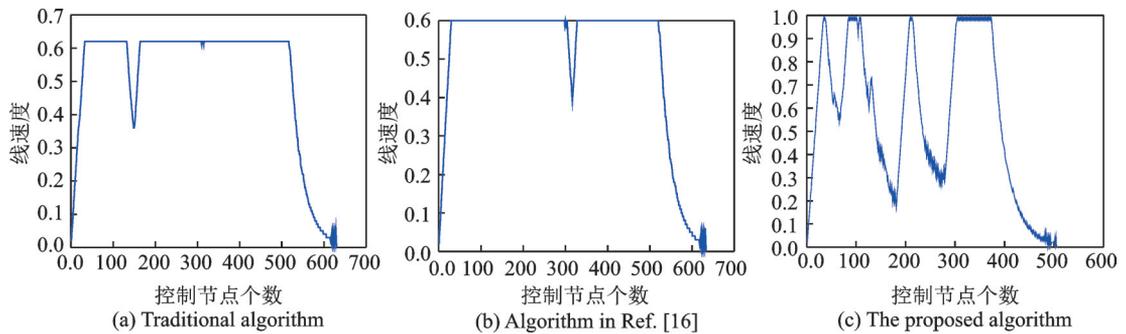


图 18 动态环境下 3 种算法的速度变化

Fig.18 Speed change of three algorithms in dynamic environment

表 7 仿真数据 6

Table 7 Simulation data 6

算法	全局路径规划			局部路径规划		
	距离/m	拐点数/个	拐角总度数	距离/m	用时/s	到达终点/碰撞
传统 DWA				32.568 8	30.608 1	是/是
文献[16]算法	27.476 0	4	46	31.954 5	27.082 5	是/是
本文算法	27.472 8	4	42	28.140 1	18.553 2	是/否

从图 15 可知,传统 DWA 将机器人与动态障碍物和静态障碍物的冲突距离同等对待以及方向性较差,遇到动态未知障碍物时,机器人容易与动态障碍物发生碰撞,避障灵敏度不高。缺乏全局路径的引导,无法从静态未知和静态已知障碍物所处狭窄空间通过,进行绕路,导致路径非最优,到达终点的时间较长;从图 16 可知,文献[16]融合算法也未对障碍物类型进行区别对待,将机器人与动态障碍物和静态障碍物的冲突距离设置同一数值,容易与动态障碍物发生碰撞,距离静态已知或静态未知障碍物过远,容易陷入局部最优,同时两个引导点间的距离过远且环境较复杂,无法从静态未知和静态已知障碍物所处狭窄空间通过,偏离全局最优路线,导致路径非最优;本文融合算法兼有上述两种方法的优点之外,对障碍物进行分类处理,与动态障碍物有着较大的冲突预判距离,能够较好地避碰,实时监测路径弯曲程度,能够自适应的改变速度,拐弯时减速而不是匀速,平直路径上速度可达近 1.0 m/s,如图 18 所示。

3.2.3 特殊动态环境下仿真

为验证存在特殊障碍物情况下本文采用优先级策略的可行性,本文提供默认优先级和距离优先级

两种方案并进行各自的仿真。默认优先级情况下的机器人模型参数如表 8 所示,未在表中列出的参数视为参数相同。距离优先级情况下的机器人模型参数与前文相同,仿真过程分别如图 19、20 所示,图中的 3 个动态障碍物速度不同且都做匀速运动。

在图 19 中,默认优先级从高到低为 Robot₁、Robot₂ 和 Robot₃,机器人间的冲突距离为 2 m。图 19 (b),Robot₁ 与 Robot₂ 发生冲突,Robot₁ 优先级高,Robot₂ 停止前进,直到 Robot₁ 通过冲突范围后,Robot₂ 继续前进。图 19(d),Robot₁ 与 Robot₃ 发生冲突,Robot₁ 优先级高,Robot₃ 停止前进,直到 Robot₁ 通过冲突范围后,Robot₃ 继续前进。

表 8 默认优先级情况下的机器人模型参数

Table 8 Robot model parameters under default priority

机器人代号	最大线速度/ (m·s ⁻¹)	最大角速度/ (°·s ⁻¹)	最大线加速度/ (m·s ⁻²)	最大角加速度/ (°·s ⁻²)	线速度分辨率/ (m·s ⁻¹)	角速度分辨率/ (°·s ⁻¹)
Robot ₁	1.0	30.0	0.3	60.0	0.2	1.0
Robot ₂	0.7	20.0	0.2	50.0	0.1	1.0
Robot ₃	0.5	20.0	0.2	50.0 </td <td>0.1</td> <td>1.0</td>	0.1	1.0

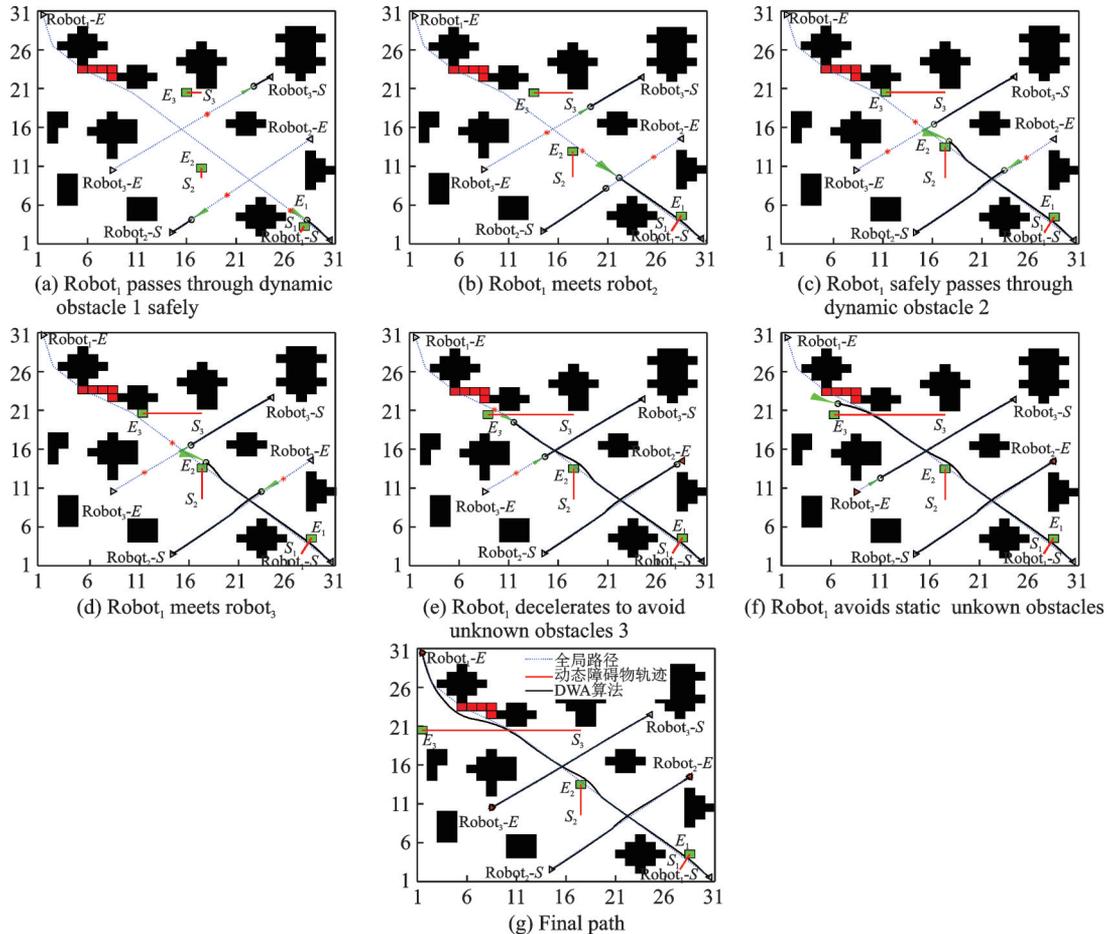


图 19 默认优先级情况下的机器人路径规划
Fig.19 Robot path planning under default priority

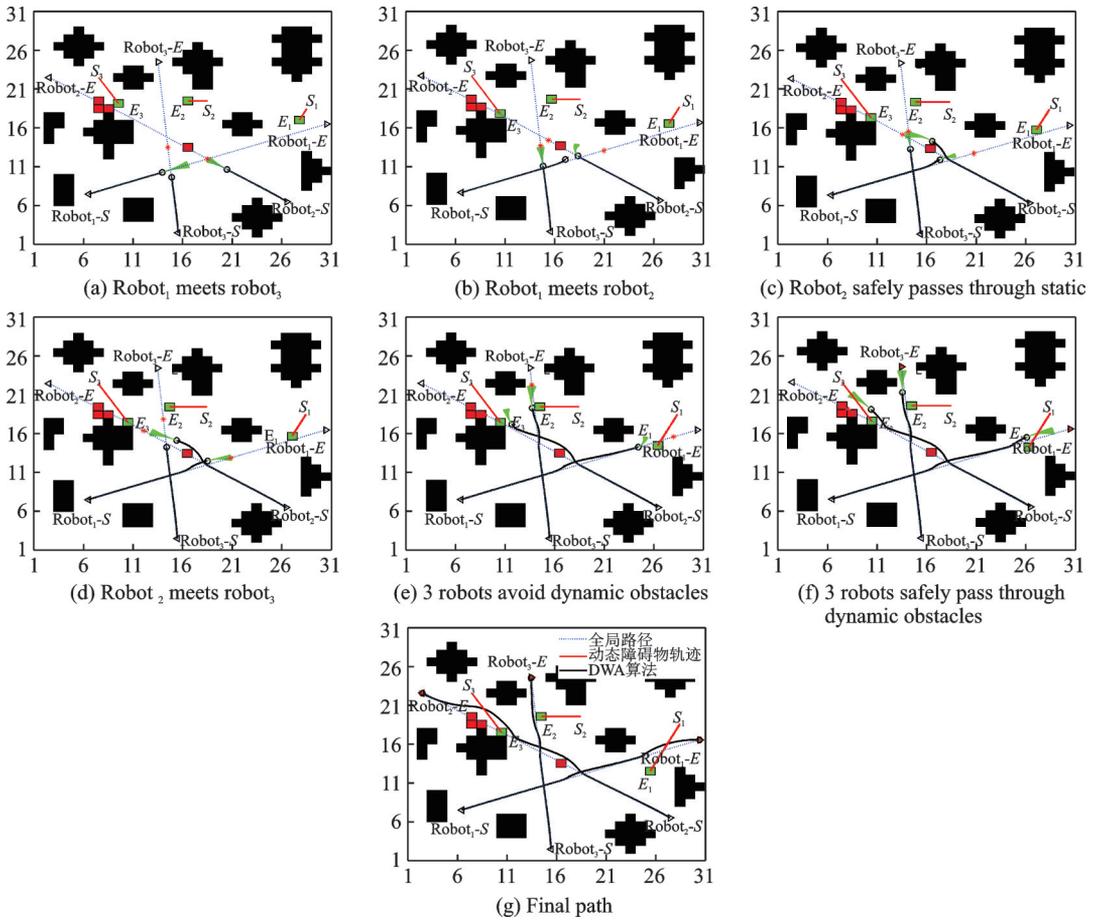


图 20 距离优先级情况下的机器人路径规划

Fig.20 Robot path planning under distance priority

在图 20 中,距离优先级为距离目标点越远,优先级越大,机器人间的冲突距离为 2 m。图 20(a), Robot₁与 Robot₃发生冲突,此时 Robot₁当前点距离目标点较远,优先级大于 Robot₃, Robot₃停止前进;图 20(b), Robot₁与 Robot₂发生冲突, Robot₂当前点距离目标点较远,优先级大于 Robot₁, Robot₁停止前进;图 20(d), Robot₂与 Robot₃发生冲突, Robot₂当前点距离目标点较远,优先级大于 Robot₃, Robot₃停止前进。

此部分仿真聚集各类障碍物,复杂度大大提升,仿真结果表明,本文改进算法能够很好地适应复杂的动、静态环境。

4 结束语

针对传统 A*算法在机器人路径规划中存在转折点多、转角大、遍历节点多和路径不平滑问题以及传统动态窗口法存在无中间指引,容易陷入局部最优,甚至规划失败问题,本文对上述两种算法存在的问题都进行相应的改进,如采用 16 邻域 16 方向的路径搜索方式、改进启发信息、两次平滑策略和障碍物进行分类处理,并验证每一部分改进的可行性和有效性。然后进行整体实验仿真,验证改进 A*算法的有效性。最后将改进后的算法进行融合,在静态已知与未知环境、一般动态环境和特殊动态环境下进行仿真,验证了本文融合方法以及优先级策略的可行性和有效性。以上结论都是从仿真中得到,未

来工作重心将从实验仿真转移到实体移动机器人上来,继续探究本文算法及其他算法在移动机器人路径规划中的应用。

参考文献:

- [1] 毕松,王宇豪.果园机器人视觉导航行间位姿估计与果树目标定位方法[J].农业机械学报,2021,52(8): 16-26,39.
BI Song, WANG Yuhao. Inter-line pose estimation and fruit tree location method for orchard robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 16-26, 39.
- [2] 邱亚,沈林勇,胡卫建,等.缝隙搜救机器人镜体的形状重建和定位方法[J].仪器仪表学报,2015,36(12): 2782-2789.
QIU Ya, SHEN Linyong, HU Weijian, et al. Shape rebuilding and positioning method of search and rescue robot endoscope in ruin crack[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2782-2789.
- [3] 姚斌,张建勋,代煜,等.用于微创外科手术机器人的多维力传感器解耦方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(1):147-153.
YAO Bin, ZHANG Jianxun, DAI Yu, et al. Research on decoupling method of multi-dimensional force sensor used in minimally invasive surgical robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 147-153.
- [4] 高斌.室内智能扫地机器人的关键技术研究[D].重庆:重庆大学,2017.
GAO Bin. Research on key technologies of indoor intelligent sweeping robot[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [5] 江明,王飞,葛愿,等.基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划研究[J].仪器仪表学报,2019,40(2): 113-121.
JIANG Ming, WANG Fei, GE Yuan, et al. Research on path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 113-121.
- [6] 张文,刘勇,张超凡,等.基于方向A*算法的温室机器人实时路径规划[J].农业机械学报,2017,48(7): 22-28.
ZHANG Wen, LIU Yong, ZHANG Chaofan, et al. Real-time path planning of greenhouse robot based on directional A* algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 22-28.
- [7] FU B, CHEN L, ZHOU Y T, et al. An improved A* algorithm for the industrial robot path planning with high success rate and short length[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2018, 106: 26-37.
- [8] 孙功武,苏义鑫,顾轶超,等.基于改进蚁群算法的水面无人艇路径规划[J].控制与决策,2021,36(4): 847-856.
SUN Gongwu, SU Yixin, GU Yichao, et al. Path planning for unmanned surface vehicle based on improved ant colony algorithm[J]. Control and Decision, 2021, 36(4): 847-856.
- [9] MA Y, HU M Q, YAN X P. Multi-objective path planning for unmanned surface vehicle with currents effects[J]. ISA Transactions, 2018, 75: 137-156.
- [10] PATLE B K, PARHI D, JAGADEESH A, et al. Matrix-binary codes based genetic algorithm for path planning of mobile robot[J]. Computers & Electrical Engineering, 2017: S004579061630996X.
- [11] OROZCO-ROSAS U, MONTIEL O, SEPÚLVEDA R. Mobile robot path planning using membrane evolutionary artificial potential field[J]. Applied Soft Computing, 2019, 77: 236-251.
- [12] BALLESTEROS J, URDIALES C, VELASCO A, et al. A biomimetical dynamic window approach to navigation for collaborative control[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2017, 6:1-11.
- [13] ASITA K R, DAYAL R P, HARISH C D, et al. Analysis and use of fuzzy intelligent technique for navigation of humanoid robot in obstacle prone zone[J]. Defence Technology, 2018, 14(6): 677-682.
- [14] 张庆,刘旭,彭力,等.融合JPS和改进A*算法的移动机器人路径规划[J].计算机科学与探索,2021,15(11): 2233-2240.
ZHANG Qing, LIU Xu, PENG Li, et al. Path planning for mobile robots based on JPS and improved A* algorithm[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2021, 15(11): 2233-2240.
- [15] 孙伟,吕云峰,唐宏伟,等.基于一种改进A*算法的移动机器人路径规划[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(4): 94-101.
SUN Wei, LV Yunfeng, TANG Hongwei, et al. Mobile robot path planning based on an improved A* algorithm[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(4): 94-101.
- [16] 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(3): 132-140.
CHI Xu, LI Hua, FEI Jiyu. Research on robot random obstacle avoidance method based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 132-140.
- [17] 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[EB/OL].(2021-08-29). <https://doi.org/10.13195/j>.

kzyjc. 2020.1817.

CHANG Lu, SHAN Liang, DAI Yuewei, et al. Multi-robot formation control in unknown environment based on improved DWA[EB/OL]. (2021-08-29). <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1817>.

- [18] 岳高峰,张萌,沈超,等.移动机器人导航规划的双向平滑A-star算法[J].中国科学:技术科学,2021,51(4): 459-468.
YUE Gaofeng, ZHANG Meng, SHEN Chao, et al. Bi-directional smooth A-star algorithm for navigation planning of mobile robots[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, 51(4): 459-468.
- [19] 王洪斌,尹鹏衡,郝维,等.基于改进的A*算法与动态窗口法的移动机器人路径规划[J].机器人,2020,42(3): 346-353.
WANG Hongbin, YIN Pengheng, ZHENG Wei, et al. Mobile robot path planning based on improved A* algorithm and dynamic window method[J]. Robot, 2020, 42(3): 346-353.
- [20] 劳彩莲,李鹏,冯宇.基于改进A*与DWA算法融合的温室机器人路径规划[J].农业机械学报,2021,52(1): 14-22.
LAO Cailian, LI Peng, FENG Yu. Path planning of greenhouse robot based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 14-22.
- [21] 吴飞龙,郭世永.融合改进A*和动态窗口法的AGV动态路径规划[J].科学技术与工程,2020,20(30): 12452-12459.
WU Feilong, GUO Shiyong. Dynamic path planning of AGV based on fusion of improved A* and dynamic window approach [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(30): 12452-12459.
- [22] 赵伟,吴子英.双层优化A*算法与动态窗口法的动态路径规划[J].计算机工程与应用,2021,57(22): 295-303.
ZHAO Wei, WU Ziyong. Dynamic path planning based on bilevel optimization A* algorithm and dynamic window method[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(22): 295-303.
- [23] 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.
- [24] 张凌云.安防巡检机器人导航系统设计与实现[D].成都:电子科技大学,2018.
ZHANG Lingyun. Design and implementation of the security and inspection robot's navigation system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [25] 王亭.基于强化学习的无人艇路径规划方法与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
WANG Ting. Path planning method and design of USV based on reinforcement learning[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [26] 张志文,张鹏,毛虎平,等.融合改进A*算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J].电光与控制,2021,28(9):39-43.
ZHANG Zhiwen, ZHANG Peng, MAO Huping, et al. Global dynamic path planning combining improved A* algorithm with dynamic window approach[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(9): 39-43.
- [27] 程传奇,郝向阳,李建胜,等.融合改进A*算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J].西安交通大学学报,2017,51(11): 137-143.
CHENG Chuanqi, HAO Xiangyang, LI Jiansheng, et al. Global dynamic path planning based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(11): 137-143.
- [28] 刘建娟,薛礼敬,张会娟,等.融合改进A*与DWA算法的机器人动态路径规划[J].计算机工程与应用,2021,57(15): 73-81.
LIU Jianjuan, XUE Liqi, ZHANG Huijuan, et al. Robot dynamic path planning based on improved A* and DWA algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(15): 73-81.

作者简介:



齐款款(1993-),男,硕士研究生,研究方向:移动机器人,E-mail:943484216@qq.com。



李二超(1979-),通信作者,男,博士,教授,博士生导师,研究方向:多目标优化、人工智能等,E-mail:lecstarr@163.com。



毛玉燕(1994-),女,硕士研究生,研究方向:多目标优化。