

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313568

# 移动机器人复杂角点定位和停车策略研究与实现<sup>\*</sup>

李芳娣 邓晓燕 吴伟铭 周依静 陈芯婷  
(华南理工大学自动化科学与工程学院 广州 510641)

**摘要:**针对移动机器人在复杂角点深处定位不准确而导致振荡旋转无法停车的问题,提出了一种基于TEB局部规划器与激光雷达相结合的角点定位和停车策略。首先基于TEB规划器进行局部路径规划,利用激光雷达采集角点信息,进而通过设置辅助点进行小车前进和转角修正策略,实现移动机器人在角点处的快速定位和导航。通过在仿真平台Gazebo和实际环境下进行测试,结果表明该方法在复杂角点的定位停车准确率达95%,能有效实现移动机器人在复杂角点的快速定位和精准停车。

**关键词:** 移动机器人;路径规划;辅助点

**中图分类号:** TP242.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Research and implementation of complex corner location and parking strategy for mobile robot

Li Fangdi Deng Xiaoyan Wu Weiming Zhou Yijing Chen Xinting

(School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** When the mobile robot sets the navigation point in the depth of the complex corner, the mobile robot can not plan the path because of the oscillation and rotation of the inaccurate positioning. This paper proposes a local planner based on TEB combined with lidar to collect corner information, and realize the rapid positioning and navigation of the mobile robot by setting auxiliary points. Through testing in the simulation platform Gazebo and the actual environment, the results show that the method can solve the positioning problem of complex corners, and realize the fast and effective path planning and accurate parking of mobile robots.

**Keywords:** mobile robot; path planning; auxiliary positioning

### 0 引言

近年来,科学技术迅猛发展,移动机器人的应用越来越广泛,机器人智能化自主定位导航成为研究的热点。移动机器人在日常生活、工业制造等场景中应用广泛,其定位导航问题愈发重要。移动机器人的定位即通过移动机器人对环境的感知和自身运动确定其在环境中的位姿。目前对环境的定位主要有两大类:其中第一类是基于机器人主体传感器定位,主要由激光定位和相机定位;仇新等<sup>[1]</sup>提出融合深度学习和结构特征的视觉定位方法实现移动机器人复杂环境下的定位问题。刘奇<sup>[2]</sup>研究中将激光和视觉的二维语义信息融合实现对墙角的重定位。蒋林等<sup>[3]</sup>在复杂环境下实现对墙角语义地图改进自适应蒙特卡罗定位(adaptive Monte Carlo localization, AMCL)的重定位研究。以上利

用视觉定位的方法和改进AMCL算法的方法都是需要提取环境下的各种特征结构,适合于有复杂环境的墙角场景。第二类是基于环境中静态装置进行定位,如安装的摄像头,二维条码(quick response, QR)等。Zhang等<sup>[4]</sup>提出在环境设置了静态QR码,通过相机获得机器人与墙角的相对关系。胡章芳等<sup>[5]</sup>提出在墙角设置固定二维码,利用相机获得距离信息将其转换到机器人中心坐标系上,实现机器人的定位。但是这种方法灵活性较低且精度不高。在定位准确的基础上,需要机器人在工作环境中规划出一条从初始位置到目标位置的最优路径。林韩熙等<sup>[6]</sup>论述了各类智能路径规划算法,同时满足实时躲避静态障碍物和动态障碍物的要求。根据移动机器人掌握的先验信息和基于传感器的信息,路径规划由全局路径规划和局部路径规划构成<sup>[7]</sup>。同时金云等<sup>[8]</sup>验证了复杂环境下D\*算法规划全局

收稿日期:2023-05-08

<sup>\*</sup> 基金项目:2022年华南理工大学中央高校基本科研业务费专项资金(2022ZYGXZR021, x2zdD2220490)、2022年华南理工大学校级教研教改项目(x2zdC9223137)、国家自然科学基金(61836003)、华南理工大学2022年研究生教育教学成果奖培育项目(D622267023)资助

路径的最优性, 陈奕梅等<sup>[9]</sup>进一步将时间弹性带算法 (time-elastic band, TEB) 和速度障碍算法 (velocity obstacle, VO) 融合实现很好的效果。但是算法融合后计算量增大, 对机器人底层驱动要求较高。目前机器人在角点的定位和停车问题还存在实时性较差和定位精度不够等问题。

基于上述, 本文基于 TEB 算法和激光雷达信息实现麦克纳姆轮移动机器人快速定位和导航, 主要创新点如下:

1) 基于 TEB 局部规划器结合激光雷达采集角点信息, 通过设置辅助点进行控制策略设计, 实现移动机器人快速定位和导航;

2) 通过仿真平台 Gazebo 和实车在实际环境下进行了测试, 验证了方法的有效性。

## 1 相关知识

### 1.1 移动机器人模型

本文采用由麦克纳姆轮驱动的全向移动机器人<sup>[10]</sup>, 麦轮有轮毂和辮子两部分, 轮毂是主体支架, 辮子安装在轮毂上。建立全向移动机器人的运动学模型, 其相关坐标系和车轮分析如图 1 所示。

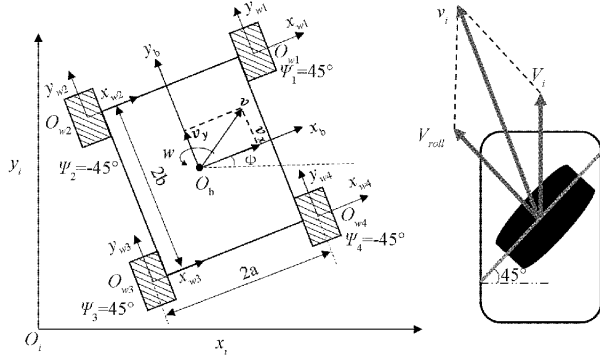


图 1 移动机器人模型和车轮分析

$O_i, x_i, y_i$  作为底盘惯性坐标系,  $O_b, x_b, y_b$  为机器人连体坐标系,  $O_b$  点是车体中心点,  $y$  轴指向车身纵轴方向,  $x$  轴指向车身横轴, 并与  $y$  轴形成右手直角坐标系, 车身长宽分别为  $2b, 2a$ 。  $O_{wi}, x_{wi}, y_{wi}$  是车轮的轮系坐标系,  $O_{wi}$  点位于车轮几何中心,  $x_i$  轴平行于电机输出轴, 与  $y_i$  轴组成右手坐标系。按照麦克纳姆轮以  $45^\circ$  安装方式分析, 车轮的速度分别记为  $v_i (i=1, 2, 3, 4)$ , 电机驱动轮速度为  $V_i (i=1, 2, 3, 4)$ , 还有辮子滚动提供的速度  $V_{roll}$ , 小车底盘的线速度为  $v$ , 分解在坐标轴上分别为  $v_x, v_y$ , 角速度为  $w$ <sup>[10]</sup>。

$$\begin{bmatrix} v_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ix} \\ v_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \times w \\ a \times w \end{bmatrix} \quad (1)$$

同时对车轮分析有:

$$\begin{bmatrix} v_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ix} \\ v_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{roll} \cos 45^\circ \\ V_{roll} \sin 45^\circ \end{bmatrix} \quad (2)$$

对式(1)和(2)联立可得:

$$V_i = v_x + v_y + (a+b)w \quad (3)$$

由于 1234 轮的轮辮朝向不一样, 所以最后的车轮速度分别为:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x - v_y - (a+b)w \\ v_x + v_y + (a+b)w \\ v_x + v_y - (a+b)w \\ v_x - v_y + (a+b)w \end{bmatrix} \quad (4)$$

最后对其进行逆变换可得全向移动机器人底盘的前向运动。

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \frac{1}{4}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ \frac{1}{a+b} & \frac{1}{a+b} & -\frac{1}{a+b} & \frac{1}{a+b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 1.2 激光雷达

激光雷达 LiDAR 是通过发射激光束探测目标的位置、障碍物的距离等特征量, 一般的激光雷达有<sup>[11-12]</sup>。本文实际环境使用的 YDLIDAR G4 激光雷达, 采用三角测距原理对二维平面进行激光扫描生成信息。其在扫描频率为  $5 \sim 12$  Hz 范围内, 角度分辨率为  $0.2^\circ \sim 0.48^\circ$ 。单点测距, 以角度  $\beta$  发射一束激光 (图 2), 沿物体方向反射激光,  $d$  为雷达和物体的距离, 接受激光的 CMOS, 被反射的激光会通过小孔成像被拍到, 焦距是  $f$ , 物体离平面垂直距离是  $q$ , 激光器和焦点间的距离是  $s$ , 激光器反射后距离过焦点平行于激光方向的延长线为  $m$ 。

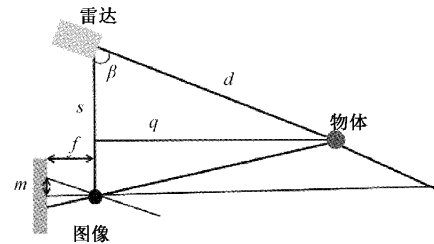


图 2 雷达单点测距

从图 2 中得出  $q, d, \beta$  三角形和  $m, f$  三角形为相似三角形:

$$\frac{f}{m} = \frac{q}{s} \quad (6)$$

$$\sin \beta = \frac{q}{d} \quad (7)$$

最后有:

$$d = f \frac{s}{m \sin \beta} \quad (8)$$

激光雷达按照  $360^\circ$  旋转, 激光器和成像器固定成一个装置, 旋转获得  $360^\circ$  的扫描距离。

## 2 定位和辅助停车策略

### 2.1 TEB 局部规划器

TEB 是对全局规划器生成的初始轨迹进行后续局部优化修正。机器人的位姿定义为： $X_j = (x_j, y_j, \beta_j)^T$ ， $x_j, y_j$  表示机器人位置， $\beta_j$  表示机器人的方向， $\Delta T_j$  表示  $X_j$  到  $X_{j+1}$  的时间间隔<sup>[9,13]</sup>，如图 3 所示。

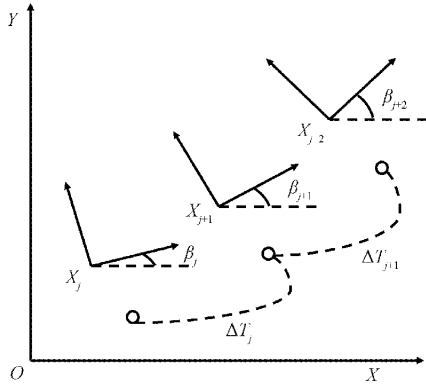


图 3 TEB 机器人位姿表示

TEB 利用图优化的思想<sup>[9]</sup>，机器人相邻的时间间隔与状态作为图优化的节点，速度、加速度、机器人约束作为图优化的边，加入障碍物信息、规划轨迹的离散时间间隔与时间空间的序列约束，最后用 G2O 求解线速度和角速度，获得最优轨迹，TEB 使用多目标加权优化器。

$$f(B) = \sum_k \gamma_k f_k(B) \quad (9)$$

$$B^* = \arg \min_B f(B) \quad (10)$$

$f(B)$  为目标函数， $f_k(B)$  为各个约束函数， $\gamma_k$  为每项的权值， $B^*$  为最优的规划路径结果。TEB 的约束函数通常有 4 个：跟随路径与障碍物距离约束、速度加速度约束、非完整运动学约束以及最快路径约束<sup>[13]</sup>。机器人的位姿状态做弧线运动，可得机器人在世界坐标系上与航向角  $\theta_j, \theta_{j+1}$  的代价函数，最小化时间间隔的平方即为最后控制的目标函数，使得机器人获得最快路径<sup>[13]</sup>。

$$f = \left( \sum_{j=0}^n \Delta T_j \right)^2 \quad (11)$$

### 2.2 控制策略

在机器人从出发点向停车点出发的过程中，TEB 算法规划局部路径，在辅助停车点时采集小车前面方向的雷达信号，并得出最大距离即为距离墙角的距离，并且可以计算出小车姿态与墙角的连线相对雷达的角度差  $\gamma, v, w$  是小车线速度和角速度， $d_{max}$  是雷达扫描得出距离墙角的最大距离，为了减小惯性影响，故利用此距离反馈控制速度。

#### 1) 辅助停车点

从初始位置开始到辅助停车点采用 Dijkstra 全局规划器、TEB 局部规划器<sup>[14]</sup>，在选择辅助停车点时需要考虑该点处无随机障碍物，同时在定位可能漂的假设下该点不会被隐藏在膨胀层中。辅助点处设置阈值让小车停在一定范围内直接进行自动修正，调用 TF 转换获取小车真实位置，如式(12) 阈值  $Q^*$  设置。

$$(x_e - x_a)^2 + (y_e - y_a)^2 \leq Q^* \quad (12)$$

#### 2) 修正转角

由于小车在辅助点设置阈值，小车会停在辅助点附近，故此时实际小车和理想位姿设置存在夹角  $\gamma (0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ)$ ，利用  $\gamma$  作反馈量来控制机器人的角速度，修正机器人位姿到理想状态的阈值。 $\gamma_R$  是机器人姿态角， $\gamma_L$  是雷达最大距离相对  $0^\circ$  的角度， $\gamma^*$  是原地修正角度差的阈值。

$$\gamma = \gamma_R - \gamma_L \quad (13)$$

$$\gamma \leq \gamma^* \quad (14)$$

$$w = \begin{cases} K_{m1} \gamma, & \gamma > 10 \\ K_{m2} \gamma, & 3 < \gamma \leq 10 \\ K_{m3} \gamma, & -8 \leq \gamma < -3 \\ K_{m4} \gamma, & \gamma < -8 \end{cases} \quad (15)$$

#### 3) 小车前进

小车在修正自己辅助点位置后采集  $d_{max}$ ，利用此距离来控制机器人底盘运动，由于 2.2 节修正后  $\gamma$  不为 0，故按照对终点坐标和姿态的设置，机器人会通过  $d_{max}$  的大小来设置前进速度。

$$v = \begin{cases} K_{p1} d_{max}, & d_{max} > 0.5 \\ K_{p2} d_{max}, & 0.3 < d_{max} \leq 0.5 \\ 0, & 0 \leq d_{max} \leq 0.3 \end{cases} \quad (16)$$

$$w = \begin{cases} w_1^*, & d_{max} > 0.5 \\ w_2^*, & 0.3 < d_{max} \leq 0.5 \\ 0, & 0 \leq d_{max} \leq 0.3 \end{cases} \quad (17)$$

整个运动规划框架基于 ROS 系统，利用开源的 move\_base 提供全局导航点，调用 D\* 算法作全局规划，TEB<sup>[14]</sup> 作局部规划，在不同场景采集激光雷达信息，整体运动框架如图 4。

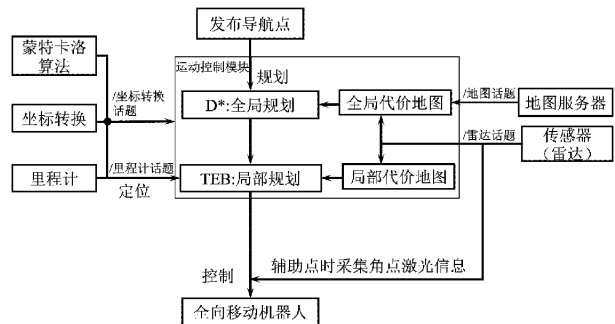


图 4 运动规划框架图

算法伪代码程序:

#### 算法 1 辅助点停车算法

控制值:  $v, w$  速度, 加速度

判断值:  $\chi, \gamma$  距离墙角距离, 姿态夹角

```

1: function Nav_Text
2:   flag ← True or False
3:   if flag then
4:     send_goal and plan_path
5:     if |fuzhu. position-get_pose. position| < Q* then
6:       cancel_goal and get_scan
7:     end if
8:     if  $|\gamma| > \gamma^*$  then
9:       get_twist_msg
10:    end if
11:    if  $|\chi| > \chi^*$  then
12:      get_twist_msg
13:    end if
14:  else
15:    send_goal and plan_path
16:    if path_waiting_timeout > 5 then
17:      stop and send_goal
18:    end if
19:    if rotate_waiting_timeout > 10 then
20:      stop
21:    end if
22:    results = |end. position-get_pose. position|
23:  Output results
24: end function

```

### 3 实验分析

#### 3.1 仿真实验

本文基于 Ubuntu18.04, ROS 版本为 melodic, Gazebo 搭建的仿真场地并采用可视化工具 Rviz, 其中机器人模型采用全向移动机器人模型。首先利用集成功能包, 对未知环境在激光雷达数据下利用 Gmapping 算法下构建栅格地图<sup>[15]</sup>, 然后运行整个算法程序, 实现动态的避障导航<sup>[16]</sup>。在文中涉及到辅助点的选取, 由于在停车区间附近存在随机障碍物, 故选取停车区和随即障碍物区相邻的区域, 以小车的径向半径作相切圆, 选择圆心作为小车的辅助点, 小车的姿态方向设定为辅助点与墙角的连线方向以方便姿态角的修正。同时选择一个初始位置进行实验验证, 辅助点和初始位置如图 5 所示。

##### 1) 避障

在选定机器人辅助停车点之后, 对小车避障能力进行测试, 如图 5 和 6。

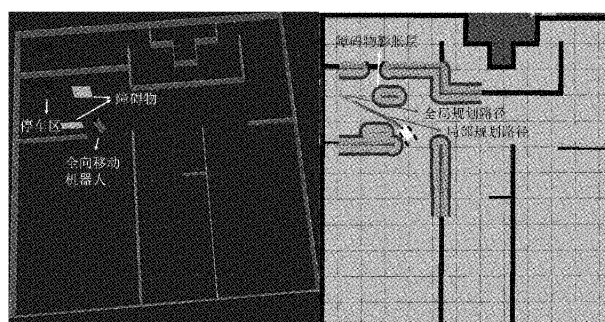


图 5 避障测试和辅助点初始点设置

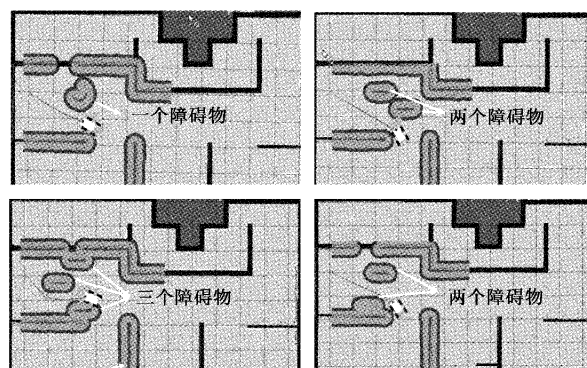


图 6 更换障碍物相对位置与数量测试避障效果

在原有 Gazebo 环境中在障碍物区域加入不同位置, 不同数量的障碍物, 进行测试, 优化 TEB 避障参数, 测试小车避障能力。根据避障实验移动机器人躲避障碍物的效果可知, 设置不同的障碍物小车的局部规划器基本可以跟随全局规划器, 避障效果良好。

##### 2) 辅助停车

选定辅助点后, 对整个辅助点策略进行优化, 即参数的选择。从初始点到辅助点再到停车点的过程需要最少时间, 故在这里进行多次测试来获得 TEB 优化后的参数和辅助点停车的优化参数, 最终获得参数如表 1 和 2 所示。

表 1 TEB 关键参数的设定

TEB 参数	数值
max_vel_x	1.8
max_vel_x_backwards	0.2
max_vel_theta	2.9
acc_lim_x	1.6
acc_lim_theta	3.0
xy_goal_tolerance	0.5
yaw_goal_tolerance	0.5
Global:inflation_radius	0.2
Local:inflation_radius	0.2

确定了整个算法体系的相关参数后利用 TEB 算法、动态窗口法 (dynamic window approach, DWA) 以及采用本

表 2 停车优化参数的选择

停车参数	数值
$Q^*$	0.007 2
$\gamma^*$	3
$K_{m1}; K_{m2}; K_{m3}; K_{m4}$	0.12, 0.1, 0.1, 0.12
$K_{p1}, K_{p2}$	2.2, 1.5
$W_1^*, W_2^*$	0.5, 0.4

文提出的辅助停车方法进行对比实验,在程序中设定标志位来标定选择使用的算法,分别对 3 种情况各独立实验 40 次,在这个过程中为防止动态障碍物可能作为不同的因素影响实验,故不设置随机障碍物,利用程序分别获得两种情况下小车到停车点所需时间,通过机器人本身位姿的坐标系与地图坐标系的位置坐标转换,就可以得到机器人实时位置进行判断最后停车的准确性。结果如表 3 所示。

表 3 现有算法和本文辅助停车算法对比实验

	没有震荡 %	次数	平均时间/s	准确度 %
TEB 算法	57.5	40	6.563	55
DWA 算法	40.2	40	7.58	42
本文方法 (辅助停车)	100	40	3.221	95

注:在 TEB 算法和 DWA 算法中停车中有 33.5% 和 59.8% 的实验移动机器人一直在停车点处原地旋转,无法准确停车,时间为 inf,在计算平均时间时将这些数据筛出。

$$\text{平均时间: } t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (18)$$

$$\text{准确停车: } p = \frac{p_{\text{准确停车次数}}}{p_{\text{总的有效仿真次数}}} \times 100\% \quad (19)$$

在停车处对  $d_{\max}$  设置一定的裕量  $d^* = 0.3$ , 使在一定的范围内就确认小车停车成功。

分别利用以上 3 种方法来测试移动机器人的停车效果,通过数据可以看出,单纯利用 TEB 或者 DWA 算法导航停车时,存在定位不准确导致无法准确停车,一直在原地振荡的情况,同时因为算法本身对目标点附近的速度有限制,故最终停车的时间较长。

而本文辅助停车的方法,在选取辅助点之后,即使定位不准确,但是利用采集到的激光雷达信息可以实现二次对墙角位置的判断,从而控制机器人的底盘运动,同时对底盘控制时,不存在限速问题,故所需时间更少。通过实验结果可知,辅助停车的平均时间远低于 TEB 算法和 DWA 算法,同时停车的准确率达 95%,基本上实现了移动机器人的稳定定位和快速停车。

### 3.2 实际环境实验

本文在实际环境中所采用的移动机器人是讯飞公司研发的 mini 全向移动机器人小车,移动机器人上位机为 Jetson

Nano 处理器,下位机为 STM32F4 控制器,IMU 惯性模块、麦克风阵列、单目摄像头、激光雷达,采用麦克纳姆轮运动,如图 7。

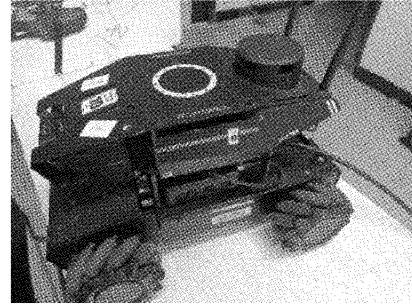


图 7 实际移动机器人

实际物理环境和 Gazebo 仿真物理环境一致如图 8,验证在仿真中获得的参数和策略的效果。

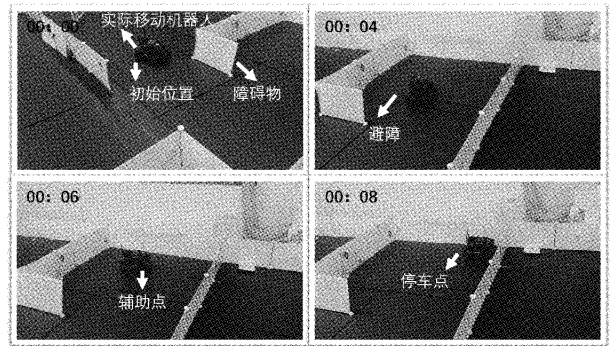


图 8 实际小车实验环境

在实际环境中,测试了移动机器人的避障能力,以及通过多次测试获得合适的辅助点,验证机器人的定位和停车。由于实际环境相比仿真环境存在更多的干扰因素,同时实际机器人与仿真机器人有差别,故平均时间会比仿真时间更长,停车的准确性可达 90%,可以基本上实现机器人的定位和停车。

## 4 结 论

经过仿真实验验证了移动机器人良好的避障能力,并获得了相应的 TEB 参数和停车参数,最后通过对比实验数据验证了采用本文的方法可以解决小车在墙角定位不准确导致无法路径规划的问题,在 TEB 和激光雷达信息结合的辅助点策略下使小车准确规划和停车概率远远高于现有的 TEB 算法和 DWA 算法,快速性也显著提高,在 TEB 参数良好的状况下平均缩短时间达 3.342 s。同时在实际的单一墙角环境中进行墙角实验验证,结果证明了该方法的有效性。

本文方法在环境信息量缺乏,无法利用视觉采集有效信息以及环境中没有固定的 QR 码等信息的情况下,充分利用激光雷达的信息实现移动机器人的定位导航,对移动

机器人在简单环境下复杂角点场景中导航停车作业有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] 仇新,毛宇新,李锁.融合深度学习和结构特征的视觉定位方法[J].长江信息通信,2023,36(5):84-87.
- [2] 刘奇.激光视觉融合的室内二维语义地图构建及其重定位研究[D].武汉:武汉科技大学,2022.
- [3] 蒋林,聂文康,朱建阳,等.基于具有墙角信息的语义地图改进 AMCL 重定位算法[J].机械工程学报,2022,58(24):312-323.
- [4] ZHANG H, ZHANG C, YANG W, et al. Localization and navigation using QR code for mobile robot in indoor environment[C]. IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics, IEEE, 2015, DOI: 10.1109/ROBIO.2015.7419715.
- [5] 胡章芳,曾林全,罗元,等.融入二维码信息的自适应蒙特卡洛定位算法[J].计算机应用,2019,39(4):989-993.
- [6] 林韩熙,向丹,欧阳剑,等.移动机器人路径规划算法的研究综述[J].计算机工程与应用,2021,57(18):38-48.
- [7] 霍凤财,迟金,黄梓健,等.移动机器人路径规划算法综述[J].吉林大学学报(信息科学版),2018,36(6):639-647.
- [8] 金云,周苗,黄仁欢,等.一种基于 Dijkstra 算法的动态进路规划方法[J].铁路通信信号工程技术,2022,19(1):20-23.
- [9] 陈奕梅,沈建峰,李柄棋.改进 TEB 算法的多机器人动态避障策略研究[J].电光与控制,2022,29(5):107-112.
- [10] 刘佳伟,杜欣,范方朝,等.基于多传感器的室内建图导航系统的设计[J].计算机科学,2023,50(S1):879-886.
- [11] KHAN S, WOLLHERR D, BUSS M. Modeling laser intensities for simultaneous localization and mapping[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016, 2(1): 692-699.
- [12] ARTAMONOV S I, GRYAZNOV N A, KUPRENYUK V I, et al. Selection of scanners for use in lidar systems [J]. Journal of Optical Technology, 2016, 83(9):549-555.
- [13] 高熙强.基于 TEB 算法的移动机器人运动轨迹规划研究[J].农业装备与车辆工程,2022,60(7):126-129.
- [14] 邵连奇,张媛媛,袁田,等.基于 ROS 的机器人自主探索导航与地图构建研究[J].科技创新与应用,2023,13(8):37-40.
- [15] 危双丰,庞帆,刘振彬,等.基于激光雷达的同时定位与地图构建方法综述[J].计算机应用研究,2020,37(2):327-332.
- [16] 刘文之.基于激光雷达的 SLAM 和路径规划算法研究与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.

### 作者简介

李芳娣,本科,主要研究方向为机器人控制。

E-mail:2644480343@qq.com

邓晓燕(通信作者),博士,高级实验师,主要研究方向为机器人控制、人机交互。

E-mail:dengxy@scut.edu.cn