

结合历史运动状态的机器人高效沿墙算法研究

蒋林^{1,2} 张燕飞¹ 朱建阳^{1,2} 雷斌^{1,2} 王翰¹ 高旭敏¹

摘要 针对目前室内移动机器人沿墙走算法过于复杂、路径易重复、不能完全遍历、效率低等问题,采用室内未知环境下结合历史状态的机器人沿墙高效遍历研究来解决这些问题.该算法由移动机器人的上一个周期历史环境运动状态(分8类)、当前环境运动状态(分8类)和旋向信息(分2类)建立运动规则库,沿墙行走时移动机器人时时采集这三类信息(上一个周期历史环境运动状态、当前环境运动状态和旋向信息)决定移动机器人当前的运动方向,如此循环直到完成指定的沿墙任务.最后对该算法进行了仿真与实际实验,实验结果证明该算法可以在不同的、复杂的环境中高效、快速地完成沿墙走的任务,并且对室内未知环境有很好的适应性.

关键词 历史环境运动状态,当前环境运动状态,旋向信息,移动机器人,沿墙

引用格式 蒋林,张燕飞,朱建阳,雷斌,王翰,高旭敏.结合历史运动状态的机器人高效沿墙算法研究.自动化学报,2020,46(6):1166-1177

DOI 10.16383/j.aas.c190365

Research on Efficient Algorithm of Robot Along the Wall Combined With Historical Motion State

JIANG Lin^{1,2} ZHANG Yan-Fei¹ ZHU Jian-Yang^{1,2} LEI Bin^{1,2} WANG Han¹ GAO Xu-Min¹

Abstract The indoor mobile robots moving along the wall will encounter the issue of complex algorithm, easy repetitive path, partial traversal and low efficiency, to end these problems, efficient traversal research of robots along the wall in the unknown environment is proposed in this work. The algorithm establishes a motion rule based on the previous cycle historical environment motion state of the mobile robot (in 8 categories), the current environmental motion state (in 8 categories), and the direction information (in 2 categories). The mobile robot collects timely while walking along the wall. These three types of information (previous cycle historical environment motion state, current environmental motion state, and direction information) determine the current motion direction of the mobile robot, and thus cycle until the specified wall-to-wall task is completed. Finally, the algorithm is simulated and experimented. The experimental results show that the algorithm can efficiently and quickly complete the task along the wall in different and complex environments, which indicates that the algorithm has good adaptability to indoor unknown environment.

Key words Historical environment movement state, current environmental motion status, rotation information, mobile robot, along the wall

Citation Jiang Lin, Zhang Yan-Fei, Zhu Jian-Yang, Lei Bin, Wang Han, Gao Xu-Min. Research on efficient algorithm of robot along the wall combined with historical motion state. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(6): 1166-1177

收稿日期 2019-05-13 录用日期 2019-11-01

Manuscript received May 13, 2019; accepted November 1, 2019

国家重点研发计划项目(2019YFB1310000),国家自然科学基金(61305110),机器人与智能系统研究院开放课题(F201803),武汉市应用基础前沿项目(2019010701011404),湖北省自然科学基金(2018CFB626)资助

Supported by National Key Research and Development Program of China (2019YFB1310000), National Natural Science Foundation of China (61305110), Research Institute of Robotics and Intelligent Systems (F201803), Wuhan Application Foundation Frontier Project (2019010701011404), and Hubei Natural Science Foundation (2018CFB626)

本文责任编辑 高会军

Recommended by Associate Editor GAO Hui-Jun

1. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室 武汉 430081 2. 武汉科技大学机器人与智能系统研究院 武汉 430081

1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan

在室内环境中,墙体是最基本的结构之一.沿墙走是指机器人能够根据室内环境中墙体的基本结构,沿着墙体,并与墙体保持一定距离的移动.这可以看成是移动机器人的低层行为,当与其他高层的智能行为相结合时,就可以完成一些复杂的任务^[1].而对于室内移动机器人来讲,能否沿墙高效遍历是分辨室内移动机器人能力的重要条件.在许多情况下,都需要机器人具备沿墙走这一功能,比如室内地图的构建、路径规划^[2]、避障^[3]等.

目前,国内外专家对室内机器人沿墙走的研究

430081 2. Institute of Robotics and Intelligent Systems, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081

已有很多. 1992 年 Van Turenout 等^[4] 基于移动机器人的运动学模型首次提出移动机器人沿墙走的概念, 并使用超声波传感器作为测距工具, 设计了简单的沿墙走算法. 虽然实现了沿墙走行为, 但该算法会受累计误差的影响, Ando 等^[5] 则利用单个声纳环^[6] 实现复杂室内环境机器人沿墙走的功能, 但没有考虑到传感器自身的不足, 实验结果不理想. 王栋耀等^[1] 提出基于有限状态机的沿墙算法, 虽然对声纳信息进行滤波处理后减小了声纳的镜面发射, 改善了沿墙走的效果, 但没有完全解决声纳传感器镜面反射的问题. 针对这一问题, Wu 等^[7] 提出了基于红外传感器的沿墙控制算法, 使用 5 个红外传感器对环境进行感知, 解决了声纳传感器的镜面反射问题, 降低了成本, 能够实现沿墙走功能, 但收集的数据有限、精度低. 而周慧等^[8] 通过对数据的预处理克服了镜面反射的问题, 但所使用的 DTW 算法受其自身测试数据长度的影响, 准确率较低. 李霞等^[9] 提出通过左右手法则实现沿墙走的功能, 即靠近、离开、远离、又接近墙体的规则实现沿墙行走, 但所用的多个传感器会造成串扰, 影响系统精度. 还有学者提出通过视觉传感器^[10] 或激光雷达传感器^[11] 采集机器人与墙体的距离和角度信息, 利用模糊神经网络算法^[12-13], 将输入数据融合, 判断机器人位姿信息, 通过控制左右轮速度控制其运动, 但模糊神经网络需要规则库且离线训练困难. 以及采用 Q 学习算法^[14] 让机器人通过学习来自动构建导航控制器, 利用对动作空间的 Q 值函数的优化获得控制, 从而实现沿墙走, 但 Q 学习算法的规则手工建立困难.

虽然上述算法各有特点, 但大多存在一定的缺点, 因此本文采用室内未知环境下结合历史状态的机器人沿墙高效遍历算法并使用激光雷达传感器实现室内移动机器人沿墙走的功能. 该算法由移动机器人的上一个周期历史环境运动状态、当前环境运动状态和旋向信息建立运动规则库, 沿墙行走时移动机器人时时采集这三类信息决定移动机器人当前的运动方向, 如此循环直到完成指定的沿墙任务. 本文提出室内未知环境下结合历史状态的机器人沿墙高效遍历算法, 用 Mealy 型有限状态机描述其运动状态, 并通过多次仿真实验以及实际实验验证了本算法的可行性和高效性.

1 室内未知环境下结合历史状态的机器人沿墙高效遍历算法

室内未知环境下结合历史状态的机器人沿墙高效遍历研究提出根据移动机器人上的激光雷达对障

碍物的反馈, 判断移动机器人当前位置的前方、左方以及右方是否存在障碍物, 并根据障碍物的存在位置描述移动机器人的运动环境状态. 当前状态为 t 时刻移动机器人所在位置的障碍物存在情况用 k 表示, 即当前运动环境状态 k , 历史状态为 $t-1$ 时刻移动机器人所在位置的障碍物存在情况用 k_1 表示, 即历史运动环境状态 k_1 , 当前 t 时刻之前移动机器人用变量 f_x 记录的旋向信息. 根据移动机器人的历史运动环境状态和当前运动环境状态来判断移动机器人所处的状态, 然后根据判断的结果和记录的自身旋向信息决定移动机器人的运动方向, 如图 1 所示.

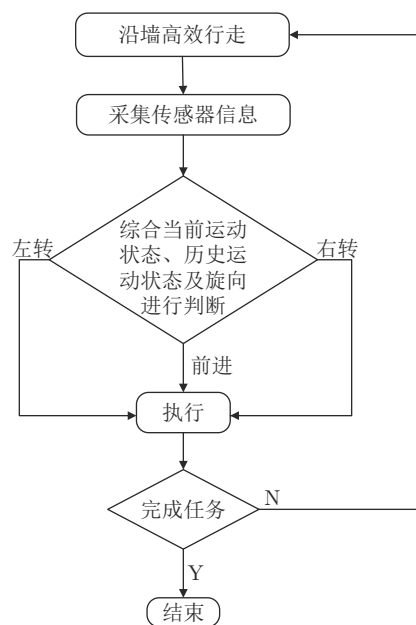


图 1 运动方向判断

Fig. 1 Motion direction judgment

1.1 运动环境状态

当前运动环境状态 k 和历史运动环境状态 k_1 的取值范围均为 1~8 间的自然数, 具体如下:

状态 1. 如图 2(a), 移动机器人的前方、左方和右方均无障碍物, 则 k 或者 k_1 取 1;

状态 2. 如图 2(b), 移动机器人只有左方有障碍物, 前方和右方无障碍物, 则 k 或者 k_1 取 2;

状态 3. 如图 2(c), 移动机器人只有前方有障碍物, 左方和右方无障碍物, 则 k 或者 k_1 取 3;

状态 4. 如图 2(d), 移动机器人只有右方有障碍物, 前方和左方无障碍物, 则 k 或者 k_1 取 4;

状态 5. 如图 2(e), 移动机器人的左方和前方都有障碍物, 右方无障碍物, 则 k 或者 k_1 取 5;

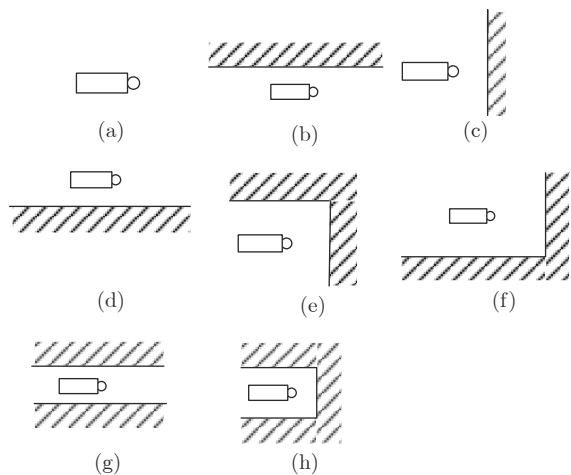


图 2 机器人环境状态

Fig.2 Robot environment status

状态 6. 如图 2(f), 移动机器人的右方和前方都有障碍物, 左方无障碍物, 则 k 或者 k_1 取 6;

状态 7. 如图 2(g), 移动机器人的左方和右方都有障碍物, 前方无障碍物, 则 k 或者 k_1 取 7;

状态 8. 如图 2(h), 移动机器人的前方、左方以及右方均有障碍物, 则 k 或者 k_1 取 8.

1.2 旋向信息的记录

当移动机器人根据当前运动环境状态 k 和历史运动环境状态 k_1 无法判断当前时刻运动方向时, 通过移动机器人当前时刻 t 之前的旋向信息 f_x 判断, 旋向信息 f_x 定义如下:

移动机器人当前时刻 t 之前的旋向信息 f_x 为累计值, f_x 的初始值为 $f_x = 0$, 当移动机器人历史运动环境状态 $k_1 = 2$ 时, 则 $f_x = f_x + 1$; 当移动机器人历史运动环境状态 $k_1 = 4$ 时, 则 $f_x = f_x - 1$; 当移动机器人历史运动中处于其他环境状态时, f_x 的值不变, f_x 的值在移动机器人运动时, 不断累积, 当遇到需要旋向信息来判断移动机器人的运动方向时, 就取 t 时刻之前 f_x 的值, 如果 $f_x \geq 0$, 则说明移动机器人沿墙顺时针行走, 结合旋向信息 f_x 、当前时刻 t 的运动环境状态和时刻 $t-1$ 的运动环境状态确定移动机器人当前运动方向; 如果 $f_x < 0$, 则说明移动机器人沿墙逆时针行走, 结合旋向信息 f_x 、当前时刻 t 的运动环境状态和时刻 $t-1$ 的运动环境状态确定移动机器人当前运动方向.

1.3 机器人运动方向判断

机器人运动方向的具体判断方法为: 如果已知移动机器人 t 时刻的当前运动环境状态 k , 判断其 $t-1$ 时刻的运动环境状态, 确定历史运动环境状态

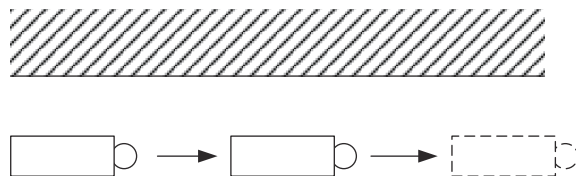
k_1 , 与当前运动环境状态结合, 得到移动机器人的运动方向. 如果根据当前运动环境状态 k 与历史运动环境状态 k_1 无法判断当前时刻机器人的运动方向, 则可结合移动机器人当前时刻 t 之前的旋向信息 f_x 判断.

例如移动机器人 t 时刻的当前运动环境状态 $k = 2$ (图 2(b) 所示) 时, 判断 $t-1$ 时刻历史运动环境状态 k_1 , 如果结合不同的历史运动环境状态, 机器人将会有不同的运动方向. 以下为 8 种不同历史环境状态下机器人当前的移动方向:

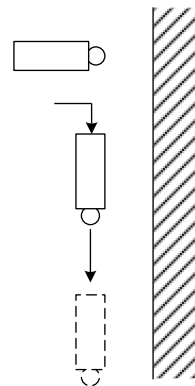
1) 如图 3 所示, 如果历史运动环境状态 $k_1 = 1$, 则机器人继续前进.

图 3 $k = 2, k_1 = 1$ 机器人运动示意图Fig.3 Robot motion diagram when $k = 2, k_1 = 1$

2) 如图 4 所示, 如果历史运动环境状态 $k_1 = 2$, 则机器人继续前进.

图 4 $k = 2, k_1 = 2$ 机器人运动示意图Fig.4 Robot motion diagram when $k = 2, k_1 = 2$

3) 如图 5 所示, 如果历史运动环境状态 $k_1 = 3$, 则机器人继续前进.

图 5 $k = 2, k_1 = 3$ 机器人运动示意图Fig.5 Robot motion diagram when $k = 2, k_1 = 3$

4) 如图 6 所示, 如果历史运动环境状态 $k_1 = 4$, 则机器人右转.

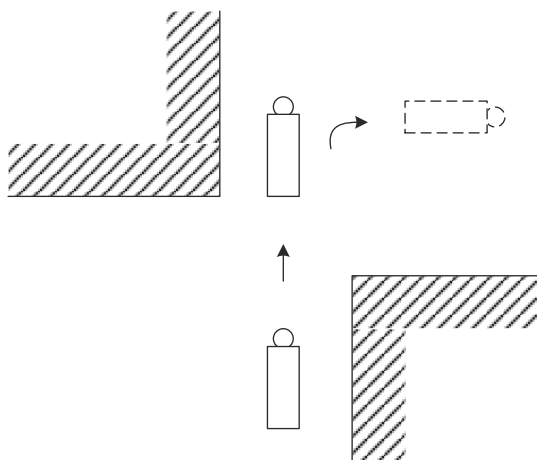


图 6 $k=2, k_1=4$ 机器人运动示意图

Fig.6 Robot motion diagram when $k=2, k_1=4$

5) 如图 7 所示, 如果历史运动环境状态 $k_1 = 5$, 则机器人继续前进.

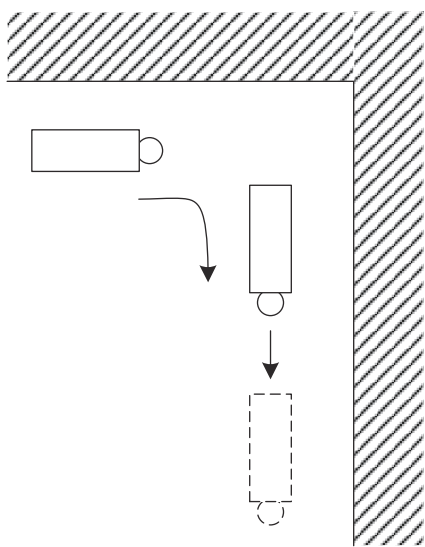


图 7 $k=2, k_1=5$ 机器人运动示意图

Fig.7 Robot motion diagram when $k=2, k_1=5$

6) 如图 8 所示, 如果历史运动环境状态 $k_1 = 6$, 则机器人右转.

7) 如图 9 所示, 如果历史运动环境状态 $k_1 = 7$, 机器人结合当前运动状态无法判断当前时刻机器人的运动, 则移动机器人需结合当前时刻 t 之前的旋向信息 f_x 判断. 当 f_x 判断机器人整体走向为顺时针, 则机器人前进; 当 f_x 判断机器人整体走向为逆时针, 则机器人右转.

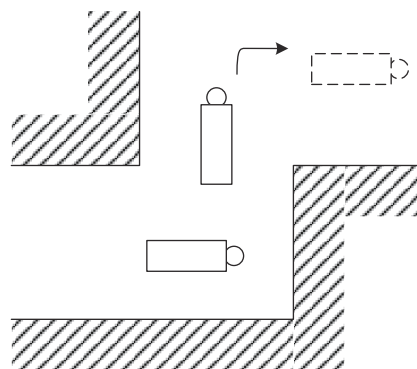


图 8 $k=2, k_1=6$ 机器人运动示意图

Fig.8 Robot motion diagram when $k=2, k_1=6$

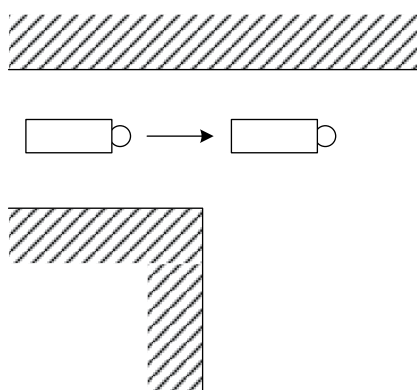


图 9 $k=2, k_1=7$ 机器人运动示意图

Fig.9 Robot motion diagram when $k=2, k_1=7$

8) 如图 10 所示, 如果历史运动环境状态 $k_1 = 8$, 机器人结合当前运动状态无法判断当前时刻机器人的运动, 则移动机器人需结合当前时刻 t 之前

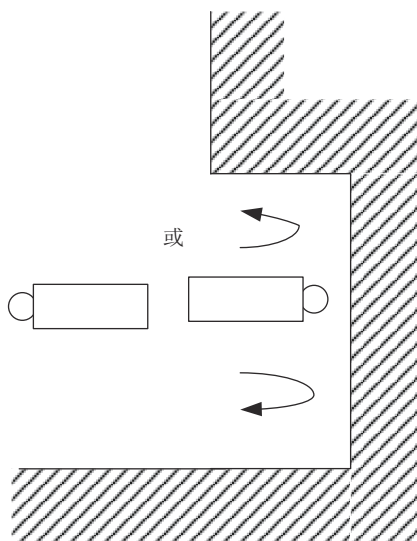


图 10 $k=2, k_1=8$ 机器人运动示意图

Fig.10 Robot motion diagram when $k=2, k_1=8$

的旋向信息 f_x 判断. 当 f_x 判断机器人整体走向为顺时针, 则机器人前进; 当 f_x 判断机器人整体走向为逆时针, 则机器人右转.

以上为当前运动环境状态 $k = 2$ 时, 结合不同历运动状态下机器人的运动方向判断. 因为机器人在 t 时刻当前运动环境状态 k 共有 8 种不同的状态, 所以机器人运动方向判断如表 1 所示, 共有 64 种情况.

表 1 移动机器人运动转向判断关系
Table 1 Mobile robot motion steering judgment relationship

k	k_1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	前进	左转	f_x 决定	右转	左转	右转	f_x 决定	f_x 决定
2	前进	前进	前进	右转	前进	右转	f_x 决定	f_x 决定
3	f_x 决定	左转	f_x 决定	右转	左转	右转	f_x 决定	f_x 决定
4	前进	左转	前进	前进	左转	前进	f_x 决定	f_x 决定
5	右转	右转	右转	右转	右转	右转	右转	右转
6	左转	左转	左转	左转	左转	左转	左转	左转
7	前进	前进	前进	前进	前进	前进	前进	前进
8	f_x 决定	右转	f_x 决定	左转	右转	左转	f_x 决定	f_x 决定

表 1 中, 当遇到需要 f_x 决定运动方向时, 首先通过记录的 f_x 值判断移动机器人沿墙运动整体的顺逆走向, 当由 f_x 判断移动机器人整体走向为顺时针, 则按照表 2 规则判断, 当由 f_x 判断移动机器人整体走向为逆时针, 则按照表 3 规则判断.

表 2 机器人沿墙顺时针行走运动转向判断表
Table 2 Robot walking along the wall clockwise movement steering judgment table

k	k_1			
	1	3	7	8
1		左转	左转	左转
2			前进	前进
3	右转	右转	左转	左转
4			左转	左转
8	右转	右转	右转	右转

表 3 机器人沿墙逆时针行走运动转向判断表
Table 3 Counterclockwise walking movement steering judgment table of robot along the wall

k	k_1			
	1	3	7	8
1		右转	右转	右转
2			右转	右转
3	左转	左转	右转	右转
4			前进	前进
8	左转	左转	左转	左转

2 沿墙运动状态

由上述可知, 机器人 t 时刻运动方向的判断可根据 t 时刻当前运动环境状态 k , $t - 1$ 时刻历史运动环境状态 k_1 以及 t 时刻之前记录的 f_x 来判断. 本文采用有限状态机来描述沿墙走时机器人运动状态转移情况.

本文提到的有限状态机 (Finite-state machine, FSM), 又称为有限状态自动机, 它是用来表示有限个状态之间的转移和动作的数学模型. 有限状态机主要分两类: 一类为 Mealy 型有限状态机, 另一类为 Moore 型有限状态机. Mealy 型的下一个状态不仅与各种输入信号有关, 还和当前状态有关. 而 Moore 型只由当前状态决定下一状态. 而本文中所提算法不仅仅与当前状态有关, 还与历史运动状态以及旋向信息有关, 所以 Moore 型对本文所提算法不适用.

本文中所采用的是 Mealy 型有限状态机模型, 将 t 时刻机器人的运动方向定义为模型中的下一个状态, 将 $t - 1$ 时刻历史运动环境状态 k_1 以及 t 时刻之前记录的 f_x 定义为模型中的各种输入信号, 将 t 时刻当前运动环境状态 k 定义为模型中的当前状态. 根据移动机器人上的激光雷达对障碍物的反馈, 判断移动机器人当前位置的前方、左方以及右方是否存在障碍物, 将其分为 8 种状态, 移动机器人的状态转移将在这些状态中进行. 状态转移 (即移动机器人的运动方向) 如图 11 示.

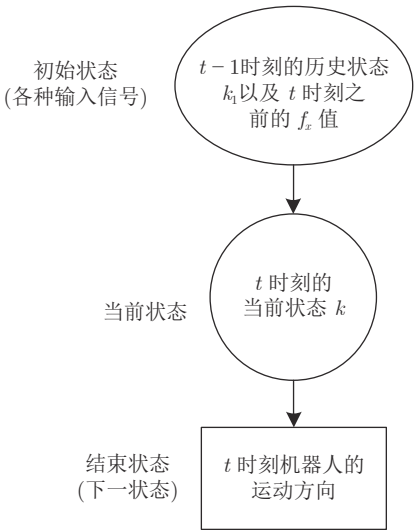


图 11 状态转移图

Fig.11 Robot state transfer table

用状态转移表更直观地表示机器人运动方向, 如表 4 所示. 表中 p_{ij} 表示有限状态机中的下一状态, 即 t 时刻移动机器人的运动方向, 具体的运动方

表 4 机器人状态转移表
Table 4 Robot state transfer table

k	k_1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}	p_{15}	p_{16}	p_{17}	p_{18}
2	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{24}	p_{25}	p_{26}	p_{27}	p_{28}
3	p_{31}	p_{32}	p_{33}	p_{34}	p_{35}	p_{36}	p_{37}	p_{38}
4	p_{41}	p_{42}	p_{43}	p_{44}	p_{45}	p_{46}	p_{47}	p_{48}
5	p_{51}	p_{52}	p_{53}	p_{54}	p_{55}	p_{56}	p_{57}	p_{58}
6	p_{61}	p_{62}	p_{63}	p_{64}	p_{65}	p_{66}	p_{67}	p_{68}
7	p_{71}	p_{72}	p_{73}	p_{74}	p_{75}	p_{76}	p_{77}	p_{78}
8	p_{81}	p_{82}	p_{83}	p_{84}	p_{85}	p_{86}	p_{87}	p_{88}

向与表 1 相对应。

3 仿真实验与结果

由于实体环境搭建较为复杂, 所以所述的室内未知环境下结合历史状态的机器人沿墙高效遍历算法首先进行仿真实验, 证明本算法的可行性. 仿真计算机使用联想 E540 笔记本, CPU 为 i5 4210 MB, 内存为 3.8 GB. 在 Linux 系统下, 采用 Gazebo7.0 和 Rviz 对其进行仿真实验. Gazebo 是一款功能强大的三维物理仿真平台, 具备强大的物理引擎、高质量的图形渲染、方便的编程与图形接口, 最重要的是其开源免费的特性. 在 Rviz 中可以实现对建立地图以及导航路径等的动态观测, 而且还可以建立模拟机器人仿真环境. 仿真试验中采用圆形底盘搭建的差分轮式机器人^[15-16], 其底盘中心上方放置有激光雷达传感器. 通过激光雷达传感器来确定算法中提到的障碍物的位置, 从而使得机器人能够沿墙行走.

进行仿真实验时, 沿墙的距离设置为 0.7 m, 机器人的前方、左方以及右方的障碍物距离设置为 0.7 m, 机器人的线速度为 0.2 m/s, 角速度为 0.3 rad/s. 其中机器人的移动轨迹由内置的里程计来记录. 仿真中搭建的室内环境从简单到复杂, 所模拟的室内环境基本可以囊括日常常见的室内环境, 在 Gazebo 中可以显示出来其模拟的环境情况. 模拟的室内环境如图 12~14 所示, 分别表示拐角较多的室内模拟环境、不规则墙体模拟环境和室内中央有墙体的模拟环境.

利用 Rviz 可以得到机器人在模拟的室内环境中沿墙行走的轨迹. 图中最外围规则的线条是模拟的墙体结构, 而内部平滑曲线是机器人在仿真环境中实际的行走轨迹. 从 Rviz 中的内部平滑曲线显示机器人的实际运动的轨迹. 三种室内环境下机器人的运动轨迹分别如图 15~17 所示.

将机器人在模拟环境下的当前环境运动状态的 k 值采集出来, 并利用 Python 中的绘图库 Matplotlib



图 12 拐角较多的室内模拟环境
Fig.12 Indoor simulation environment with more corners

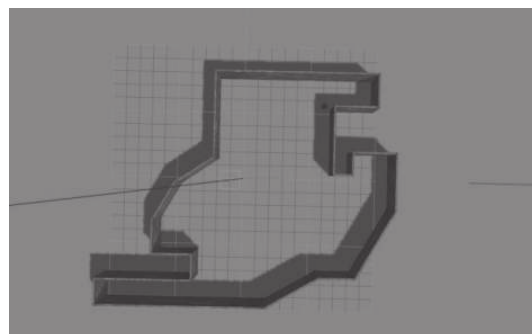


图 13 不规则墙体模拟
Fig.13 Irregular wall simulation

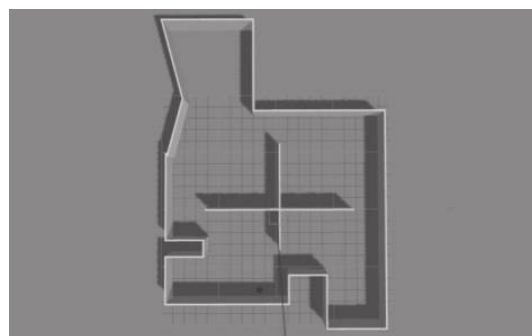


图 14 室内中央有墙体的模拟环境
Fig.14 A simulated environment with a wall in the center of the room

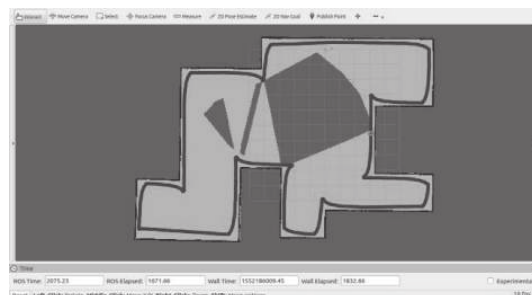


图 15 拐角较多环境下的机器人轨迹
Fig.15 Robot trajectory in a corner environment

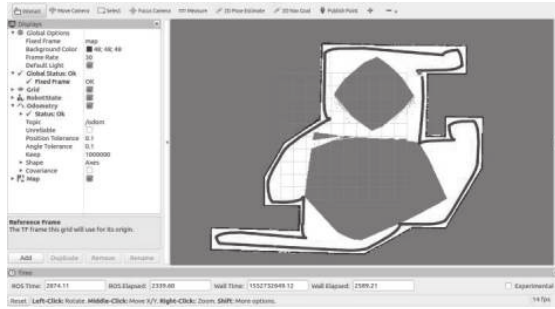


图 16 不规则墙体下的机器人轨迹

Fig.16 Robot trajectory under irregular wall

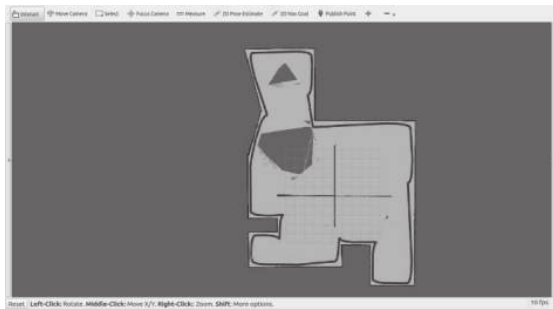
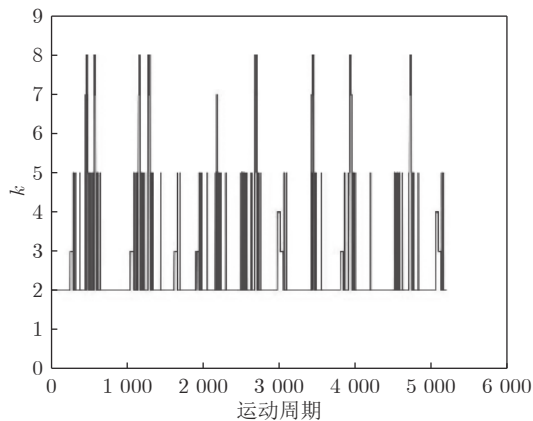
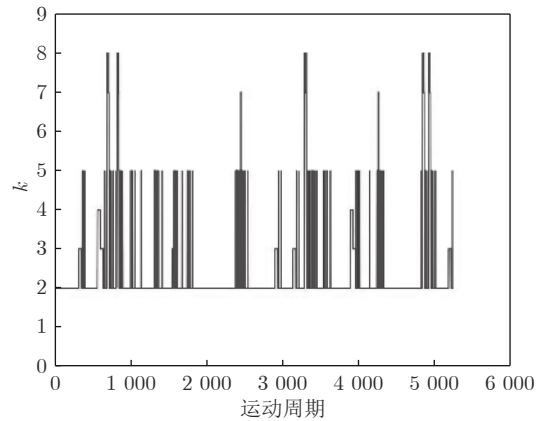
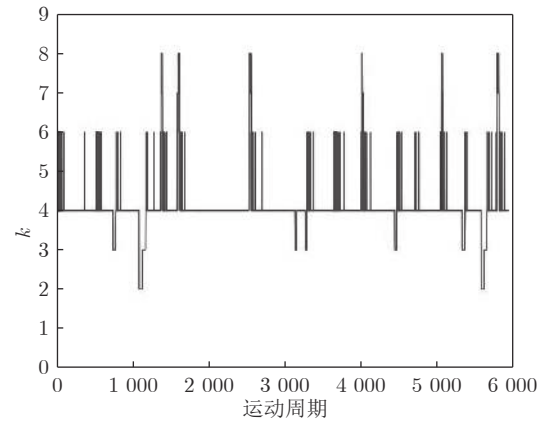


图 17 室内中央有墙体的机器人轨迹

Fig.17 Robot trajectory with wall in the center of the room

绘制出关于 k 值的变化曲线. 采集模拟室内环境下机器人的当前环境运动状态的 k 值, 得到图 18~20.

将机器人运动方向判断的数据集采集出来, 即采集机器人在模拟环境下的历史环境运动状态 k_1 以及机器人当前时刻的运动方向, 与已经采集的当前环境运动状态的 k 结合, 并且利用 Python 中的绘图库 Matplotlib 绘制机器人运动方向判断图. 将机器人的运动方向用自然数表示: 0 表示前进, -1 表示右转, -2 表示左转. 因为采集得到的数据量过

图 18 拐角较多环境下 k 值变化Fig.18 Change in k value in indoor simulated environment with more corners图 19 不规则墙体模拟下 k 值变化Fig.19 Variation of k value under irregular wall simulation图 20 室内中央有墙体的模拟环境下 k 值变化Fig.20 Change in k value in a simulated environment with a wall in the center of the room

于庞大, 所以只截取局部的数据, 得到图 21~23.

仿真中图 12 模拟的是拐角多且有突出墙体的室内环境, 验证机器人是否因为拐角多, 无法准确判断. 从图 15 可以得出: 机器人不会因为拐角过多

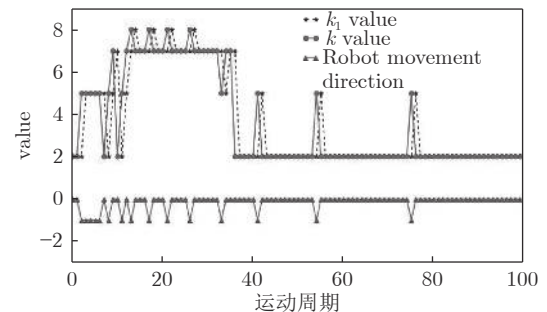


图 21 拐角较多环境下机器人运动方向判断局部图

Fig.21 Partial diagram of the direction of motion of the robot in a corner environment

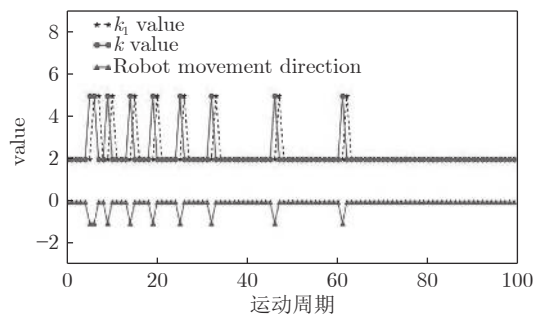


图 22 不规则墙体下机器人运动方向判断局部图

Fig. 22 Figure of the motion direction of the robot under the irregular wall

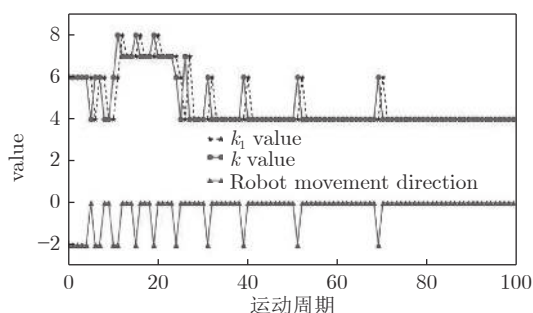


图 23 室内中央有墙体下机器人运动方向判断局部图

Fig. 23 The local figure of the movement direction of the robot under the wall in the center of the room

受到干扰, 并且其能够准确判断, 能够沿墙一周. 因为机器人当前运动环境状态 k 的初始值为 0, 所以图 18 中 k 的起始值为 0. 因为机器人一开始沿着墙走, 并且是顺时针方向, 所以 k 值一直为 2. 直到机器人运动到其他位置时, 模拟环境发生变化, 则当前运动状态 k 值改变. 当运动到类似走廊的位置时, 机器人当前环境运动状态的 k 值在 7 和 8 之间变化. 如果遇到内拐角时, 机器人当前环境运动状态的 k 值为 5. 从拐角较多环境下 k 值变化图中可以看出机器人 $k = 2$ 的次数最多, 根据算法规则可知累积的旋向信息 $f_x > 0$. 从图 18 中可以看出 k 值变化曲线与机器人在模拟环境中的运动轨迹一致. 将机器人运动方向判断所需数据集采集出来, 绘制机器人运动方向判断图. 在图 21 中分别截取 3 个数据集在 451~550 区间的 100 个数据, 得到图 21 所示的 3 条曲线, 即当前环境运动状态 k 、历史环境运动状态 k_1 以及机器人的运动方向的变化曲线. 从图 21 中可以看出: 当 $k = 2$, $k_1 = 2$, 机器人运动方向的值为 0, 即机器人前进. 当 $k = 5$, $k_1 = 2$, 机器人运动方向的值为 -1, 即机器人右转. 当 $k = 5$, $k_1 = 5$, 机器人运动方向的值为 -1, 即机器人右转. 当 $k = 2$, $k_1 = 5$, 机器人运动方向的值为 0, 即机器人前进. 当 $k = 7$, $k_1 = 5$, 机器人运动方向的值为 0,

即机器人前进. 当 $k = 5$, $k_1 = 7$, 机器人运动方向的值为 0, 即机器人前进. 当 $k = 8$, $k_1 = 7$, 此时累计的旋向信息 $f_x > 0$, 机器人运动方向的值为 -1, 即机器人右转. 当 $k = 7$, $k_1 = 8$, 机器人运动方向的值为 0, 即机器人前进. 从图 21 的整个曲线变化来看, 仿真时机器人的运动方向判断符合本文提出的算法, 即用表 1 和表 2 进行判断.

图 13 模拟的墙体结构不规则, 且有很多拐角, 验证机器人是否收到不规则墙体的干扰而无法判断. 从图 16 可以看出, 机器人不会受到不规则墙体的干扰, 并且其能够完成沿墙一周的功能. 图 19 采集的是不规则墙体下机器人当前运动状态 k 值. 开始运动时, 机器人当前运动状态的 k 的初始值同样也为零. 机器人运动时, 模拟环境的墙体结构与图 12 类似, 所以图 18 和图 19 采集的数据的变化趋势基本相同. 但模拟环境中图 18 的类似走廊的结构较多, 所以图中 k 值在 7 和 8 位置变化的次数大于图 19 中的变化次数. 从整个曲线变化来看: 累计的旋向信息 $f_x > 0$, 即机器人顺时针运动, 这与在仿真环境中机器人的运动轨迹相同, 即本模拟环境中机器人的运动方向判断按照表 1 和表 2 进行. 图 22 是分别截取了 k 、 k_1 以及运动方向值在 1 301~1 400 区间数据的运动方向判断图. 从图中可以看出: 当 $k = 2$, $k_1 = 2$, 运动方向值为 0, 即机器人前进; 当 $k = 5$, $k_1 = 2$, 运动方向值为 -1, 即机器人右转; 当 $k = 2$, $k_1 = 5$, 运动方向值为 0, 即机器人前进. 图 19 证明了机器人在模拟环境中的运动方向与本文提出的算法规则相同, 如表 1 所示.

图 14 所模拟的室内中央有墙体, 并且带有不规则的墙体结构, 验证机器人运动方向是否因为中央的障碍物而受到干扰. 从图 17 中可以看出: 在室内环境中心位置如果有墙体结构, 并不影响机器人的沿墙行走. 从图 20 可以看出, $k = 4$ 的次数最多, 即累计的 $f_x < 0$, 则机器人的逆时针运动, 这与机器人在仿真中的运动方向一致. 从图 20 曲线的变化趋势来看: k 的变化趋势与模拟环境中机器人的运动轨迹一致. 图 23 是分别截取了移动机器人 k 、 k_1 以及运动方向值在 4 001~4 100 区间数据的运动方向判断图. 可以看出: 当 $k = 6$, $k_1 = 6$, 运动方向值为 -2, 即机器人左转; 当 $k = 4$, $k_1 = 6$, 运动方向值为 0, 即机器人前进; 当 $k = 6$, $k_1 = 4$, 运动方向值为 -2, 即机器人左转; 当 $k = 8$, $k_1 = 6$, 运动方向值为 -2, 即机器人左转; 当 $k = 7$, $k_1 = 8$, 运动方向值为 0, 即机器人前进; 当 $k = 7$, $k_1 = 7$, 运动方向值为 0, 即机器人前进; 当 $k = 8$, $k_1 = 7$, 累计的旋向信息 $f_x < 0$, 运动方向值为 -2, 即机器人左转; 当 $k = 6$, $k_1 = 7$, 运动方向值为 -2,

即机器人左转; 当 $k = 7$, $k_1 = 4$, 运动方向值为 0, 即机器人前进; 当 $k = 4$, $k_1 = 7$, 运动方向值为 0, 累计的旋向信息 $f_x < 0$, 即机器人前进; 当 $k = 4$, $k_1 = 4$, 运动方向值为 0, 即机器人前进. 从图 23 的整个曲线变化来看, 仿真时机器人在模拟环境中的运动方向判断符合本文提出的算法, 即用表 1 和表 3 进行判断.

机器人在 Rviz 仿真实验时, 其轨迹平滑, 说明本文所提出算法的稳定性较好, 并且精确度高. 从 k 值变化图、室内环境的机器人轨迹图以及机器人运动方向判断局部图来看, k 值变化的趋势和机器人仿真时的运动方向一致. 因此可以得出: 机器人在仿真实验时的运动状态变化与本文提出的算法一致, 从而证明算法的实用性和高效性.

经过多次仿真实验证明了移动机器人采用结合历史运动状态的室内移动机器人沿墙高效遍历算法能够十分出色地完成室内沿墙走的行为. 并且对于本文中提到的其他状态机器人同样也能够很好地实现沿墙走功能.

4 实体实验

经过多次仿真实验证明了本文所采用沿墙算法的可行性和高效性. 再将其用于实际的室内环境进行实体机器人实验测试. 实体实验中采用实验室搭建的差分轮式机器人如图 24 所示. 差分轮式机器人主要由机械部分、传感部分和控制部分构成. 差分轮式机器人使用开源操作系统 (Robot operating system, ROS) 作为软件平台. 机械部分主要由玻璃纤维板及其他紧固件构成. 传感部分包括激光



图 24 差分轮式机器人

Fig.24 Differential wheeled robot

雷达传感器、陀螺仪以及编码器, 传感部分主要是为了收集数据. 控制部分包括主控和驱动控制, 并且通过传感部分传来的数据控制机器人完成各种任务. 主控使用 intel 的 miniPC, 驱动控制利用两个带光电编码器的无刷电机实现机器人的差分控制, 驱动控制板使用 Arduino-Mega2560 开发板. 在实体实验中采用 Rviz 显示实际的墙体环境, 用 Rviz 中的插件 Odometry 来绘制机器人的沿墙轨迹. 进行实体实验时, 沿墙的距离设置为 0.5 m, 机器人的前方、左方以及右方的障碍物距离设置为 0.5 m, 机器人的线速度为 1 m/s, 1 m/s, 角速度为 0.3 rad/s.

在移除所有物品的简单环境下进行实体实验测试时, 对本文所提算法进行验证, 如图 25. 将采用本文算法 (即使用移动机器人的上一个周期历史环境运动状态、当前环境运动状态和旋向信息来判断机器人当前运动状态判断) 与只利用当前环境运动状态 (分 8 类) 来判断运动方向的算法进行对比, 在 Rviz 中查看实际运动轨迹. 由于实体实验中, 机器人从初始位置开始沿墙行走, 机器人首次距离初始位置大于 2 m 后, 又运动到距离初始位置小于 1.5 m 的地方, 认为机器人已经沿墙一周, 停止沿墙走. 所以 Rviz 中绘制的轨迹并没有首尾相连. 如图 26(a) 所示, 采用本文所提算法的轨迹来看, 机器人完全遍历简单环境中的所有墙体结构. 而只利用当前环境运动状态 (分 8 类) 算法所得到的轨迹如图 26(b) 所示. 可以看出, 不仅机器人不能完全遍历, 而且路径重复、杂乱无章. 可见本文所提算法具有简洁性、可行性和高效性.

为了验证本文所提算法在复杂环境下同样适用, 构建如图 27 所示的复杂环境, 该环境不仅含有常见的几种墙体结构, 还含有室内常见的一些物品. 图 28 为复杂环境下机器人沿墙一周所得到的轨迹.



图 25 简单的室内环境

Fig.25 Simple indoor environment

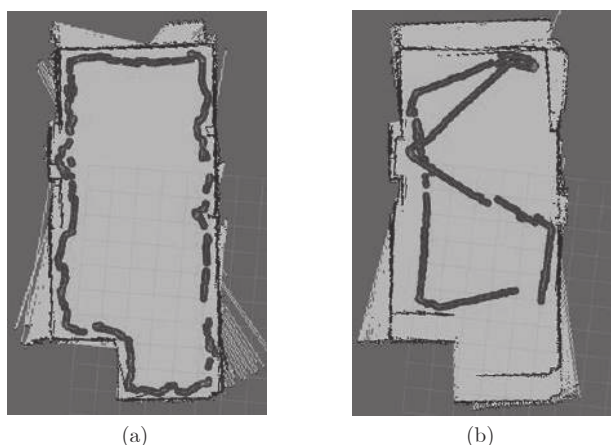


图 26 空环境下采用算法与不采用算法对比图

Fig. 26 Comparison diagram between using algorithm and not using algorithm in empty environment

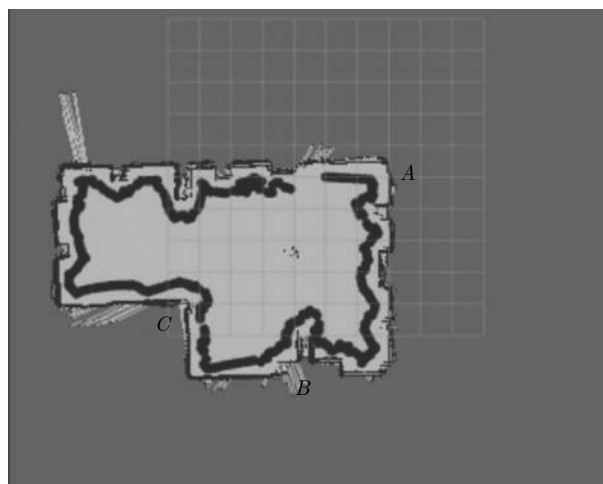


图 28 复杂环境下的机器人轨迹

Fig. 28 Robot trajectory in complex environments



图 27 复杂的室内环境

Fig. 27 Complex indoor environment

对于在实际轨迹标出的 A 、 B 、 C 三个位置, 是常见的几种典型墙体结构, 从实际沿墙轨迹可以看出, 机器人在复杂环境下同样可以完成沿墙行走, 能完

全遍历所有环境.

图 29 分别为实际轨迹中 A 、 B 、 C 三个位置的机器人实际运动图. 图 29(a)~(c) 为机器人所处的历史运动状态 $k_1 = 2$, 当前运动状态 $k = 5$ 的情况, 机器人右转, 也就是图 28 中 A 所处的位置, 其墙体环境为常见内拐角结构. 图 29(d)~(f) 为机器人所处历史状态 $k_1 = 2$, 当前运动状态 $k = 1$ 的情况, 机器人的实际运动为左转, 这是图 28 中 C 所处的位置, 其墙体结构为外拐角, 虽然与 A 所处位置的墙体结构类似, 但是其运动状态并不同. 而图 29(g)~(j) 为图 28 中 B 所处的位置, 虽然与 C 位置的运动状态相同, 都为机器人所处的历史状态 $k_1 = 2$, 当前运动状态 $k = 1$ 的情况, 机器人运动方向为左转, 但实际的墙体结构并不相同. 通过实体试验中可以得出: 机器人实际的运动方向与本文提出算法的判断方向相同, 并且能够准确判断. 从图 28 可以看出机器人的实际运动方向为 $A \rightarrow B \rightarrow C$, 其轨迹平滑, 并且与墙体保持一定的距离, 能够很好地遵循本文

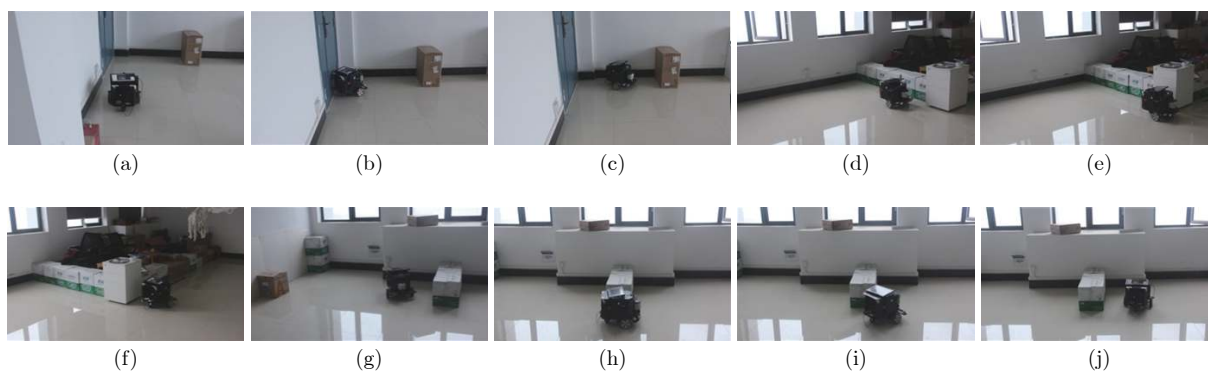


图 29 复杂环境下机器人的运动

Fig. 29 Movement of the robot in complex environments

提出的算法规则进行沿墙行走. 在机器人遇到不同的环境状态时, 都能很好地判断, 不会出现机器人无法判断的情况. 在实体实验中虽然所构建的墙体拐角多且室内环境并不是很规则, 但是从实际运动中可以看出机器人均可以准确判断并能实现沿墙行走. 从而证明本文所述的算法可行性高、判断准确且精度高, 可以完成复杂情况下的沿墙走功能.

5 总结

本文针对目前室内移动机器人沿墙走存在算法过于复杂、路径易重复、不能完全遍历、效率低等问题, 提出了室内未知环境下结合历史状态的机器人沿墙高效遍历算法研究, 根据 t 时刻的当前运动环境状态 k 以及 $t-1$ 时刻的历史运动环境状态 k_1 , 与当前运动环境状态结合, 得到移动机器人的运动方向. 如果根据当前运动环境状态 k 与历史运动环境 k_1 无法判断当前时刻机器人的运动方向, 可通过移动机器人当前时刻 t 之前的旋向信息 f_x 判断, 使得机器人能高效、精确地完成沿墙走的导航. 仿真与实验结果表明: 对于不同的室内环境, 机器人能够很好地完成沿墙行走, 具有很高的实用性和可行性. 本算法与高层智能算法相结合, 可以完成室内定位、导航、建图等复杂任务.

References

- Wang Dong-Yao, Ma Xu-Dong, Dai Xian-Zhong. Wall-following navigation control for a sonar-based mobile robot. *Robot*, 2004, **26**(4): 346–350
(王栋耀, 马旭东, 戴先中. 基于声纳的移动机器人沿墙导航控制. 机器人, 2004, **26**(4): 346–350)
- Zhu Yi, Zhang Tao, Song Jing-Yan. Study on the local minima problem of path planning using potential field method in unknown environments. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(8): 88–96
(朱毅, 张涛, 宋靖雁. 未知环境下势场法路径规划的局部极小问题研究. 自动化学报, 2010, **36**(8): 88–96)
- Nasrinahar A, Chuah J H. Intelligent motion planning of a mobile robot with dynamic obstacle avoidance. *Journal on Vehicle Routing Algorithms*, 2018, **1**: 89–104
- Van Turennot P, Honderd G, Van Schelven L J. Wall-following control of a mobile robot. In: Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics. IEEE, 1992. 280–285
- Y. Ando, S. Yuta. Following a wall by an autonomous mobile robot with a sonar-ring. In: Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1995. 2599–2606
- Lee C L, Lin C J, Lin H Y. Smart robot wall-following control using a sonar behavior-based fuzzy controller in unknown environments. *Smart Science*, 2017, **5**(3): 1–7
- Wu G D, Zhu Z W, Chien C W. Sparse-sensing-based wall-following control design for a mobile-robot. In: Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE). IEEE, 2016. 1–5
- Zhou Hui, Li Jian-Wen, Jiang Hao-Wei, Tong Feng. Mobile robot wall-following navigation based on a single ultrasonic sensor. *Technical Acoustics*, 2014, **33**(2): 243–246
(周慧, 李剑汶, 江昊威, 童峰. 基于单超声传感器的移动机器人沿墙导航. 声学技术, 2014, **33**(2): 243–246)
- Li Xia, Sun Qiu-Feng. Application and exploration of the algorithm of walking along the wall in the fire extinguishing robot. *Research and Exploration in Laboratory*, 2018, **37**(5): 38–41
(李霞, 孙秋凤. 沿墙走算法在竞赛灭火机器人中的应用. 实验室研究与探索, 2018, **37**(5): 38–41)
- Wei X, Dong E B, Liu C S, Han G M, Yang J. A wall-following algorithm based on dynamic virtual walls for mobile robots navigation. In: Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Real-time Computing. IEEE, 2018. 46–51
- Zuo S X, Ou Y S, Zhu X R. A path planning framework for indoor low-cost mobile robots. In: Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Information. IEEE, 2017. 18–23
- Juang C F, Chen Y H, Jhan Y H. Wall-following control of a hexapod robot using a data-driven fuzzy controller learned through differential evolution. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **62**(1): 611–619
- Hsu C H, Juang C F. Evolutionary robot wall-following control using type-2 fuzzy controller with species-DE-activated continuous ACO. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, **21**(1): 100–112
- Xu Ming-Liang, Chai Zhi-Lei, Xu Wen-Bo. Wall-following control of a mobile robot with fuzzy Q-learning. *Electric Machines And Control*, 2010, **14**(6): 83–97
(徐明亮, 柴志雷, 须文波. 移动机器人模糊 Q-学习沿墙导航. 电机与控制学报, 2010, **14**(6): 83–97)
- Wardana A A, Widyotriatmo A, Turnip A. Wall following control of a mobile robot without orientation sensor. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA). IEEE, 2013. 212–215
- Silva Ortigoza R, Garcia Sanchez J R, Hernandez Guzman V M, Marquez Sanchez C, Marcelino Aranda M. Trajectory tracking control for a differential drive wheeled mobile robot considering the dynamics related to the actuators and power stage. *IEEE Latin America Transactions*, 2016, **14**(2): 657–664



蒋林 武汉科技大学博士, 教授. 2016 年 1 月至 2017 年 1 月在英国朴茨茅斯大学访学一年. 主要研究方向为室内移动机器人地图构建、定位、导航及液压机器人研究.

E-mail: jianglin76@wust.edu.cn

(JIANG Lin Ph.D., professor at Wuhan University of Science and Technology. From January 2016 to January 2017, he was a visiting scholar at the University of Portsmouth, UK for one year. His research interest covers indoor mobile robot map construction, positioning, navigation, and hydraulic robot research.)

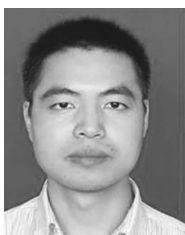


张燕飞 武汉科技大学硕士研究生. 主要研究方向为移动机器人高效沿墙与导航算法研究. 本文通信作者.

E-mail: 15671553653@163.com

(ZHANG Yan-Fei Master student at Wuhan University of Science and Technology. His research interest covers

indoor mobile robot efficient wall-following and navigation algorithm research. Corresponding author of this paper.)



朱建阳 武汉科技大学机械自动化学院副教授. 2014 年于哈尔滨工业大学流体机械及工程专业获得工学博士学位. 主要研究方向为扑翼空气动力学, 流固耦合分析和流体动力学.

E-mail: zhujiy@wust.edu.cn

(ZHU Jian-Yang Associate professor at the School of Machinery and Automation, Wu-

han University of Science and Technology. He received his Ph.D. degree in fluid machinery and engineering from Harbin Institute of Technology University in 2014. His research interest covers flapping wing aerodynamic, fluid-structure interaction, and fluid dynamic.)



雷 斌 武汉科技大学博士, 副教授. 2017 年 5 月至 2018 年 5 月在美国休斯顿大学访学. 主要研究方向为群体机器人, 编队控制, 一致性方法.

E-mail: leibin@wust.edu.cn

(LEI Bin Ph.D., associate professor at Wuhan University of Science and

Technology. From May 2017 to May 2018, he was a visiting scholar at the University of Houston, USA for one year. His research interest covers swarm robots, formation control, and consensus algorithm research.)



王 翰 武汉科技大学硕士研究生. 主要研究方向为移动机器人定位.

E-mail: 15071309504@163.com

(WANG Han Master student at Wuhan University of Science and Technology. His main research interest is indoor mobile robot positioning.)



高旭敏 武汉科技大学硕士研究生. 主要研究方向为移动机器人定位与建图.

E-mail: 15071460998@163.com

(GAO Xu-Min Master student at Wuhan University of Science and Technology. His research interest covers indoor mobile robot positioning and

mapping.)