

基于改进动态窗口法的户外清扫机器人局部路径规划

张瑜¹, 宋荆洲¹, 张琪祁²

(1. 北京邮电大学自动化学院, 北京 100876; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200120)

摘要: 针对清扫机器人在停车场结构化路面下存在的加速度过大、路径偏离全局路径过大等问题, 提出了一种改进的动态窗口法 (DWA)。首先, 为了限制小车加速度的范围, 对 DWA 速度空间的动力学约束进行优化, 避免出现过大的加速度导致轮胎垂直载荷过小的状况。然后, 基于激光里程计对轨迹推算环节进行实时误差补偿, 解决停车场路面下路径偏离全局路径较大的问题。最后将改进的 DWA 应用于四轮独立驱动、独立转向的清扫机器人上进行对比实验。实验结果表明, 在相同的全局路径、相同的路况下, 改进 DWA 的路径平均误差较传统 DWA 减小了约 60%, 轮胎垂直载荷在不同路况下也大大提高, 验证了本文方法的有效性和可靠性。

关键词: 动态窗口法; 局部路径规划; 清扫机器人; 垂直载荷

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2020)-05-0617-09

Local Path Planning of Outdoor Cleaning Robot Based on an Improved DWA

ZHANG Yu¹, SONG Jingzhou¹, ZHANG Qiqi²

(1. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: Aiming at the problems of cleaning robots on the structured road surface in the parking lot, such as excessive acceleration and large path deviation from the global path, an improved dynamic window approach (DWA) is proposed. In order to limit the acceleration range of the vehicle, the dynamic constraints of the DWA speed space are optimized firstly to avoid the situation that the excessive acceleration leads to very small vertical tire load. Then, error compensation for trajectory estimation is performed in real time based on the laser odometer, to solve the problem that the path deviates greatly from the global path on the parking lot road. Finally, the improved DWA is applied to a cleaning robot with four wheels of independent driving and independent steering to conduct comparative experiments. Experimental results show that the average path error of the improved DWA is reduced by about 60% compared with the traditional DWA on the basis of the same global path and road conditions, and the vertical load of tires is also greatly increased under different road conditions, which verify the effectiveness and reliability of the proposed method.

Keywords: dynamic window approach; local path planning; cleaning robot; vertical load

1 引言 (Introduction)

由于人口老龄化的出现, 传统的停车场清扫工作渐渐地由户外清扫小车代替^[1]。在真实环境中, 由于障碍物位置的不确定性以及环境的复杂性, 为了清扫小车能够高效、安全地在户外停车场完成清扫工作, 小车的局部路径规划功能至为关键。局部路径规划是移动机器人实现自主导航的关键技术之一, 分为全局路径规划算法与局部路径规划算法^[2]。常用的局部路径规划方法有基于节点的 A* 算法^[3] 和 D* 算法^[4]、基于模型的人工势场法^[5]、动态窗口法 (dynamic window approach, DWA)^[6] 等。

DWA 在局部路径规划中应用比较广泛, 在现有的 ROS (robot operating system) 上得到了广泛应用。文 [7] 提出了一种改进的 DWA, 利用立体视觉进行避障, 通过定义一个严格的搜索空间得到机器人的最优速度。然而, 局部极小问题仍然可能发生, 立体视觉增加了时间和空间的复杂性。文 [8] 提出了一种改进的 DWA, 该方法考虑了移动机器人的尺寸与障碍物之间的自由空间关系, 但容易陷入局部最优。文 [9] 提出了一种改进的 DWA, 使其目标函数具有收敛性, 但没有充分考虑环境的影响。现有的 DWA 依然存在以下问题: 环境约束主要局限于障碍物, 没有考虑地面路况的影响, 动力学约束考

虑得不够充分(仅仅考虑了机器人驱动力限制的加速度),没有考虑小车自身的垂直载荷和路况颠簸给加速度带来的限制,轨迹推算太过理想,没有考虑到小车实际行走时带来的误差。

针对以上问题,本文首先基于路况颠簸和小车垂直载荷模型对DWA的速度空间环节中的动力学约束进行优化,从而避免出现过大的加速度。其次在轨迹推算环节进行实时误差在线补偿,保证小车行驶路径准确。最后将改进后的DWA应用于实验室自主研制的清扫小车上验证算法的有效性。

2 问题的描述(The problem description)

2.1 问题引入

户外停车场的路面类型较多,大致可以分为2类:以沥青、水泥、实心砖等为代表的平坦路面^[10]及以圆孔、方孔空心砖等为代表的坎坷路面。本文选取常见的沥青、空心砖路面作为2种路面的代表,如图1所示。受清扫区域的限制,户外清扫机器人一般体积较小,实验室自主研制的户外清扫机器人外形为圆柱形,直径700 mm,轮胎直径为100 mm,在空心砖或者沥青路面高速行驶时,由于路况较差、小车悬架性能有限,很容易产生颠簸;由于清扫目标点多且距离较近,机器人会频繁进行加减速;由于加速度过大、路面颠簸和小车自身轮间距较窄、重心较高等因素,轮胎垂直载荷常常过小。因此,除了优化小车结构以外,还要对控制进行优化。此外在路面打滑的情况下,机器人容易偏离全局路径,偏移量超出允许的误差范围,导致机器人碰撞到周围车辆。



(a) 空心砖路面 (b) 沥青路面

图1 停车场路面图

Fig.1 Parking lot pavement

因此为了保证户外清扫机器人能够安全高效地完成路径行走、执行清扫任务,主要需要解决2个问题:①根据实际情况限制加速度的范围,保证轮胎垂直载荷在合理范围内;②减小路径跟踪误差,提高清扫效率。

2.2 小车垂直载荷建模

为了解决2.1节提到的问题①,需要对小车进行垂直载荷建模。实验平台基于四轮独立驱动、独

立转向的移动底盘,由于停车场路面为人造路面,坡度较小,假设小范围内路面坡度为0,即小车 z 轴方向和重力方向重合^[15],底盘受力分析见图2。

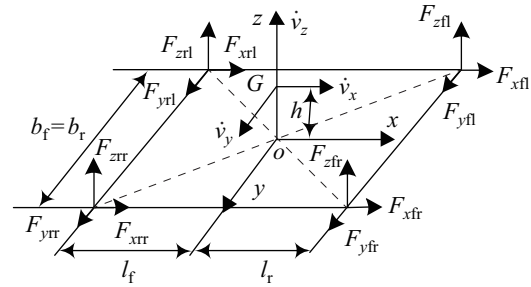


图2 底盘受力示意图

Fig.2 Schematic diagram of chassis force

图2中 $o-xyz$ 为底盘坐标系, b_f 、 b_r 分别为前后轮各自的轮间距, l_f 、 l_r 分别为前轮和后轮距离重心的横向距离, F_{zi} 为轮胎受到地面竖直方向的力,其中 F_{xi} 、 F_{yi} 代表轮胎在 x 和 y 方向受到的力, $i = fl, fr, rl, rr$,分别指代左前轮、右前轮、左后轮、右后轮。 \dot{v}_x 、 \dot{v}_y 、 \dot{v}_z 为小车重心在 x 、 y 、 z 方向的加速度,可以通过IMU(inertial measurement unit)测量得到, G 点为小车的重心, h 为重心距离地面的高度,整车质量为 m 。

下面对垂直载荷建模进行简要推导:

考虑到小车加速度 \dot{v}_x 、 \dot{v}_y 相互独立,可以分别计算加速度 \dot{v}_x 、 \dot{v}_y 单独存在时 F_{zi} 的值,之后进行相加。

(1) 当 \dot{v}_x 单独存在时:

通过小车 z 轴方向的力平衡条件可得:

$$F_{zfl} + F_{zfr} + F_{zrr} + F_{zrl} = m(g - \dot{v}_z) \quad (1)$$

由各力对底盘 x 轴的力矩的和为0可得:

$$\frac{b_r F_{zfl}}{2} - \frac{b_l F_{zfr}}{2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{b_r F_{zrl}}{2} - \frac{b_l F_{zrr}}{2} = 0 \quad (3)$$

由各力对 o 点的力矩可得:

$$(F_{zrl} + F_{zrr})l_f - (F_{zfl} + F_{zfr})l_r = m\dot{v}_x h \quad (4)$$

联立式(1)~式(4)可解得:

$$F_{zfl} = \frac{m}{l_f + l_r} \left[\frac{1}{2}(g - \dot{v}_z)l_r - \frac{1}{2}\dot{v}_x h \right] \quad (5)$$

(2) 当 \dot{v}_y 单独存在时,同理可得:

$$F_{zfl} = \frac{m}{l_f + l_r} \left[\frac{1}{2}(g - \dot{v}_z)l_r - \frac{l_r}{b_f} \dot{v}_y h \right] \quad (6)$$

将式(5)(6)相加并去掉重复的重力作用可得:

$$F_{zfl} = \frac{m}{l_f + l_r} \left[\frac{1}{2}(g - \dot{v}_z)l_r - \frac{1}{2}\dot{v}_x h - \frac{l_r}{b_f} \dot{v}_y h \right] \quad (7)$$

同理可得 F_{zfr} 、 F_{zrr} 、 F_{zrl} 的表达式, 将 F_{zfl} 、 F_{zfr} 、 F_{zrr} 、 F_{zrl} 表达式整理后如下:

$$\begin{aligned} F_{zfl} &= \frac{m}{l_f + l_r} \left[\frac{1}{2}(g - \dot{v}_z)l_r - \frac{1}{2}\dot{v}_x h - \frac{l_r}{b_f}\dot{v}_y h \right] \\ F_{zfr} &= \frac{m}{l_f + l_r} \left[\frac{1}{2}(g - \dot{v}_z)l_r - \frac{1}{2}\dot{v}_x h + \frac{l_r}{b_f}\dot{v}_y h \right] \\ F_{zrl} &= \frac{m}{l_f + l_r} \left[\frac{1}{2}(g - \dot{v}_z)l_f + \frac{1}{2}\dot{v}_x h - \frac{l_f}{b_r}\dot{v}_y h \right] \\ F_{zrr} &= \frac{m}{l_f + l_r} \left[\frac{1}{2}(g - \dot{v}_z)l_f + \frac{1}{2}\dot{v}_x h + \frac{l_f}{b_r}\dot{v}_y h \right] \end{aligned} \quad (8)$$

由式 (8) 可知, 通过代入小车实时的 IMU 数据 \dot{v}_x 、 \dot{v}_y 、 \dot{v}_z 可以得到实时垂直载荷数据. 同理当已知垂直载荷的范围时也可得出小车加速度的范围.

3 改进 DWA (The improved DWA)

3.1 动态窗口法

动态窗口法是目前局部路径规划中比较主流的方法, 能对全局路径进行跟踪并实现实时避障^[11]. 主要流程如下:

1) 对机器人自身的速度空间进行约束, 主要由 3 部分组成:

① 运动学约束 V_k , 即在仅考虑电机性能的情况下, 由小车的线速度 v 和角速度 ω 的上下限构成的速度空间^[12]:

$$V_k = \left\{ (v, \omega) \mid v \in [v_{\min}, v_{\max}], \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}] \right\} \quad (9)$$

② 动力学约束 V_d , 即小车在 dt 时间内, 在驱动力限制的加速度极限下可达的速度空间:

$$V_d = \left\{ (v, \omega) \mid v \in [v_c - \dot{v}_a dt, v_c + \dot{v}_a dt], \omega \in [\omega_c - \dot{\omega}_a dt, \omega_c + \dot{\omega}_a dt] \right\} \quad (10)$$

其中 v_c 为小车当前线速度, ω_c 为当前角速度, \dot{v}_a 、 $\dot{\omega}_a$ 分别对应线加速度的上下限, $\dot{\omega}_a$ 、 $\dot{\omega}_d$ 分别对应角加速度的上下限^[13]. 但目前的加速度仅考虑了机器人自身设定的加速度, 并没有考虑当前路况下最大的加速度限制.

③ 障碍物约束 V_o , 即小车在轨迹末端能够与障碍物不发生碰撞的速度空间:

$$V_o = \left\{ (v, \omega) \mid v \leq \sqrt{2d(v, \omega)\dot{v}_d}, \omega \leq \sqrt{2d(v, \omega)\dot{\omega}_d} \right\} \quad (11)$$

其中, $d(v, \omega)$ 表示下一时刻机器人距离障碍物的距离.

2) 轨迹推算环节, 通过对约束后的速度空间进行采样, 对采样后的速度根据运动学公式进行轨迹

推算^[14]:

$$\begin{bmatrix} x_{t+dt} \\ y_{t+dt} \\ \theta_{t+dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ d\theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中 $[x_{t+dt} \ y_{t+dt} \ \theta_{t+dt}]^T$ 为 $t + dt$ 时刻小车在世界坐标系下位姿, $[x_t \ y_t \ \theta_t]^T$ 为 t 时刻小车在世界坐标系下位姿, $[dx \ dy \ d\theta]^T$ 为 dt 时间内小车在底盘坐标系下的理想变化量, $[dx \ dy \ d\theta]^T = [v_x dt \ v_y dt \ \omega dt]^T$, v_x 、 v_y 为小车在底盘坐标系下沿 x 轴、 y 轴的线速度, ω 为小车的角速度. 式 (12) 进行轨迹推算时假设条件过于理想, 没有考虑路面打滑等因素带来的误差.

3) 对多组采样速度进行轨迹推算之后利用评价函数进行打分, 选出最优的一组, 评价函数为

$$G(v, \omega) = \alpha c_{\text{obs}} + \beta d_g + \gamma d_p \quad (13)$$

其中 c_{obs} 表示机器人沿当前评估轨迹行驶后所经过的地图栅格的代价总和, d_g 、 d_p 分别表示当前评估轨迹的末端点到局部目标点和全局路径的曼哈顿距离, α 、 β 、 γ 是 3 个权值参数. 最终选择使 $G(v, \omega)$ 值最小的轨迹作为最优轨迹.

3.2 动力学约束优化

为保证小车行驶过程中垂直载荷在合理的范围内, 限制动力学约束中的加速度, 即保证式 (8) 中 $F_{zi} > jmg$ ($i = fl, fr, rl, rr, j \in (0, \frac{1}{4})$), \dot{v}_z 是通过 IMU 测得并滤波之后的值, \dot{v}_z 反映了路况的颠簸程度, \dot{v}_x 、 \dot{v}_y 的范围如图 3 所示.

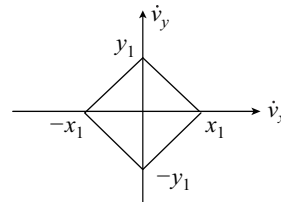


图 3 加速度范围

Fig.3 The range of accelerations

取 $2l_f = 2l_r = b_r$, 代入式 (8) 得:

$$x_1 = y_1 = \frac{(g - 4jg - \dot{v}_z)l_r}{h} \quad (14)$$

式中可以看出, \dot{v}_z 越大, \dot{v}_x 、 \dot{v}_y 的范围越小, 对速度空间动力学的约束越强, 从而避免过大的加速度导致轮胎垂直载荷过小, 进一步优化动力学约束.

3.3 轨迹推算误差补偿

采样后的速度需要根据运动学公式进行轨迹推算, 但是目前 DWA 采用的运动学公式较为理想, 没有考虑到路况因素对行驶造成的误差影响, 图 4 为机器人轨迹推算模型.

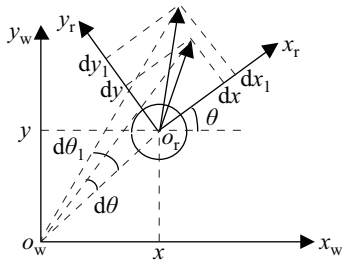


图4 轨迹推算示意图

Fig.4 Schematic diagram of trajectory estimation

图4中 $o_r-x_r y_r$ 为底盘坐标系, $o_w-x_w y_w$ 为世界坐标系, $[x_t \ y_t \ \theta_t]^T$ 为 t 时刻的底盘位姿, $I_t = [dx \ dy \ d\theta]^T$ 和 $I_a = [dx_1 \ dy_1 \ d\theta_1]^T$ 分别为 dt 时间内小车在底盘坐标系下的理想变化量和实际变化量. 令 $[x_{t+dt} \ y_{t+dt} \ \theta_{t+dt}]^T$ 为 $t+dt$ 时刻小车在世界坐标系下的位姿, 理想的轨迹推算公式如下:

$$\begin{bmatrix} x_{t+dt} \\ y_{t+dt} \\ \theta_{t+dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ d\theta \end{bmatrix} \quad (15)$$

实际的轨迹推算公式如下:

$$\begin{bmatrix} x_{t+dt} \\ y_{t+dt} \\ \theta_{t+dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx + e_x \\ dy + e_y \\ d\theta + e_\theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中 $e = [e_x \ e_y \ e_\theta]^T$ 为误差项, $e = I_a - I_t$.

本文对该环节进行改进, 当采样时间 dt 较小时, 移动机器人偏离设定路径的程度较小. 设采样时间 dt 内激光里程计得到的位姿变化量 $u_i^* = [u_{ix}^* \ u_{iy}^* \ u_{i\theta}^*]^T$ 为真值, 轮式里程计得到的位姿变化量为 $u_i = [u_{ix} \ u_{iy} \ u_{i\theta}]^T$, 假设二者成线性关系, 证明见附录.

$$\begin{bmatrix} u_{ix}^* \\ u_{iy}^* \\ u_{i\theta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \\ u_{i\theta} \end{bmatrix} \quad (17)$$

通过最小二乘法对系数进行求解, 从而实现误差的实时补偿, 提高轨迹推算的准确性. 误差补偿之后的轨迹推演公式为

$$\begin{bmatrix} x_{t+dt} \\ y_{t+dt} \\ \theta_{t+dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ d\theta \end{bmatrix} \quad (18)$$

3.4 算法流程

本文提出的基于动态窗口法的户外清扫机器人局部路径规划算法框架如图5所示, 步骤如下:

1) 利用 A* 算法对清扫区域内的目标点进行全局路径规划, 将得到的全局路径发送给 DWA 局部规划器模块接口.

2) 采集 IMU 数据, 结合小车垂直载荷模型对 DWA 速度空间的动力学约束进行优化, 进一步约束速度空间, 避免轮胎垂直载荷过小.

3) 对优化后的速度空间进行速度采样, 采集激光里程计和轮式里程计数据, 对 DWA 轨迹推算环节进行实时误差补偿, 获得推算后的轨迹.

4) 对速度采样之后推算的轨迹进行打分, 选出最优轨迹和速度, 控制机器人行走.

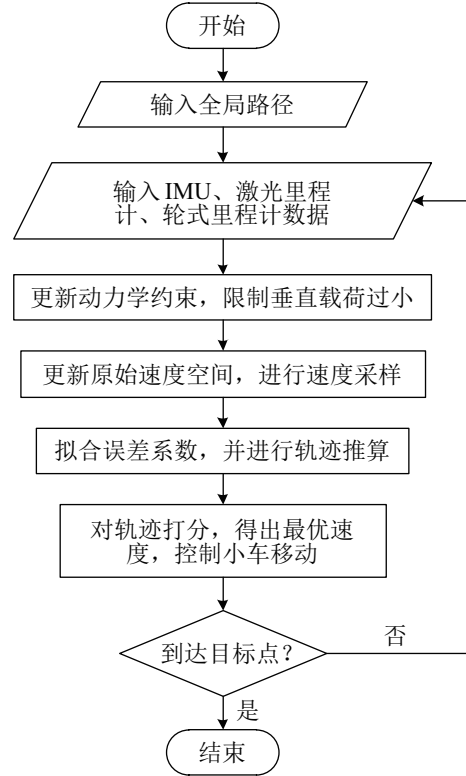


图5 算法流程图

Fig.5 The flowchart of algorithm

4 实验验证 (The experimental verification)

4.1 实验平台介绍

本文实验平台如图6所示, 平台采用实验室自主研发的四轮独立驱动、独立转向的清扫机器人, 配有4个60W的直流伺服电机、4个4寸200W的轮毂电机, 以及STM32嵌入式控制器和工业小电脑i7处理器, 运行版本为Kinetic的ROS, 传感器配有3D激光雷达、IMU、GPS(全球定位系统)、轮式编码器. 小车通过传感器采集环境信息进行建图定位, 再在清扫区域内规划出目标点, 把目标点发送给全局规划器A*, A*规划出2点之间的全局

表 1 车辆参数

Tab.1 The parameters of the vehicle

质量 m/kg	重心与前/后轴 的距离 $l_f/l_r/\text{cm}$	前/后轮轮 间距 $b_f/b_r/\text{cm}$	重心 高度 h/cm	最大线速 度 $v/\text{(m/s)}$	最大角速 度 $\omega/\text{(rad/s)}$	x 轴最大线 加速度 $\dot{v}_x/\text{(m/s}^2\text{)}$	y 轴最大线 加速度 $\dot{v}_y/\text{(m/s}^2\text{)}$
20	25/25	50/50	20	2	1	2	2

表 2 DWA 参数

Tab.2 The parameters of DWA

机器人膨胀 半径 r/m	控制 频率 f/Hz	线速度 分辨率 $v/\text{(m/s)}$	角速度 分辨率 $\omega/\text{(rad/s)}$	轨迹预测 时间 t/s	全局权重 β	局部权重 γ	障碍物权重 α
0.35	10	0.02	0.01	2	0.6	0.3	0.1

路径, 再发送给 DWA 路径规划器进行跟踪避障, 小车底层控制器 STM32 接受 DWA 发出的速度命令来控制小车移动. 小车详细参数见表 1, DWA 部分参数见表 2.

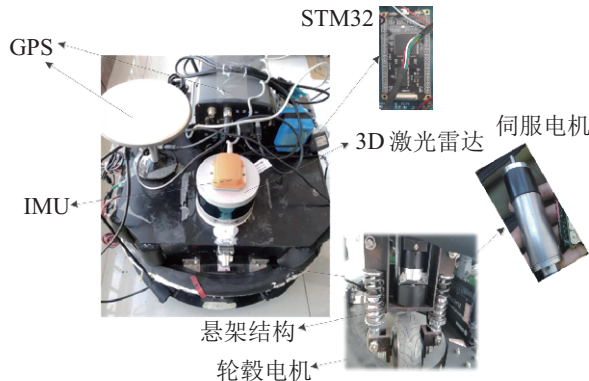


图 6 户外清扫机器人

Fig.6 Outdoor cleaning robot

4.2 轨迹推算误差补偿

为了验证改进 DWA 在停车场不同路况下实际路径更加贴近全局路径, 使得路径误差更小, 分别无障碍物和有障碍物 2 种情况下进行实验. 表 2 中机器人膨胀半径在无障碍物时设为清扫小车半径 0.35 m, 有障碍物时机器人膨胀半径设为清扫小车半径 0.35 m 加上安全距离 10 cm, 权重 α 、 β 、 γ 的值通过 Gazebo 仿真软件仿真测试之后选取.

1) 无障碍物

本次实验在户外停车场的沥青和空心砖路面上分别进行测试, 考虑到清扫小车行驶过程中多为折线行驶, 所以设定的理想路径如图 7 所示.

实验场景如图 8 所示, 在沥青路面和空心砖路面上的路径如图 9 所示. 其中在沥青路面以最大速度 0.4 m/s 行驶, 在空心砖路面以最大速度 0.3 m/s 行驶. 改进 DWA 表现出较好的路径跟踪能力, 其中小车在空心砖路面偏离全局路径的程度比沥青路面更为严重, 在 $x = 5\text{ m}$ 和 9 m 附近最大偏差在

20 cm 左右, 这是因为空心砖路面较为坎坷.

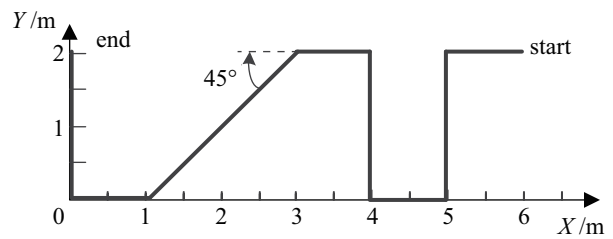


图 7 无障碍物情况下的理想路径

Fig.7 The ideal path without obstacles

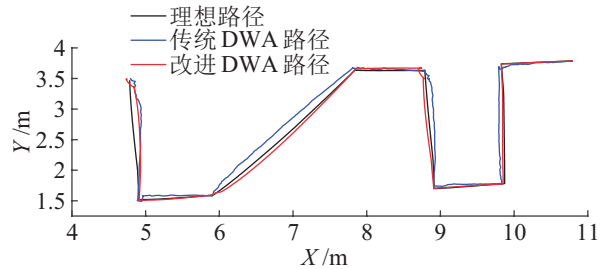


(a) 空心砖路面

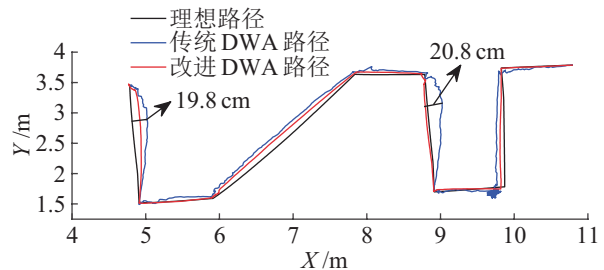
(b) 沥青路面

图 8 实验场景

Fig.8 Experimental scene



(a) 沥青路面



(b) 空心砖路面

图 9 无障碍物情况下的实验结果

Fig.9 Experimental results without obstacles

图 10 为 2 种路况下小车的实时路径误差图。可以发现改进 DWA 的全程跟踪误差更小, 在沥青路面上改进后总耗时减少了 19%。空心砖路面上最大设定速度是沥青路面上的 0.75 倍, 理论上总耗时应该是沥青路面上的 1.33 倍, 但由于路面较为坎坷, 在目标点的调整较为耗时, 传统 DWA 在空心砖路面上的实际耗时是沥青路面上的 2.3 倍; 改进 DWA 虽然减少了调整次数, 但是由于加速度受到约束, 在空心砖路面上整体速度不高, 整体耗时也略高, 为改进 DWA 在沥青路面上的 2.2 倍, 相比传统 DWA 在空心砖路面上的总耗时减少 20%。

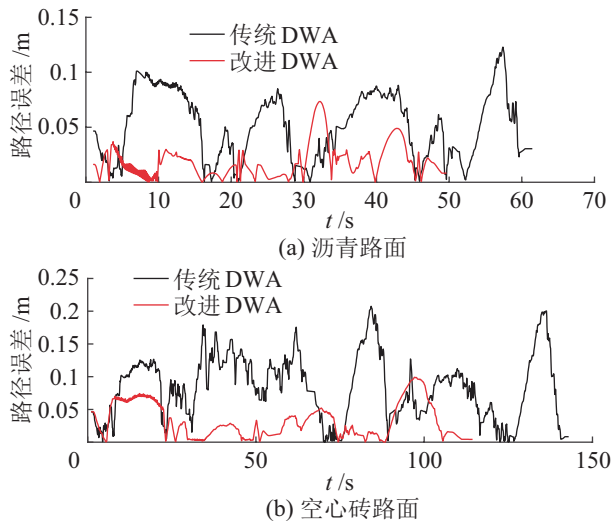


图 10 路径误差
Fig.10 Path errors

由表 3 可知, 改进 DWA 在沥青路面和空心砖路面上的平均跟踪误差均在 5 cm 以内, 满足实际应用的要求, 同时改进 DWA 的路径跟踪误差的方差也大幅度减小, 说明实际路径更加平稳, 避免了路径偏离过大、小车频繁调整, 提高了清扫效率, 具体参数见表 3。

表 3 位置误差
Tab.3 Position errors

路面	算法	最大跟踪误差 /m	平均跟踪误差 /m	平均跟踪误差降低率 /%	方差
沥青	传统 DWA	0.123	0.051	64.7	0.030
	改进 DWA	0.073	0.018		0.015
空心砖	传统 DWA	0.208	0.084	60	0.049
	改进 DWA	0.099	0.032		0.026

2) 有障碍物

清扫小车在停车场路面行驶时可能会遇到障碍物, 这个时候需要清扫小车安全地避开障碍物再回到全局路径下。本次实验设定的路径如图 11 所示, 考虑到现实中障碍物尺寸一般不大, 此处用直径 30 cm 的垃圾桶代替。沥青路面上设定最大速度为 0.4 m/s, 空心砖路面上设定最大速度为 0.3 m/s。

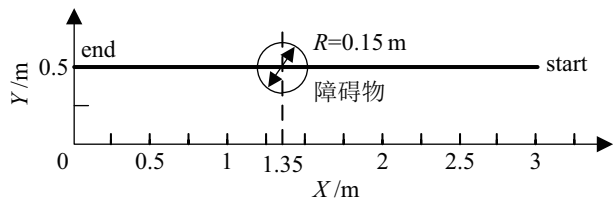


图 11 有障碍物情况下的理想路径
Fig.11 The ideal path with obstacles

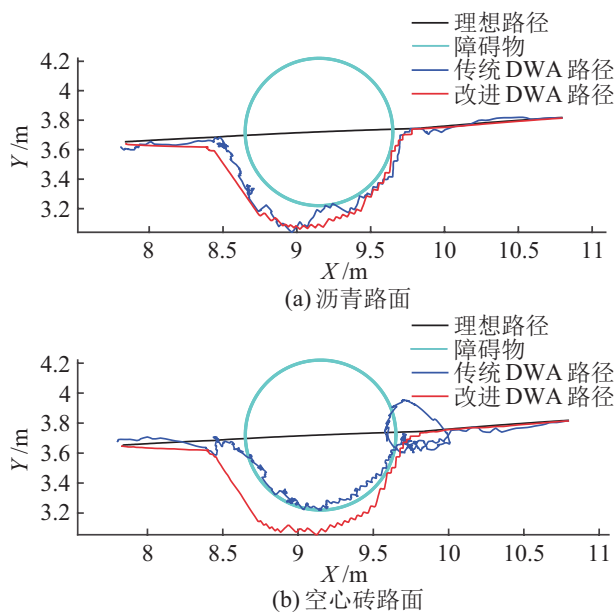


图 12 有障碍物情况下的实验结果
Fig.12 Experimental results with obstacles

图 12 为 4 种情况下的路径图, 由于小车的半径是 0.35 m, 障碍物的半径是 0.15 m, 因此图 12 中圆的半径为 0.5 m, 路径为小车中心的路径。可以看出, 在沥青路面, 传统 DWA 的路径更加靠近障碍物, 容易碰到障碍物, 安全性较差; 改进 DWA 的路径则与障碍物保持在设定安全距离 10 cm 左右。在空心砖路面, 由于颠簸, 传统 DWA 的路径多次碰触到障碍物, 路径调整频繁, 安全性很差; 改进 DWA 的路径则保持较好的安全距离。

图 13 为小车在障碍物附近时距离障碍物边界的距离, 可以发现改进 DWA 在避障时由于对轨迹推算环节进行了误差补偿, 小车与障碍物间的距离几乎都在安全距离以上, 小车可以更好地完成避障任务。从表 4 可知, 改进 DWA 在避障时距离障碍

物的平均距离保持在 10 cm 左右, 满足安全距离的设定要求.

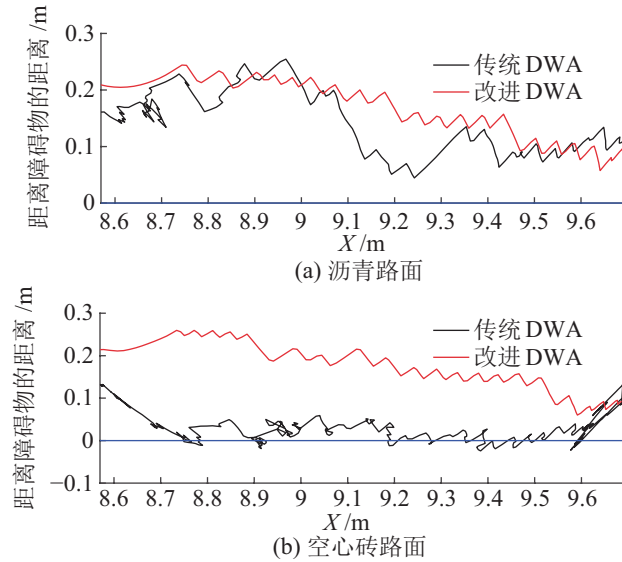


图 13 底盘与障碍物之间的距离随位置变化图

Fig.13 Distances between the chassis and obstacles vary with its position

表 4 底盘与障碍物之间的距离参数

Tab.4 The parameters of distances between the chassis and obstacles

路面	算法	平均距离 /m	最小距离 /m	最大距离 /m
沥青	传统 DWA	0.09	-0.005	0.2
	改进 DWA	0.09	0.01	0.19
空心砖	传统 DWA	-0.02	-0.074	0.085
	改进 DWA	0.10	0.01	0.20

4.3 动力学约束优化

考虑到行驶过程中 4 个轮胎的载荷情况基本一致, 这里仅选取左前轮的垂直载荷作为代表. 图 14 和图 15 显示了左前轮在图 7 路径下 4 种情况的实时垂直载荷. 此处认定轮胎垂直载荷不小于静止状态下的 0.8 倍为合理的范围. 图 14 和图 15 中的数据是根据式 (8) 计算得出的, 不是实际测量得出的, 将行驶过程中采集到的 IMU 数据代入到式 (8) 中, 即可得到垂直载荷数据. 由图 14 可以发现, 沥青路面上由于颠簸很小, DWA 改进前后的压力几乎均在 40 N 以上; 由图 15 可得, 空心砖路面由于剧烈的颠簸, 小车打滑较为严重, 实际测得的 \dot{v}_z 、 \dot{v}_x 、 \dot{v}_y 存在突变值, 改进前轮胎处的垂直载荷变化剧烈, 改进后由于加速度受到约束, 幅度变小, 进而验证了路况约束的有效性.

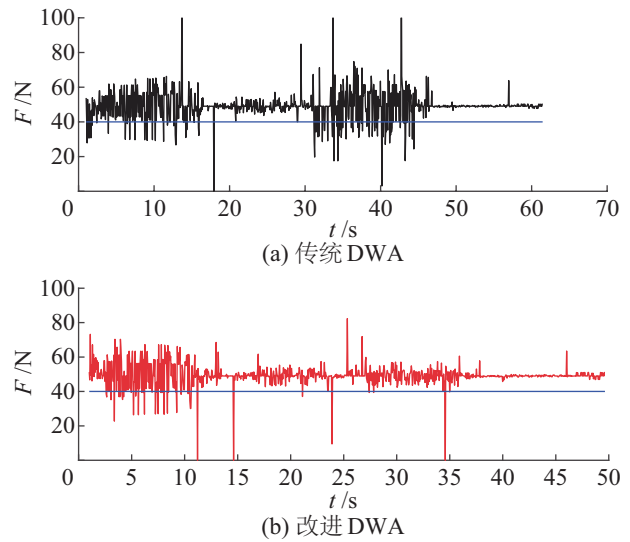


图 14 沥青路面: 左前轮垂直载荷

Fig.14 Asphalt: vertical loads on the left front wheel

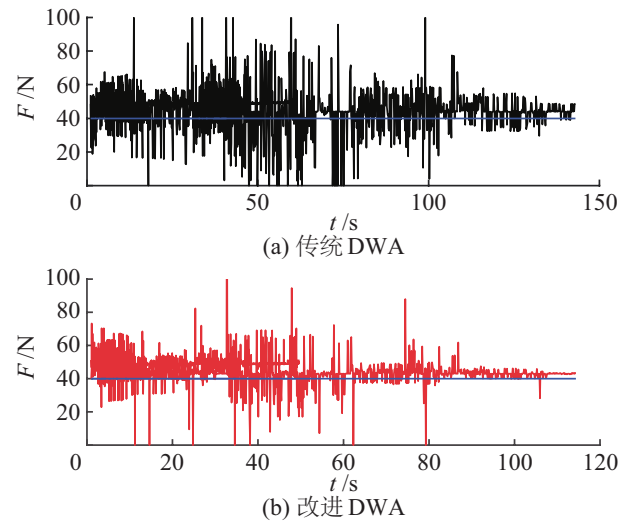


图 15 空心砖路面: 左前轮垂直载荷

Fig.15 Hollow bricks: vertical loads on the left front wheel

表 5 载荷时间占比均值

Tab.5 The average value of load time ratio

路面	算法	设定最大速度 / (m/s)	均载荷时间占比 /%
沥青	传统 DWA	0.4	90
	改进 DWA	0.4	95.6
空心砖	传统 DWA	0.3	68.3
	改进 DWA	0.3	84.7

表 5 中的载荷时间占比均值表示 4 个轮胎行驶过程中轮胎垂直载荷大于 40 N 的时间占比的平均值, 可以看出沥青路面由于颠簸很小, 改进前后区别不大, 载荷时间占比均值均在 90% 以上; 空心

砖路面上由于颠簸比较严重, 加入路况约束后从 68.3% 提升到了 84.7%, 值得注意的是, 这里空心砖路面设定的最大速度低于沥青路面, 原因在于速度过大, 由于颠簸打滑, 小车在空心砖路面上难以完成全部路径跟随.

5 结论 (Conclusion)

路径规划在清扫机器人运动控制中有着重要的作用. 针对清扫机器人在停车场结构化路面下存在的加速度过大、路径偏离全局路径过大等问题, 提出了一种改进的动态窗口法. 首先, 建立垂直载荷模型, 优化原始的速度空间中的动力学约束, 保证轮胎垂直载荷在停车场路况下保持在合理的范围内. 然后, 对原始的轨迹推算环节利用激光里程计进行标定, 加入实时误差补偿, 减小路径跟踪误差. 最后应用于四轮独立驱动独立转向的清扫机器人上, 实验结果表明, 改进 DWA 可以满足实际要求, 优化效果明显. 由于停车场存在部分破坏路面, 给人造路面的结构化带来了破坏, 因此需要对行驶的路况利用视觉或者超声波进行提前观察, 适应更复杂的路面, 这是接下来的研究方向.

附录 (Appendix)

以下对式 (17) 的线性化假设进行简要证明, 本文的实验平台示意图如图 16 所示, 其中 xy 为平台坐标系的坐标轴, o 为形心, C 代表平台瞬时转动中心, v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 为各个车轮的速度, r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 、 r 为各个车轮和平台中心 o 绕 C 点的瞬时转动半径, δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 为各个车轮速度方向与坐标系 x 轴的夹角, 由转向电机编码器测得. v_x 、 v_y 、 ω 为平台的线速度和角速度, l_1 、 l_2 为车轮在纵向和横向的轮间距, 考虑到本实验平台为圆形, 取 $l = l_1 = l_2$.

接下来对图 16 中小车形态的正向运动学进行简要推导, 由几何关系可得:

$$\cos \delta_1 = \frac{\frac{l}{2} - r \cos \beta}{r_1} \quad (19)$$

把 $r_1 = \frac{v_1}{\omega}$, $v_x = r\omega \cos \beta$ 代入式 (19) 并整理得:

$$v_1 \cos \delta_1 = \frac{1}{2} \omega l - v_x \quad (20)$$

同理可得:

$$v_2 \cos \delta_2 = \frac{1}{2} \omega l - v_x \quad (21)$$

$$-v_3 \cos \delta_3 = \frac{1}{2} \omega l + v_x \quad (22)$$

$$-v_4 \cos \delta_4 = \frac{1}{2} \omega l + v_x \quad (23)$$

联立式 (20)~式 (23) 可得:

$$v_x = -\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 v_i \cos \delta_i \quad (24)$$

同理可得:

$$v_y = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 v_i \sin \delta_i \quad (25)$$

$$\omega = \frac{1}{l} [\sin \delta_3 \quad \sin \delta_1] \begin{bmatrix} v_3 \\ -v_1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

式 (24)~(26) 即为平台的正向运动学.

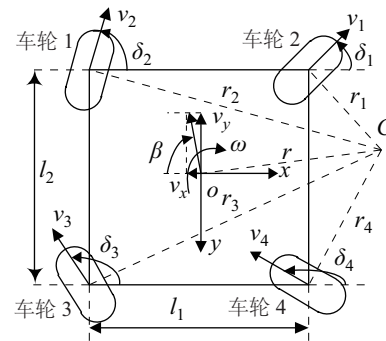


图 16 平台示意图

Fig.16 The schematic of platform

轮式里程计的误差主要来源有 3 种: ①系统误差, 由于运动学方程中参数的不确定所产生的建模误差, 并不断增大; ②非系统误差, 如车轮打滑或地面不平造成的误差; ③数值漂移, 即离散时间积分造成的误差. 然而适当缩短采样周期或改变积分规则可以提高离散时间积分的精度和减小非系统误差的影响, 因此误差的幅值受运动参数的不确定性影响最大.

设小车的轮胎半径、轮间距的真实参数依次为 R_{1t} 、 R_{2t} 、 R_{3t} 、 R_{4t} 、 l_t , 正向运动学中设定的参数依次为 R_{1f} 、 R_{2f} 、 R_{3f} 、 R_{4f} 、 l_f , 编码器测得的角速度依次为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 . 采样时间 dt 内激光里程计、轮式里程计测得的位姿变化量依次为 $[u_{ix}^* \quad u_{iy}^* \quad u_{i\theta}^*]^T$ 、 $[u_{ix} \quad u_{iy} \quad u_{i\theta}]^T$, 其中前 2 行为位移变化量, 第 3 行为角度变化量.

在采样时间 dt 较小时, 非系统误差和数值漂移的影响较小, 激光里程计的角度变化量可以近似等于轮式里程计的理论积分, 即:

$$u_{i\theta}^* \approx \omega dt \quad (27)$$

将式 (26) 代入式 (27) 并整理可得:

$$u_{i\theta}^* \approx \begin{bmatrix} R_{3t} & R_{1t} \\ l_t & l_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_3 \sin \delta_3 \\ -\omega_1 \sin \delta_1 \end{bmatrix} dt \quad (28)$$

轮式里程计积分得到的角度变化量为

$$u_{i\theta} = \begin{bmatrix} R_{3f} & R_{1f} \\ l_f & l_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_3 \sin \delta_3 \\ -\omega_1 \sin \delta_1 \end{bmatrix} dt \quad (29)$$

式 (29) 两边左乘 $\begin{bmatrix} R_{3f} & R_{1f} \\ l_f & l_f \end{bmatrix}$ 的左逆, 并整理可得:

$$\begin{bmatrix} \omega_3 \sin \delta_3 \\ -\omega_1 \sin \delta_1 \end{bmatrix} dt = \frac{l_f^2}{R_{3f}^2 + R_{1f}^2} \begin{bmatrix} R_{3f} \\ l_f \\ R_{1f} \\ l_f \end{bmatrix} u_{i\theta} \quad (30)$$

把式 (30) 代入式 (28) 并整理得:

$$u_{i\theta}^* \approx \frac{l_f(R_{3f}R_{3t} + R_{1f}R_{1t})}{l_t(R_{3f}^2 + R_{1f}^2)} u_{i\theta} \quad (31)$$

由式 (31) 可得在采样时间 dt 内, 激光里程计得到的角度变化量和轮式里程计得到的角度变化量近似为线性关系. 对于位移变化量, 同理得:

$$\begin{bmatrix} u_{ix}^* \\ u_{iy}^* \end{bmatrix} \approx \frac{R_{1f}R_{1t} + R_{2f}R_{2t} + R_{3f}R_{3t} + R_{4f}R_{4t}}{R_{1f}^2 + R_{2f}^2 + R_{3f}^2 + R_{4f}^2} \begin{bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \end{bmatrix}$$

综上可得, 采样时间 dt 内, 激光里程计得到的位姿变化量和轮式里程计得到的位姿变化量近似为线性关系, 故式 (17) 假定成线性关系是可以的.

参考文献 (References)

- [1] 田忠江, 王坤, 张国鹏. 一种自动清扫垃圾的小车结构设计 [J]. 南方农机, 2017, 48(17): 146-147.
Tian Z J, Wang K, Zhang G P. The structural design of a trolley for automatic garbage cleaning [J]. South Agricultural Machinery, 2017, 48(17): 146-147.
- [2] 张贺, 胡越黎, 王权, 等. 基于改进 D* 算法的移动机器人路径规划 [J]. 工业控制计算机, 2016, 29(11): 73-74.
Zhang H, Hu Y L, Wang Q, et al. Path planning of mobile robot based on improved D* algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2016, 29(11): 73-74.
- [3] 王殿君. 基于改进 A* 算法的室内移动机器人路径规划 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52(8): 1085-1089.
Wang D J. Path planning of indoor mobile robot based on improved A* algorithm[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012, 52(8): 1085-1089.
- [4] 张飞, 白伟, 乔耀华, 等. 基于改进 D* 算法的无人机室内路径规划 [J]. 智能系统学报, 2019, 14(4): 662-669.

Zhang F, Bai W, Qiao Y H, et al. Interior path planning of UAV based on improved D* algorithm[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2019, 14(4): 662-669.

- [5] 张殿富, 刘福. 基于人工势场法的路径规划方法研究及展望 [J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(6): 88-95.
Zhang D F, Liu F. Research and prospect of path planning method based on artificial potential field method[J]. Computer Engineering and Science, 2013, 35(6): 88-95.
- [6] Wang Y, He T, Silva P. Wide-band high-accuracy ADC using segmented DAC with DWA and mismatch shaping[J]. Electronics Letters, 2017, 53(11): 713-714.
- [7] Zhang H Q, Dou L H, Fang H, et al. Autonomous indoor exploration of mobile robots based on door-guidance and improved dynamic window approach[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 408-413.
- [8] Li X Y, Liu F, Liu J, et al. Obstacle avoidance for mobile robot based on improved dynamic window approach[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2017, 25(2): 666-676.
- [9] Vista F P, Singh A M, Lee D J, et al. Design convergent dynamic window approach for quadrotor navigation[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(10): 2177-2184.
- [10] Wang J S, Meng Q L, Tan K H, et al. Experimental investigation on the influence of evaporative cooling of permeable pavements on outdoor thermal environment[J]. Building and Environment, 2018, 34(7): 462-469.
- [11] Lamon P, Siegwart R. Wheel torque control in rough terrain-modeling and simulation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 412-415.
- [12] Minguez J, Montano L. Nearness diagram (ND) navigation: Collision avoidance in troublesome scenarios[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 20(1): 45-59.
- [13] Lima D A D, Pereira G A S. Navigation of an autonomous car using vector fields and the dynamic window approach[J]. Journal of Control Automation and Electrical Systems, 2013, 24(1/2): 106-116.
- [14] Shiomi M, Zanlungo F, Hayashi K, et al. Towards a socially acceptable collision avoidance for a mobile robot navigating among pedestrians using a pedestrian model[J]. International Journal of Social Robotics, 2014, 6(3): 443-455.
- [15] Fox D, Burgard W, Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2002, 4(1): 23-33.

作者简介:

张瑜 (1995-), 男, 硕士生. 研究领域: 移动机器人, 智能机器人技术.

宋荆洲 (1976-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 机器人机构设计与控制, 智能机器人技术.

张琪祁 (1985-), 女, 硕士生. 研究领域: 电力系统及其自动化.