

基于速度空间的移动机器人同时避障和轨迹跟踪方法

张启彬, 王 鹏, 陈宗海[†]

(中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230027)

摘要: 针对有障碍物环境下非完整轮式移动机器人的轨迹跟踪问题, 提出一种基于速度空间的同时避障和轨迹跟踪方法(VSTTM). 首先, 根据机器人的动力学特性构建速度空间, 得到由速度元组构成的控制集; 然后, 构造目标函数并对各控制量进行评价, 其中跟踪误差评价函数评估跟踪效果, 碰撞检测函数检测是否发生碰撞, 终端状态惩罚项保证算法的稳定性; 最后, 通过优化过程找到最优的无碰控制量. 仿真结果表明了所提出方法的有效性.

关键词: 轮式移动机器人; 轨迹跟踪; 避障; 速度空间

中图分类号: TP24

文献标志码: A

Velocity space based concurrent obstacle avoidance and trajectory tracking for mobile robots

ZHANG Qi-bin, WANG Peng, CHEN Zong-hai[†]

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Aiming at the trajectory tracking problem of nonholonomic wheeled mobile robots in the presence of obstacles in the environment, a velocity space based concurrent obstacle avoidance and trajectory tracking method(VSTTM) is proposed. Firstly, a velocity space is built according to the dynamics of the robot, and the control set made up by velocity pairs is constructed. Then, an objective function is designed to evaluate the controls, among which the tracking error function evaluates the tracking errors, the collision detection function checks if a collision happens, and the terminal-state penalty term guarantees the stability of the proposed algorithm. Finally, the optimal collision-free control is found through an optimization progress. Simulation results show the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: wheeled mobile robots; trajectory tracking; obstacle avoidance; velocity space

0 引言

轨迹跟踪是轮式移动机器人运动控制的一个基本问题, 其目标是控制机器人跟踪一条以时间为参数的几何曲线(称为期望轨迹或参考轨迹), 在区域覆盖^[1]、导览、农业、空间探索等任务场景中有着广泛的应用. 轮式移动机器人的运动要满足“纯滚动而无滑动”这一约束, 因而是一类典型的非完整动力学系统^[2]. 根据 Brockett 定理^[3], 不存在光滑的时不变状态反馈控制律使一个非完整系统渐近镇定到平衡点, 因此, 传统的线性方法不能直接应用于轮式机器人系统, 对其控制问题的研究具有重要的理论和现实意义.

非完整轮式机器人在控制方面的挑战引起了研究者的普遍关注. Oriolo 等^[4]提出一种动态反馈线性

化方法以解决移动机器人的轨迹跟踪和点镇定问题; Kanayama 等^[5]将 Lyapunov 直接法与 Backstepping 方法相结合, 设计了一种渐近稳定的轨迹跟踪控制律; 李昆鹏等^[6]对 Kanayama 设计的控制律进行改进, 通过考虑纵坐标误差的影响加快轨迹逼近速度; 于浩等^[7]不直接跟踪期望位姿的姿态角, 而是根据当前跟踪的侧向误差设计引导角, 将其作为期望姿态角来设计轨迹跟踪控制律. 对于移动机器人系统, 自适应控制^[8]是另一种常用的控制方法, 一般使用神经网络^[9]或模糊逻辑^[10]逼近非线性模型, 用自适应方法设计速度控制器. 然而上述方法假设规划的轨迹是无碰的, 即环境中不存在障碍物, 这在实际的应用场景中很难满足. 当环境中存在障碍物时, 已有的研究通常把避障和跟踪当作两个独立的问题分别设计控制

收稿日期: 2015-11-10; 修回日期: 2016-04-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61375079).

作者简介: 张启彬(1991—), 男, 博士生, 从事智能机器人系统、SLAM 问题的研究; 陈宗海(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统、机器人与智能系统、汽车新能源技术与能源互联网等研究.

[†]通讯作者. E-mail: chenzh@ustc.edu.cn

律,根据条件在二者之间进行切换^[11]或将两种控制律结合使用^[12-14],实施过程较为复杂.

受动态窗口法(DWA)^[15-16]思想启发,本文提出基于速度空间的同时避障和轨迹跟踪方法(VSTTM).该方法能够处理一般方法没有考虑的控制信号饱和问题,具有较好的适用性;将避障和跟踪问题用统一的代价函数来表示,不需要分别设计控制律,减小了问题求解的复杂度.另外,应用模型预测理论证明了算法的稳定性,并给出了参数选取条件.典型环境下的轨迹跟踪实验验证了所提出方法的有效性.

1 移动机器人轨迹跟踪问题

非完整轮式移动机器人轨迹跟踪问题如图1所示.

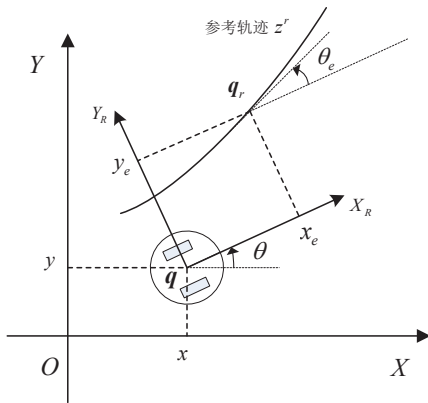


图1 移动机器人轨迹跟踪

当前时刻机器人在全局坐标系 XOY 中的位姿向量 $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^T$ 表示, $\mathbf{u} = [v \ \omega]^T$ 为相应的速度矢量.相应地,参考位姿记为 $\mathbf{q}_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$,所在的参考轨迹用 $z^r = [x_r(t) \ y_r(t)]^T$ 表示.在机器人满足非完整约束假设下,机器人运动学方程为

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}. \quad (1)$$

在机器人局部坐标系下,跟踪误差为

$$\mathbf{e}_q = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

根据式(2),得到跟踪误差对时间的微分^[5],即

$$\dot{\mathbf{e}}_q = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega + v_r \cos \theta_e - v \\ -x_e \omega + v_r \sin \theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix}. \quad (3)$$

这样,将移动机器人的轨迹跟踪问题转化为系统(2)的镇定问题,此时需要设计控制律 $\mathbf{u} = [v \ \omega]^T$,使得对于任意的初始跟踪误差, $\dot{\mathbf{e}}$ 有界且机器人的跟踪误差 \mathbf{e} 趋于0.

2 基于速度空间的轨迹跟踪方法

VSTTM方法在每个控制周期循环执行以下步骤:首先根据机器人的运动学和动力学约束建立速度空间;然后将速度空间离散化,构建备选的控制集;最后,使用目标函数对控制集中的元素进行评价,以代价最小的控制量作为当前的控制目标.

2.1 建立速度空间

设机器人的线速度最大值为 v_{\max} , 最小值为 v_{\min} , 最大角速度为 ω_{\max} , 机器人所有可能的速度构成静态窗口,即 $U_s = \{(v, \omega) | v \in [v_{\min}, v_{\max}], \omega \in [-\omega_{\max}, \omega_{\max}]\}$. 类似地,设机器人当前时刻的速度为 (v_t, ω_t) , 最大线加速度为 \dot{v} , 最大角加速度为 $\dot{\omega}$. 在一个时间周期 T 内,机器人的线速度范围为 $[v_t - \dot{v}T, v_t + \dot{v}T]$, 角速度范围为 $[\omega_t - \dot{\omega}T, \omega_t + \dot{\omega}T]$, 二者构成一个2D的动态窗口,记为 U_d . 两个窗口的交集 $U = U_s \cap U_d$ 构成了机器人当前时刻的速度空间,它以机器人当前的速度为中心,代表机器人在一个时间周期所能达到的速度范围,在此范围之外的控制量在运动规划时不予考虑.

2.2 构建控制集

为避免在连续的控制空间中进行搜索,减少计算量,需要对控制空间作离散化处理.记速度空间中线速度的范围为 $[v, \bar{v}]$, 角速度范围为 $[\omega, \bar{\omega}]$. 分别将线速度和角速度离散化成 $2m$ 份和 $2n$ 份,得到线速度集合 V 和角速度集合 W , 即

$$\begin{aligned} V &= \{v_i, i = 1, 2, \dots, 2m | v_i = \underline{v} + (i - 1) \cdot \Delta v\}, \\ W &= \{\omega_j, j = 1, 2, \dots, 2n | \omega_j = \underline{\omega} + (j - 1) \cdot \Delta \omega\}. \end{aligned} \quad (4)$$

由此得到相应的控制集

$$S = V \times W = \{\mathbf{u} = [v \ \omega]^T | v \in V, \omega \in W\}. \quad (5)$$

下面对控制集 S 进行扩展.根据2.4节终端反馈控制律和辅助控制量计算公式分别计算反馈控制量 u_c 和辅助控制量 u_a , 得到扩展后的控制集 $S' = S \cup u_c \cup u_a$. 集合 S' 是对连续空间 U 的一个较好的代表,可以在满足跟踪和避障要求的前提下显著减小计算量.

2.3 评价与优化

VSTTM算法使用目标函数描述轨迹跟踪和避障的代价,若设目标函数为 $J(\mathbf{u})$, 则问题转化为优化问题,即寻找控制量 \mathbf{u} , 使其满足

$$\mathbf{u} = \arg \min_{\mathbf{u} \in S'} J(\mathbf{u}). \quad (6)$$

设计的目标函数 $J(\mathbf{u})$ 包括3个部分: 评价轨迹跟踪误差的评价函数 $\Gamma(\mathbf{u})$, 检测是否发生碰撞的检测函数 $C(\mathbf{u})$, 保证算法稳定性的终端惩罚项 $P(\mathbf{u})$. 即有

$$J(\mathbf{u}) = \Gamma(\mathbf{u}) + C(\mathbf{u}) + P(\mathbf{u}). \quad (7)$$

轨迹跟踪误差为主要评价因素. 建立跟踪误差评价函数

$$\Gamma(\mathbf{u}) = \int_t^{t+T} (q_1 x_e^2(\tau) + q_2 y_e^2(\tau) + q_3 \theta_e^2(\tau)) d\tau \triangleq \int_t^{t+T} L(\tau, \mathbf{u}) d\tau. \quad (8)$$

其中: t 为当前时刻, T 代表一个预测周期, q_1 、 q_2 和 q_3 为相应的权重. 函数 $\Gamma(\mathbf{u})$ 反映了在相应控制量作用下跟踪的总体距离误差和航向角误差.

要实现避障功能, 需要引入碰撞检测机制. 碰撞检测函数定义为二值函数, 即

$$C(\mathbf{u}) = \begin{cases} 0, & \text{dis}(\tau) > r + \Delta; \\ \infty, & \text{dis}(\tau) \leq r + \Delta, \tau \in [t, t+T]. \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\text{dis}(\tau)$ 表示 t 时刻机器人中心到障碍物边缘的距离, r 为机器人的半径, Δ 为障碍物定位误差的上界. 函数 $C(\mathbf{u})$ 检测机器人是否发生碰撞, 并设定相应的代价: 当二者间的距离大于阈值时, 二者不会发生碰撞, 代价为0; 否则目标函数代价置为 ∞ , 以排除使机器人发生碰撞的控制量.

为保证算法的稳定性, 目标函数还需要一个终端状态惩罚项 $P(\mathbf{u})$ 将终端状态约束在终端域 Ω 内. 根据文献[17], 定义终端惩罚项如下:

$$P(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \|e_q(t+T)\|^2 + 1 - \cos \theta_e(t+T). \quad (10)$$

2.4 稳定性分析

不考虑干扰时, 加上时间参数, 目标函数可表示为

$$J(t, \mathbf{u}) = \int_t^{t+T} L(\tau, \mathbf{u}) d\tau + P(t+T, \mathbf{u}). \quad (11)$$

对于控制量 $\mathbf{u} = [v \ \omega]^T$, 若令 $u_1 = v_r \cos \theta_e - v$, $u_2 = \omega_r - \omega$, 则得到虚拟控制量 $\mathbf{u}^L = [u_1 \ u_2]^T$. 设 t 时刻通过寻优过程找到的最优控制量为 $\bar{\mathbf{u}}(\cdot)$, δ 为采样时间, 则 $t + \delta$ 时刻需要再次求解优化问题(6). 此时根据 $\bar{\mathbf{u}}(\cdot)$ 和终端反馈控制律构造辅助控制量 \mathbf{u}_a , 有

$$\mathbf{u}_a(\tau) = \begin{cases} \bar{\mathbf{u}}(\tau), & t + \delta \leq \tau \leq t + T; \\ \mathbf{u}^L(\tau), & t + T \leq \tau \leq t + T + \delta. \end{cases} \quad (12)$$

由于通过优化过程得到的最优解不会差于构造解, 根据文献[18]中的稳定性定理, 若参考速度有界, 则当以下条件满足时, 系统渐近稳定:

$$\dot{P}(t, \mathbf{u}^L) + L(t, \mathbf{u}^L) \leq 0. \quad (13)$$

将式(13)中不等式的左边展开, 有

$$\begin{aligned} \dot{P}(t, \mathbf{u}^L) + L(t, \mathbf{u}^L) = & x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e + \theta_e \dot{\theta}_e + \sin \theta_e \cdot \dot{\theta}_e + L(t, \mathbf{u}^L) = \\ & u_1 x_e + v_r y_e \sin \theta_e + u_2 (\sin \theta_e + \theta_e) + \\ & q_1 x_e^2 + q_2 y_e^2 + q_3 \theta_e^2. \end{aligned} \quad (14)$$

设计终端反馈控制律

$$\mathbf{u}^L = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 x_e \\ -v_r y_e - k_2 \theta_e \end{bmatrix}, \quad (15)$$

其中 $k_1 \geq 0$ 且 $k_2 \geq 0$. 为使不等式(13)成立, 设定参数 $k_1 - q_1 - q_2 \geq 0$, $k_2 - q_3 \geq 0$, 终端域为 $\Omega = \{e_q \in \mathbf{R}^3 | x_e^2 \geq y_e^2, y_e \theta_e \geq 0\}$. 此时式(13)左边变为

$$\begin{aligned} \dot{P}(t, \mathbf{u}^L) + L(t, \mathbf{u}^L) = & - (k_1 - q_1) x_e^2 + q_2 y_e^2 - (k_2 - q_3) \theta_e^2 - \\ & v_r y_e \theta_e - k_2 \theta_e \sin \theta_e \leq 0. \end{aligned} \quad (16)$$

即条件(13)成立, 系统渐近稳定.

综上所述, 建立基于速度空间的同时避障和轨迹跟踪(VSTTM)算法如下.

输入: 机器人当前位姿 $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^T$, 当前速度 (v_t, ω_t) ; 参考机器人当前位姿 $\mathbf{q}_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$, 当前速度 (v_r, ω_r) ; 传感器数据和环境地图;

输出: 最优控制量 $\hat{\mathbf{u}}$.

1) 根据机器人当前状态建立速度空间 U .

2) 将速度空间离散化, 构造控制集 S' .

3) 对每个 $\mathbf{u} \in S'$, 重复:

3.1) 预测 $[t, t+T]$ 内机器人的轨迹;

3.2) 使用式(7)对轨迹进行评价.

4) 找到满足式(6)的最优控制量 $\hat{\mathbf{u}}$.

5) 以 $\hat{\mathbf{u}}$ 为控制目标执行一个控制周期, 回到步骤1).

3 仿真实验

为验证 VSTTM 方法的有效性, 下面将在 Matlab 7.8 环境下进行仿真实验, 将 VSTTM 算法与文献[12]算法进行对比研究. 设定离散参数 $2m = 2n = 20$, 避障参数 $r = 0.2 \text{ m}$, $\Delta = 0.05 \text{ m}$, 实验尽量保证文献[12]参数与 VSTTM 方法参数一致: 设定最小安全距离 $r_{ij}^* = 0.2 \text{ m}$, 期望的最小安全距离 $\bar{r}_{ij} = 0.25 \text{ m}$, 定位误差 $\Delta_{ij} = 0.05 \text{ m}$. 为便于对比, 采用与文献[12]实验相同的参考轨迹, 参考轨迹方程为

$$z^r = \left[1.5 \cos \left(\frac{\pi}{45} t \right) \text{ m} \quad 1.5 \sin \left(\frac{\pi}{45} t \right) \text{ m} \right]^T.$$

机器人初始位姿为 $\mathbf{q}(0) = [0 \text{ m}, 0 \text{ m}, \pi/2 \text{ rad}]^T$,

速度矢量 $[v(0), \omega(0)]^T = [0 \text{ m/s}, 0 \text{ rad/s}]^T$. 两个障碍物坐标分别为 $O_1 = [1.6 \text{ m}, 0 \text{ m}]^T, O_2 = [-1.6 \text{ m}, 0 \text{ m}]^T$, 障碍物半径为 0.1 m , 此时实验结果如图2所示(其中点线、实线和虚线分别为参考轨迹、VSTTM方法和文献[12]方法).

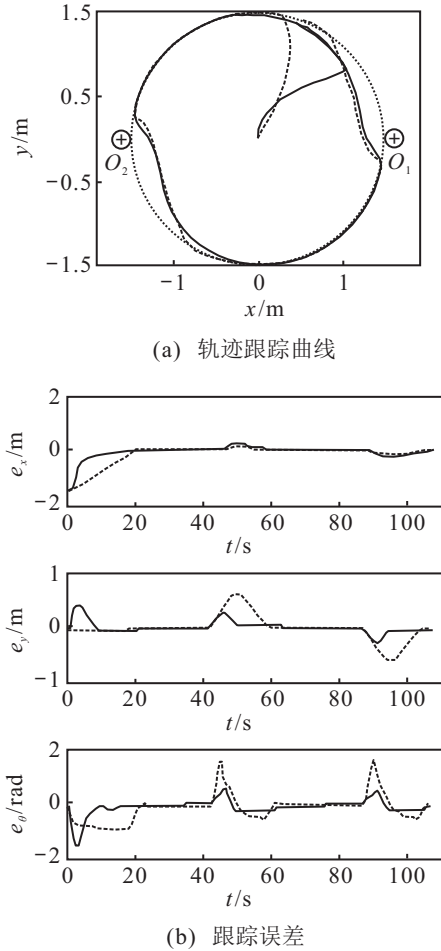


图2 静态障碍物环境轨迹跟踪

移动机器人从零时刻开始跟踪参考轨迹, 由图2中结果可以看出, VSTTM算法逼近参考轨迹的速度更快. $t \approx 42 \text{ s}$ 时机器人检测到障碍物 O_2 , 然后作出避障行为, 当距离 O_2 超过一定距离后机器人重新跟踪参考轨迹; 在 $t \approx 87 \text{ s}$ 时机器人检测到障碍物 O_1 , 开始表现出类似的避障行为. 从机器人对 O_2 开始作出避障行为到重新跟踪参考轨迹, 计算该过程中跟踪误差的各分量的均值, 结果如表1所示.

表1 避障过程平均跟踪误差

算法	$ e_x $ 均值/m	$ e_y $ 均值/m	$ e_\theta $ 均值/rad
VSTTM	0.1239	0.1021	0.2002
文献[12]方法	0.0649	0.3116	0.4704

下面假设障碍物 O_1 在 $t = 80 \text{ s}$ 时开始运动, 运动方程为

$$O_1 = \begin{bmatrix} 1.6 \cos\left(-\frac{\pi}{45}(t-80)\right) \text{ m} \\ 1.6 \sin\left(-\frac{\pi}{45}(t-80)\right) \text{ m} \end{bmatrix}; \quad (17)$$

障碍物 O_2 在 $t = 43.5 \text{ s}$ 时开始运动, 运动方程为

$$O_2 = \begin{bmatrix} 1.6 \cos\left(\pi + \frac{\pi}{90}(t-43.5)\right) \text{ m} \\ 1.6 \sin\left(\pi + \frac{\pi}{90}(t-43.5)\right) \text{ m} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

为简化问题, 假设两个障碍物之间可以互相重叠, 此时得到动态环境下轨迹跟踪结果如图3所示(其中点线、实线和虚线分别为参考轨迹、VSTTM方法和文献[12]方法).

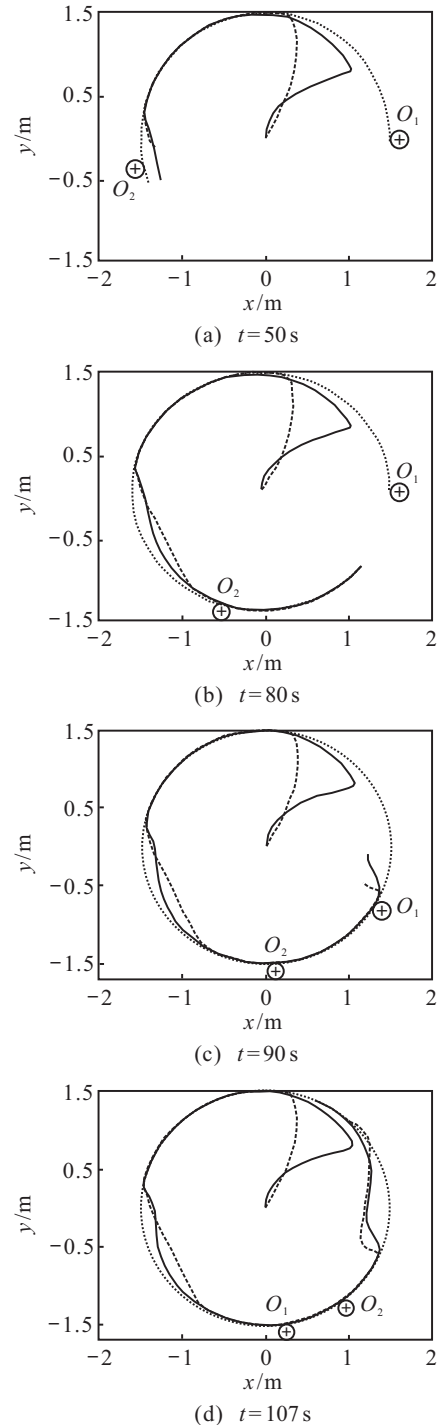


图3 动态障碍物环境轨迹跟踪

图3(a)~图3(d)分别展示了从零时刻开始到不同时刻的跟踪结果.当 $t \approx 40$ s时机器人开始作出避障行为,当 $t = 50$ s时机器人已经避开了障碍物 O_2 (图3(a));由于 O_2 运动速度较慢, $t > 50$ s后障碍物 O_2 落在机器人后方,不再对机器人后续的运动产生影响;当 $t \approx 90$ s时,机器人与障碍物 O_1 交叉而过(图3(c));然后重新跟踪参考轨迹(图3(d)).从图3中机器人的轨迹可以看出,VSTTM算法的运动轨迹较为平滑,且在避开障碍物的过程中保持了较小的跟踪误差.

4 结 论

针对有障碍物环境下移动机器人的轨迹跟踪问题,本文提出了一种同时避障和轨迹跟踪方法,将避障和跟踪问题描述成两个不同的代价函数,进而将其转化为优化问题,并应用模型预测控制理论证明了闭环系统的稳定性.由于使用统一的代价函数表示避障和跟踪问题,不需要同时设计两个控制器,减小了问题求解的复杂度;算法兼顾机器人的运动学和动力学约束,提高了机器人逼近参考轨迹的速度,同时使得机器人在避障过程中能够尽量跟踪参考轨迹,降低了跟踪误差.当前算法使用的参数是固定的,下一步的工作将致力于建立参数的自适应调节机制,进一步提高算法性能.

参考文献(References)

- [1] 孙建,陈宗海,王鹏,等.基于代价地图和最小树的移动机器人多区域覆盖方法[J].机器人,2015,37(4): 435-442.
(Sun J, Chen Z H, Wang P, et al. Multi-region coverage method based on cost map and minimal tree for mobile robot[J]. Robot, 2015, 37(4): 435-442.)
- [2] Siegwart R, Nourbakhsh I R, Scaramuzza D. Introduction to autonomous mobile robots[M]. London: MIT Press, 2011: 84-85.
- [3] Brockett R W. Asymptotic stability and feedback stabilization[M]. Boston: Birkhäuser, 1983: 181-191.
- [4] Oriolo G, De Luca A, Vendittelli M. WMR control via dynamic feedback linearization: Design, implementation, and experimental validation[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(6): 835-852.
- [5] Kanayama Y, Kimura Y, Miyazaki F, et al. A stable tracking control method for an autonomous mobile robot[C]. Proc of the 1990 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. New York: IEEE Press, 1990: 384-389.
- [6] 李昆鹏,王孙安,郭子龙.一种移动机器人自适应轨迹跟踪控制算法研究[J].系统仿真学报,2008,20(10): 2575-2578.
(Li K P, Wang S A, Guo Z L. Adaptive trajectory tracking control method of mobile robot[J]. J of System Simulation, 2008, 20(10): 2575-2578.)
- [7] 于浩,宿浩,杨雪,等.基于引导角的轮式移动机器人轨迹跟踪控制[J].控制与决策,2015,30(4): 635-639.
(Yu H, Su H, Yang X, et al. Guidance angle based trajectory tracking for wheeled mobile robots[J]. Control and Decision, 2015, 30(4): 635-639.)
- [8] 陈宗海,文锋,王智灵.基于自适应评价的非线性系统神经网络控制[J].控制与决策,2007,22(7): 765-768.
(Chen Z H, Wen F, Wang Z L. Neural network control of nonlinear systems based on adaptive critic[J]. Control and Decision, 2007, 22(7): 765-768.)
- [9] Park B S, Yoo S J, Park J B, et al. Adaptive neural sliding mode control of nonholonomic wheeled mobile robots with model uncertainty[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2009, 17(1): 207-214.
- [10] Hou Z G, Zou A M, Cheng L, et al. Adaptive control of an electrically driven nonholonomic mobile robot via backstepping and fuzzy approach[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2009, 17(4): 803-815.
- [11] Chunyu J, Qu Z, Pollak E, et al. Reactive target-tracking control with obstacle avoidance of unicycle-type mobile robots in a dynamic environment[C]. Proc of the 2010 American Control Conf. New York: IEEE Press, 2010: 1190-1195.
- [12] Rodr Guez-Seda E J, Tang C, Spong M W, et al. Trajectory tracking with collision avoidance for nonholonomic vehicles with acceleration constraints and limited sensing[J]. The Int J of Robotics Research, 2014, 33(12): 1569-1592.
- [13] Cui M, Sun D, Liu W, et al. Adaptive tracking and obstacle avoidance control for mobile robots with unknown sliding[J]. Int J of Advanced Robotic Systems, 2012, 9(5): 171-184.
- [14] Yang H, Fan X, Shi P, et al. Nonlinear control for tracking and obstacle avoidance of a wheeled mobile robot with nonholonomic constraint[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2016, 24(2): 741-746.
- [15] Fox D, Burgard W, Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 1997, 4(1): 23-33.
- [16] De Lima D A, Pereira G A S. Navigation of an autonomous car using vector fields and the dynamic window approach[J]. J of Control, Automation and Electrical Systems, 2013, 24(1/2): 106-116.
- [17] Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V, et al. Constrained model predictive control: Stability and optimality[J]. Automatica, 2000, 36(6): 789-814.
- [18] Gu D, Hu H. Receding horizon tracking control of wheeled mobile robots[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2006, 14(4): 743-749.

(责任编辑:李君玲)