

轮式移动机器人轨迹跟踪的 PID 控制方法

冯 剑¹, 张文安¹, 倪洪杰¹, 丰其云²

1. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江大丰实业股份有限公司, 浙江 宁波 315400

基金项目: 教育部重点实验室开放基金(200240)

通信作者: 张文安, wazhang@zjut.edu.cn 收稿/录用/修回: 2016-07-01/2016-10-08/2016-10-31

摘要

针对轮式移动机器人的领航—追随轨迹跟踪控制问题, 设计了一种基于直接反馈线性化的 PID 控制器. 首先分析了移动机器人的运动学模型, 进而建立了领航—追随轨迹跟踪控制系统模型. 在此基础上, 设计了基于直接反馈线性化的 PID (proportion-integral-derivative) 控制器. 仿真及实验研究结果表明, 所提出的控制方法可有效实现移动机器人的轨迹跟踪控制任务, 控制器易于实现且具有一定的抗干扰能力.

关键词

轮式移动机器人
轨迹跟踪
直接反馈线性化
抗干扰
比例—积分—微分控制
中图分类号: TP13
文献标识码: A

Trajectory Tracking Control of Wheeled Mobile Robots Using PID Control Method

FENG Jian¹, ZHANG Wenan¹, NI Hongjie¹, FENG Qiyun²

1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Zhejiang Dafeng Industrial Corporation Limited, Ningbo 315400, China

Abstract

We investigate the leader-follower trajectory tracking control problem for wheeled mobile robots, and develop a PID controller based on direct feedback linearization (DFL). First, we establish a kinematic model for a single-wheeled mobile robot by motion analysis. Then, we present a kinematic model for the leader-follower trajectory tracking control system. On the basis of the established model, we design a PID controller with DFL strategy. Simulations and experiments demonstrate that the PID controller is easy to implement and preserves certain advantages in disturbance rejection.

Keywords

wheeled mobile robot;
trajectory tracking;
direct feedback linearization (DFL);
disturbance rejection;
PID (proportion-integral-derivative) control

1 引言

机器人领域的变化趋势由在生产线上固定的机械手向能做更复杂任务的自主移动机器人过渡, 比如救援、军事行动以及日常生活服务等^[1-2]. 近几年, 移动机器人已逐渐应用于不同的工业过程, 其控制方法设计被视为一个难点, 因此移动机器人是一类典型非完整系统^[3]. 移动机器人控制的一个主要问题是轨迹跟踪控制. 然而, 描述轨迹跟踪的跟踪误差系统往往是一个耦合非线性系统, 不满足 Brockett 的必要条件^[4], 使得该问题的解决变得复杂. 在实际应用中, 由于移动机器人在运动过程中不可避免地存在不确定性, 因此需要充分考虑移动机器人的模型不确定性和外部干扰问题^[5].

传统的移动机器人轨迹跟踪问题已有许多研究结果.

其中, Samson 和 Ait-Abderrahim 在 1991 年就提出全局跟踪控制律^[6]. 随后涌现了一系列方法, 滑模变结构方法利用高速开关控制律驱动非线性状态轨迹渐近到达预设的开关表面并且在以后的时间状态轨迹保持在该开关表面上. 具有响应快、良好的瞬态性能和鲁棒性, 广泛应用于轨迹跟踪控制^[7-9], 但是它将控制律中的不连续项直接转移到输出项, 导致系统在不同控制逻辑之间来回高速切换引起系统出现不可避免的“抖动”现象, 直接影响控制效果^[10]. 反演法是较早基于运动学考虑的轨迹跟踪控制方法^[11], 被广泛应用于跟踪问题, 针对满足严格反馈控制的系统, 通过李亚普诺夫函数来构造控制器, 使积分环节串联的各子系统逐级稳定并设计辅助速度控制输入实现系统轨迹跟踪, 但其控制结构和设计过程较复杂, 此外, 要求移动机

机器人尽可能提供较大的加速度,这在实际情况中是较难实现的^[12]. 自适应控制可以通过不断地获取系统输入、状态、输出及性能参数,通过及时辨识、学习逐渐了解和掌握对象,然后对控制律做出相应的调整,从而使控制性能达到最优,该控制方法能适应结构不确定性但参数选择复杂^[13-15]. 模糊控制方法具有一定的鲁棒性,但是模糊控制规则会受到人的主观因素影响而不能完全归总,且因缺乏“自我学习”的能力很难消除稳态误差^[16]. 神经网络控制方法固有的并行性和学习能力,使其在机器人运动控制系统中十分受欢迎^[17-18],但学习速度慢、算法不完备仍是其主要缺点. 结合李亚普诺夫稳定性理论的线性矩阵不等式(LMI)方法可用来设计线性跟踪系统控制器,具有主动容错的优点但不适用于非线性系统^[19]. 此外还有如预测控制^[20]、粒子群算法^[21]、遗传算法^[22]、 H_∞ 算法^[23]以及其它智能控制(包括混合控制)方法^[24-29].

综上所述可知,多数已有的移动机器人轨迹跟踪控制器设计过程比较复杂. 本文采用带直接反馈线性化的PID控制方法设计轨迹跟踪控制器,降低了算法复杂度. 通过仿真和实验验证了所提出的方法简单易行,并具有良好的跟踪精度和抗干扰能力.

2 系统建模

2.1 移动机器人的运动学模型

轮式移动机器人采用两轮独立前驱的四轮差分结构,其结构如图1所示.

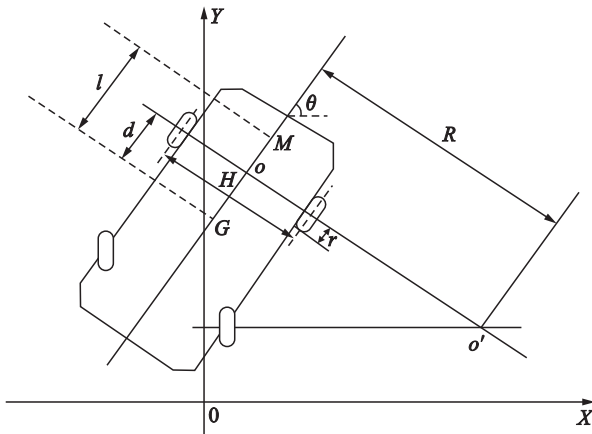


图1 移动机器人结构示意图

Fig.1 Structure diagram of mobile robot

符号说明: o 为移动机器人两驱动轮中心点, o' 为移动机器人的旋转瞬心, M 为移动机器人两超声波传感器的中心, H 为移动机器人两驱动轮中心之间的距离, l 为移动机器人质心距传感器中心连线的垂直距离, R 为移动机器人绕瞬心的转弯半径, r 为左右轮半径, $G(x(t), y(t))$ 为移动机器人的质心位置, $\theta(t)$ 为移动机器人移动方向与 X 轴夹角(航向角), $v(t)$ 为移动机器人移动线速度, $w(t)$ 为移动机器人移动角速度, d 为移动机器人质心到驱动轮轴心的距离, $v_l(t)$ 为移动机器人左轮中心相对地面的移动线速度, $v_r(t)$ 为移动机器人右轮中心相对地面的移动线速度.

在建立移动机器人的运动学模型过程中,需要用到如下假设:移动机器人材质均匀,质心同时也为几何中心,记为 G ;移动机器人左、右轮受力相等,且车轮与地面之间是纯滚动无滑动;移动机器人前轮驱动,后轮随动.

在上述假设基础上,如图1所示的轮式移动机器人的运动学模型可以描述为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta(t) & -d \sin \theta(t) \\ \sin \theta(t) & d \cos \theta(t) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 主从移动机器人的追随误差模型

本文考虑的移动机器人轨迹跟踪指的是从机器人以恒定的横向和纵向距离跟踪主机器人的运动. 因此,刻画横、纵向距离差,并给出主从机器人的追随误差模型是十分必要的. 为了便于获得主从机器人的追随误差模型,引入了虚拟主机器人,即假设有一个与主机器人保持恒定横向与纵向距离且运动方向始终与主机器人一致的虚拟机器人,如图2所示.

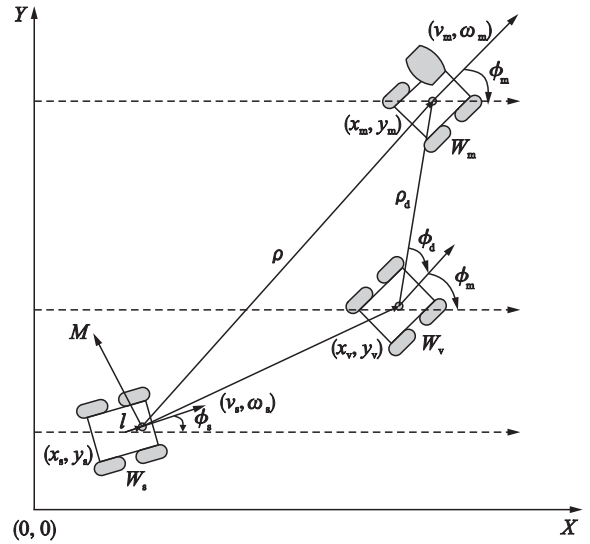


图2 主从机器人跟随系统示意图

Fig.2 The following system diagram of the master-slave robots

图2中, W_m 、 W_s 和 W_v 分别代表主机器人、从机器人和虚拟主机器人,定义 M 点为从机器人上传感器阵列的中心,位于从机器人前进的方向并偏移从机器人质心的距离为 l , M 点姿态信息可以表示为

$$\begin{cases} x_M(t) = x_s(t) + l \cos \phi_s(t) \\ y_M(t) = y_s(t) + l \sin \phi_s(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $x_M(t)$ 和 $y_M(t)$ 表示点 M 在全局坐标系中的坐标, $x_s(t)$ 和 $y_s(t)$ 表示从机器人质心在全局坐标系中的坐标, $\phi_s(t)$ 表示从机器人的航向角.

对式(2)两边关于时间 t 求导,可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_M(t) = \dot{x}_s(t) - l \dot{\phi}_s(t) \sin \phi_s(t) \\ \dot{y}_M(t) = \dot{y}_s(t) + l \dot{\phi}_s(t) \cos \phi_s(t) \\ \dot{\phi}_M(t) = \dot{\phi}_s(t) \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)和式(3), 可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_M(t) \\ \dot{y}_M(t) \\ \dot{\phi}_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_s(t) & -l \sin \phi_s(t) - d \sin \phi_s(t) \\ \sin \phi_s(t) & l \cos \phi_s(t) + d \cos \phi_s(t) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s(t) \\ w_s(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $v_s(t)$ 和 $w_s(t)$ 分别为从机器人的移动线速度和角速度. 式(4)是对从机器人的传感器阵列中心 M 点的运动学描述. 由图 2 可知, 虚拟主机器人 W_v 的质心与主机器人质心的距离为 ρ_d , 虚拟主机器人的前进方向与虚拟主机器人和主机器人两质心连线的夹角角度为 ϕ_d . 以主机器人为参考, 则虚拟主机器人的位姿信息可表示为

$$\begin{cases} x_v(t) = x_m(t) - \rho_d \cos(\phi_m(t) + \phi_d) \\ y_v(t) = y_m(t) - \rho_d \sin(\phi_m(t) + \phi_d) \\ \phi_v(t) = \phi_m(t) \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)求导, 并结合式(1), 可得 W_v 的运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_v(t) = v_m(t) \cos \phi_m(t) - d \sin \phi_m(t) w_m(t) + \rho_d \sin(\phi_m(t) + \phi_d) w_m(t) \\ \dot{y}_v(t) = v_m(t) \sin \phi_m(t) + d \cos \phi_m(t) w_m(t) - \rho_d \cos(\phi_m(t) + \phi_d) w_d(t) \\ \dot{\phi}_v(t) = w_m(t) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $w_m(t)$ 和 $v_m(t)$ 分别表示主机器人的角速度和线速度.

现根据 M 点和 W_v 的动态模型, 对主从机器人追随系统的位置偏差和角度偏差进行分析. 记 $e_\phi(t)$ 为虚拟主机与从机之间的角度偏差, $e_x(t)$ 和 $e_y(t)$ 为虚拟主机与从机之间的位置偏差. 首先, 从机追随虚拟主机的追随偏差可表示为

$$\begin{cases} e_x(t) = x_v(t) - x_M(t) \\ e_y(t) = y_v(t) - y_M(t) \\ e_\phi(t) = \phi_v(t) - \phi_s(t) \end{cases} \quad (7)$$

将式(2)和式(5)代入式(7), 可得:

$$\begin{cases} e_x(t) = x_m(t) - x_s(t) - \rho_d \cos(\phi_m(t) + \phi_d) - l \cos \phi_s(t) \\ e_y(t) = y_m(t) - y_s(t) - \rho_d \sin(\phi_m(t) + \phi_d) - l \sin \phi_s(t) \\ e_\phi(t) = \phi_m(t) - \phi_s(t) \end{cases} \quad (8)$$

对式(8)两边求导并结合式(4)和式(6)可得:

$$\begin{cases} \dot{e}_x(t) = v_m(t) \cos \phi_m(t) - v_s(t) \cos \phi_s(t) - d \sin \phi_m(t) w_m(t) + \rho_d \sin(\phi_m(t) + \phi_d) w_m(t) + w_s(t) (l + d) \sin \phi_s(t) \\ \dot{e}_y(t) = v_m(t) \sin \phi_m(t) - v_s(t) \sin \phi_s(t) + d \cos \phi_m(t) w_m(t) - \rho_d \cos(\phi_m(t) + \phi_d) w_m(t) - w_s(t) (l + d) \cos \phi_s(t) \\ \dot{e}_\phi(t) = w_m(t) - w_s(t) \end{cases} \quad (9)$$

为了简化式(9)并得到主从机器人追随误差模型, 采用如图 3 所示的坐标变换方法.

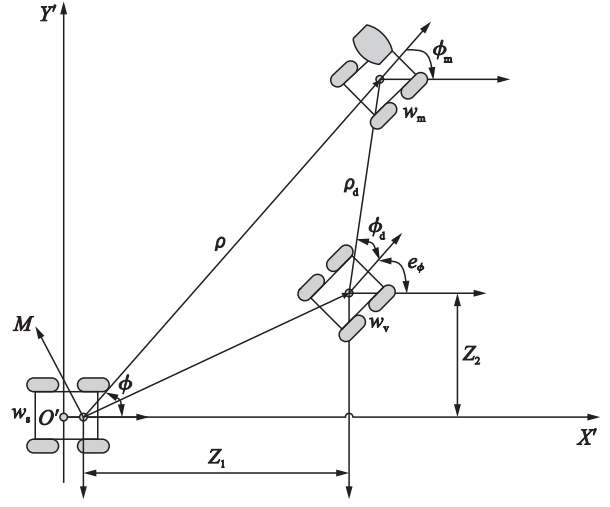


图 3 新坐标系下主从机器人跟随系统示意图

Fig.3 The following system diagram of the master-slave robots in new coordinate system

以从机器人质心为坐标原点, 以 W_s 的行驶方向作为 X' 轴的正方向建立直角坐标系 $X'O'Y'$, 则可得坐标变换:

$$\begin{cases} Z_1(t) = e_x(t) \cos \phi_s(t) + e_y(t) \sin \phi_s(t) \\ Z_2(t) = e_y(t) \cos \phi_s(t) - e_x(t) \sin \phi_s(t) \end{cases} \quad (10)$$

其中, $Z_1(t)$ 和 $Z_2(t)$ 分别表示 M 点与 W_v 在新坐标系下的位置误差. 联立式(8)和式(10)可得主从机器人跟随误差:

$$\begin{cases} d_1 = x_m(t) - x_s(t) \\ = Z_1(t) \cos \phi_s(t) - Z_2(t) \sin \phi_s(t) + \rho_d \cos(\phi_m(t) + \phi_d) + l \cos \phi_s(t) \\ d_2 = y_m(t) - y_s(t) \\ = Z_1(t) \sin \phi_s(t) + Z_2(t) \cos \phi_s(t) + \rho_d \sin(\phi_m(t) + \phi_d) + l \sin \phi_s(t) \end{cases} \quad (11)$$

对式(11)两边关于时间 t 求导, 可得:

$$\begin{cases} \dot{d}_1 = \dot{Z}_1(t) \cos \phi_s(t) - Z_1(t) \sin \phi_s(t) w_s(t) - \dot{Z}_2(t) \sin \phi_s(t) - Z_2(t) w_s(t) \cos \phi_s(t) - w_m(t) \rho_d \sin(\phi_m(t) + \phi_d) - l w_s(t) \sin \phi_s(t) \\ \dot{d}_2 = \dot{Z}_1(t) \sin \phi_s(t) + Z_1(t) w_s(t) \cos \phi_s(t) + \dot{Z}_2(t) \cos \phi_s(t) - Z_2(t) w_s(t) \sin \phi_s(t) + w_m(t) \rho_d \cos(\phi_m(t) + \phi_d) + l w_s(t) \cos \phi_s(t) \end{cases} \quad (12)$$

再对式(10)两边关于时间 t 求导, 可得:

$$\begin{cases} \dot{Z}_1(t) = \dot{e}_x(t) \cos \phi_s(t) - w_s(t) e_x(t) \sin \phi_s(t) + \dot{e}_y(t) \sin \phi_s(t) + w_s(t) e_y(t) \cos \phi_s(t) \\ \dot{Z}_2(t) = \dot{e}_y(t) \cos \phi_s(t) - w_s(t) e_y(t) \sin \phi_s(t) - \dot{e}_x(t) \sin \phi_s(t) - w_s(t) e_x(t) \cos \phi_s(t) \end{cases} \quad (13)$$

由式(8)~式(10)和式(13)可得:

$$\begin{cases} \dot{Z}_1(t) = -v_s(t) + v_m(t) \cos e_\phi(t) - d w_m(t) \sin e_\phi(t) + Z_2(t) w_s(t) + \rho_d \sin(e_\phi(t) + \phi_d) w_m(t) \\ \dot{Z}_2(t) = v_m(t) \sin e_\phi(t) + d w_m(t) \cos e_\phi(t) - Z_1(t) w_s(t) - (l + d) w_s(t) - \rho_d \cos(e_\phi(t) + \phi_d) w_m(t) \\ \dot{e}_\phi(t) = w_m(t) - w_s(t) \end{cases} \quad (14)$$

其中, $v_m(t)$ 和 $w_m(t)$ 分别表示主机器人的线速度和角速度, 可视为外部输入, 由式(7)可得:

$$\phi_s(t) = \phi_m(t) - e_\phi(t) \quad (15)$$

将式(14)和式(15)代入式(12)可得:

$$\begin{cases} \dot{d}_1 = -v_s(t) \cos(\phi_m(t) - e_\phi(t)) + dw_s(t) \sin(\phi_m(t) - e_\phi(t)) + v_m(t) \cos \phi_m(t) - dw_m(t) \sin \phi_m(t) \\ \dot{d}_2 = -v_s(t) \sin(\phi_m(t) - e_\phi(t)) - dw_s(t) \cos(\phi_m(t) - e_\phi(t)) + v_m(t) \sin \phi_m(t) + dw_m(t) \cos \phi_m(t) \\ \dot{e}_\phi(t) = w_m(t) - w_s(t) \end{cases} \quad (16)$$

式(16)为主从机器人的追随误差模型, d_1 和 d_2 分别为主机器人的横向位置差和纵向位置差。

本文所要解决的轨迹跟踪控制问题是: 当主机的线速度 $v_m(t)$ 和角速度 $w_m(t)$ 给定后, 控制从机器人的线速度 $v_s(t)$ 和角速度 $w_s(t)$ 使得主从机器人之间的横向位置差 d_1 和纵向位置差 d_2 为设定的常值。

3 控制器设计

由式(16)可知, 主从机器人的追随系统是一个非线性系统。可采用反馈线性化方法解决此类系统的控制问题。对于移动机器人轨迹跟踪系统这样的非线性耦合系统, 使用在平衡点附近按泰勒展开的传统方法对其进行线性化解耦控制, 易造成控制精度低, 控制效果不理想。微分几何法等其它反馈线性化解耦控制方法, 实现非线性系统线性化过程大都依靠大量复杂的坐标变换, 而直接反馈线性化理论只需要通过建立虚拟控制输入量, 获得非线性反馈补偿律后就可以实现非线性系统的全局精确线性化。直接反馈线性化方法实现非线性系统线性化的关键是选择合适的虚拟控制量, 以抵消原系统中的非线性因素, 从而实现线性化。

将如式(16)所示的追随模型重新写成如下的状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{D}}_{12} = \mathbf{A}\mathbf{u}_s + \mathbf{B}\mathbf{u}_m \\ \dot{e}_\phi(t) = w_m(t) - w_s(t) \end{cases} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{D}_{12} = [d_1 \ d_2]^T$, $\mathbf{u}_s = [v_s(t) \ w_s(t)]^T$, 并:

$$\mathbf{u}_m = [v_m(t) \ w_m(t)]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\cos(\phi_m(t) - e_\phi(t)) & d\sin(\phi_m(t) - e_\phi(t)) \\ -\sin(\phi_m(t) - e_\phi(t)) & -d\cos(\phi_m(t) - e_\phi(t)) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \cos \phi_m(t) & -d\sin \phi_m(t) \\ \sin \phi_m(t) & d\cos \phi_m(t) \end{bmatrix}$$

移动机器人质心到驱动轮轴心的距离 d 不为零时, 矩阵 \mathbf{A} 可逆, 将从机器人的控制输入 \mathbf{u}_s 取为

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{e} - \mathbf{B}\mathbf{u}_m) \quad (18)$$

其中, \mathbf{e} 为辅助控制输入, 取为

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} k_1(d_1^* - d_1) \\ k_2(d_2^* - d_2) \end{bmatrix} = \mathbf{k}(\mathbf{D}_{12}^* - \mathbf{D}_{12}) \quad (19)$$

其中, $\mathbf{k} = [k_1 \ k_2]^T$, $k_1 > 0$, $k_2 > 0$ 为控制器增益, d_1^* 和 d_2^* 表示两机器人之间期望的横向间距和纵向间距。从而追随控制系统模型可简化为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{D}}_{12} = \mathbf{e} = \mathbf{k}(\mathbf{D}_{12}^* - \mathbf{D}_{12}) \\ \dot{e}_\phi(t) = w_m(t) - w_s(t) \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)可知, 线性化后的追随控制系统是一个稳定系统, 但当系统存在扰动时, 仅简单应用直接反馈线性化不能确保系统的稳定性。将进一步设计 PID 控制器, 保证闭环系统的稳定性。

以下确定 PID 控制器参数以保证闭环系统稳定性。以横向间距跟踪为例, 纵向间距的跟踪可按类似方法获得。反馈线性化之后加入 PID 控制器, 可得:

$$\dot{d}_1 = k_1 \left(k_p(d_1^* - d_1) + k_d \left(\frac{d(d_1^* - d_1)}{dt} \right) + k_i \int (d_1^* - d_1) dt \right) \quad (21)$$

令:

$$e_1 = d_1^* - d_1 \quad (22)$$

将式(22)代入式(21)可得:

$$\dot{e}_1 = -k_1 \left(k_p e_1 + k_d \frac{de_1}{dt} + k_i \int e_1 dt \right) \quad (23)$$

对式(23)两边关于时间 t 求导, 可得:

$$\ddot{e}_1 = -k_1 (k_p \dot{e}_1 + k_d \ddot{e}_1 + k_i e_1) \quad (24)$$

整理式(24)为

$$(1 + k_1 k_d) \ddot{e}_1 + k_1 k_p \dot{e}_1 + k_1 k_i e_1 = 0 \quad (25)$$

式(25)对应特征方程为

$$(1 + k_1 k_d) s^2 + k_1 k_p s + k_1 k_i = 0 \quad (26)$$

根据赫尔维茨判据, 二阶方程各项系数均大于 0 即可满足稳定要求, 即:

$$\begin{cases} 1 + k_1 k_d > 0 \\ k_1 k_p > 0 \\ k_1 k_i > 0 \end{cases} \quad (27)$$

由于反馈线性化控制增益 k_1 大于 0, 所以满足系统稳定的条件是 PID 的 3 个参数满足:

$$\begin{cases} k_d > -1/k_1 \\ k_p > 0 \\ k_i > 0 \end{cases} \quad (28)$$

利用直接反馈线性化理论将主从机器人追随控制系统解耦成两个子系统, 并为每个解耦的子系统分别设计 PID 追随控制器, 控制系统结构如图 4 所示。

移动机器人运动时其移动线速度 v 、角速度 w 与左右驱动轮速度之间的关系如下: 纯滚动无打滑条件下, 机器人作直线运动时, 可以得知 $v_l = v_r = v$ 。非直线运动(比如右转弯情形)时, 小邻域范围内用圆来比拟, 假设该虚拟圆的半径为 R , 则有:

$$w = \frac{v_r}{R - H/2} = \frac{v_l}{R + H/2} = \frac{v}{R} \quad (29)$$

解得:

$$v = wR = \frac{v_l + v_r}{2} \quad (30)$$

$$w = \frac{v_l - v_r}{H} \quad (31)$$

这样由移动机器人的移动线速度和角速度就可以得到左右轮线速度, 继而得到电机的期望转速。

4 仿真示例

考虑如式(1)所示的移动机器人运动学模型, 取移动机器人质心到驱动轮轴心的距离 d 为 0.2 m, 移动机器人质心距传感器中心连线的垂直距离 l 为 0.3 m, 移动机器人两驱动轮中心之间的距离 H 为 0.2 m。设定主从机器人之

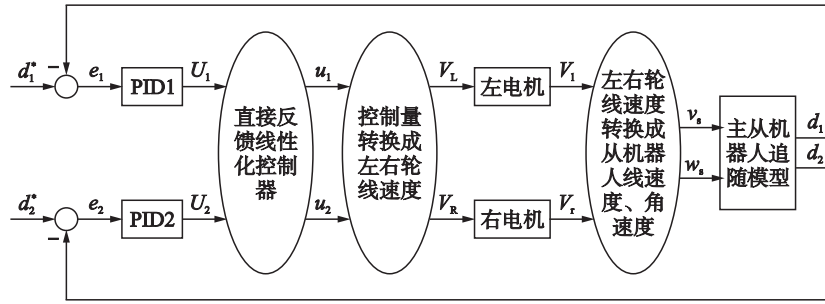


图4 直接反馈线性化的PID控制框图

Fig.4 The control block diagram of PID based on direct feedback linearization

间的期望横、纵向间距分别为 $d_1^* = 3 \text{ m}$, $d_2^* = 4 \text{ m}$, 主机器人的线速度 $v_m = 1 \text{ m/s}$, 角速度 $w_m = 0.26 \text{ rad/s}$. 另外, 式 (16) 是在假设移动机器人做纯滚动且无外部扰动下得到的模型, 为了验证所设计控制器的抗干扰能力, 人为加入扰动项 $n(t)$, 仿真时给定 $n(t)$ 为每 10 s 加入一次强度为 0.3 的脉冲信号来模拟轮胎打滑等干扰. 取采样周期为 0.005 s, 采用的直接反馈线性化 PID 方法仿真所调参数如下:

$$\begin{cases} k_1 = 10, k_2 = 10 \\ k_p = 0.8, k_i = 1, k_d = 0.05 \end{cases} \quad (32)$$

其中, k_1 和 k_2 是直接反馈线性化参数, 根据系统响应的快慢需求预先调试得到. 主从机器人的运动轨迹以及横向和纵向间距跟踪的仿真曲线如图 5 ~ 图 7 所示. 图 5 给出了主从机器人各自的运动轨迹, 可见从机器人经过快速地调整就能保持与主机器人相同形状的轨迹运行, 进一步图 6 给出了主从机器人各自在全局坐标系中的横纵向坐标, 对比可知其横纵向坐标差能快速稳定并保持不变, 最后图 7 说明了横纵向坐标差的稳定值为期望值, 并且不被外界扰动所影响, 以上说明基于直接反馈线性化的 PID 控制方法可以实现精确轨迹跟踪并具有一定的抗扰动能力.

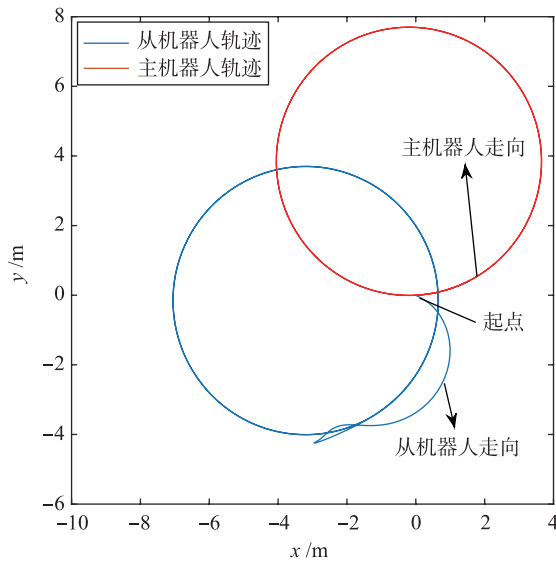


图5 主从机器人运动轨迹图

Fig.5 The trajectory diagram of master-slave robots

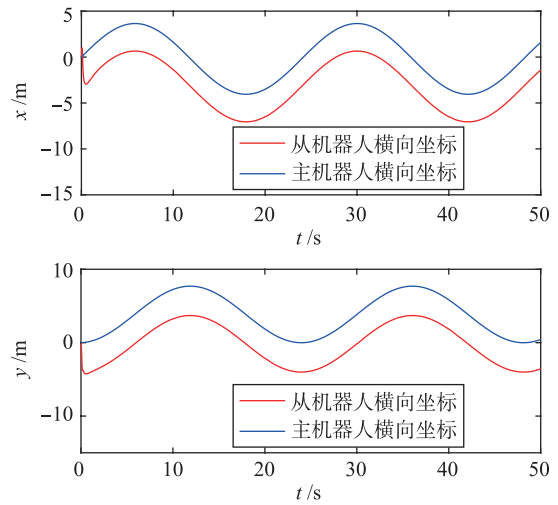


图6 主从机器人横纵向坐标对比图

Fig.6 Comparison of the horizontal and vertical coordinates of master-slave robots

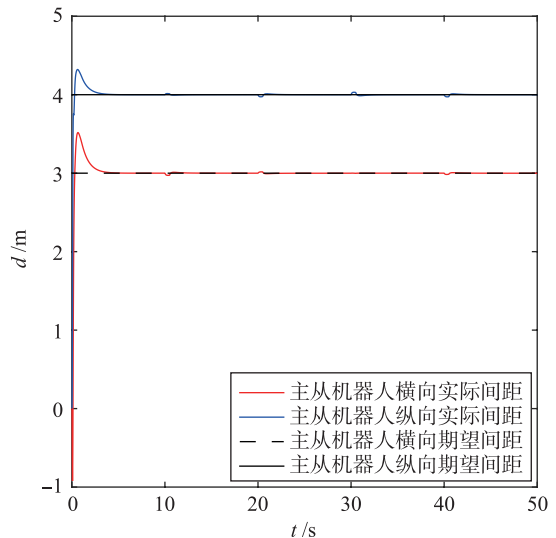


图7 主从机器人横纵向间距跟踪图

Fig.7 The horizontal and vertical distance tracking diagram of master-slave robots

进一步, 考虑移动机器人质心位置测量存在不确定性的情况. 仍设定主从机器人之间的期望横纵向间距分别为

$d_1^* = 3 \text{ m}$, $d_2^* = 4 \text{ m}$, 以及主机器人的线速度 $v_m = 1 \text{ m/s}$, 角速度 $w_m = 0.26 \text{ rad/s}$, 并保持直接反馈线性化 PID 控制器的所有参数不变, 仅改变 d 为 0.5 m , 从而判定该方法对内部参数的抗扰能力. 仿真曲线如图 8 ~ 图 10 所示, 其轨迹跟踪效果和抗扰能力分析同上.

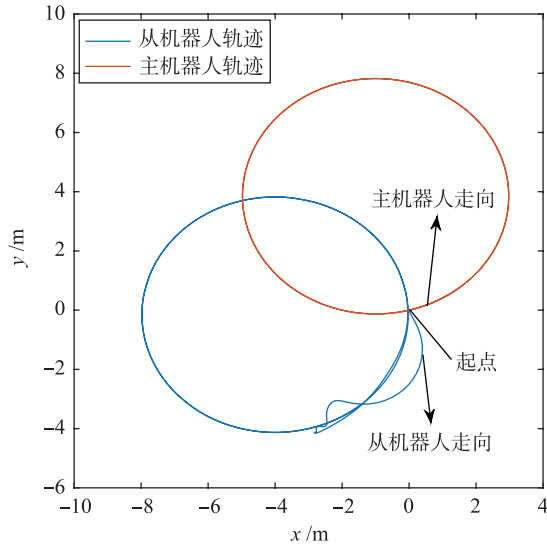


图 8 主从机器人运动轨迹图 ($d = 0.5 \text{ m}$)

Fig.8 The trajectory diagram of master-slave robots ($d = 0.5 \text{ m}$)

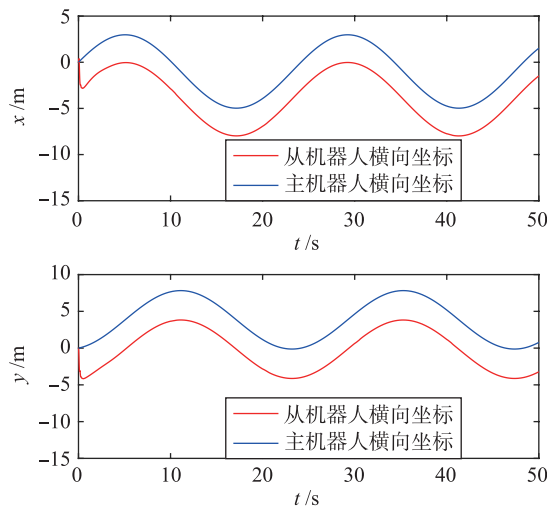


图 9 主从机器人横纵向坐标对比图 ($d = 0.5 \text{ m}$)

Fig.9 Comparison of the horizontal and vertical coordinates of master-slave robots ($d = 0.5 \text{ m}$)

5 实验验证

为了进一步验证上述算法的可靠性和实际控制效果, 在自主研发的移动机器人平台上进行了轨迹跟踪实验, 原型如图 11 所示. 设定移动机器人之间的期望横、纵向间距分别为 $d_1^* = 1 \text{ m}$, $d_2^* = 1 \text{ m}$, 以及主机器人的线速度 $v_m = 0.1 \text{ m/s}$, 角速度 $w_m = 0.1 \text{ rad/s}$, 采样周期为 0.01 s . 以主移动机器人起始点为全局坐标系原点, 并设定从移动机器人的初始位置为 $(-1.5 \text{ m}, -1.5 \text{ m})$. 所谓直接反馈线

性化 PID 方法的参数如下:

$$\begin{cases} k_1 = 1, k_2 = 1 \\ k_p = 0.8, k_i = 0.5, k_d = 0.08 \end{cases} \quad (33)$$

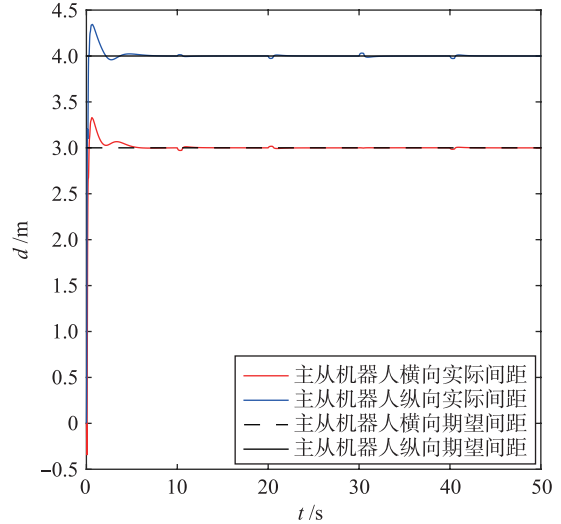


图 10 主从机器人横纵向间距跟踪图 ($d = 0.5 \text{ m}$)

Fig.10 The horizontal and vertical distance tracking diagram of master-slave robots ($d = 0.5 \text{ m}$)

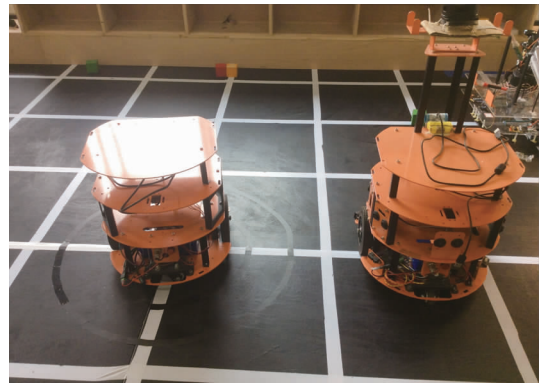


图 11 双差速驱动移动机器人的原型系统

Fig.11 The double differential driving prototype system diagram of mobile robot

从移动机器人通过无线通信获取主移动机器人的实时位置和速度信息, 并结合算法给出从移动机器人两差动轮的控制速度, 利用上位机记录主从移动机器人的实时轨迹如图 12 所示, 此外将记录的主从移动机器人在全局坐标系中的横纵向坐标值导入 Matlab 中得到主从移动机器人在全局坐标系中的横纵向坐标对比图以及主从机器人横纵向间距跟踪图, 如图 13 ~ 图 15 所示, 从实验结果图可知其横纵向坐标差能快速稳定并保持在期望值左右, 对实验数据进行分析, 发现系统动态过程无超调量, 当系统跟踪误差为期望值的 2% 时的调节时间为 1.9 s . 稳态过程中系统稳态误差在波动并始终维持在期望值的 1% 范围内, 实验结果验证了本方法可以达到较为满意的响应速度和控制精度.

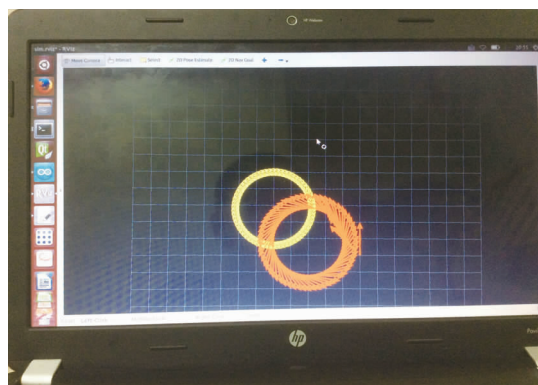


图 12 上位机中主从机器人轨迹跟踪图

Fig.12 The trajectory diagram of master-slave robots in host computer

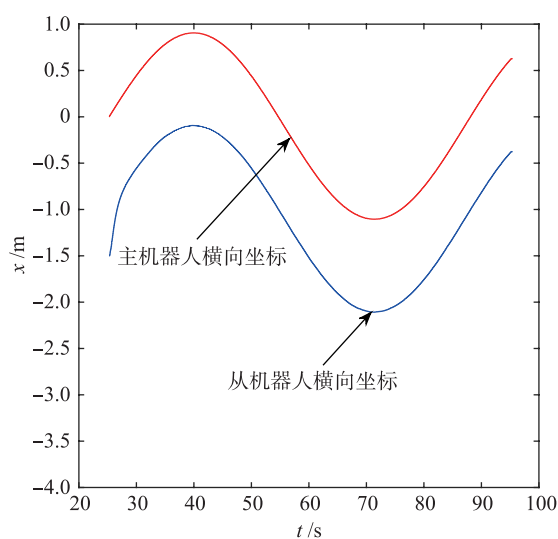


图 13 主从机器人实际横向坐标对比图

Fig.13 Comparison of the horizontal coordinates of master-slave robots in the experiment

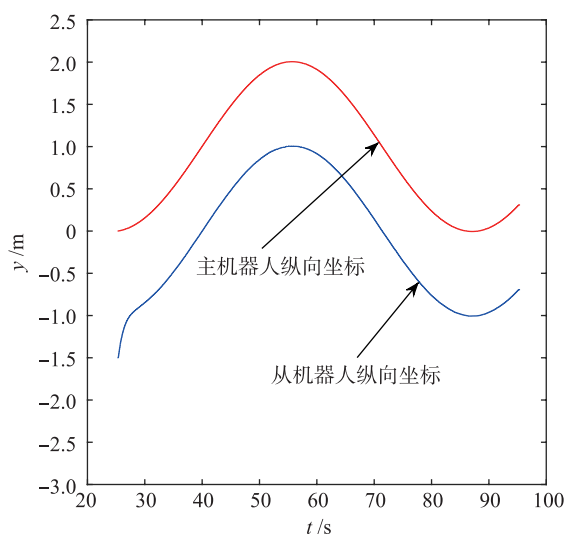


图 14 主从机器人实际纵向坐标对比图

Fig.14 Comparison of the vertical coordinates of master-slave robots in the experiment

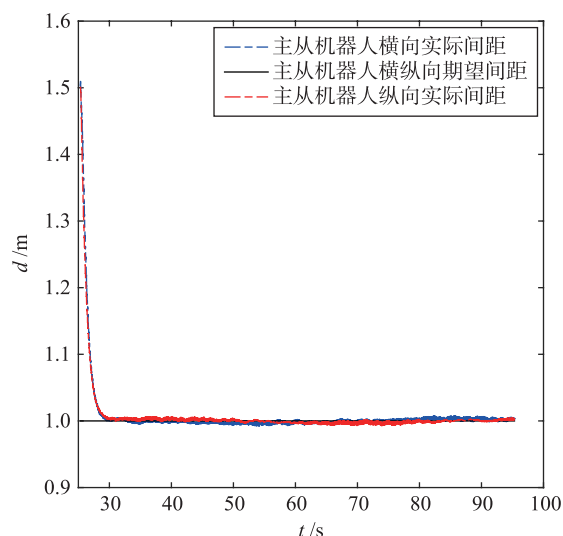


图 15 主从机器人实际横纵向间距跟踪图

Fig.15 The horizontal and vertical distance tracking diagram of master-slave robots in the experiment

为了更进一步说明此方法具有一定的抗干扰能力, 在从机器人非质心位置加入额外负载从而改变摩擦力等以提供外界扰动, 此外额外负载的加入也改变了移动机器人的质心位置从而改变了质心与轮轴中心间的距离 d 以提供内部参数扰动, 仍设定主从机器人之间的期望横纵向间距分别为 $d_1^* = 1 \text{ m}$, $d_2^* = 1 \text{ m}$, 以及主机机器人的线速度 $v_m = 0.1 \text{ m/s}$, 角速度 $w_m = 0.1 \text{ rad/s}$, 采样周期为 0.01 s , 并保持直接反馈线性化 PID 控制器的所有参数不变, 将实验记录的主从移动机器人在全局坐标系中的横纵向坐标值导入 Matlab 中得到主从移动机器人在全局坐标系中的横纵向坐标对比图以及主从机器人横纵向间距跟踪图, 如图 16 ~ 图 18 所示, 从实验结果图可知其横纵向坐标差能快速稳定并保持在期望值左右, 验证了上述算法一定的抗干扰能力。

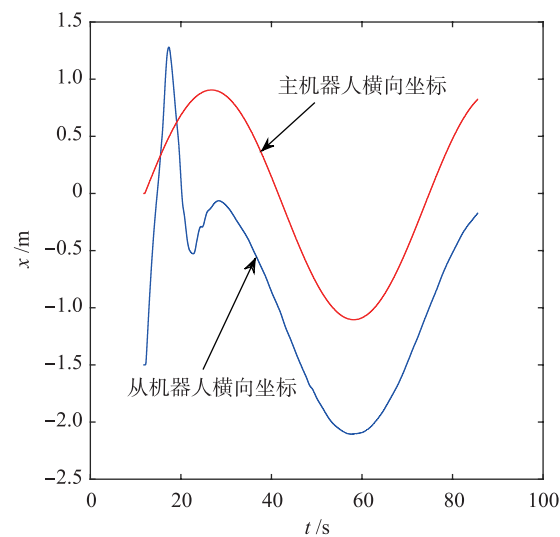


图 16 主从机器人加入扰动后的横向坐标对比图

Fig.16 Comparison of the horizontal coordinates of master-slave robots considering the disturbances

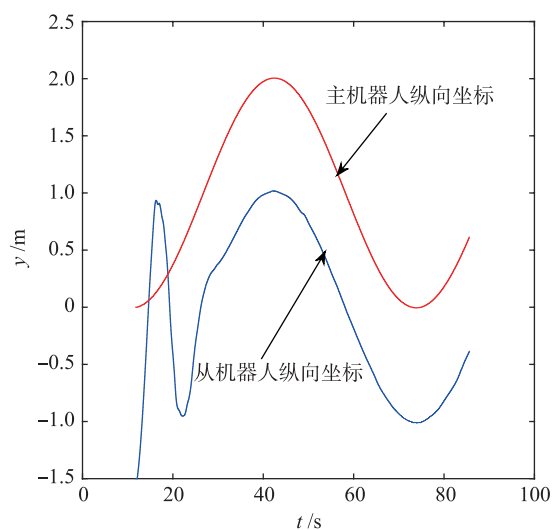


图 17 主从机器人加入扰动后的纵向坐标对比图

Fig.17 Comparison of the vertical coordinates of master-slave robots considering the disturbances

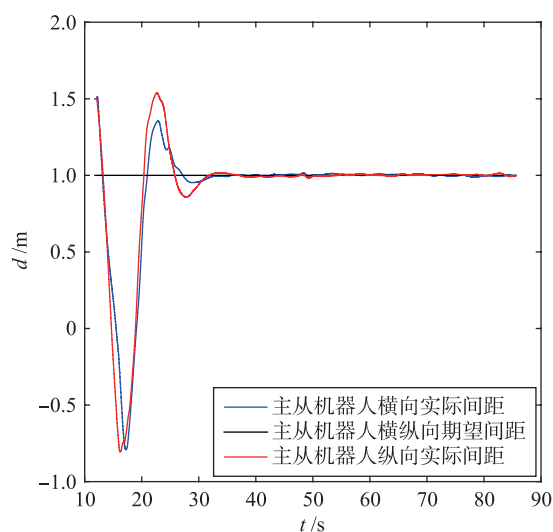


图 18 主从机器人加入扰动后的横纵向间距跟踪图

Fig.18 The horizontal and vertical distance tracking diagram of master-slave robots considering the disturbances

6 结论

本文研究了移动机器人的轨迹跟踪控制问题,设计并实现了基于直接反馈线性化的 PID 控制方法.首先,论文分析了主从移动机器人的动态特性,得到了主从移动机器人的追从误差数学模型.在此基础上,考虑到实际运动中

轮子打滑等不确定性和外界干扰因素的影响,导出一种带扰动的非线性耦合系统,进而采用直接反馈线性化方法获得线性化模型,并设计了具有稳定性保证的 PID 控制器.仿真和实验结果验证了所设计方法的有效性.

参考文献

- [1] Gritli H, Khraief N, Belghith S. Period-three route to chaos induced by a cyclic-fold bifurcation in passive dynamic walking of a compass-gait biped robot[J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2012, 17(11): 4356–4372.
- [2] Cha Y S, Kim K G, Lee J Y, et al. MAHRU-M: A mobile humanoid robot platform based on a dual-network control system and coordinated task execution[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2011, 59(6): 354–366.
- [3] Park B S, Yoo S J, Jin B P, et al. A simple adaptive control approach for trajectory tracking of electrically driven nonholonomic mobile robots[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(5): 1199–1206.
- [4] Brockett, Roger W. Differential geometric control theory[M]. Boston, USA: Birkhauser, 1983.
- [5] Tamoghna D, Kar I N. Design and implementation of an adaptive fuzzy logic-based controller for wheeled mobile robots[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(3): 501–510.
- [6] Samson C, Ait-Abderrahim K. Feedback control of a nonholonomic wheeled cart in cartesian space[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1991: 1136–1141.
- [7] Yang J, Ma R, Zhang Y R, et al. Sliding mode control for trajectory tracking of intelligent vehicle[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 33(3): 1160–1167.
- [8] Li Y D, Wang Z Y, Zhu L, et al. A sliding mode trajectory tracking control for mobile robots based on global vision[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(11): 9–11.
- [9] Proano P, Capito L, Rosales A, et al. Sliding mode control: Implementation like PID for trajectory-tracking for mobile robots[J]. Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering, 2015, 21(14): 220–225.
- [10] Liang Y, Xu L, Wei R, et al. Adaptive fuzzy control for trajectory tracking of mobile robot[C]//2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 4755–4760.
- [11] Kanayama Y, Kimura Y, Miyazaki F, et al. A stable tracking control method for an autonomous mobile robot[C]//Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1990: 384–389.
- [12] Jiang D, Zhong P, Nijmeijer H. Tracking control of mobile robots: A case study in backstepping[J]. Automatica, 1997, 33(7): 1393–1399.
- [13] Park B S, Yoo S J, Jin B P, et al. A simple adaptive control approach for trajectory tracking of electrically driven nonholonomic mobile robots[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(5): 1199–1206.
- [14] Yoo S J. Adaptive tracking control for a class of wheeled mobile robots with unknown skidding and slipping[J]. IET Control Theory & Applica-

- tions, 2010, 4(10): 2109–2119.
- [15] Jian C, Jia B, Zhang K. Trifocal tensor-based adaptive visual trajectory tracking control of mobile robots[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 3(9): 1–15.
- [16] Chwa D. Fuzzy adaptive tracking control of wheeled mobile robots with state-dependent kinematic and dynamic disturbances[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 20(3): 587–593.
- [17] Su K H, Chen Y Y, Su S F. Design of neural-fuzzy-based controller for two autonomously driven wheeled robot[J]. Neurocomputing, 2010, 73(4): 2478–2488.
- [18] Li Z, Deng J, Lu R, et al. Trajectory-tracking control of mobile robot systems incorporating neural-dynamic optimized model predictive approach[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2015, 46(6): 1.
- [19] 赵石磊, 郭红, 刘宇鹏. 基于轨道跟踪的线性时滞系统容错控制[J]. 信息与控制, 2015, 44(4): 469–473.
Zhao S L, Guo H, Liu Y P. Fault tolerant control for linear time-delay system based on trajectory tracking[J]. Information and Control, 2015, 44(4): 469–473.
- [20] Raeisi Y, Shojaei K, Chatraei A. Output feedback trajectory tracking control of a car-like drive wheeled mobile robot using RBF neural network [C]//Power Electronics, Drives Systems & Technologies Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 363–368.
- [21] Mahmoodabadi M J, Taherkhorsandi M, Bagheri A. Optimal robust sliding mode tracking control of a biped robot based on ingenious multi-objective PSO[J]. Neurocomputing, 2014, 124(2): 194–209.
- [22] Guo J, Hu P, Li L, et al. Design of automatic steering controller for trajectory tracking of unmanned vehicles using genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 2913–2924.
- [23] Chen H, Ma M M, Wang H, et al. Moving horizon H_∞ tracking control of wheeled mobile robots with actuator saturation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(2): 449–457.
- [24] 杨芳, 王朝立. 具有未知视觉参数的非完整移动机器人的自适应动态反馈跟踪控制[J]. 信息与控制, 2012, 41(1): 57–62.
Yang F, Wang C L. Tracking control based on adaptive dynamic feedback for nonholonomic mobile robots with unknown camera parameters [J]. Information and Control, 2012, 41(1): 57–62.
- [25] Aissa B C, Fatima C. Adaptive neuro-fuzzy control for trajectory tracking of a wheeled mobile robot[C]//International Conference on Electrical Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015.
- [26] 陈罡, 高婷婷, 贾庆伟, 等. 带有未知参数和有界干扰的移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(4): 491–496.
Chen G, Gao T T, Tia Q W, et al. Trajectory tracking control for nonholonomic mobile robots with unknown parameters and bounded disturbance[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(14): 491–496.
- [27] Khalaji A K, Moosavian S A A. Robust adaptive controller for a tractor-trailer mobile robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(3): 943–953.
- [28] 刘国荣, 张扬名. 移动机器人轨迹跟踪的模糊 PID-P 型迭代学习控制[J]. 电子学报, 2013, 41(8): 1536–1541.
Liu G R, Zhang Y M. Trajectory tracking of mobile robots based on fuzzy PID-P type iterative learning control[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(8): 1536–1541.
- [29] Kayacan E, Kayacan E, Ramon H, et al. Towards agrobots: Trajectory control of an autonomous tractor using type-2 fuzzy logic controllers [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 20(1): 287–298.

作者简介

冯 剑(1991–), 男, 硕士生. 研究领域为移动机器人轨迹跟踪控制.

张文安(1982–), 男, 博士, 教授. 研究领域为移动机器人定位与导航, 多传感器信息融合, 网络化控制.

倪洪杰(1978–), 男, 博士生, 高级工程师. 研究领域为控制工程, 工业自动化.