

具有不确定滑转的轮式移动机器人轨迹跟踪控制方法

吴昊, 梁忠超, 王文成, 王永富

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 轮式移动机器人在松软复杂地形条件下容易发生车轮滑转, 影响轨迹跟踪精度. 为提高机器人在该情况下的轨迹跟踪准确性, 提出了一种基于容错控制的自适应滑转补偿控制器. 首先, 考虑车轮滑转率建立了四轮移动机器人运动学模型, 并构建了相应的轨迹跟踪误差模型; 然后, 根据容错控制方法设计了滑转补偿项, 并基于Lyapunov稳定性理论证明了自适应滑转补偿控制器的稳定性, 实现了对由车轮滑转引起的速度误差的准确补偿; 最后, 利用四轮移动机器人进行了两种工况下的实验验证. 结果表明, 设计的控制器能够使移动机器人在未知的车轮滑转率条件下准确跟踪理想路径, 并且相较于常规控制器有更强的鲁棒性和更高的跟踪精度.

关键词: 轮式移动机器人; 松软地形; 车轮滑转; 轨迹跟踪; 容错控制

中图分类号: TP 242 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)06-0858-08

Trajectory Tracking Control Method of Wheeled Mobile Robot with Uncertain Slippage

WU Hao, LIANG Zhong-chao, WANG Wen-cheng, WANG Yong-fu

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIANG Zhong-chao, E-mail: liangzc@me.neu.edu.cn)

Abstract: Wheeled mobile robots are prone to wheel slippage on soft and complex terrains, which affects trajectory tracking accuracy. To improve the trajectory tracking accuracy of robots under such conditions, an adaptive slip compensation controller (ASCC) based on fault-tolerant control (FTC) is proposed. Firstly, a kinematic model of a four-wheeled mobile robot (4 WMR) is established by considering wheel slippage rates, and the corresponding trajectory tracking error model is constructed. Then, based on the FTC method, a slippage compensation term is designed. The stability of the ASCC is proven using Lyapunov stability theory, achieving accurate compensation for the velocity error caused by wheel slippage. Finally, experiments under two working conditions are conducted on the 4 WMR. The results show that the designed controller enables the mobile robot to track the desired path under unknown wheel slippage rates, and it exhibits stronger robustness and higher tracking accuracy compared to the conventional controllers.

Key words: wheeled mobile robot; soft terrain; wheel slippage; trajectory tracking; fault-tolerant control(FTC)

移动机器人在家庭服务及星球探测等方面的应用十分广泛^[1]. 轨迹跟踪控制是实现上述应用的基础之一, 研究人员对其进行了深入研究, 并提出了不同的控制方法, 如模型预测控制^[2]、模糊控制^[3]等. 但是, 当轮式移动机器人在松软地形

运动时, 易发生车轮滑转和沉陷现象^[4], 影响轨迹跟踪精度. 近年来国内外诸多学者针对移动机器人轨迹跟踪过程中的车轮滑转问题进行了研究. Cui等^[5]针对轮式移动机器人存在纵向和横向滑移情况的轨迹跟踪问题提出了一种自适应控制

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52475007); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2403009).

作者简介: 吴昊(1999-), 男, 安徽滁州人, 东北大学硕士研究生; 梁忠超(1984-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

方法,引入滑模观测器在线实时估计滑移参数. Ryu等^[6]将车轮滑转作为干扰,设计了一种鲁棒控制器,并通过仿真和实验验证了在存在车轮滑转情况下的有效性. Hoang等^[7]提出了一种基于在线权值更新律的神经网络自适应控制器,通过神经网络对车轮滑转引起的不确定性进行在线补偿,以达到预期的跟踪性能. Liao等^[8]提出了一种基于动态模型的协调自适应鲁棒控制器,该控制器中最底层控制器用于控制车轮滑转率以达到理想值,在一定程度上补偿车轮的高滑转率. Gao等^[9]在假定车轮滑转率可测的前提下,设计了一种基于神经网络和车轮滑转补偿的自适应轨迹跟踪控制器,该控制器的轨迹跟踪误差小、稳定性强. Chen等^[10]在控制方案设计中开发了扰动观测器处理打滑、滑移和输入扰动,再利用扰动观测器,制定鲁棒跟踪控制方案. Tian等^[11]建立了受车轮滑转影响的两轮移动机器人整体动力学模型,并提出了滑模控制方法. Yoo^[12]设计了非线性扰动观测器估计移动机器人的车轮滑转率,并设计了自适应神经网络轨迹跟踪控制器. Ding等^[13]提出了一种响应地形变形的新型变量RC用于估计可变形地形上的驱动扭矩和滑移比,滑移估计有效地将速度跟踪误差从20%以上降低到10%以下. Degel等^[14]为了提高轨迹跟踪性能,对车轮的驱动电机进行了研究并提出了一种稳健滑移控制系统,具有良好的跟踪性能.

目前大部分学者都将车轮滑转当作扰动处理,或者先行测量滑转率再设计控制器. 本文采用容错控制方法对由车轮滑转导致的误差项进行补偿,在未知车轮滑转率的前提下设计了轨迹跟踪控制器.

1 模型搭建

1.1 考虑车轮滑转的机器人运动学建模

本文以四轮移动机器人为研究对象,在速度较小的情况下,假设其结构完全对称,并且同侧轮速相同. 如图1所示,定义全局坐标系为 (XOY) ,以机器人几何中心为原点建立局部坐标系 (xoy) ,以行进方向为 x 轴正方向, y 轴正方向垂直向左. 定义机器人在全局坐标下的位置向量为 $q=[X, Y, \theta]^T$,则向量 $\dot{q}=[\dot{X}, \dot{Y}, \dot{\theta}]^T$ 为机器人在全局坐标系下的速度向量. 定义局部坐标系中的速度向量为 $v=[v_x, v_y, \omega]^T$.

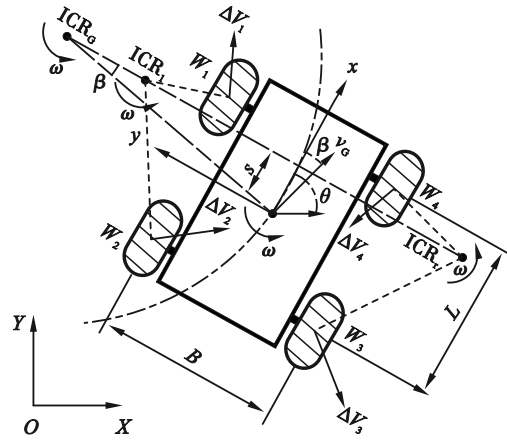


图1 四轮移动机器人运动学模型

Fig. 1 Kinematics model of four-wheeled mobile robot

由图1可得全局坐标系与局部坐标系中的速度向量的关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (1)$$

在上述假设下,机器人质心处的速度、角速度与左右两侧轮速的关系为

$$\begin{bmatrix} v_x \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2b^{-1} & 2b^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中, ω_L 和 ω_R 分别表示左侧轮速和右侧轮速:

$$\omega_L = \omega_1 = \omega_2, \quad \omega_R = \omega_3 = \omega_4.$$

将式(2)代入到式(1)中,可得到在上述假设下,四轮移动机器人的运动学方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{r}{2b} \begin{bmatrix} b \cos \theta & b \cos \theta \\ b \sin \theta & b \sin \theta \\ -2 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式(3)在四轮移动机器人上有着广泛运用^[15]. 本文将四轮移动机器人等效为差速驱动机器人.

为描述车轮滑动程度,引入车轮滑转率^[16]:

$$s_i = (\omega_i r - v_{ix}) / \omega_i r. \quad (4)$$

其中: ω_i 为各轮角速度; v_{ix} 为各轮轮轴的纵向速度. 考虑不完全滑转情况,即 $0 < s_i < 1 (i=L, R)$.

将式(4)代入式(2)可得机器人的正运动学方程:

$$\begin{bmatrix} v_{xs} \\ \omega_s \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} 1-s_L & 1-s_R \\ -2b^{-1}(1-s_L) & 2b^{-1}(1-s_R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中: s_L, s_R 分别为左、右侧车轮的滑转率; ω_L, ω_R 分别为左、右车轮的转速. 将式(5)代入式(1),得到考虑车轮滑转的机器人运动学方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{r}{2b} \begin{bmatrix} b(1-s_L) \cos \theta & b(1-s_R) \cos \theta \\ b(1-s_L) \sin \theta & b(1-s_R) \sin \theta \\ -2(1-s_L) & 2(1-s_R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix}. \quad (6)$$

1.2 轨迹跟踪误差模型

假设存在一个沿参考轨迹运动的虚拟机器人,则该机器人的运动方程可以表征此参考轨迹.用 M_r, M_b 分别表示参考和被控机器人,运动学方程由式(1)表示.定义 x_e, y_e, θ_e 为 M_r 和 M_b 在横、纵轴上的位置误差和姿态角误差,如图2所示.

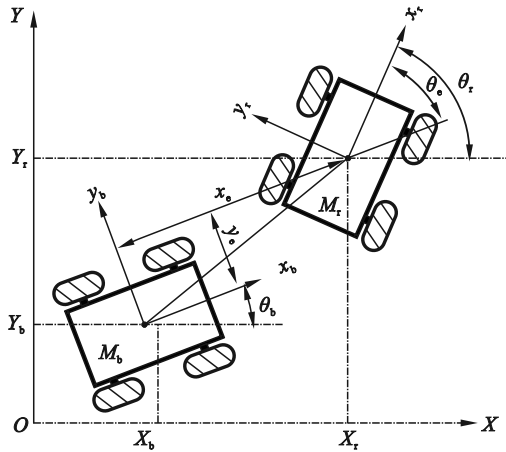


图2 轨迹跟踪模型
Fig. 2 Trajectory tracking model

将 M_r 和 M_b 的运动学方程做差,并进行坐标转换,得到轨迹跟踪的位姿误差表示为

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_b & \sin \theta_b & 0 \\ -\sin \theta_b & \cos \theta_b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r - X_b \\ Y_r - Y_b \\ \theta_r - \theta_b \end{bmatrix}. \quad (7)$$

2 滑转补偿控制器设计及稳定性分析

2.1 滑转补偿控制器设计

轨迹跟踪控制的目标为通过设计合适的输入 v_{xs} 和 ω_s ,使得系统的位姿误差在该控制输入作用下一致有界.由于车轮滑转率大小未知,无法通过式(5)得到左右两侧车轮的理想转速 ω_L 和 ω_R .因此,需要将控制输入量由 v_{xs} 和 ω_s 变换为 v_x 和 ω .对式(5)的变换为

$$\begin{cases} v_{xs} = [(1-s_L)(\omega_L + \omega_R) + (s_L - s_R)\omega_R]r/2 = \\ (1-s_L)v_x + (s_L - s_R)\omega_R r/2 = v_{xs1}, \\ \omega_s = [-(1+s_L)(\omega_L - \omega_R) + (s_L - s_R)\omega_R]r/b = \\ (1-s_L)\omega + (s_L - s_R)\omega_R r/b = \omega_{s1}. \end{cases} \quad (8)$$

同理可得

$$\begin{cases} v_{xs} = (1-s_R)v_x - (s_L - s_R)\omega_L r/2 = v_{xs2}, \\ \omega_s = (1-s_R)\omega + (s_L - s_R)\omega_L r/b = \omega_{s2}. \end{cases} \quad (9)$$

为综合左右侧车轮滑转率对车体质心运动

速度的影响,对式(9)进行变形:

$$\begin{cases} v_{xs} = (v_{xs1} + v_{xs2})/2 = (1 - \Delta_1)v_x + d_v, \\ \omega_s = (\omega_{s1} + \omega_{s2})/2 = (1 - \Delta_1)\omega + d_\omega. \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\Delta_1 = (s_L + s_R)/2$; $d_v = (s_L - s_R)b\omega/4$; $d_\omega = v_x(s_L - s_R)b^{-1}$.由于机器人存在输入限制,故定义 $|\Delta_1| \leq h_1 < 1, |d_v| \leq h_2$ (h_1, h_2 为未知常数). d_v, d_ω 分别为当左右侧车轮滑转率不一致时,产生的速度误差和角速度误差.考虑车轮滑转率的误差微分方程有

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e + \omega_s y_e - v_{xs} \\ v_r \sin \theta_e - \omega_s x_e \\ \omega_r - \omega_s \end{bmatrix}. \quad (11)$$

基于式(11),采用自适应容错控制方法所设计得到的滑转补偿控制器为

$$\begin{cases} v_x = v_{x1} + v_{x2}, \\ \omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3, \end{cases} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} v_{x1} = v_r \cos \theta_e + k_1 x_e; \\ v_{x2} = (\hat{h}_2 + \hat{h}_4) \text{sgn}(x_e); \\ \omega_1 = \frac{k_3 z + \hat{h}_{10} |x_e| \text{sgn}(z)}{\cos \theta_e + k_2 x_e}; \\ \omega_2 = \frac{y_e v_r + \omega_r \cos \theta_e + k_2 v_r \sin \theta_e}{\cos \theta_e + k_2 x_e}; \\ \omega_3 = (\hat{h}_7 - (\hat{h}_{11} + \hat{h}_{12} |x_e|) \hat{h}_1^{-1}) \text{sgn}(z). \end{cases}$$

控制器中的参数自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\hat{h}}_2 = p_1 |x_e|, \\ \dot{\hat{\lambda}}_3 = p_2 \lambda_{2a} |x_e|, \\ \dot{\hat{h}}_{10} = p_3 |x_e| |z|, \\ \dot{\hat{h}}_{11} = p_4 |z|, \\ \dot{\hat{h}}_{12} = p_5 |x_e| |z|. \end{cases} \quad (13)$$

2.2 控制器稳定性分析

本节将基于 Lyapunov 稳定性理论分析控制器的稳定性.按容错控制的方法定义 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 = |v_{x1}| + \hat{h}_2 + \lambda_1 > 0, \hat{\lambda}_3 = (1 - \hat{h}_1)^{-1}, \hat{h}_4 = (\hat{\lambda}_3 - 1)\lambda_2$.上述参数中的 $\hat{h}_1, \hat{h}_2, \hat{h}_4$ 及 $\hat{\lambda}_3$ 分别表示 h_1, h_2, h_4 和 λ_3 的估计值,定义估计误差 $\tilde{h}_2 = h_2 - \hat{h}_2, \tilde{\lambda}_3 = \lambda_3 - \hat{\lambda}_3$.令 $p_i > 0 (i=1, 2)$,定义部分 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} x_e^2 + \frac{1}{2} y_e^2 + \frac{1}{2p_1} \tilde{h}_2^2 + \frac{1-h_1}{2p_2} \tilde{\lambda}_3^2. \quad (14)$$

结合式(10)和式(11),对式(14)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & x_e(-v_x + v_r \cos \theta_e) + v_r y_e \sin \theta_e + \Delta_1 v_x x_e + \\ & h_2 |x_e| - p_1^{-1} \tilde{h}_2 \dot{\hat{h}}_2 - p_2^{-1} (1 - h_1) \tilde{\lambda}_3 \dot{\hat{\lambda}}_3. \end{aligned} \quad (15)$$

将式(12)中 v_x 和式(13)中 \hat{h}_2 代入式(15)可得

$$\dot{V}_1 \leq -k_1 x_e^2 - \hat{h}_4 |x_e| + v_r y_e \sin \theta_e - p_2^{-1} (1 - h_1) \tilde{\lambda}_3 \hat{\lambda}_3 + h_1 |x_e| (|v_{x1}| + \hat{h}_2 + \lambda_1 - \lambda_1 + \hat{h}_4). \quad (16)$$

将定义的参数 $\lambda_1, \lambda_2, \hat{\lambda}_3, \hat{h}_4$ 和 $\hat{\lambda}_3$ 代入式(16)有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & -k_1 x_e^2 + v_r y_e \sin \theta_e - p_2^{-1} (1 - h_1) \tilde{\lambda}_3 \hat{\lambda}_3 + \\ & |x_e| \left[-h_1 \lambda_1 - (1 - h_1) (\lambda_3 - \tilde{\lambda}_3) \lambda_{2a} + \lambda_{2a} \right] = \\ & -k_1 x_e^2 - h_1 \lambda_1 |x_e| + v_r y_e \sin \theta_e. \end{aligned} \quad (17)$$

根据反步法思想,将状态变量 $\sin \theta_e$ 作为虚拟控制量,构造虚拟反馈变量 $\sin \theta_e = -k_2 y_e (k_2 > 0)$.由此构造新的误差变量为

$$z = \sin \theta_e + k_2 y_e. \quad (18)$$

按容错控制的方法定义参数 $\hat{h}_7 = (\hat{\lambda}_3 - 1) \lambda_5$, 其中, $\lambda_5 = |\omega_1 + \omega_2| + \lambda_4 > 0, \lambda_4 > 0$.

定义 $\tilde{h}_1 = h_1 - \hat{h}_1, |k_2(\Delta_1 \omega - d_\omega)| \leq h_{10}$ (h_{10} 为未知正常数),并定义其他误差项为

$$\left. \begin{aligned} d_3 &= \omega_3 \cos \theta_e + d_\omega \cos \theta_e - \hat{h}_7 \operatorname{sgn}(z) - \\ & \tilde{h}_1 (|\omega_1 + \omega_2| \operatorname{sgn}(z) + \omega_3), \\ d_4 &= \omega_3 k_2. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

由式(13)可知 $\hat{\lambda}_3 \geq 0$,若 $\hat{\lambda}_3$ 的初值大于1,则有 $\hat{h}_1 = 1 - \hat{\lambda}_3^{-1}$ 有界,故 d_3 有界.定义 $|d_3| \leq h_{11}, |d_4| \leq h_{12}$ (h_{11}, h_{12} 为未知正常数).定义 h_{10}, h_{11}, h_{12} 的估计值分别为 $\hat{h}_{10}, \hat{h}_{11}, \hat{h}_{12}$,估计误差分别为: $\tilde{h}_{10} = h_{10} - \hat{h}_{10}, \tilde{h}_{11} = h_{11} - \hat{h}_{11}$ 和 $\tilde{h}_{12} = h_{12} - \hat{h}_{12}$.

取 $p_i > 0 (i=3, 4, 5)$,设全局 Lyapunov 函数:
 $V = V_1 + 2^{-1} z^2 + 2^{-1} p_3^{-1} \tilde{h}_{10}^2 + 2^{-1} p_4^{-1} \tilde{h}_{11}^2 + 2^{-1} p_5^{-1} \tilde{h}_{12}^2. \quad (20)$

对式(20)求导,并将式(17)和式(18)代入可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_1 x_e^2 - h_1 \lambda_1 |x_e| - k_2 v_r y_e^2 + z \Delta_1 \omega \cos \theta_e + \\ & z (d_\omega \cos \theta_e + v_r y_e + \omega_r \cos \theta_e + k_2 v_r \sin \theta_e) + \\ & z [-\omega (\cos \theta_e + k_2 x_e) + k_2 (\Delta_1 \omega - d_\omega) x_e] - \\ & p_3^{-1} \tilde{h}_{10} \hat{h}_{10} - p_4^{-1} \tilde{h}_{11} \hat{h}_{11} - p_5^{-1} \tilde{h}_{12} \hat{h}_{12}. \end{aligned}$$

再将式(12)中控制输入 ω_1 和 ω_2 代入有

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_1 x_e^2 - h_1 \lambda_1 |x_e| - k_2 v_r y_e^2 - k_3 z^2 - p_4^{-1} \tilde{h}_{11} \hat{h}_{11} - \\ & z (\omega_3 \cos \theta_e + d_\omega \cos \theta_e + \omega_3 k_2 x_e) - p_5^{-1} \tilde{h}_{12} \hat{h}_{12} + \\ & \hat{h}_1 (|\omega_1 + \omega_2| |z| + \omega_3 z) + \tilde{h}_1 (|\omega_1 + \omega_2| |z| + \omega_3 z). \end{aligned}$$

将式(19)代入并化简可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_1 x_e^2 - h_1 \lambda_1 |x_e| - k_2 v_r y_e^2 - k_3 z^2 + h_{11} |z| + \\ & h_{12} |x_e| |z| - \hat{h}_7 |z| + \hat{h}_1 (|\omega_1 + \omega_2| |z| + \omega_3 z) - \\ & p_4^{-1} \tilde{h}_{11} \hat{h}_{11} - p_5^{-1} \tilde{h}_{12} \hat{h}_{12}. \end{aligned}$$

将式(12)中控制输入 ω_3 代入有

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_1 x_e^2 - h_1 \lambda_1 |x_e| - k_2 v_r y_e^2 - k_3 z^2 - \\ & \hat{h}_7 |z| + \hat{h}_1 (|\omega_1 + \omega_2| |z| + \omega_3 z). \end{aligned}$$

采用容错控制的方法处理:

$$\dot{V} \leq -k_1 x_e^2 - h_1 \lambda_1 |x_e| - k_2 v_r y_e^2 - k_3 z^2 - \hat{h}_1 \lambda_4 |z|. \quad (21)$$

根据式(21)可得 $\dot{V}_a \leq 0$,即控制器(12)和自适应律(13)可以使得全局 Lyapunov 函数的导数半负定,故 V 有界,所以 x_e, y_e, z, θ_e 均有界,又因为 ω 与 v 均有界,故 $\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{\theta}_e$ 也是有界变量.为继续分析收敛特性,对式(21)求导有

$$\begin{aligned} \ddot{V} \leq & -2k_1 x_e \dot{x}_e - h_1 \lambda_1 \dot{x}_e \operatorname{sgn}(x_e) - k_2 \dot{v}_r y_e^2 - \\ & 2k_2 v_r y_e \dot{y}_e - 2k_3 z \dot{z} - \hat{h}_1 \lambda_4 |z| - \hat{h}_1 \lambda_4 \dot{z} \operatorname{sgn}(z). \end{aligned} \quad (22)$$

由 \hat{h}_1 与 $\hat{\lambda}_3$ 的关系式 $\hat{\lambda}_3 = (1 - \hat{h}_1)^{-1}$ 可得 $\hat{h}_1 = \hat{\lambda}_3 (1 - \hat{h}_1)^2$,即 $\hat{\lambda}_3$ 有界,且当 $\hat{\lambda}_3$ 的积分初值大于1时 \hat{h}_1 为有界量,因此只需保证 $\hat{\lambda}_3$ 的积分初值大于1即可确定 \hat{h}_1 有界,故 \ddot{V}_a 是有界函数,由 Barbalat 引理可知,当 $t \rightarrow \infty$ 时 $\dot{V}_{a(t)} \rightarrow 0$,所以 x_e, y_e, z 均收敛到0,则 θ_e 收敛到 $k\pi$ (k 为常数),最终通过调节参数可使得 θ_e 收敛到0.

3 滑转补偿控制器仿真及实验验证

为验证算法有效性,使用自适应补偿控制器和常规控制器进行对比.为减小抖振,对控制器式(12)使用饱和函数 $\tanh(x)$ 代替符号函数.若不考虑自定义参数,式(12)可以简化为常规控制器:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v_r \cos \theta_e + k_1 x_e, \\ \omega &= \frac{k_3 z + y_e v_r + \omega_r \cos \theta_e + k_2 v_r \sin \theta_e}{\cos \theta_e + k_2 x_e}. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

3.1 仿真实验

令两控制器中相同参数 k_1, k_2, k_3 的取值相同,并令自适应律(13)中 $\hat{h}_2, \hat{\lambda}_3, \hat{h}_{10}, \hat{h}_{11}$ 及 \hat{h}_{12} 的初值分别为0, 1.05, 0, 0, 0,其余参数见表1.

目标轨迹初始位置为 $[0.5, 0.5, \pi/9]^T$,机器人初始位置为 $[0, 0, 0]^T$,理想轨迹表达式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_r &= v_r \cos(\omega_r t), \\ \dot{y}_r &= v_r \sin(\omega_r t). \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

左、右侧车轮滑转率分别按照 $s_L = 0.3 + 0.2 \times$

$\sin(\pi t/90)$ 和 $s_r=0.2+0.2 \sin(\pi t/90)$ 变化, 仿真时长为 90 s. 仿真结果如图 3~图 5 所示.

表 1 仿真控制器参数
Table 1 Simulink controller parameters

参数	数值	参数	数值	参数	数值
k_1	0.01	p_3	0.1	b	0.3
k_2	0.8	p_4	0.1	r	0.1
k_3	0.01	p_5	0.1	v_r	0.3
p_1	5	λ_1	0.3	ω_r	0.1
p_2	2	λ_4	0.8	—	—

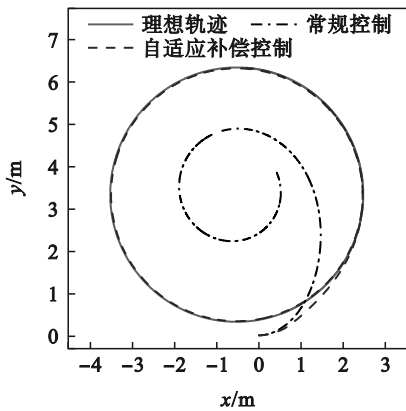


图 3 轨迹跟踪结果对比

Fig. 3 Comparison of trajectory tracking results

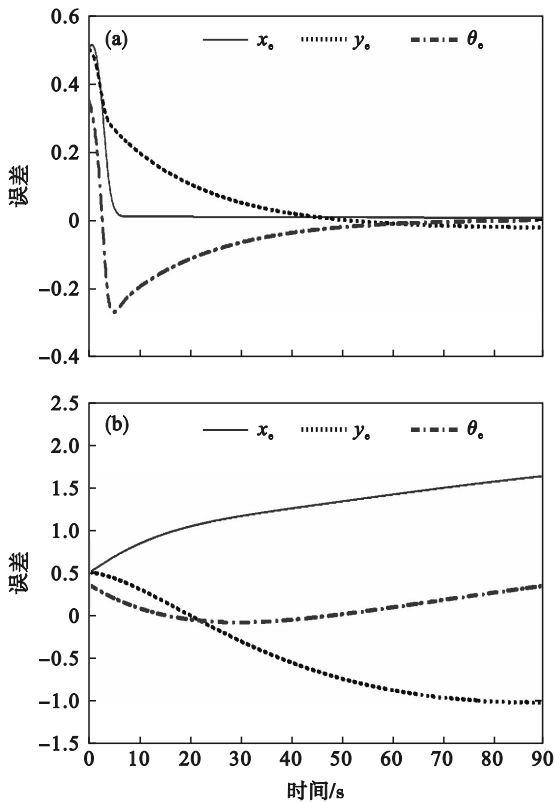


图 4 轨迹跟踪误差对比

Fig. 4 Comparison of trajectory tracking errors

(a) 自适应滑转补偿控制器误差收敛效果;
(b) 一常规控制器误差收敛效果.

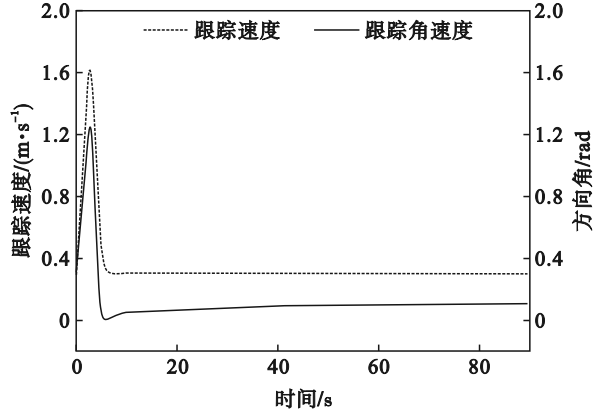


图 5 跟踪速度和角速度

Fig. 5 Tracking speed and angular velocity

如图 3 所示, 自适应补偿控制器作用下的轨迹跟踪效果更好. 图 4a 和图 4b 对比可以看出, 自适应补偿控制器的误差收敛效果更好, 速度更快. 图 5 则表示了机器人速度和角速度能够收敛到理想值, 证明了滑转补偿控制器的有效性.

3.2 软硬件平台介绍及参数设置

本文使用的实验平台如图 6 所示, 基于 ROS 系统进行搭建. 实验平台在硬件层面分为 3 层: 下位机是基于 STM32F1 单片机的底层控制板; 上位机使用的是树莓派 4B+ 平台, 主要用于 ROS 功能包的开发; PC 端搭载的是 Windows 系统, 主要作用是运行 Simulink 中的控制器.



图 6 四轮移动机器人实验平台

Fig. 6 Four-wheel mobile robot experimental platform

为了验证所提出控制器的有效性, 令机器人在控制器 (12) 和 (23) 作用下跟踪相同轨迹, 并且令两控制器中的相同参数 k_1, k_2, k_3 取值相同. 自适应律 (13) 中的 $\hat{h}_2, \hat{\lambda}_3, \hat{h}_{10}, \hat{h}_{11}$ 以及 \hat{h}_{12} 的积分初值分别设置为 0, 1.05, 0, 0 和 0, 控制器中的其他参数见表 2.

表 2 控制器参数
Table 2 Controller parameters

参数	数值	参数	数值	参数	数值
k_1	0.1	p_2	1.2	λ_1	1.85
k_2	0.2	p_3	0.05	λ_4	3.25
k_3	0.1	p_4	0.05	v_r	0.3
p_1	0.02	p_5	0.02	ω_r	0.1

3.3 圆形轨迹跟踪实验

圆形轨迹跟踪实验中,取与仿真中相同的轨迹参数,实验时长 90 s,实验结果如图 7~图 10 所示.

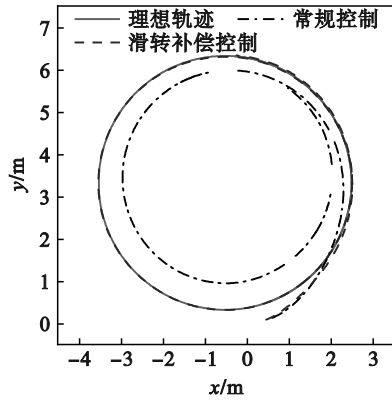


图 7 圆形轨迹跟踪结果对比

Fig. 7 Comparison of circular trajectory tracking results

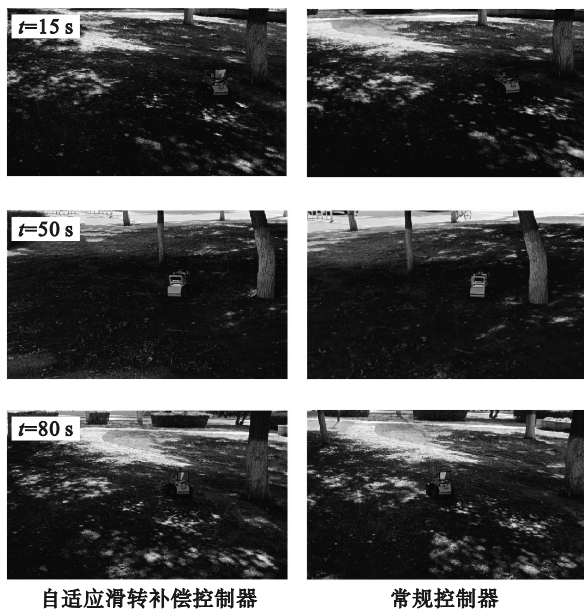


图 8 机器人运动照片

Fig. 8 Robot motion photos

图 7 表示四轮移动机器人在两种控制器作用下的轨迹跟踪效果,自适应补偿控制器的跟踪效果更优;图 8 分别表示不同控制器下不同时刻机器人的运动照片;图 9 表示两种控制器作用下的机器人轨迹跟踪误差,自适应补偿控制器的误差有更好的收敛效果和更快的收敛速度;图 10 表示传感器实时采集的机器人的实际速度与角速度,自适应补偿控制器作用下的实际速度和角速度均接近理想值.

3.4 “8”字形轨迹跟踪实验

为进一步验证自适应补偿控制器的轨迹跟

踪控制性能,令机器人跟踪“8”字形轨迹.自适应滑转补偿控制器和常规控制器的参数值均不变.“8”字形轨迹方程与式(24)一致,式中 $v_r=0.2$, ω_r 的表达式为

$$\omega_r = \begin{cases} 0, & t < 20; \\ \pi^2 \sin(\pi(t-20)/40)/80, & 20 \leq t < 100; \\ -\pi^2 \sin(\pi(t-20)/40)/80, & 100 \leq t. \end{cases}$$

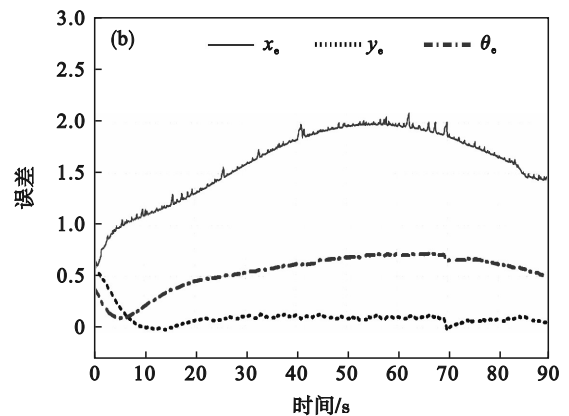
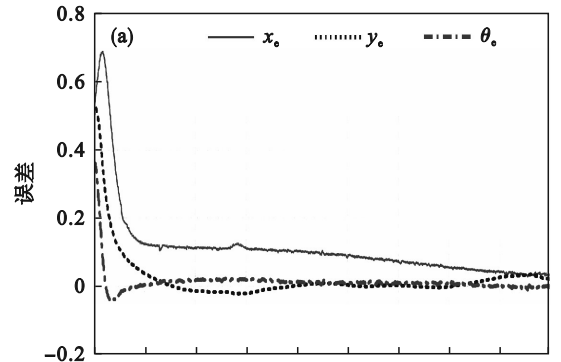


图 9 圆形轨迹跟踪误差对比

Fig. 9 Comparison of circular trajectory tracking errors

(a) — 自适应滑转补偿控制器误差收敛效果;

(b) — 常规控制器误差收敛效果.

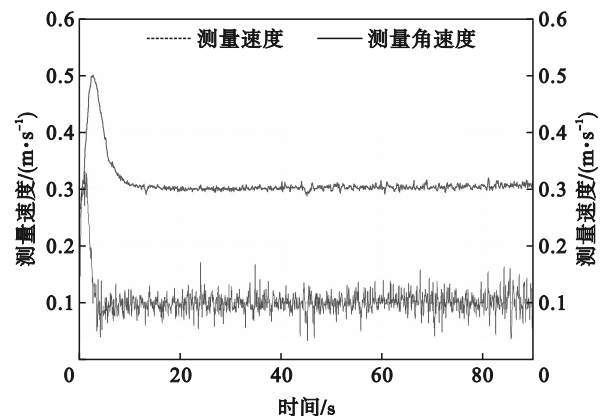


图 10 测量速度和角速度

Fig. 10 Tracking speed and angular velocity

为了更加严苛地验证滑转补偿控制器的效果,分别外加左、右侧车轮滑转率 $s_L=0.3+0.2 \times \sin(\pi t/180)$ 和 $s_R=0.2+0.2 \sin(\pi t/180)$.目标轨迹从 $[0.5, 0.5, \pi/9]^T$ 开始,机器人初始位置为 $[0, 0, 0]^T$,实验时长 180 s,实验结果如图 11~图 14 所示.

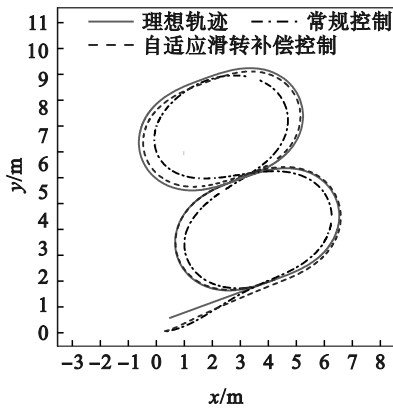


图 11 “8”字形轨迹跟踪结果对比
Fig. 11 Comparison of “8” trajectory tracking results

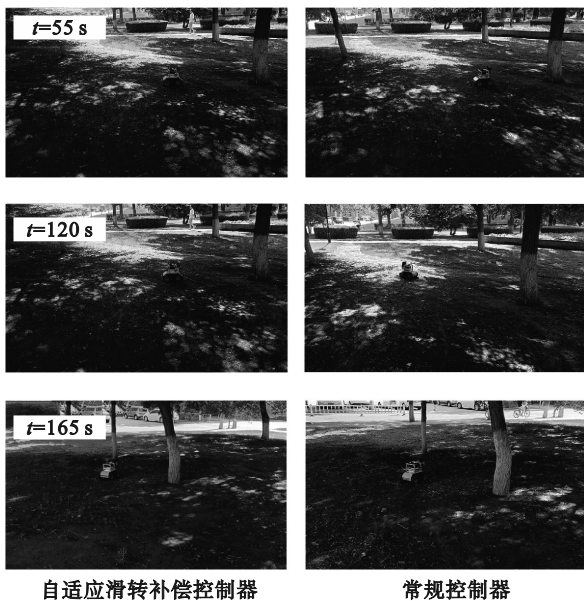


图 12 机器人运动照片
Fig. 12 Robot motion photos

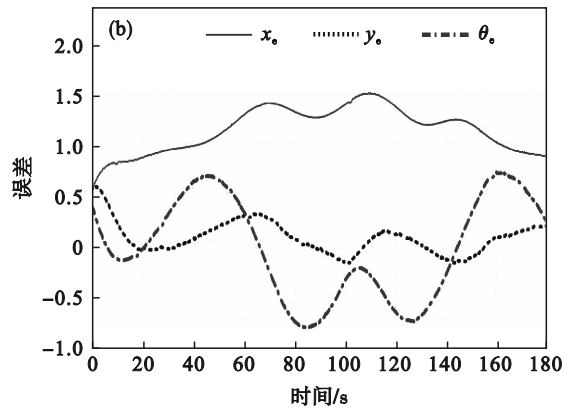
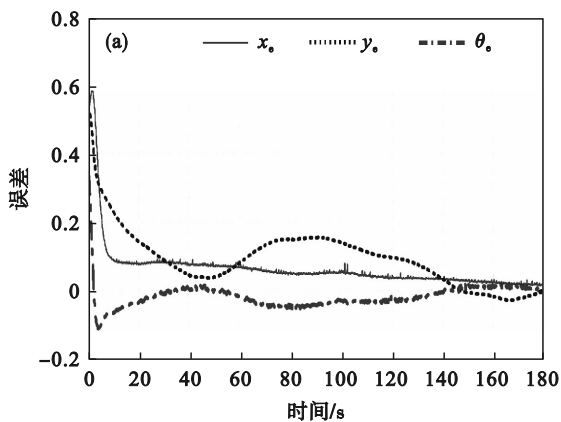


图 13 “8”字形轨迹跟踪误差对比
Fig. 13 Comparison of trajectory tracking errors
(a)—自适应滑转补偿控制器误差收敛效果;
(b)—常规控制器误差收敛效果.

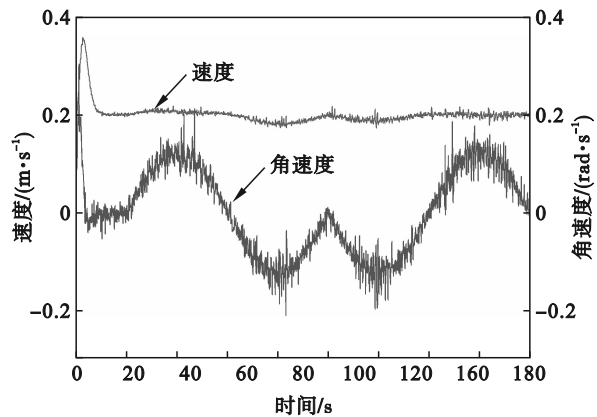


图 14 测量速度和角速度
Fig. 14 Tracking speed and angular velocity

从图 11 中可以看出,在自适应滑转补偿控制器作用下,机器人能够更好地跟踪到理想轨迹;图 12 分别表示不同控制器下不同时刻机器人的照片;从图 13 能更明显地看出,在滑转补偿控制器作用下移动机器人轨迹跟踪更为精确;图 14 中,在自适应滑转补偿控制器作用下,机器人质心速度接近理想值 0.2 m/s,质心角速度的变化情况也接近理想角速度的变化.

4 结 语

本文针对具有未知车轮滑转率的轮式移动机器人运动控制问题设计了自适应滑转补偿控制器.仿真和实车验证结果表明即使受车轮滑转的影响,在滑转补偿控制器作用下,轮式移动机器人的轨迹跟踪比常规控制器更加精确、更加稳定;轨迹跟踪误差能够收敛且速度更快;质心实际线速度和角速度均可以达到理想值.该自适应

滑转补偿控制器能够应用于在松软复杂地形条件下的轨迹跟踪任务中。

参考文献:

- [1] Liang Z C, Wang Y F, Chen G S, et al. A mechanical model for deformable and mesh pattern wheel of lunar roving vehicle [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(11): 2515-2526.
- [2] 梁忠超, 张欢, 赵晶, 等. 基于自适应MPC的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 835-840.
(Liang Zhong-chao, Zhang Huan, Zhao Jing, et al. Trajectory tracking control of unmanned vehicles based on adaptive MPC [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(6): 835-840.)
- [3] 唐传茵, 赵懿峰, 赵亚峰, 等. 智能车辆轨迹跟踪控制方法研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(9): 1297-1303.
(Tang Chuan-yin, Zhao Yi-feng, Zhao Ya-feng, et al. Research on the trajectory tracking control method of intelligent vehicles [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(9): 1297-1303.)
- [4] Li L H, Lian J, Chen B C, et al. Trajectory tracking and traction coordinating controller design for lunar rover based on dynamics and kinematics analysis [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2014, 16(6): 3064-3075.
- [5] Cui M Y, Huang R J, Liu H Z, et al. Adaptive tracking control of wheeled mobile robots with unknown longitudinal and lateral slipping parameters [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 78(3): 1811-1826.
- [6] Ryu J C, Agrawal S K. Differential flatness-based robust control of mobile robots in the presence of slip [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2011, 30(4): 463-475.
- [7] Hoang N B, Kang H J. Neural network-based adaptive tracking control of mobile robots in the presence of wheel slip and external disturbance force [J]. *Neurocomputing*, 2016, 188: 12-22.
- [8] Liao J F, Chen Z, Yao B. Model-based coordinated control of four-wheel independently driven skid steer mobile robot with wheel-ground interaction and wheel dynamics [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(3): 1742-1752.
- [9] Gao H B, Song X G, Ding L, et al. Adaptive motion control of wheeled mobile robot with unknown slippage [J]. *International Journal of Control*, 2014, 87(8): 1513-1522.
- [10] Chen M. Disturbance attenuation tracking control for wheeled mobile robots with skidding and slipping [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 64(4): 3359-3368.
- [11] Tian Y, Sarkar N. Control of a mobile robot subject to wheel slip [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, 74(3): 915-929.
- [12] Yoo S J. Approximation-based adaptive control for a class of mobile robots with unknown skidding and slipping [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2012, 10(4): 703-710.
- [13] Ding L, Huang L, Li S, et al. Definition and application of variable resistance coefficient for wheeled mobile robots on deformable terrain [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2020, 36(3): 894-909.
- [14] Degel W, Lupberger S, Odenthal D, et al. Scalable slip control with torque vectoring including input-to-state stability analysis [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2022, 31(3): 1250-1265.
- [15] Matraji I, Al-Durra A, Haryono A, et al. Trajectory tracking control of skid-steered mobile robot based on adaptive second order sliding mode control [J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 72: 167-176.
- [16] Zhang Z S, Ma R H, Wang L F, et al. Novel PMSM control for anti-lock braking considering transmission properties of the electric vehicle [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(11): 10378-10386.