

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413337

基于双曲正切视线制导的轮式移动机器人 目标跟踪自抗扰控制*

刘小松¹, 朱焕海¹, 单泽彪^{1,2}, 苏成志²

(1. 长春理工大学电子信息工程学院 长春 130022; 2. 长春理工大学智能复合机器人吉林省校企
联合技术创新实验室 长春 130022)

摘要:为提高轮式移动机器人(WMR)在复杂环境中应对侧滑和打滑干扰的目标跟踪能力,提出了一种基于双曲正切视线制导策略的自抗扰控制方法。首先,通过分析 WMR 的侧滑和打滑现象建立了扰动下 WMR 的运动学和动力学模型;其次,给出了一种基于分区切换机制的双曲正切视线制导策略以提高跟踪的动态响应能力;随后,基于 WMR 的动力学模型设计自抗扰控制算法,利用扩张状态观测器估计侧滑和打滑等未知干扰,实现目标跟踪任务。仿真和实车实验结果表明,本文方法在复杂环境中具有更高的跟踪精度和更强的抗干扰能力。实际测试中 WMR 在遭受模拟打滑试验后可快速地恢复到目标跟踪行进轨迹,且跟踪误差稳定于 0.025 m 以内,验证了所提方法的有效性。

关键词: 轮式移动机器人; 目标跟踪; 双曲正切视线制导策略; 扩张状态观测器; 自抗扰控制

中图分类号: TH134 TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Active disturbance rejection control for target tracking of wheeled mobile robot based on hyperbolic-tangent line-of-sight guidance

Liu Xiaosong¹, Zhu Huanhai¹, Shan Zebiao^{1,2}, Su Chengzhi²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Joint School-Enterprise Technological Innovation Laboratory of Jilin Province for Intelligent Composite Robot,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: To enhance the target tracking capability of wheeled mobile robots (WMR) in complex environments, particularly in the presence of disturbances such as sideslip and slippage, this paper proposes a self-adaptive disturbance rejection control method based on a hyperbolic tangent line-of-sight guidance strategy. First, by analyzing the sideslip and slippage phenomena of WMR, a kinematic and dynamic model of WMR under disturbances is established. Then, a hyperbolic tangent line-of-sight guidance strategy based on a partition switching mechanism is proposed to improve the dynamic response capability of tracking. Subsequently, a self-adaptive disturbance rejection control algorithm is designed, leveraging the dynamics of the WMR and employing an extended state observer to estimate and compensate for unknown disturbances such as sideslip and slippage, to achieve the target tracking task. Simulation and real-world experimental results show that the proposed method offers higher tracking accuracy and stronger disturbance rejection capability in complex environments. In actual tests, WMR quickly returned to the target tracking path after simulated slippage tests, with tracking errors stabilized within 0.025 meters, thereby verifying the effectiveness of the proposed method.

Keywords: wheeled mobile robot; target tracking; hyperbolic-tangent line-of-sight; extended state observer; active disturbance rejection control

0 引言

随着机器人技术的快速发展,轮式移动机器人(wheeled mobile robots, WMR)因动作灵活、适应性强等优点已广泛应用于救援行动、物流运输和社交互动等领域^[1-2]。在这些任务中,WMR需要在复杂环境中执行精确的目标跟踪,但侧滑和打滑等环境因素常导致跟踪精度和稳定性下降。因此,如何提高WMR在复杂环境中的跟踪性能成为一个亟待解决的问题。制导策略在WMR目标跟踪中起着至关重要的作用,其核心是通过调整机器人的运动轨迹,使其跟踪目标移动。目前,主流的制导策略有纯追踪、Stanley策略和视线制导策略(line-of-sight, LOS)等。为了提高无人驾驶车辆的跟踪精度,文献[3]基于Ackerman转向提出了一种改进的纯追踪策略。文献[4]通过动态调整前瞻距离,使纯追踪策略适应不同道路场景。文献[5]通过种群遗传算法对Stanley策略改进,提高了系统的跟踪效果。相比之下,视线制导策略因其简单高效、抗干扰性能强且易于实现等特点,已在无人车等跟踪控制系统中得到广泛应用。如文献[6]提出了基于有限时间漂角的视线制导策略,有效应对无人船的动态干扰问题。文献[7]通过在传统视线制导中引入前视补偿,提高了跟踪精度。

尽管制导策略在路径修正方面表现优异,但仅依靠制导策略难以保证系统在复杂环境中的鲁棒性和控制精度。因此,除了优化制导策略外,还需要控制系统提供有效反馈补偿,以增强系统的鲁棒性和抗扰能力。学者们提出了诸多控制方法以增强WMR的控制性能,包括比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制、滑模控制和模型预测控制等。文献[8]通过非线性模型预测控制算法实现了全向移动机器人在动态环境中的精确定位。文献[9]基于扰动观测器和积分滑模控制设计一种鲁棒控制方案,使机器人系统能够渐近地跟踪期望速度,并抵消复合扰动。为提升自动驾驶车辆的跟踪能力,文献[10]提出将Stanley算法与PID控制相结合的方案。而文献[11]通过比例积分控制与纯追踪控制的组合,有效降低了在高曲率轨迹下的跟踪误差。针对蛇形机器人的控制需求,文献[12]基于滑模控制优化了视线制导策略,减少了跟踪偏差。文献[13]研究了自适应视线制导策略与模型预测控制结合的策略,通过实时调整前视距离提升了系统的制导性能。

为提高系统的鲁棒性和适应性,学者们广泛使用自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)方法,其中通过扩张状态观测器(extended state observer, ESO)实时估计和补偿系统中的未知扰动^[14]。文献[15]

提出了一种基于扩张状态观测器的里程计定位补偿方法,解决了无人车在复杂工况下里程计误差累积的问题。文献[16]设计了一种基于线性/非线性混合自抗扰的控制器,结合ESO和状态误差非线性控制律(state error nonlinear control law, SENCL),提高了无人直升机在不确定干扰条件下的跟踪能力。然而,上述方法大多基于环境扰动较为温和的假设,WMR在实际应用中通常面临复杂且动态的环境,例如高频扰动和突发路径变化。在这些情况下,现有方法在系统响应速度和跟踪精度的平衡上存在局限性。

针对上述问题,提出了一种基于双曲正切视线制导策略(hyperbolic-tangent line-of-sight, HLOS)与自抗扰控制相结合的目标跟踪控制方法。首先,在传统视线制导策略中引入双曲正切函数,实现对横向误差和纵向误差的非线性调节,并设计了分区切换机制对误差进行分区控制。在此基础上,加入了ADRC算法控制WMR跟踪上目标,并且通过扩张状态观测器对跟踪过程中的未知干扰进行估计并对其补偿。最后,通过仿真实验和实车实验验证了本文所提方法在WMR遭受模拟打滑试验过程中的有效性。

1 问题描述

1.1 机器人数学模型

WMR如图1所示,其由2个驱动轮和1个起支撑作用的万向轮组成。为了描述WMR的运动,定义了以地面为参考的全局坐标系 $\{X_I, Y_I\}$ 和以机器人自身为参考的机体坐标系 $\{X_b, Y_b\}$ 。

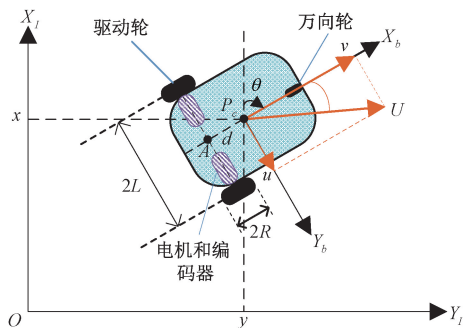


图1 轮式移动机器人

Fig. 1 Wheeled mobile robots

WMR的数学模型包括运动学模型和动力学模型,理想状态下其非完整约束方程为:

$$-\dot{x}\sin\theta + \dot{y}\cos\theta - d\dot{\theta} = 0 \quad (1)$$

式中: x 和 y 为WMR在全局坐标系中的位置; θ 为其航向角; d 为WMR中心和两后轮中点之间的距离。

轮式移动机器人在理想状态下的运动学方程为:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{\Omega}(\mathbf{q})\boldsymbol{\xi} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^T \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 是 WMR 广义坐标; $\boldsymbol{\xi} = [v \ \omega]^T$, v 为 WMR 的线速度, ω 为角速度。

轮式移动机器人拉格朗日形式的动力学模型^[9]为:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau}_d = \mathbf{B}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} - \mathbf{A}^T(\mathbf{q})\boldsymbol{\lambda} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 是惯性矩阵; $\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 是科氏矩阵; $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 是重力矢量; $\boldsymbol{\tau}_d \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 表示有界外部干扰; $\mathbf{B}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{3 \times 2}$ 是输入变换矩阵; $\boldsymbol{\tau}$ 是电机提供的输入扭矩; $\mathbf{A}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 是约束相关的矩阵; $\boldsymbol{\lambda}$ 是约束矢量。

在道路潮湿或急转弯等复杂条件下, WMR 的车轮容易发生侧滑或打滑现象。由此, 本文结合动力学和运动学模型, 综合侧滑或打滑等扰动因素, 建立更为完善的 WMR 控制模型。WMR 非完整约束方程为:

$$\begin{cases} -\dot{x}\sin\theta + \dot{y}\cos\theta - d\dot{\theta} = u \\ \dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta - L\dot{\theta} = R(\dot{\theta}_r - \varphi_r) \\ \dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta + L\dot{\theta} = R(\dot{\theta}_l - \varphi_l) \end{cases} \quad (4)$$

式中: u 是 WMR 的横向滑动速度; φ_r 和 φ_l 是由纵向打滑引起的驱动轮的扰动角速度; θ_r 和 θ_l 为车轮转速。 L 为 WMR 宽度的一半; R 为车轮半径。

因此, 未知打滑和侧滑下的 WMR 的运动学模型为:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})(\boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\psi}) + \mathbf{P}(\mathbf{q})\mathbf{c}_0 \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\psi} = [\psi_v \ \psi_\omega]^T$; ψ_v 为纵向滑动速度; ψ_ω 为扰动角速度; $\mathbf{P}(\mathbf{q})\mathbf{c}_0$ 表示由于扰动非完整约束而产生的不匹配扰动; $\mathbf{c}_0 = [u \ \varphi_r \ \varphi_l]^T$ 。

对式 (5) 求导得到 $\ddot{\mathbf{q}}$, 将 $\ddot{\mathbf{q}}$ 和式 (5) 带入式 (3), 可得打滑和侧滑干扰下的 WMR 动力学模型为:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{V}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\xi} + \mathbf{M}_2(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} - \mathbf{V}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\psi} - \mathbf{M}_2(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau}_d - \mathbf{M}_2(\mathbf{q})(\mathbf{C}_1(\mathbf{q})\dot{\mathbf{c}}_0 + \mathbf{C}_2(\mathbf{q})\mathbf{c}_0) + \dot{\boldsymbol{\psi}} + \Delta\mathbf{M}_2(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} + \Delta\mathbf{V}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\xi} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{C}_1(\mathbf{q})$ 和 $\mathbf{C}_2(\mathbf{q})$ 均是扰动补偿相关矩阵; $\Delta\mathbf{V}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 和 $\Delta\mathbf{M}_2(\mathbf{q})$ 均是由打滑和侧滑引起的参数不确定性和变化。

定义干扰 $\mathbf{D} = [D_v \ D_\omega]^T$ 为:

$$\mathbf{D} = -\mathbf{V}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\psi} - \mathbf{M}_2(\mathbf{q})(\mathbf{C}_1(\mathbf{q})\dot{\mathbf{c}}_0 + \mathbf{C}_2(\mathbf{q})\mathbf{c}_0) - \mathbf{M}_2(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau}_d + \Delta\mathbf{V}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\xi} + \Delta\mathbf{M}_2(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} + \dot{\boldsymbol{\psi}} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{D}$ 是来自车轮打滑和侧滑的扰动; D_v 和 D_ω 分别为对线速度和角速度的复合扰动。

由式 (7) 对式 (6) 改写可得 WMR 动力学方程为:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{V}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\xi} + \mathbf{M}_2(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} + \mathbf{D} \quad (8)$$

式中: $\|\mathbf{D}\| \leq \alpha$ 和 $\|\dot{\mathbf{D}}\| \leq \beta$, 其中 α 和 β 为正常数。

1.2 目标跟踪运动状态描述

目标跟踪误差描述如图 2 所示。为便于描述 WMR 与目标物体之间的位置和运动关系, 建立路径切线坐标系 $\{X_r, Y_r\}$ 。目标的航向角为 ϕ_p , 其在全局坐标系中的位置坐标定义为 x_r 和 y_r , 则 ϕ_p 满足以下关系:

$$\phi_p = \arctan2(\dot{y}_r(t), \dot{x}_r(t)) \quad (9)$$

为进一步描述 WMR 与目标的位置偏差, 定义位置误差 $\mathbf{q}_{e1} = [x_{e1} \ y_e \ \theta_e]^T$ 。其中, x_{e1} 为目标与 WMR 之间的纵向距离; y_e 为横向误差; θ_e 为角度误差。

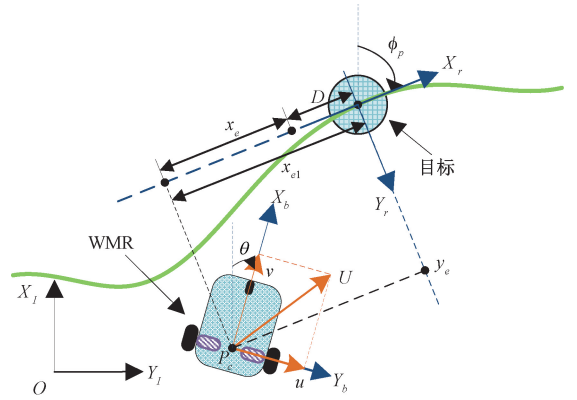


图 2 移动机器人目标跟踪误差

Fig. 2 Target tracking error plot of WMR

目标 (x_r, y_r, ϕ_p) 和 WMR (x, y, θ) 之间的误差为:

$$\begin{bmatrix} x_{e1} \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi_p & -\sin\phi_p & 0 \\ \sin\phi_p & \cos\phi_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ \theta - \phi_p \end{bmatrix} \quad (10)$$

在目标跟踪过程中, 要求 WMR 位于目标后方, 并保持距离为 D 。为此, 定义目标跟踪误差为 $\mathbf{q}_e = [x_e \ y_e \ \theta_e]^T$ 。由图 2 可知, 跟踪过程中的纵向误差为 $x_e = x_{e1} - D$ 。由式 (5), 可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_e = v\cos(\theta - \phi_p) + \dot{\phi}_p y_e - v_r \\ \dot{y}_e = v\sin(\theta - \phi_p) - \dot{\phi}_p x_e \\ \dot{\theta}_e = \dot{\theta} - \dot{\phi}_p \end{cases} \quad (11)$$

式中: v_r 为目标物体的线速度。根据上述分析, WMR 的目标跟踪任务为找到有界输入 $\boldsymbol{\tau}$, 使得 $\mathbf{q}_e = [x_e \ y_e \ \theta_e]^T$ 在任意初始误差下 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{q}_e\| = 0$ 。

2 双曲正切视线制导策略设计

2.1 传统视线制导策略

传统视线制导策略如图 3 所示, 其基本思想是通过调整车辆的航向角, 使其始终指向目标路径上的前瞻点, 从而实现目标跟踪。

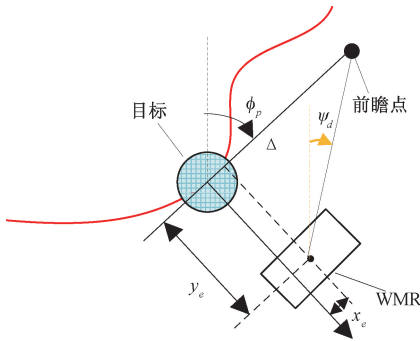


图3 传统视线制导策略

Fig. 3 Diagram of traditional line-of-sight guidance strategy

传统视线制导策略为:

$$\psi_d \triangleq \phi_p - \arctan(y_e/\Delta), \Delta > 0 \quad (12)$$

式中: \$\psi_d\$ 为期望航向角; \$\Delta\$ 为前视距离。

2.2 双曲正切视线制导策略

相较于传统 LOS 的线性比例控制, 双曲正切函数能够自适应调节误差响应, 在不同误差条件下平衡控制需求。因此, 将双曲正切函数引入传统视线制导策略中, 对误差进行非线性调节。

1) 航向制导律设计

双曲正切视线制导策略中的航向制导律为:

$$\psi_d = \phi_p - \arctan(k_y \tanh(a_y y_e) + s_y) \quad (13)$$

式中: \$k_y > 0\$ 和 \$a_y > 0\$ 为控制增益参数; \$s_y\$ 为分区切换机制。

2) 速度制导律

双曲正切视线制导策略中的速度制导律为:

$$v_d = \frac{v_r - k_x \tanh(a_x x_e) - s_x}{\cos(\theta - \phi_p)} \quad (14)$$

式中: \$v_d\$ 是期望速度; \$k_x > 0\$ 和 \$a_x > 0\$ 为控制增益参数; \$s_x\$ 为分区切换机制。

3) 分区切换机制设计

在 HLOS 策略中, 为确保 WMR 在不同误差区间下保持平稳的响应以及避免控制信号的波动, 设计分区切换机制 \$s_y\$ 和 \$s_x\$ 来进一步补偿横向和纵向误差。

分区切换机制 \$s_y\$ 为:

$$\dot{s}_y = \begin{cases} -k_{s_y} \operatorname{sgn}(s_y) + \frac{v_d y_e}{\sqrt{1 + (k_y \tanh(a_y y_e) + s_y)^2}} - \frac{k_y v_d (|y_e| - y_e \tanh(a_y y_e))}{s_y \sqrt{1 + (k_y \tanh(a_y y_e) + s_y)^2}}, & |s_y| \geq \epsilon_{s_y} \\ -k_{s_y} \operatorname{sgn}(s_y) + \frac{v_d y_e}{\sqrt{1 + (k_y \tanh(a_y y_e) + s_y)^2}}, & |s_y| < \epsilon_{s_y} \end{cases} \quad (15)$$

式中: \$k_{s_y}\$ 是调节参数; \$\epsilon_{s_y}\$ 是误差切换的临界点; \$\operatorname{sgn}(\cdot)\$ 是符号函数, 表明误差的方向。

分区切换机制 \$s_x\$ 为:

$$\dot{s}_x = \begin{cases} -k_{s_x} \operatorname{sgn}(s_x) + x_e - \frac{k_x (|x_e| - x_e \tanh(a_x x_e))}{s_x}, & |s_x| \geq \epsilon_{s_x} \\ -k_{s_x} \operatorname{sgn}(s_x) + x_e, & |s_x| < \epsilon_{s_x} \end{cases} \quad (16)$$

式中: \$k_{s_x}\$ 是调节参数; \$\epsilon_{s_x}\$ 是误差切换的临界点。

3 自抗扰控制算法设计

定义 \$e_{td_\psi} = \psi_{1d} - \psi_d\$, \$e_{td_v} = v_{1d} - v_d\$。\$U_\psi\$、\$U_v\$ 分别为对航向角和速度的补偿量。控制系统的跟踪微分器为:

$$\begin{cases} e_{td_\psi} = \psi_{1d} - \psi_d \\ \dot{\psi}_{1d} = \psi_{1d} + h_{1\psi} \psi_{2d} \\ \dot{\psi}_{2d} = \psi_{2d} + h_{f\psi}(e_{td_\psi}, \psi_{2d}, r_{0\psi}, h_{1\psi}) \\ e_{td_v} = v_{1d} - v_d \\ \dot{v}_{1d} = v_{1d} + h_{1v} v_{2d} \\ \dot{v}_{2d} = v_{2d} + h_{fv}(e_{td_v}, v_{2d}, r_{0v}, h_{1v}) \end{cases} \quad (17)$$

式中: \$\psi_{1d}\$ 和 \$\psi_{2d}\$ 为跟踪目标所需航向角及其微分; \$v_{1d}\$ 和 \$v_{2d}\$ 为所需速度及其微分; \$r_{0\psi}\$ 和 \$r_{0v}\$ 为跟踪因子; \$h_{1\psi}\$ 和 \$h_{1v}\$ 为滤波因子; \$f_{h_\psi}(\cdot)\$ 和 \$f_{h_v}(\cdot)\$ 为最速综合函数。

针对侧滑和打滑等未知干扰 \$\mathbf{D}\$, 使用扩张状态观测器对其进行估计和补偿。对式 (8) 系统建立 ESO 为:

$$\begin{cases} e_{eso_\psi} = Z_{1\psi} - \theta \\ \dot{Z}_{1\psi} = Z_{2\psi} - b_{01\psi} e_{eso_\psi} \\ \dot{Z}_{2\psi} = Z_{3\psi} + b_{0\psi} U_\psi - b_{02\psi} fal(e_{eso_\psi}, a_1, \Delta_1) \\ \dot{Z}_{3\psi} = -b_{03\psi} fal(e_{eso_\psi}, a_2, \Delta_2) \\ e_{eso_v} = Z_{1v} - v \\ \dot{Z}_{1v} = Z_{2v} - b_{01v} e_{eso_v} \\ \dot{Z}_{2v} = Z_{3v} + b_{0v} U_v - b_{02v} fal(e_{eso_v}, a_1, \Delta_1) \\ \dot{Z}_{3v} = -b_{03v} fal(e_{eso_v}, a_2, \Delta_2) \end{cases} \quad (18)$$

式中: \$e_{eso_\psi}\$、\$e_{eso_v}\$ 为航向角及速度的观测误差; \$Z_{1\psi}\$、\$Z_{2\psi}\$、\$Z_{3\psi}\$ 分别为 \$\theta\$、\$\dot{\theta}\$ 和航向角控制系统中扰动的观测值; \$Z_{1v}\$、\$Z_{2v}\$、\$Z_{3v}\$ 分别为 \$v\$、\$\dot{v}\$ 和速度控制系统中扰动的观测值; \$b_{0\psi}\$、\$b_{01\psi}\$、\$b_{02\psi}\$、\$b_{03\psi}\$、\$b_{0v}\$、\$b_{01v}\$、\$b_{02v}\$、\$b_{03v}\$、\$a_1\$、\$a_2\$、\$\Delta_1\$ 和 \$\Delta_2\$ 为可调参数。

\$fal(\cdot)\$ 定义为:

$$fal(\rho, \iota, \sigma) = \begin{cases} \|\rho\|^\iota \operatorname{sgn}(\rho), & \|\rho\| > \sigma \\ \frac{\rho}{\sigma^{1-\iota}}, & \|\rho\| \leq \sigma \end{cases} \quad (19)$$

式中: σ 是线性区间的长度,且 $0 < \iota < 1$ 。

在非线性状态误差反馈中,系统的状态误差用 $e_{1\psi}$ 、 $e_{2\psi}$ 、 e_{1v} 、 e_{2v} 表示。根据误差计算控制器的输出 U_ψ 和 U_v , 非线性误差反馈为:

$$\begin{cases} e_{1\psi} = \psi_{1d} - Z_{1\psi} \\ e_{2\psi} = \psi_{2d} - Z_{2\psi} \\ U_{0\psi} = k_{p\psi}fal(e_{1\psi}, a_3, h_1) + k_{d\psi}fal(e_{2\psi}, a_4, h_1) \\ U_\psi = U_{0\psi} - \frac{Z_{3\psi}}{b_{0\psi}} \\ e_{1v} = v_{1d} - Z_{1v} \\ e_{2v} = v_{2d} - Z_{2v} \\ U_{0v} = k_{pv}fal(e_{1v}, a_3, h_1) + k_{dv}fal(e_{2v}, a_4, h_1) \\ U_v = U_{0v} - \frac{Z_{3v}}{b_{0v}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $k_{p\psi}$ 、 $k_{d\psi}$ 、 k_{pv} 、 k_{dv} 、 a_3 、 a_4 和 h_1 为可调参数。

4 仿真与实验验证

4.1 数值仿真实验

在 MATLAB R2022b/Simulink 环境下搭建 WMR 数学模型并对所提方法进行仿真验证。所研究的 WMR 系统的参数如表 1 所示。

表 1 WMR 系统参数
Table 1 WMR system parameters

物理意义	符号/单位	值
WMR 的质量	m/kg	1.506
WMR 的总转动惯量	$I/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.009 753
车轮的转动惯量	$I_w/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.000 718
WMR 的一半宽度	L/m	0.087 5
车轮半径	R/m	0.067
P_e 和 A 之间的距离	d/m	0.059 7
目标和 WMR 保持的距离	D/m	1

仿真过程中涉及到的参数如表 2 所示。
为验证所提 HLOS 策略的有效性,对其与传统视线制导策略和文献[13]中的自适应 LOS 策略进行了对比实验。仿真过程添加打滑扰动: $u = 0.3e^{-t}$, $\varphi_r = 0.4e^{-2t}$, $\varphi_l = 0.2e^{-2t}$ 。设跟踪目标的运动方程为:

$$\begin{cases} x_r(t) = 5\cos(0.4t) \\ y_r(t) = 5\sin(0.4t) \end{cases} \quad (21)$$

WMR 初始位置为 $(x_0, y_0, \theta_0) = (0, 0, 0)$ 。目标跟踪效果如图 4 所示。

表 2 仿真参数
Table 2 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
k_x, k_y	1	$b_{01\psi}, b_{01v}$	25
a_x, a_y	1	$b_{02\psi}, b_{02v}$	30
k_{s_x}, k_{s_y}	0.5	$b_{03\psi}, b_{03v}$	100
$\epsilon_{s_x}, \epsilon_{s_y}$	0.5	$k_{p\psi}, k_{p v}$	1.35, 1
$r_{0\psi}, r_{0v}$	0.6	$k_{d\psi}, k_{d v}$	5, 0.9
$h_{1\psi}, h_{1v}, h_1$	0.005	$b_{0\psi}, b_{0v}$	0.35
a_1, a_2	0.5, 0.25	a_3, a_4	0.5, 1.2

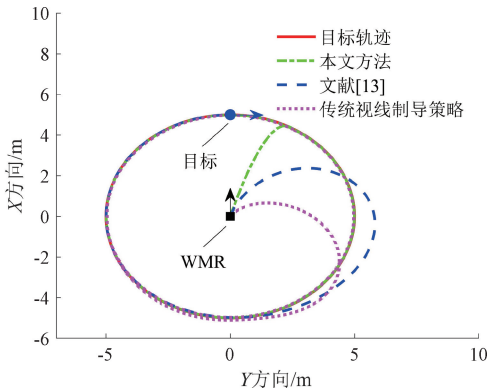


图 4 圆形轨迹下的目标跟踪

Fig. 4 Target tracking graph under circular trajectory

由图 4 可见,3 种方法均可实现对目标的跟随,但跟踪性能有所不同。文献[13]的方法在轨迹拐点处偏离目标较多,跟踪误差较大;传统 LOS 策略由于固定前视距离的限制,在急转弯处存在明显劣势。相比之下,所提出的 HLOS 策略实现了平滑且稳定的目标跟踪。

图 5 为 3 种策略在目标跟踪过程中的绝对误差 x_e 和 y_e 的测试结果。由图 5 可知,所提 HLOS 策略在 X 和 Y 方向的误差均迅速收敛,表现出较高的快速性。而文献[13]和传统 LOS 策略尽管也能收敛,但收敛速度较慢,误差波动较大。相比之下,HLOS 策略的快速性和稳定性明显优于其他两种策略。

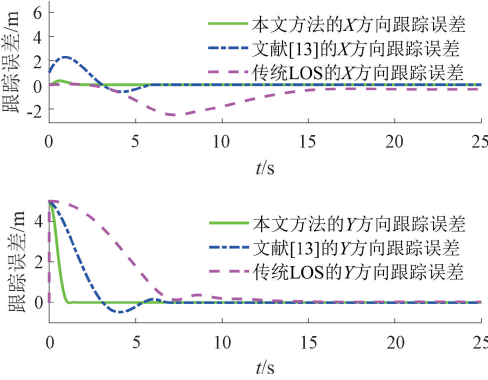


图 5 圆形跟踪误差

Fig. 5 Circular tracking error plot

为进一步对所提控制方法的鲁棒性进行验证,将所提方法与文献[8]中的模型预测控制方法及文献[9]中的基于反步法策略的积分滑模控制方法进行对比实验。在目标跟踪中,WMR 横向侧滑为 $u = \sin(\pi t/4)$,纵向打滑为 $\varphi_r = \varphi_l = 0.01(t-10)^2$ 。

跟踪目标的运动轨迹为双纽线,其运动方程为:

$$\begin{cases} x_r(t) = 3\sin(0.5t) \\ y_r(t) = 4\sin(0.25t) \end{cases} \quad (22)$$

WMR 的初始位置为 $(x_0, y_0, \theta_0) = (0, 1, 0)$ 。图 6 为 3 种方法在侧滑和打滑情况下的目标跟踪轨迹。由图 6 可知,本文方法在目标进行转折和急转弯时展示出较小的轨迹误差,而文献[8-9]的方法在相同情况下出现了较大误差。所提 HLOS 策略通过非线性调节实现平滑且快速的误差修正,同时 ESO 对侧滑和打滑等未知扰动进行实时补偿,进一步提升了系统的鲁棒性。相比之下,文献[8-9]方法尽管具备一定的鲁棒性,但其动态扰动调节能力有限。

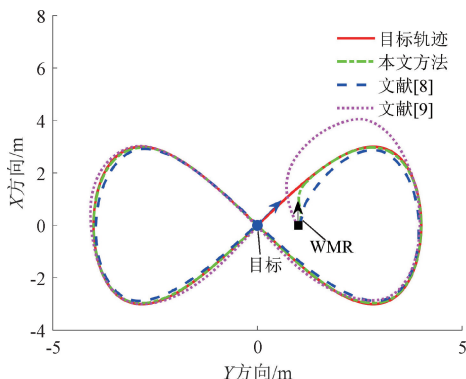


图 6 双纽线目标跟踪

Fig. 6 Double newline target tracking diagram

图 7 为目标跟踪误差 x_e 、 y_e 和 WMR 航向角跟踪误差的仿真结果。根据图 7 可知所提方法、文献[8-9]方法在 X 和 Y 方向的跟踪误差有明显差异。对于 X 方向,所提方法迅速收敛至稳定状态,有较好的收敛性和稳定性。相比之下文献[8]方法在急转弯时具有较大的误差;文献[9]方法的误差波动较大,收敛速度明显较慢且在初期有较大的振荡。在 Y 方向,所提方法同样表现出较快的误差收敛能力,而文献[8]方法的收敛速度响度较慢,并且在急转弯处具有明显的误差波动;文献[9]方法在 Y 方向上初始误差较大,尽管最终收敛,但整个过程中误差的波动幅度较大。对于航向角度跟踪误差,本文所提方法的角度误差快速收敛且稳定,而文献[8]的角度误差收敛速度相对较慢且在急转弯处出现波动,文献[9]在目标进行急转弯时同样具有较大误差。综上可知,本文方法具有明显的优势,在复杂动态环境下具有更强的控制能力。

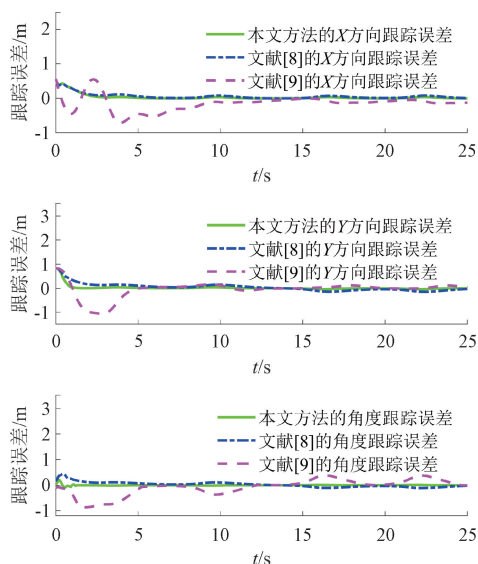


图 7 双纽线跟踪误差

Fig. 7 Double newline tracking error diagram

4.2 实车测试实验

实验所用 WMR 如图 8 所示。该车辆由微控制器、驱动电路、惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 模块、无线通信模块、带编码器的电机、电源模块及金属车架等组成。前轮为万向轮,后两轮由两个驱动直流电机提供动力。

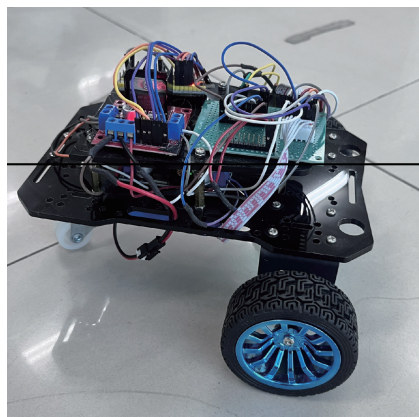


图 8 WMR 实验装置

Fig. 8 WMR experimental device

为验证所提算法在未知滑动情况下目标跟踪的有效性,在 WMR 跟踪目标时分别对其施加横向位移和纵向位移以模拟侧滑和打滑现象。图 9 为 WMR 在直线行驶过程中遭受侧滑的模拟实验。在 4.5 s 处施加 10 cm 侧滑下 WMR 的目标跟踪轨迹。由图 9 可知,在施加干扰之前,WMR 能够稳定的跟踪目标。当施加外力后发生侧滑时,WMR 出现了一定程度的波动,但能迅速回到目标轨迹上继续跟踪目标,表明所提方法具有较强的防侧滑

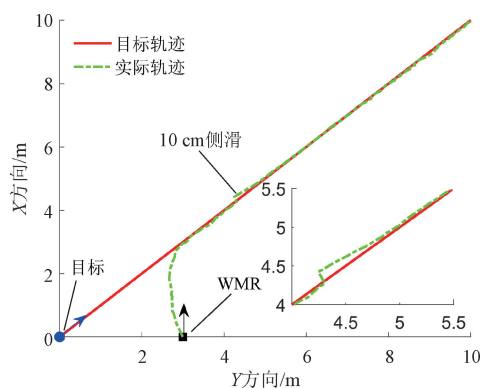


图 9 施加横向侧滑下 WMR 的目标跟踪

Fig. 9 Target tracking of WMR under lateral sideslip

能力和较好的控制性能。

图 10 为 WMR 受到横向侧移下的 X 和 Y 方向的跟踪误差。在跟踪初期,WMR 在所提方法作用下于 3.26 s 迅速跟踪上目标,且跟踪误差较小。当 WMR 受到外力冲击发生侧滑时,误差急剧增大,经过约 1 s 调整后误差趋于稳定, X 和 Y 方向的跟踪误差均接近于零,且误差范围收敛至 0.024 m 以内。验证了 WMR 在受到侧滑干扰后的恢复能力较强,能够有效减小跟踪误差并回到正常路径。

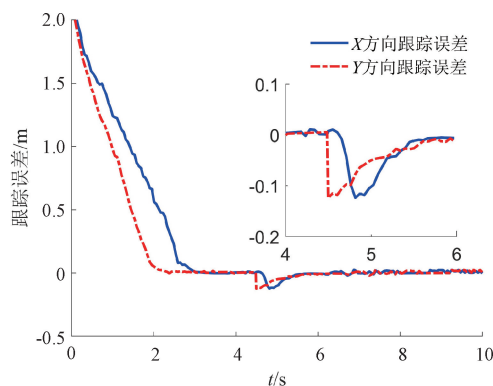


图 10 施加横向侧滑下 WMR 的跟踪误差

Fig. 10 Tracking error of WMR under lateral sideslip

图 11 为 WMR 在曲线行驶过程中遭受纵向打滑的模拟实验。在 15 s 处施加 20 cm 纵向打滑下 WMR 的目标跟踪行驶轨迹。从图 11 中可以看出,WMR 在施加打滑之前能够稳定地跟随目标轨迹。打滑干扰作用下,虽然出现了短暂的波动,但 WMR 迅速恢复并继续沿着目标轨迹行进。表明所提方法具有良好的防纵向滑动能力,能够有效应对打滑干扰并快速回归稳定状态。

图 12 为 WMR 受到纵向打滑干扰下的 X 和 Y 方向的跟踪误差。运行初期,WMR 于 2.07 s 迅速趋近目标,

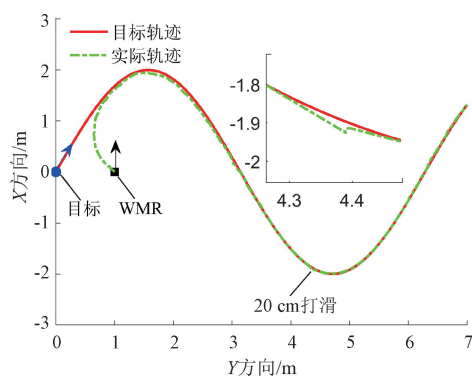


图 11 施加纵向打滑下 WMR 的目标跟踪

Fig. 11 Target tracking of WMR under longitudinal slip

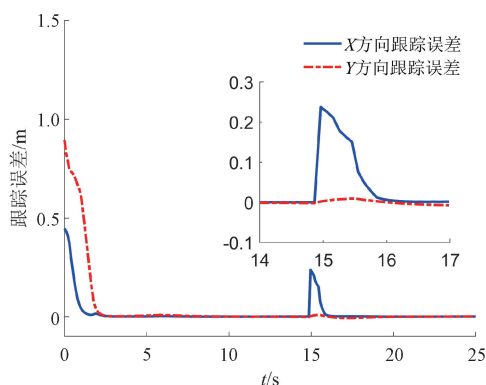


图 12 施加纵向打滑下 WMR 的跟踪误差

Fig. 12 Tracking error of WMR under longitudinal slip

且跟踪误差较小。在受到纵向外力导致纵向打滑后,WMR 误差出现明显波动。但在本文方法控制作用下,跟踪误差迅速收敛且稳定在 0.025 m 以内。综上所述,所提方法有较强的动态响应能力和控制精度。

5 结 论

本文提出了一种基于双曲正切视线制导策略和自抗扰控制算法相结合的控制方法,旨在提高轮式移动机器人在侧滑和打滑等复杂情况下的目标跟踪能力。首先将双曲正切函数引入传统的视线制导策略中,利用其非线性特性对误差进行调节,且设计分区切换机制实现误差的分区控制。然后利用 ADRC 算法使 WMR 快速且稳定地跟踪上期望速度和期望航向角,实现目标跟踪任务。同时采用扩张状态观测器估计和补偿未知干扰,进一步增强了系统的抗干扰能力。最后,通过仿真实验和实车实验验证了所提控制方法的有效性,在实际测试中 WMR 在遭受模拟打滑后可快速恢复到既定轨迹且跟踪误差稳定于 0.025 m 以内,表明具有较高的控制精度。虽然所提方法在实验室测试环境下表现良好,但未考虑动态障

碍物等情形,未来将引入动态避障功能和机器学习参数优化等,以期进一步提高复杂环境下的适应能力和响应效率。

参考文献

- [1] 周正阳,潘树国,蔚保国,等. 基于 ABMSSA 的 PP 算法分布式自动驾驶轨迹跟踪控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6): 50-57.
- ZHOU ZH Y, PAN SH G, WEI B G, et al. Distributed automatic driving trajectory tracking control strategy based on PP algorithm based on ABMSSA [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 50-57.
- [2] 于华成,艾自东. 基于终端滑模控制的移动机器人轨迹跟踪[J]. 电子测量技术, 2022, 45(11): 78-82.
- YU H CH, AI Z D. Trajectory tracking of mobile robot based on terminal sliding mode control [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(11): 78-82.
- [3] AHN J, SHIN S, KIM M, et al. Accurate path tracking by adjusting look-ahead point in pure pursuit method[J]. International Journal of Automotive Technology, 2021, 22(1): 119-129.
- [4] WANG M, LYU X, CHEN J X, et al. Improved pure pursuit algorithm based path tracking method for autonomous vehicle[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2024, 28(4): 1034-1042.
- [5] WANG L, ZHAI ZH Q, ZHU ZH X, et al. Path tracking control of an autonomous tractor using improved Stanley controller optimized with multiple-population genetic algorithm[J]. Actuators, 2022, 11(1): 22-22.
- [6] 王宁,贾薇,吴浩峻. 欠驱动无人船路径跟踪:一种有限时间正切漂角视线制导方法[J/OL]. 控制与决策, 1-9[2024-10-05].
- WANG N, JIA W, WU H J. Path following of underactuated marine vehicles: A finite-time sideslip-tangent los guidance approach[J/OL]. Control and Decision, 1-9[2024-10-05].
- [7] 周彬,黄兵,毛磊,等. 基于前视角引导的欠驱动水面无人艇自适应路径跟踪控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(1): 73-80.
- ZHOU B, HUANG B, MAO L, et al. Adaptive path tracking control of underactuated unmanned surface vessels based on the frontal point of view[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(1): 73-80.
- [8] AZIZI M R, RASTEGARPANAH A, STOLKIN R. Motion planning and control of an omnidirectional mobile robot in dynamic environments [J]. Robotics, 2021, 10(1): 48.
- [9] GAO X SH, YAN L, GERADA C. Modeling and analysis in trajectory tracking control for wheeled mobile robots with wheel skidding and slipping: Disturbance rejection perspective [J]. Actuators, 2021, 10(9): 222.
- [10] FU W J, LIU Y, ZHANG X M. Research on accurate motion trajectory control method of four-wheel steering AGV based on Stanley-PID control[J]. Sensors, 2023, 23(16): 7219.
- [11] IBRAHIM A E B. Self-tuning look-ahead distance of pure-pursuit path-following control for autonomous vehicles using an automated curve information extraction method[J]. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 2022, 20(3): 709-719.
- [12] LI D F, ZHANG Y L, LI P, et al. Position errors and interference prediction-based trajectory tracking for snake robots[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(9): 1810-1821.
- [13] 刘清河,王泽文,赵立军. 自适应 LOS 制导结合 MPC 控制的车辆循迹优化[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(1): 96-104.
- LIU Q H, WANG Z W, ZHAO L J. Vehicle tracking optimization based on adaptive LOS guidance and MPC control[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(1): 96-104.
- [14] LI S H, ZHANG J H, ZHAO K, et al. Trajectory tracking control for four-mecanum-wheel mobile vehicle: A variable gain active disturbance rejection control approach[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2022, 32(4): 1990-2006.
- [15] 刘小松,魏昌斌,单泽涛,等. 基于扩张状态观测器的里程计定位补偿无人车轨迹跟踪控制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 313-320.
- LIU X S, WEI CH B, SHAN Z T, et al. Trajectory tracking control of unmanned vehicles with odometer positioning compensation based on extended state observer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

2024, 45(7): 313-320.

- [16] 卢艳军, 王柏森, 张晓东. 基于 BFO-FPA 参数寻优无人直升机轨迹跟踪自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 261-269.

LU Y J, WANG B S, ZHANG X D. Unmanned helicopter trajectory tracking active disturbance rejection control based on BFO-FPA parameter optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 261-269.

作者简介



刘小松, 2016 年于吉林大学获得博士学位, 现为长春理工大学讲师、硕士生导师。主要研究方向为信息感知与先进控制技术, 复杂系统建模、仿真与控制。

E-mail: liuxs@cust.edu.cn

Liu Xiaosong received her Ph. D. degree from Jilin University in 2016. Now she is a lecturer and master supervisor at Changchun University of Science and Technology. Her main research interests include information perception and advanced control technology, modeling, simulation and control of complex systems.



朱焕海, 2021 年于太原工业学院获得学士学位, 现为长春理工大学硕士研究生。主要研究方向为信息感知与先进控制技术, 机器人控制。

E-mail: liuxs@cust.edu.cn

Zhu Huanhai received her bachelor's degree from Taiyuan Institute of Technology in 2021. Now she is a master's student at Changchun University of Science and Technology. Her main research interests are information perception and advanced control technology, robot control.



单泽彪 (通信作者), 2016 年于吉林大学获得博士学位, 现为长春理工大学副教授、硕士生导师。主要研究方向为无人系统自主控制, 信号检测与估计理论以及压缩感知技术。

E-mail: zbshan@cust.edu.cn

Shan Zebiao (Corresponding author) received his Ph. D degree from Jilin University in 2016. Now he is an associate professor and master supervisor at Changchun University of Science and Technology. His main research interests include autonomous control of unmanned systems, signal detection and estimation theory and compressed sensing technology.