

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2412575

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*

刘小松¹, 魏昌斌¹, 单泽涛², 单泽彪^{1,3}, 刘云清¹

(1. 长春理工大学电子信息工程学院 长春 130022; 2. 诺博橡胶制品有限公司河北省汽车减震与密封橡胶产品技术创新中心 保定 072550; 3. 长春气象仪器研究所 长春 130102)

摘要:无人车的轨迹跟踪精度与车载传感器密切相关,应用图像、基站定位等方法容易受到实际中存在的各种干扰的影响导致传感器数据出现误差甚至丢失,进而影响无人车的轨迹跟踪精度。鉴于此本文以差速驱动型无人车为研究对象,提出了一种仅依赖轮式里程计的无人车轨迹跟踪控制方法,同时通过扩张状态观测器来估计总扰动的方式解决里程计在复杂工况下受干扰产生读数偏移以及长时间运行产生的累计误差等问题。本文首先对里程计的定位过程进行了分析,通过对里程计建立扩张状态观测器准确测量影响定位的干扰,并且针对里程计的偏差,采取扰动补偿措施以提升定位精度。随后对车辆的轨迹跟踪动态误差进行了深入研究,并设计了相应的误差方程,以制定轨迹跟踪控制策略。在实际弯曲道路测试中,车辆可以稳定在0.21 m的跟踪误差范围内,验证了本文所提方法的可行性和有效性。

关键词:无人车控制;扩张状态观测器;轮式里程计;扰动补偿;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

Trajectory tracking control of unmanned vehicles with odometer positioning compensation based on extended state observer

Liu Xiaosong¹, Wei Changbin¹, Shan Zetao², Shan Zebiao^{1,3}, Liu Yunqing¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Nobo Rubber Products Co., Ltd., Hebei Province Automotive AVS & WS Product Technology Innovation Center, Baoding 072550, China; 3. Changchun Meteorological Instrument Research Institute, Changchun 130102, China)

Abstract: The precision of trajectory tracking in autonomous vehicles is closely linked to the performance of onboard sensors. However, various interferences can cause sensor data loss, impacting the vehicle's movement. This article focuses on differential drive unmanned vehicles, proposing a trajectory tracking control method that relies solely on wheel odometers. By expanding the state observer to estimate total disturbances, it addresses the issues of reading deviations caused by interference in complex conditions and cumulative errors from long-term odometer operation. Firstly, the paper analyzes the odometer's positioning process and uses an extended state observer to accurately measure disturbances affecting positioning. Compensation measures are then applied to reduce odometer bias and improve positioning accuracy. Following this, the dynamic tracking errors of the vehicle are thoroughly investigated, leading to the formulation of error equations for a trajectory tracking control strategy. In actual road testing, the vehicle is stabilized within a tracking error range of 0.21 m, verifying the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: unmanned vehicle control; extended state observer; wheel odometry; disturbance compensation; active disturbance rejection control

收稿日期: 2024-03-04 Received Date: 2024-03-04

* 基金项目: 吉林省自然科学基金项目(YDZJ202301ZYTS412)、吉林省教育厅产业化培育项目(JJKH20240940CY)、吉林省教育厅科学技术项目(JJKH20240938KJ)资助

0 引言

无人车、无人机等是当前研究及应用最为广泛的无人自主控制系统^[1-2],其中差速型无人车具有结构简单、机动性能良好、适应能力强等特点被广泛应用在军事、地质勘探、抢险救援、仓储物流等领域^[3-5]。无人车平台通过整合先进的软硬件技术,实现对周围环境的感知与理解,从而能够自主地做出决策,并执行相应的行动。精准的轨迹跟踪是无人车实现高效自主导航的核心要素,其确保车辆能够在复杂多变的环境中准确地沿着预定轨迹行驶或达到目标位置。因此,轨迹跟踪技术成为研究的重点之一,各领域专家不断探索新方法和算法,以提高无人车在不同应用场景中的定位精度和路径跟踪效果。

当前,许多研究学者已经提出多种适用于自主车辆轨迹跟踪的控制方法,其中包括滑模控制(sliding mode control, SMC)^[6-7]、基于视觉的控制方法^[8]、滚动时域控制(rolling horizon control, RHC)^[9]和神经网络(neural network, NN)方法^[10-11]等多种方案。Taghavifar等^[12]引入了一种新型的NN算法,采用积分滑模控制(integral sliding mode controller, ISMC)方法,并结合补偿策略以最大限度地减少路面对车辆的影响。仿真结果表明这种自适应神经网络控制器能够有效地跟踪预先规划的路径。Kim等^[13]提出了一种基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的轨迹跟踪算法,将转向控制过程转化为一个二次规划问题,以获得最佳的转向控制策略,同时考虑了转向系统的动态特性。该方法确保了在无人车进行轨迹跟踪时实现平稳、精确的控制。Chu等^[14]提出了具有动态误差的车辆轨迹跟踪系统,根据轨迹性能指标和自抗扰补偿设计了车辆轨迹跟随系统的自抗扰控制器(active disturbance rejection control, ADRC),解决系统不确定性、系统非线性和外部干扰对轨迹控制的影响。Lee等^[15]设计了线性二次最优预瞄控制器来跟踪期望路径,所提控制算法在不同驾驶环境下都具有较高的控制精度。张军等^[16]针对四轮独立转向电动汽车基于MPC提出了一种横纵向耦合轨迹跟踪控制方法,对横向偏差、航向角偏差及纵向速度偏差进行闭环控制,提高了车辆行驶的稳定性。Chen等^[17]将线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)应用到六轮转向的无人车控制中,解决轮子与地形之间接触表面存在横向和纵向滑移问题。

上述研究方法虽然在一定程度上提高了轨迹跟踪的精度。但是,仍存在如下问题:1)控制器参数较多,调参困难;2)算法计算量大,需要高性能的设备来配合,增加了硬件成本;3)未考虑到无人车作业环境对车辆环境感

知的影响。针对以上问题,本文结合里程计的定位过程及轨迹跟踪误差进行分析,通过对里程计的定位过程中产生扰动的分析以建立里程计定位模型,利用扩张状态观测器(extended state observer, ESO)对未知非线性系统进行状态重构、估计的特点对定位过程中的扰动进行观测,并设计补偿器对扰动补偿。此外将ADRC应用到无人车的轨迹跟踪上,根据车辆的横向误差和纵向误差设计基于ADRC的轨迹跟踪控制器,利用Lyapunov稳定性理论对系统的稳定性进行分析。最后通过仿真分析和实车实验验证了本文所提方法的有效性。

1 问题描述

1.1 基于里程计的定位过程

轮式里程计是车辆常用的传感器,用于测量车轮的速度 v 和航向角 θ 。基于里程计的车辆定位过程是增量式的,假设在 t 时刻车辆的位置为 X_t ,在 $t \sim t+1$ 这段时间内的移动增量是 ΔX_t^{t+1} ,则 t 时刻车辆的位置 X_t 加上车辆的移动增量 ΔX_t^{t+1} ,即可得到车辆在 $t+1$ 时刻的位置 X_{t+1} 。其定位过程可以由式(1)来描述。

$$X_{t+1} = X_t + \Delta X_t^{t+1} \quad (1)$$

式中: $X_t = [x_t, y_t]^T$ 表示 t 时刻车辆在坐标系 F_1 下的坐标。 $\Delta X_t^{t+1} = [\Delta x \ \Delta y]^T = T \cdot L(\theta)$ 表示车辆在 $t \sim t+1$ 时间段内的移动增量, Δx 和 Δy 分别表示车辆在 $t \sim t+1$ 时间段内在 X 方向和 Y 方向的移动增量, r 表示车轮的半径, $L(\theta)$ 表示沿车辆航向角方向走过的距离, $T = [\cos \theta \ \sin \theta]^T$ 表示将 ΔX_t^{t+1} 投影到 X 、 Y 方向的投影矩阵。

事实上,由于存在各种不确定因素,车辆真实的坐标和里程计计算出的坐标存在偏差。导致里程计出现测量偏差的原因是复杂且耦合的,总体上可以归为4类,由于传感器自身精度造成的系统测量误差 $\tilde{\theta}, \tilde{v}$;地轮间摩擦力及车辆负载等造成的不确定干扰 $D(t)$;由于所建立的系统模型不完善带来的建模误差 $E(\tilde{\theta}, \tilde{v})$;将非线性系统线性化造成的误差 $F(\tilde{\theta}, \tilde{v})$ 。考虑到上述因素的里程计定位模型被描述为:

$$X_{t+1} = X_t + \Delta X_t^{t+1} =$$

$$X_t + \Delta X(o) + D(t) + E(\tilde{\theta}, \tilde{v}) + F(\tilde{\theta}, \tilde{v}) \quad (2)$$

式中: $\Delta X(o)$ 表示车辆实际的移动增量。

1.2 车辆轨迹跟踪的误差动态模型

差速驱动型无人车的结构如图1所示。两个前轮为驱动轮,各自由独立驱动的直流电机提供动力,左右驱动轮各自装有里程计用于车辆测速及记录车辆的移动距离。后轮是万向轮仅提供支撑作用。为了方便描述车辆运动,定义一个以地面作为参考的全局坐标系 $F_1(X, Y)$,定义移动机器人的完整位姿为 $q = [x \ y \ \theta]^T$,其中 x 和 y

表示车辆在坐标系 F_1 中的坐标, θ 表示航向角。假设车轮与路面只有滚动摩擦而无滑动摩擦。无人车的运动过程可以由式(3)描述^[18]。

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{S}(\boldsymbol{q}) \cdot \boldsymbol{z} \quad (3)$$

式中: $\dot{\boldsymbol{q}} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\omega}]^T$ 为 \boldsymbol{q} 的导数。 $\boldsymbol{S}(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$, v 和 ω 分别为车辆的线速度和角速度。

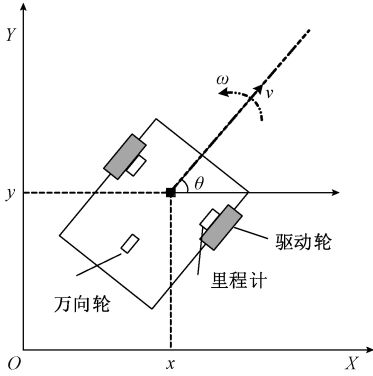


图 1 车辆结构图

Fig. 1 Vehicle structural diagram

设 $\boldsymbol{p}_r = [x_r, y_r]^T$ 为坐标系 F_1 下车辆的期望位置。定义 X 方向和 Y 方向的跟踪误差分别为 $e_x = x - x_r, e_y = y - y_r$, 其误差描述如图 2 所示, 系统的轨迹误差方程为:

$$\dot{\boldsymbol{e}} = \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{v} - \dot{\boldsymbol{p}}_r + \boldsymbol{d} \quad (4)$$

式中: $\dot{\boldsymbol{e}} = [\dot{e}_x \ \dot{e}_y]^T$ 为误差的导数。 $\dot{\boldsymbol{p}}_r = [\dot{x}_r, \dot{y}_r]^T$ 为期望位置的导数。 $\boldsymbol{d} = [d_x \ d_y]^T$, d_x, d_y 分别为车辆 X 方向和 Y 方向受到的干扰。

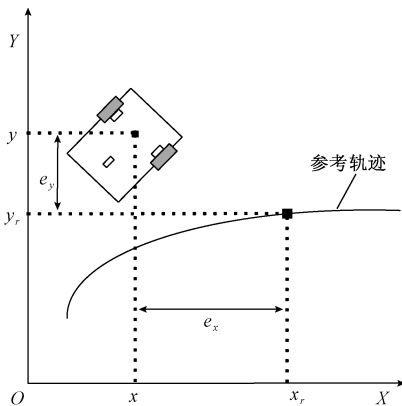


图 2 轨迹误差示意图

Fig. 2 Trajectory error schematic

2 控制系统设计

2.1 里程计定位补偿策略

传统的定位方法通过建立模型和融合多次测量值减小干扰对定位的影响,但是系统模型难以被精确的建立,系统参数也会随环境变化。并且由于定位过程是增量形式的,一旦里程计历史测量值出现误差,随着时间的推移定位误差会不断累积。

与传统方法不同,本节把自抗扰思想应用到里程计定位补偿中。从以上分析可知,里程计的测量值存在误差会导致轨迹误差增大,本文提出扰动补偿策略。在本文所提的补偿策略中把所有导致误差的因素统一视为扰动 \boldsymbol{f}_{all} 。令 $\boldsymbol{X} = [x \ y]^T, \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{v} = \Delta \dot{\boldsymbol{X}}(o)$ 式(2)可以改写成:

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{v} + \boldsymbol{f}_{all} \quad (5)$$

式中: $\dot{\boldsymbol{X}}$ 表示定位坐标 \boldsymbol{X} 的导数, $\boldsymbol{f}_{all} = \boldsymbol{D}(t) + \boldsymbol{E}(\tilde{\theta}, \tilde{v}) + \boldsymbol{F}(\tilde{\theta}, \tilde{v})$ 。 $\boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{v}$ 的物理意义为车辆在 X 和 Y 方向上的速度分量。

在自抗扰中用扩张状态观测器观测系统中的干扰,ESO 阶次越高观测快速变化扰动的能力越强,但需要计算的时间也越长。在车辆轨迹跟踪中需要兼顾计算精度和计算速度,考虑到里程计定位过程中受到总扰动 \boldsymbol{f}_{all} 的导数变化缓慢,几乎为 0。因此选用二阶 ESO,二阶 ESO 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\epsilon}}_1 = \boldsymbol{z}_1 - \boldsymbol{X} \\ \dot{\boldsymbol{z}}_1 = \boldsymbol{z}_2 + \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{v} - \beta_1 \boldsymbol{\epsilon}_1 \\ \dot{\boldsymbol{z}}_2 = \boldsymbol{z}_3 - \beta_2 \boldsymbol{\epsilon}_1 \\ \dot{\boldsymbol{z}}_3 = -\beta_3 \boldsymbol{\epsilon}_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: \boldsymbol{z}_1 是对 \boldsymbol{X} 的观测值, \boldsymbol{z}_2 是对 \boldsymbol{f}_{all} 的观测值, \boldsymbol{z}_3 是对 $\dot{\boldsymbol{f}}_{all}$ 的观测值。 $\boldsymbol{\epsilon}_1$ 表示观测值与实际值之间的误差。 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 表示 ESO 的增益参数。

补偿后的坐标为:

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{v} + \boldsymbol{f}_{all} - \boldsymbol{z}_2 \quad (7)$$

2.2 控制器设计

定义 $x_1 = e_x, x_2 = e_y, x_{d_x} = d_x, x_{d_y} = d_y$ 。 u_x, u_y 分别为在 X, Y 方向对轨迹偏移误差的补偿量。则系统的误差方程可以写成:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = u_x + \cos\theta \cdot v - \dot{x}_r + x_{d_x} \\ \dot{x}_2 = \dot{e}_y \\ \dot{x}_3 = u_y + \sin\theta \cdot v - \dot{y}_r + x_{d_y} \\ \dot{x}_4 = \dot{e}_x \end{cases} \quad (8)$$

根据上式可以写出系统误差方程的线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = u_x + \cos\theta \cdot v - \dot{x}_r + \hat{x}_{d_x} - \alpha_1(\hat{x}_1 - x_1) \\ \dot{\hat{x}}_{d_x} = -\alpha_0(\hat{x}_1 - x_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = u_y + \sin\theta \cdot v - \dot{y}_r + \hat{x}_{d_y} - \gamma_1(\hat{x}_2 - x_2) \\ \dot{\hat{x}}_{d_y} = -\gamma_0(\hat{x}_2 - x_2) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_{d_1}, \hat{x}_{d_2}$ 分别为 $x_1, x_2, x_{d_1}, x_{d_2}$ 的观测值。参数 $\alpha_0, \alpha_1, \gamma_0, \gamma_1$ 为 LESO 的增益。

最终目标是设计控制率 u_x, u_y 使得误差收敛到 0。控制率设计如下:

$$\begin{cases} u_x = -\cos\theta \cdot v + \dot{x}_r - \dot{\hat{x}}_{d_x} - k_1 e_x \\ u_y = -\sin\theta \cdot v + \dot{y}_r - \dot{\hat{x}}_{d_y} - k_2 e_y \end{cases} \quad (10)$$

式中: k_1, k_2 为控制率可调参数, 令 $\mathbf{K} = [k_1, k_2]^T$ 。

3 系统稳定性分析

3.1 定位补偿策略分析

假设 1 里程计扰动变化缓慢, 即:

$$\ddot{f}_{all} = 0 \quad (11)$$

定理 1 式(6)用来观测里程计定位过程中的扰动。

$$\text{扰动 } f_{all} \text{ 满足假设 1, ESO 的参数满足 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & 0 \\ -\beta_2 & 0 & 1 \\ -\beta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

为 Hurwitz 矩阵, 则观测误差 $\boldsymbol{\varepsilon} = [\boldsymbol{\varepsilon}_1, \boldsymbol{\varepsilon}_2, \boldsymbol{\varepsilon}_3]^T$ 渐进稳定。

证 定义观测误差为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{z}_1 - \mathbf{X} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_2 = \mathbf{z}_2 - \dot{f}_{all} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_3 = \mathbf{z}_3 - \ddot{f}_{all} \end{cases} \quad (12)$$

对式(11)求导, 代入式(5)和(6)可得:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 = -\beta_1 \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_2 \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 = -\beta_2 \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_3 \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_3 = -\beta_3 \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \dot{f}_{all} \end{cases} \quad (13)$$

由假设 1 可知 $\dot{f}_{all} = 0$, 式(12)可以写成如下形式:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (14)$$

因为 \mathbf{A} 为 Hurwitz 矩阵, 存在矩阵 \mathbf{P} 满足:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{I} \quad (15)$$

选择 Lyapunov 函数为:

$$\mathbf{V}(\boldsymbol{\varepsilon}) = \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (16)$$

对该函数求导有:

$$\dot{\mathbf{V}}(\boldsymbol{\varepsilon}) = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{P} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{A}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \boldsymbol{\varepsilon} =$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \boldsymbol{\varepsilon} = -\|\boldsymbol{\varepsilon}\|^2 \quad (17)$$

当 $\boldsymbol{\varepsilon} \rightarrow 0$ 时, 式(6)的观测误差 $\boldsymbol{\varepsilon} = [\boldsymbol{\varepsilon}_1, \boldsymbol{\varepsilon}_2, \boldsymbol{\varepsilon}_3]^T$ 渐进稳定。

3.2 自抗扰控制器的稳定性分析

将反馈控制率式(10)带入式(8), 可得系统跟踪误差的动态方程为:

$$\begin{cases} \dot{e}_x = -k_x e_x - e_{d_x} \\ \dot{e}_y = -k_y e_y - e_{d_y} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $e_{d_x} = \hat{x}_{d_1} - d_x, e_{d_y} = \hat{x}_{d_2} - d_y$ 。将式(9)减去式(8)得到 LESO 的误差方程为:

$$\begin{cases} \dot{e}_{x_1} = e_{d_x} - \alpha_1 e_{x_1} \\ \dot{e}_{d_x} = -\alpha_0 e_{x_1} - \dot{d}_x \\ \dot{e}_{x_2} = e_{d_y} - \gamma_1 e_{x_2} \\ \dot{e}_{d_y} = -\gamma_0 e_{x_2} - \dot{d}_y \end{cases} \quad (19)$$

定义变量 $\mathbf{E}_1 = [e_x, e_y]^T, \mathbf{E}_2 = [e_{x_1}, e_{d_1}]^T, \mathbf{E}_3 = [e_{x_2}, e_{d_2}]^T$, 则关于系统的轨迹跟踪误差方程可以表示为:

$$\dot{\mathbf{E}} = \mathbf{C}\mathbf{E} + \mathbf{D} \quad (20)$$

$$\text{式中: } \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \\ \mathbf{E}_3 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{B}_1 & \mathbf{B}_2 \\ 0 & \mathbf{C}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C}_3 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_3 \dot{d}_x \\ \mathbf{B}_3 \dot{d}_y \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_1 = [-k_x \ 0; \ 0 \ -k_y]^T, \mathbf{C}_2 = [-\alpha_1 \ 1; \ -\alpha_0 \ 0]^T, \mathbf{C}_3 = [-\gamma_1 \ 1; \ -\gamma_0 \ 0]^T, \mathbf{B}_1 = [0 \ -1; \ 0 \ 0]^T, \mathbf{B}_2 = [0 \ 0; \ 0 \ -1]^T, \mathbf{B}_3 = [0 \ -1]^T。$$

由于 \mathbf{C} 为 Hurwitz 矩阵, 故存在一个正定矩阵 \mathbf{H} 使得 $\mathbf{C}^T \mathbf{H} + \mathbf{H} \mathbf{C} = -\mathbf{I}$ 成立。

定理 2 当选定参数合适时, 系统的轨迹跟踪误差会收敛至有界区域 \mathbf{Z} 。

$$\mathbf{Z} = \left\{ \mathbf{E} \mid \|\mathbf{E}\| \leq \frac{\mu^2 \lambda_{\max}^2(\mathbf{H})}{\lambda_{\min}^2(\mathbf{H}) (1 - \lambda_{\max}(\mathbf{H}))} \right\} \quad (21)$$

式中: $\lambda_{\min}(\mathbf{H}), \lambda_{\max}(\mathbf{H})$ 分别为正定矩阵 \mathbf{H} 的最小、最大特征值。

证 定义 Lyapunov 函数 $\mathbf{V}(\mathbf{E}) = \mathbf{E}^T \mathbf{H} \mathbf{E}$, 对 $\mathbf{V}(\mathbf{E})$ 求导得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}(\mathbf{E}) &= 2\mathbf{E}^T \mathbf{H} \dot{\mathbf{E}} = 2\mathbf{E}^T \mathbf{H} (\mathbf{C}\mathbf{E} + \mathbf{D}) = \\ &= -\|\mathbf{E}\|^2 + 2\mathbf{E}^T \mathbf{H} \mathbf{D} \leq -\|\mathbf{E}\|^2 + 2\lambda_{\max}(\mathbf{H}) \|\mathbf{E}\| \|\mathbf{D}\| \leq \\ &= -\|\mathbf{E}\|^2 + \lambda_{\max}(\mathbf{H}) \|\mathbf{E}\|^2 + \lambda_{\max}(\mathbf{H}) \|\mathbf{D}\|^2 = \\ &= -(1 - \lambda_{\max}(\mathbf{H})) \|\mathbf{E}\|^2 + \lambda_{\max}(\mathbf{H}) \|\mathbf{D}\|^2 \end{aligned} \quad (22)$$

由于:

$$\frac{\mathbf{V}(\mathbf{E})}{\lambda_{\max}(\mathbf{H})} \leq \|\mathbf{E}\| \leq \frac{\mathbf{V}(\mathbf{E})}{\lambda_{\min}(\mathbf{H})} \quad (23)$$

将式(23)带入到式(22)中可得:

$$\dot{V}(E) \leq - \left(\frac{1}{\lambda_{\max}(H)} - 1 \right) V(E) + \lambda_{\max}(H) \|D\|^2 \quad (24)$$

根据假设 1 可得式 (24) 的解为 $V(E) \leq \frac{\mu^2 \lambda_{\max}^2(H)}{1 - \lambda_{\max}(H)} + \left(V(0) - \frac{\mu^2 \lambda_{\max}^2(H)}{1 - \lambda_{\max}(H)} \right) \times e^{-[\frac{1}{\lambda_{\max}(H)} - 1]t}$, 系统的轨迹跟踪误差会收敛至有界区域 Z 。

4 仿真与实验验证

对无人车及其控制策略分别进行数值仿真分析和实车道路行驶控制实验验证。

4.1 数值仿真实验

仿真实验中涉及到的参数如下: $\beta_1 = 30, \beta_2 = 300, \beta_3 = 1\ 000, k_1 = 32, k_2 = 32, \alpha_0 = 2.5, \alpha_1 = 18.75, \gamma_0 = 2.5, \gamma_1 = 18.75$ 。参数的选取依据如下, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为式(6)中的观测参数一般取 $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3, k_1, k_2$ 为轨迹跟踪控制器的反馈参数,根据当前误差的大小,以比例的方式调整控制输出,在本实验中经测试选取 $k_1 = 32, k_2 = 32$ 。 $\alpha_0, \alpha_1, \gamma_0, \gamma_1$ 其取值原则满足特征多项式 $p_1 = s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0$ 和 $p_2 = s^2 + \gamma_1 s + \gamma_0$ 的根轨迹在复平面 s 的左半平面^[19]。仿真实验中里程计在 X 和 Y 方向受到的

扰动设为 $f_x = \sin\left(\frac{\pi}{5}t\right)$ 、

$$f_y = \begin{cases} 0, & 5k \leq t < 10k \\ 0.02(t - 10k)^2, & 10k \leq t < 15k \end{cases}, k = 0, 1, 2, \dots$$

实验 1 里程计补偿策略的有效性实验。设期望轨迹为 $\begin{cases} x_r = t \\ y_r = t \end{cases}$, 在引入里程计定位补偿策略之前和之后进行对比实验。实验结果如图 3 所示,其中实线表示期望轨迹,点划线为未对里程计补偿时车辆的行驶轨迹,虚线表示对里程计采取补偿策略之后车辆的行驶轨迹。从图 3 可以看出应用里程计补偿策略之后车辆的轨迹跟踪效果得到明显的提升。

实验 2 车辆轨迹跟踪对比仿真实验。设车辆跟踪的参考轨迹为双纽线,其轨迹方程为 $\begin{cases} x_r = \cos(0.1t) \\ y_r = \sin(0.1t) \cos(0.1t) \end{cases}$, 参考轨迹中的 t 为仿真时间。为了展示本文所提出的轨迹跟踪控制方法的有效性,以文献[20]中的 PID 设计方法作为参考对比方法, PID 的参数设置为 $K_p = 30, K_i = 15, K_d = 10$ 。两种方法下的轨迹跟踪对比实验如图 4 所示。图中实线为车辆的期望轨迹,点划线为 PID 控制下车辆的运动轨迹,虚线表示本文方法控制下车辆的运动轨迹。当里程计受到外界影响时,车辆无法获取到真实的轨迹偏差。尤其是车辆行

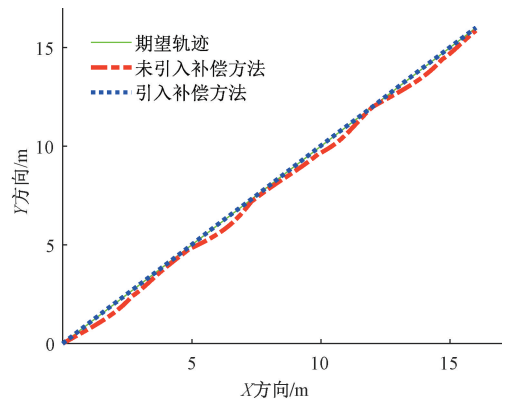


图 3 里程计补偿前后的轨迹跟踪对比

Fig. 3 Comparison of trajectory tracking before and after odometer compensation

驶在弯道路况时,左右车轮的速度变化量大且变化量不一致,导致里程计计算出的偏移误差远远偏离实际偏移误差,在轨迹跟踪过程中 PID 算法并未对里程计的数据进行补偿,因此 PID 控制下的车辆移动轨迹与期望轨迹相比均存在一定的误差。本文提出的 ADRC 方法对里程计进行了干扰补偿,弥补了外界环境对车辆的影响。从图 4 中可以看出,车辆的实际行驶轨迹基本与期望轨迹一致。

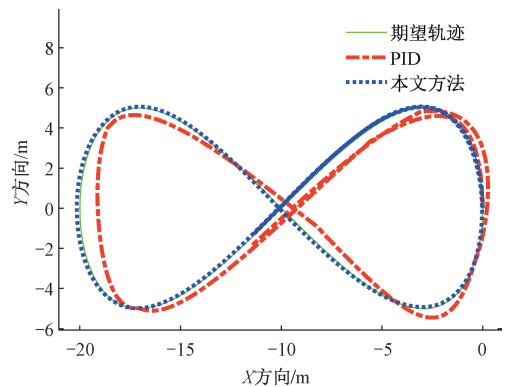


图 4 双纽线行驶轨迹

Fig. 4 Driving trajectory of double helix

图 5 所示为 ESO 扰动观测曲线,其中实线为里程计实际受到的扰动,虚线为 ESO 观测到的扰动。从图 5 可知 X 方向上受到的干扰变化平缓,ESO 的观测值可以稳定的跟随实际扰动曲线,即 ESO 能有效估计出里程计受到的扰动。 Y 方向上受到的扰动变化剧烈,ESO 观测值和实际值间存在幅度误差,但是误差总体上较小。

图 6 为车辆的轨迹偏移误差。通过图 6 可以看出 X 方向上的轨迹跟踪误差较小,可以忽略不计。虽然里程计在 Y 方向上受到的扰动变化剧烈,但是从图 6 中 Y 方向上的轨迹跟踪误差来看,仅在如 6 s 处发生扰动突变时

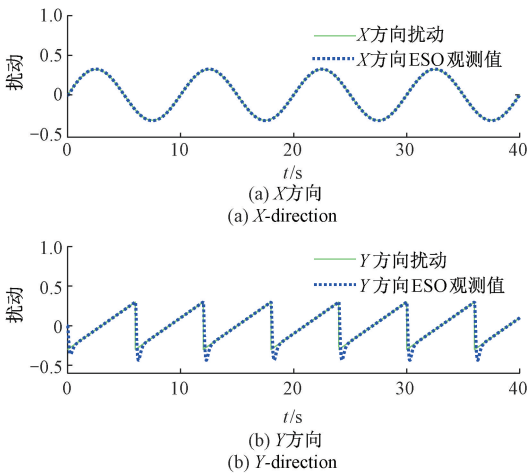


图5 扰动及其观测结果

Fig. 5 Disturbance and its observation results

车辆开始偏离轨迹,在控制器的作用下在3 s内抑制住了轨迹跟踪误差的增长趋势并控制车辆使误差收敛,并且Y方向出现的最大误差为0.03 m,证实控制器可以有效对扰动进行补偿。

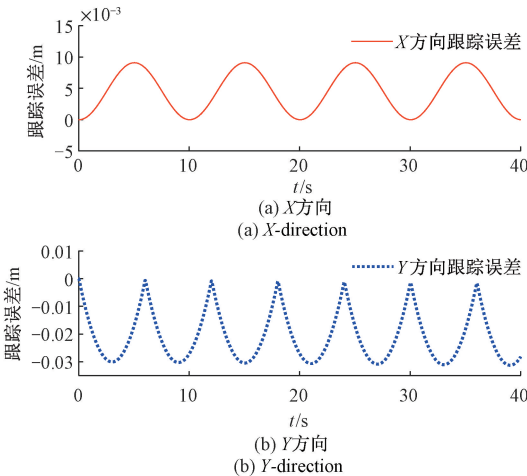


图6 轨迹偏移误差

Fig. 6 Trajectory offset error

4.2 实车道路测试实验

实验所用双轮驱动差速型无人车如图7所示。该车主要由微控制器及驱动电路、带减速器的驱动电机MY1016Z-250W24V、轮式里程计MT-3806-12-10-RS、24 V铅酸蓄电池及金属车架组成。两前轮为车辆的驱动轮,由两个独立驱动的24 V/250 W的直流电机提供动力。将本文所提方法与PID控制方法分别应用到该无人车实验平台上,在同一路面上进行实地测试。分别测试车辆的直线行驶和弯道行驶的控制效果。

实验1 车辆直线行驶控制实验。两种方法的直线



图7 无人车实验平台

Fig. 7 Unmanned vehicle experimental platform

行驶轨迹如图8所示,实线为期望直线轨迹,点划线为PID控制下的车辆行驶轨迹,由于里程计的累积误差得不到有效补偿,在PID控制下车辆逐渐偏离期望轨迹,在车辆行驶8 m后出现0.2 m的误差。虚线为本文方法控制下的车辆行驶轨迹,从图中可以看出,在本文方法作用下车辆的移动轨迹基本与期望轨迹一致。

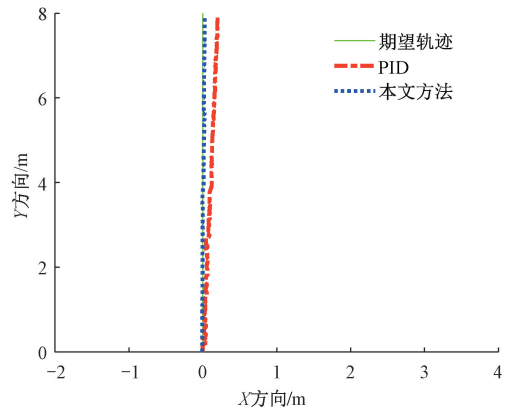


图8 直线行驶轨迹

Fig. 8 Straight travel trajectory

实验2 车辆曲线行驶控制实验。为了进一步验证所提方法的有效性,设计车辆的弯道行驶实验。设目标轨迹为一条连续90°转向的弯道路线,车辆启动时的位置设为(2.5 m, 0 m)。两种方法的实验结果如图9所示。实线为期望弯道轨迹,点划线为PID控制下的车辆行驶轨迹。从PID控制下的弯道行驶轨迹的变化可知,车辆在经过第一个弯道后开始出现偏离期望轨迹的趋势,由于其未对里程计进行补偿导致偏移误差累积,进而导致在之后的轨迹跟踪中车辆逐渐偏离期望轨迹。虚线为本文方法控制下的车辆行驶轨迹,在整个轨迹跟踪的过程中ESO对里程计受到扰动进行实时观测并对其进行补偿,因此车辆在进行连续弯道移动时偏移误差较小。从

两种方法的实验结果来看,本文所提控制方法可以有效抑制轨迹跟踪中的干扰,具有更优越的控制性能。

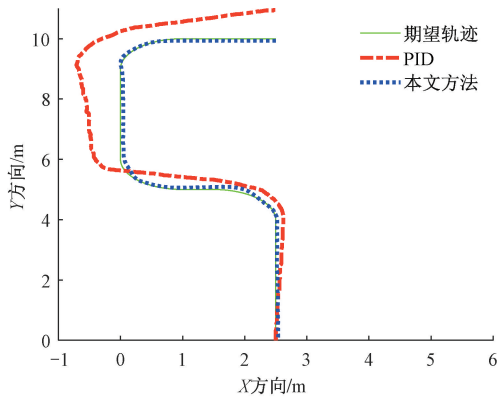


图9 弯道行驶轨迹

Fig. 9 Curved driving trajectory

5 结 论

在特殊环境下,无人车的车载传感器可能面临数据丢失的问题,致使无人车辆无法正常控制进而导致车辆偏离原定路线。为了解决这一问题,本文提出了一种基于里程计的轨迹跟踪控制方法。首先通过扩张状态观测器精确监测里程计的扰动,并采用相应的补偿策略来提高里程计的定位精度。其次根据对车辆结构的深入分析,设计与车辆结构相匹配的轨迹跟踪控制器,用于处理轨迹跟踪误差。最后利用所提方法对车辆的轨迹跟踪进行了模拟仿真,并进行了实车道路测试。测试结果表明,本文提出的控制方法能够有效减小轨迹跟踪误差,提高了无人车在特殊环境下的适应性。本文所提基于轮式里程计的轨迹跟踪控制策略不依赖于特定类型的无人车结构,而是基于通用的轮式里程计技术。因此,无论是差速驱动型、阿克曼转向型、全向轮驱动型等类型的无人车,凡是搭载了轮式里程计,均可应用本文提出的控制策略进行相关控制研究。

参考文献

[1] 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.

[2] 李永福,文跃洲,黄龙旺. 基于改进扩展状态观测器的四旋翼无人车轨迹鲁棒跟踪控制[J]. 仪器仪表学

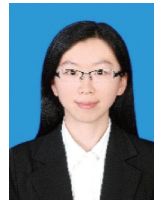
报, 2023, 44(4): 129-139.

LI Y F, WEN Y ZH, HUANG L W. Robust trajectory tracking control of quadrotor UAV based on the improved extended state observer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 129-139.

- [3] GUAN H J, WU SH B, XU SH H, et al. A planning framework of environment detection for unmanned ground vehicle in unknown off-road environment [J]. Journal of Automobile Engineering, 2023, 237 (10-11): 2387-2401.
- [4] CLAES D, OLIEHOEK F, BAIER H, et al. Decentralised online planning for multi-robot warehouse commissioning [C]. Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent systems, 2017, 1: 492-500.
- [5] 曹风魁,庄严,闫飞,等. 移动机器人长期自主环境适应研究进展和展望 [J]. 自动化学报, 2020, 46(2): 205-221.
CAO F K, ZHUANG Y, YAN F, et al. Long-term autonomous environment adaptation of mobile robots: State-of-the-art methods and prospects [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(2): 205-221.
- [6] 黄浩乾,郑康健,马惊天. 基于模型预测的AUV轨迹跟踪滑模控制方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2024, 32(2): 205-212.
HUANG H Q, ZHENG K J, MA J T. A sliding mode control method for AUV trajectory tracking based on model prediction [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2024, 32(2): 205-212.
- [7] XIE Y L, ZHANG X L, MENG W, et al. Coupled fractional-order sliding mode control and obstacle avoidance of a four-wheeled steerable mobile robot [J]. ISA Transactions, 2021, 108: 282-294.
- [8] 张仪,冯伟,王卫军,等. 融合LSTM和PPO算法的移动机器人视觉导航 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 132-140.
ZHANG Y, FENG W, WANG W J, et al. Visual navigation of mobile robots based on LSTM and PPO algorithms [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(8): 132-140.
- [9] AZIZI M R, RASTEGARPANAH A, STOLKIN R, et al. Motion planning and control of an omnidirectional mobile robot in dynamic environments [J]. Robotics, 2021, 10(1): 48-75.
- [10] LI Z J, DENG J, LU R Q, 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): 740-749.
- [11] YOO S J, CHOI Y H, PARK J B. Generalized predictive control based on self-recurrent wavelet neural network for stable path tracking of mobile robots; Adaptive learning rates approach[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2006, 53(6): 1381-1394.
- [12] TAGHAVIFAR H, RAKHEJA S. A novel terramechanics-based path-tracking control of terrain-based wheeled robot vehicle with matched-mismatched uncertainties [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 69(1): 67-77.
- [13] KIM E, KIM J, SUNWOO M. Model predictive control strategy for smooth path tracking of autonomous vehicles with steering actuator dynamics[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(7): 1155-1164.
- [14] CHU D F, LI H R, ZHAO CH Y, et al. Trajectory tracking of autonomous vehicle based on model predictive control with pid feedback [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 24(2): 2239-2250.
- [15] LEE T, KANG J, YI K, et al. An investigation on the integrated human driver model for closed-loop simulation of intelligent safety systems[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(3): 761-767.
- [16] 张军, 张闲, 张雪莹, 等. 四轮独立转向无人车辆斜向行驶轨迹跟踪控制方法[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(2): 161-169.
ZHANG J, ZHANG X, ZHANG X Y, et al. Trajectory tracking control strategy for oblique driving of 4WIS unmanned vehicle[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(2): 161-169.
- [17] CHEN CH, GAO H B, DING L, et al. Trajectory tracking control of WMRs with lateral and longitudinal slippage based on active disturbance rejection control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 107: 236-245.
- [18] YOO S J. Adaptive tracking control for a class of wheeled mobile robots with unknown skidding and slipping[J]. IET Control Theory and Applications, 2010, 4(10): 2109-2119.
- [19] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [20] GUPTA V, ARYA P P, CHAKRABARTY S. Modeling and PID control of two-wheel mobile robot with a manipulator and its implementation in SIMULINK[C]. Advances in Systems Engineering: Select Proceedings of NSC 2019. Springer Singapore, 2021: 603-610.

作者简介



刘小松, 2016年于吉林大学获得博士学位, 2022年博士后出站, 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 a Ph. D. degree from Jilin University in 2016 and then worked as a postdoctoral researcher until 2022. 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.



单泽彪(通信作者), 2016年于吉林大学获得博士学位, 现为长春理工大学讲师、硕士生导师, 长春气象仪器研究所博士后。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 a lecturer and master supervisor at Changchun University of Science and Technology, and a postdoctoral fellow at Changchun Institute of Meteorological Instruments. His main research interests include autonomous control of unmanned systems, signal detection and estimation theory and compressed sensing technology.