

基于双闭环结构的SSMR自抗扰轨迹跟踪 控制器设计

杜一鸣,程志江,李志文

(新疆大学 电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 为了实现四轮滑移转向移动机器人(SSMR)在受滑移和外界扰动情况下的高精度轨迹跟踪控制,设计了一种基于双闭环结构的自抗扰轨迹跟踪控制器,并给出了稳定性证明。首先要解决四轮SSMR旋转分运动对控制性能带来的影响,通过提出虚拟轮间距概念,引入无量纲参数,将旋转分运动的不确定影响通过虚拟轮间距来反映,并以此优化了传统机器人的数学模型;然后又考虑到机器人工作环境中的外界扰动影响,设计了双闭环结构的自抗扰轨迹跟踪控制器。该控制器具有结构简单、控制参数少、易于应用的特点;最后在软件仿真的基础上进一步搭建了实物仿真测试,并与传统PID方法进行了对比,结果表明该控制方法的轨迹跟踪精度更高,且抗扰性能提升了一倍以上。

关键词: 移动机器人;四轮滑移转向;轨迹跟踪;双闭环

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24249

Design of SSMR Auto-disturbance Rejection Trajectory Tracking Controller

Based on Double Closed-loop Structure

DU Yiming, CHENG Zhijiang, LI Zhiwen

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xianjing, China)

Abstract: In order to realize the high-precision trajectory tracking control of four-wheel skid-steering mobile robot (SSMR), under slip and external disturbance, an auto-disturbance tracking controller based on double closed-loop rail structure was designed, and its stability was proved. First of all, in order to solve the influence of the four-wheel SSMR rotation sub-motion on the control performance, the concept of virtual wheel spacing was proposed, and the dimensionless parameters were introduced to reflect the uncertain influence of the rotation sub-motion through the virtual wheel spacing, which optimized the mathematical model of the traditional robot. Then, considering the influence of external disturbance in the working environment of the robot, an auto-disturbance rejection trajectory tracking controller with double closed-loop structure was designed. The controller has the characteristics of simple structure, few control parameters and easy application. Finally, the physical simulation test was further built on the basis of software simulation, and compared with the traditional PID method. The results show that the trajectory tracking accuracy of the control method is higher, and the anti-disturbance performance is more than doubled.

Key words: mobile robot; four-wheel skid-steering; trajectory tracking; double closed-loop

随着机器人的不断发展,其在航空航天、仓储物流、机场服务、社区保障、巡航巡检等方面有着越来越广泛的应用。其中,四轮滑移转向移动机器人(skid-steering mobile robot, SSMR),因其结构简单可靠,具有较高的灵活性和更高的载重能力,在室外非结构化场景中的探索、导航和巡检

中被广泛应用。其轨迹跟踪问题作为机器人实现其它复杂功能的前提^[1-3],在机器人控制领域中具有十分重要的地位。

为了实现机器人的轨迹跟踪控制,存在许多有效的控制方法,如滑膜控制^[4]、自适应控制^[5-6]、反步法控制^[7]、神经网络控制^[8]、预测控制^[9]、自抗

基金项目: 自治区重点实验室开放课题(2021D04011);自治区自然科学基金(202102401)

作者简介: 杜一鸣(1994—),男,硕士,Email: 1204602360@qq.com

扰控制^[10]等。然而以上的控制方法都是建立在机器人轮胎“纯滚动、无滑移”的理想工作状态下,并没有考虑机器人在实际运行过程中滑移对控制器性能的影响。为了解决以上问题,文献[11]提出了一种针对纵向滑移扰动的自适应控制方法,通过对纵向扰动的补偿实现了轨迹跟踪的目的。文献[12]针对机器人参数的滑移扰动和不确定性,在动态模型的基础上,采用修正了趋近律的滑膜控制,保证了速度在有限时间内收敛到期望值以实现轨迹跟踪控制。文献[13]针对具有打滑的轮式移动机器人非线性离散时间系统,提出了一种基于强化学习的自适应神经网络跟踪算法,通过用神经网络来逼近由打滑引起的系统未知项。文献[14]利用GPS和辅助传感器等硬件设备,对车轮打滑和打滑引起的扰动进行测量,并且将其用于对反步法控制器路径跟踪的补偿。

然而,以上控制方法普遍存在以下问题:控制器参数相对较多,调参难度较大;控制器结构复杂,对机器人的硬件性能要求较高。对于四轮SSMR来说,转向的滑移必然性,将会不可避免地机器人的控制造成负面影响。因此,本文针对四轮SSMR主要研究了在受滑移影响和外界扰动情况下的轨迹跟踪问题,并提出了一种控制器结构简单、控制参数较少的新方法。本文主要内容和创新点如下:

1)考虑滑移对SSMR旋转分运动的影响,引入无量纲参数 γ ,得到差速运动情况下虚拟轮间距,从而优化了四轮SSMR的差速模型,并进一步建立了受滑移扰动下的SSMR非完整约束运动学模型。

2)根据运动学模型设计了基于外环线性自抗扰位置跟踪控制器和基于P+前馈的内环姿态跟踪控制器,构成了双闭环的自抗扰轨迹跟踪控制器,并对闭环系统做了稳定性分析。

3)通过Matlab/Simulink对本所提方法与传统PID控制方法进行对比仿真实验,验证了本文控制方法的可行性,得到了较为合理的控制器参数。

4)通过搭建的SSMR平台,设计了一种新的基于Matlab/Simulink联合机器人ROS操作系统的半实物仿真实验方法,并用此实验方法对本文控制方法与传统PID控制方法进行测试,进一步验证了本文控制方法的有效性和优越性。

1 SSMR 数学模型描述

四轮滑移转向移动机器人(SSMR)结构如图1所示。定义机器人全局参考坐标系为 XOY ,机器人由4个伺服电机组成,分为左、右侧两组电机,每组电机速度保持一致,通过左、右两侧电机转速的控制,实现机器人姿态的控制。图1中, O_c 为机器人几何中心, O_g 为机器人质心, r 为机器人轮子半径, r_c 为机器人转向半径, L_{QP} 为机器人左右两侧电机轮距, L_{NM} 为等效双轮差速移动机器人虚拟轮间距(由实际机器人运行场景决定,可通过实验测得), d 为 O_c 与 O_g 之间的距离。

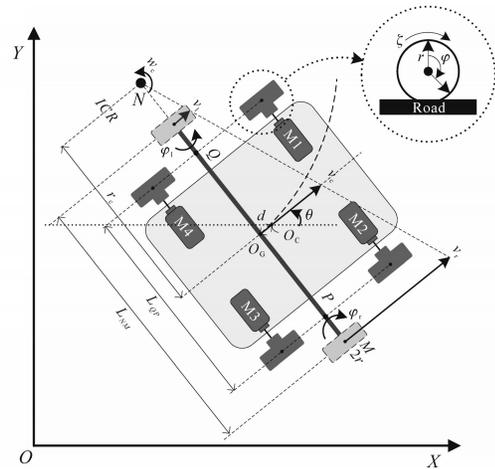


图1 SSMR模型

Fig.1 SSMR model

由于SSMR在实际转向过程中受到滑移摩擦影响^[15],仅在直线运行情况下有 $NM = QP$,在转向时 $NM \neq QP$,因此,引入无量纲参数 γ ,则实际轮间距与虚拟轮间距满足:

$$l = L_{NM} = \gamma L_{QP} \quad (1)$$

其中, γ 与机器人滑移摩擦程度有关,不同摩擦系数的地面对旋转角速度的影响不同, γ 不同。

定义SSMR在全局坐标系 XOY 下的位姿如下式所示:

$$\mathbf{q} = [x \ y \ \theta \ \varphi_l \ \varphi_r]^T \quad (2)$$

式中: x, y 为机器人的横向和纵向位置坐标; θ 为当前位置下的方向角; φ_l, φ_r 为左、右两侧电机旋转角位移。

考虑到机器人实际运行过程中会受地面湿滑、摩擦等扰动的不确定性影响,SSMR在打滑情况下的非完整约束方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{y}\cos\theta - \dot{x}\sin\theta - d\dot{\theta} = \mu \\ \dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta + l\dot{\theta} = r(\dot{\varphi}_r - \zeta_r) \\ \dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta - l\dot{\theta} = r(\dot{\varphi}_l - \zeta_l) \end{cases} \quad (3)$$

式中: ζ_l, ζ_r 为SSMR纵向滑动角速度。

则四轮SSMR受滑移影响的运动学模型可以描述如下式:

$$\dot{q} = S(q)(z - \xi) + \varphi(q, \mu, \zeta) \quad (4)$$

其中

$$S(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 1/r & 1/r \\ -d\sin\theta & d\cos\theta & 1 & l/2r & -l/2r \end{bmatrix}^T$$

$$\varphi(q, \mu, \zeta) = [-\mu\sin l/r\theta \quad \mu\cos\theta \quad 0 \quad \zeta_r \quad \zeta_l]^T$$

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_v \\ \xi_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r(\zeta_r + \zeta_l) & r(\zeta_r - \zeta_l) \\ 2 & l \end{bmatrix}^T$$

$$z = [v \quad w]^T$$

$$v = r(\dot{\varphi}_r + \dot{\varphi}_l)/2 \quad \omega = r(\dot{\varphi}_r - \dot{\varphi}_l)/l$$

式中: v 为轮式机器人的线速度; ω 为机器人的角速度。

2 控制器设计及其稳定性分析

SSMR运动学控制器由位置跟踪控制器与姿态跟踪控制器两个部分组成。SSMR控制系统结构如图2所示。

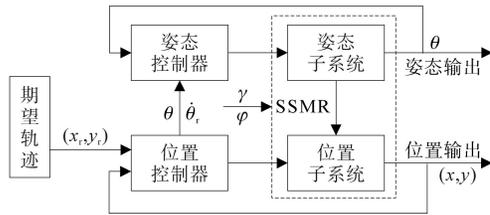


图2 四轮SSMR控制系统结构

Fig.2 Structure of four-wheel SSMR control system

SSMR双闭环控制器外环位置跟踪部分通过对外界扰动的估计和轨迹跟踪误差的反馈,产生满足位置跟踪需要的线速度与角速度,内环姿态跟踪部分通过解决机器人实际运行中期望角度与满足位置跟踪角度冲突的问题,设计了P+前馈的方向角跟踪控制器,保证了机器人对于满足位置跟踪角度 θ 的跟踪。SSMR双闭环控制系统框图如图3所示。

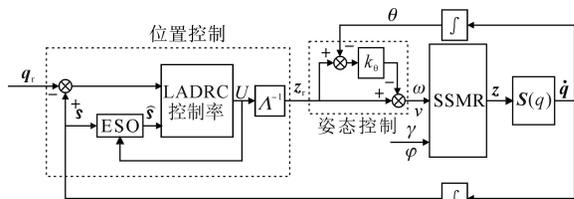


图3 四轮SSMR控制系统框图

Fig.3 Block diagram of four-wheel SSMR control system

2.1 外环位置控制器设计

取 $q_r = [x_r \quad y_r]^T$ 为期望轨迹, $q = [x \quad y]^T$ 为SSMR实际位置,则位置跟踪误差 q_e 可表示为

$$q_e = q - q_r \quad (5)$$

结合式(4)可得:

$$\dot{q}_e = U(q) - \dot{q}_r + s(q, \mu, \zeta) \quad (6)$$

其中

$$U(q) = \Lambda(q)z$$

$$s(q, \mu, \zeta) = \vartheta(q, \mu, \zeta) - \Lambda(q)\xi$$

$$\vartheta(q, \mu, \zeta) = [-\mu\sin\theta \quad \mu\cos\theta]^T$$

$$\Lambda(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -d\sin\theta \\ \sin\theta & d\cos\theta \end{bmatrix}$$

为考虑 s 对系统的影响,令 $X_1 = q_e, X_2 = s$ 。可将式(6)扩张为

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = U(q) - \dot{q}_r + s \\ \dot{X}_2 = \dot{s} \end{cases} \quad (7)$$

则扩张状态观测器可设计为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}}_1 = U(q) - \dot{q}_r + \hat{X}_2 - \alpha(\hat{X}_1 - q_e) \\ \dot{\hat{X}}_2 = -\beta(\hat{X}_1 - q_e) \end{cases} \quad (8)$$

式中: \hat{X}_1 为 X_1 的估计; \hat{X}_2 为 X_2 的估计; α, β 为观测器增益, $\alpha > 0, \beta > 0$,并满足 $p_1 = s^2 + \alpha s + \beta$ 的根轨迹全部位于复平面 s 的左半平面^[6]。

线性自抗扰控制律可设计为如下形式:

$$U = \dot{q}_r - kq_e - \hat{X}_2 \quad (9)$$

式中: k 为控制器增益,大于0。

此时可得到期望位置控制律:

$$z_r = [v_r \quad w_r]^T = \Lambda(q)^{-1}U(q) \quad (10)$$

式中: v_r 为期望线速度控制律; w_r 为期望角速度控制律。

2.2 内环姿态控制器设计

由于在实际运行过程中满足控制律的方向角与期望轨迹切线角度在初始时刻不相同(机器人起点不在期望轨迹上),可能导致系统跟踪出现不稳定的状态,因此为了对期望轨迹的快速跟踪需要设计对方向角姿态控制器。

令 θ_d 为满足位置跟踪控制 $U(q) = [u_1 \quad u_2]^T$ 的方向角,则有

$$\theta_d = \arctan \frac{u_2}{u_1} \quad \theta_d \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \quad (11)$$

式中: u_1 为 x 方向的控制律; u_2 为 y 方向的控制律。

设 θ_r 为期望理想跟踪角度,为了避免SSMR在运行过程中 $\theta_d \neq \theta_r$,造成系统不稳定,则需满足下式:

$$\theta_r = \theta_d = \arctan \frac{u_2}{u_1} \quad \theta_r \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \quad (12)$$

角度跟踪误差为

$$\theta_e = \theta - \theta_r \quad (13)$$

角度跟踪误差方程为

$$\dot{\theta}_e = \omega - \dot{\theta}_r \quad (14)$$

则可设计P+前馈控制器为

$$\omega = -k_\theta \theta_e + \dot{\omega}_r \quad (15)$$

2.3 稳定性分析

外环位置跟踪误差的动态方程为

$$\dot{q}_e = -kq_e - (\hat{X}_2 - X_2) \quad (16)$$

将式(8)减去式(7)可以得到观测器误差动态方程如下

$$\begin{cases} \dot{X}_{1e} = X_{2e} - \alpha X_{1e} \\ \dot{X}_{2e} = -\dot{s} - \beta X_{1e} \end{cases} \quad (17)$$

其中

$$X_{1e} = \hat{X}_1 - X_1$$

$$X_{2e} = \hat{X}_2 - X_2$$

整理可得外环系统误差动态方程为

$$\dot{\phi} = A\phi + \Psi \quad (18)$$

其中

$$\phi = \begin{bmatrix} q_e \\ X_{1e} \\ X_{2e} \end{bmatrix} \quad \Psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\dot{s} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -k & 0 & -1 \\ 0 & -\alpha & 1 \\ 0 & -\beta & 0 \end{bmatrix}$$

A 为赫尔维兹矩阵,存在正定矩阵 $P \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$,使得 $A^T P + PA = -I$ 成立。

令 λ_{\min} 为矩阵 P 的最小特征值, λ_{\max} 为最大特征值。取李亚普诺夫函数为

$$V(\phi) = \phi^T P \phi \quad (19)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V}(\phi) &= 2\phi^T P \dot{\phi} = 2\phi^T P (A\phi + \Psi) \\ &= -\|\phi\|^2 + 2\phi^T P \Psi \\ &\leq -\|\phi\|^2 + \lambda_{\max} \|\phi\|^2 + \lambda_{\max} \|\Psi\|^2 \\ &= -(1 - \lambda_{\max}) \|\phi\|^2 + \lambda_{\max} \|\Psi\|^2 \\ &\leq -\left(\frac{1}{\lambda_{\max}} - 1\right) V(\phi) + \lambda_{\max} \|\Psi\|^2 \end{aligned} \quad (20)$$

可解得:

$$V(\phi) \leq Z \quad (21)$$

其中

$$Z = \left\{ \phi \mid \|\phi\|^2 \leq \frac{u^2 \lambda_{\max}^2}{\lambda_{\min}^2 (1 - \lambda_{\max})} \right\}$$

因此,系统跟踪误差将收敛致有界区域 Z 。

内环姿态跟踪误差方程为

$$\dot{\theta}_e = -k_\theta \theta_e \quad (22)$$

当 $k_\theta > 0$ 时有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \theta_e = 0 \quad (23)$$

因此,内环系统稳定收敛。

需要说明的是,由于期望跟踪角 θ_r 与满足位置跟踪控制的角度 θ_d 不完全相等,在机器人初始跟踪阶段导致的闭环系统不稳定,可以通过设计较大的内环姿态控制增益 k_θ ,让内环角度跟踪收敛速度远大于外环外置跟踪收敛速度,使机器人方向角 θ 能够更快地跟踪到 θ_r ,从而可以避免闭环系统的不稳定^[17]。

3 仿真与实验测试

为了验证本文所提控制方法的可行性与有效性,首先在Matlab/Simulink中与传统的PID控制方法做对比实验,然后通过设计的基于Matlab/Simulink的半实物实时仿真平台进行测试。

对比实验的PID控制器为如下形式:

$$U(q) = \dot{q}_r - k_p q_e - k_i \int_0^t q_e dt - k_d \frac{dq_e}{dt} \quad (24)$$

式中: k_p, k_i, k_d 为PID控制器系数,均大于0。

外界扰动形式如下:

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2\sin(0.05\pi t) \\ 0.2\sin(0.05\pi t) \end{bmatrix} \quad (25)$$

机器人物理参数为:轮子半径 $r = 0.15$ m,轮间距 $L_{qp} = 0.65$ m,质心偏移 $d = 0.1$ m,无量纲参数 $\gamma = 1.24$ 。

3.1 仿真测试

设仿真测试中期望轨迹跟踪曲线为

$$q_r = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5\cos(0.1t) - 4 \\ 5\sin(0.1t)\cos(0.1t) \end{bmatrix} \quad (26)$$

仿真时间设定为100 s,假设在 $30 \text{ s} \leq t \leq 70 \text{ s}$,机器人受到外界干扰影响,仿真步长为0.01 s。仿真参数如下:1)本文控制器参数为: $\alpha = 5$, $\beta = 6.25$, $k = 2.4$, $k_\theta = 21$;2)传统PID控制参数分为横向和纵向,即 $k_j = [k_{jx} \ k_{jy}]^T$, $j = p, i, d$,取 $k_p = [5.3 \ 2.6]^T$, $k_i = [0.7 \ 0.5]^T$, $k_d = [1 \ 0.8]^T$ 。

仿真结果如图4所示。从图4a可以看出,相比传统PID控制方法,本文方法的轨迹跟踪精度更高;从图4b、图4c可以看出,在受外界扰动影响情况下,本文方法对干扰的抑制作用更明显;从图4d可以看出,本文方法对方向角的跟踪更加平滑。实验结果证明了本文方法的可行性与有效性。

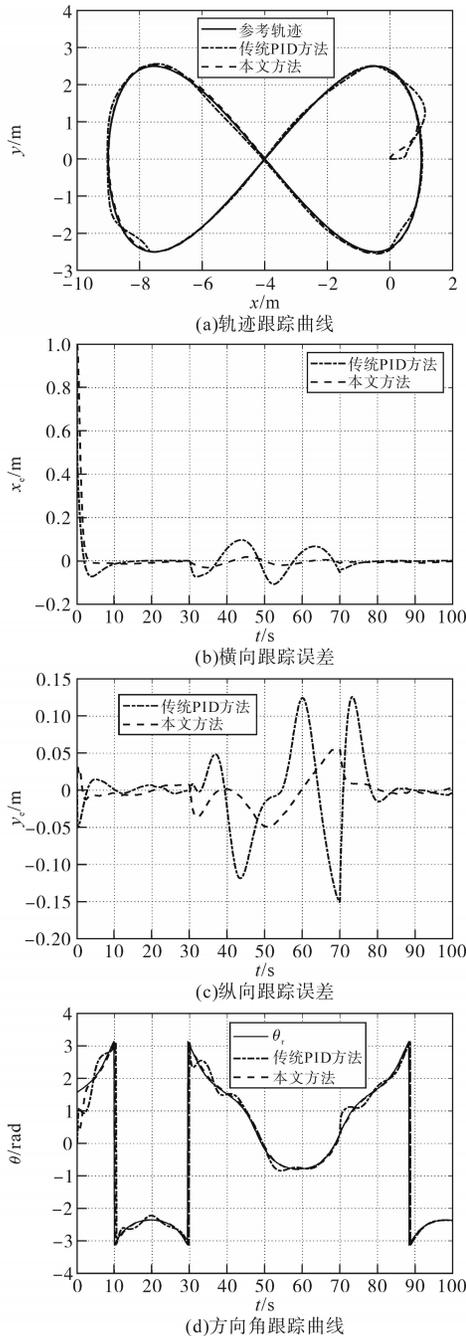


图4 仿真实验结果

Fig.4 Results of simulation experiment

3.2 实验验证

为了充分说明方法的适用性,将通过实际SSMR实验平台来进一步验证。图5为SSMR实验平台,该平台主要由嵌入式工控机、底盘微控制器核心板、IMU9250姿态传感器、伺服电机控制器、伺服电机、24 V/30 A 电瓶以及铝合金的车身组成。SSMR质心位于中轴线上。

SSMR平台工控机系统为ROS-Noetic,环境为Ubuntu20.04。电脑端操作系统为Windows11,软件为Matlab2021b。电脑端与SSMR平台通过

局域网通信,通信时应保证被同一局域网所覆盖。在SSMR平台工控机设置“ROS_IP”为工控机局域网内IP地址,即在.bashrc文件末尾加入:

```
export ROS_IP=192.168.1.117 #该IP是Ubuntu系统的IP。
```

电脑端设置ROS通信环境,在Matlab命令行输入:

```
setenv('ROS_MASTER_URI','http://192.168.1.117:11311')
```

%该IP是Ubuntu系统的IP

```
setenv('ROS_IP','192.168.1.105')
```

%该IP是Windows系统的IP

```
rosinit
```

%初始化ros节点

另外,为保证仿真的实时性,在Simulink中加入“RealTime Pacer”模块,使其与实际经过的时间同步,保证实时性。图6为SSMR平台的实验图。系统整体框架图如图7所示。

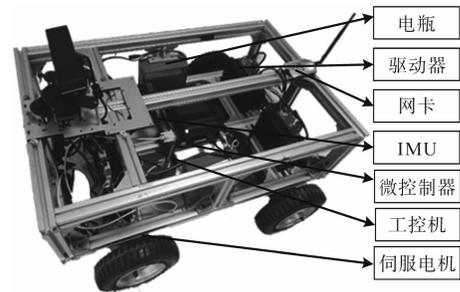


图5 SSMR实验平台

Fig.5 SSMR experimental platform



图6 SSMR平台实验

Fig.6 SSMR platform experiment

四轮SSMR平台的微处理器为M7系列的STM32F767IGT6,主要用于对电机编码器信息增量信息采集,并通过设置定时器采样,得到伺服电机的实际运行速度反馈到控制系统,姿态信息采集通过与工控机串行通信,将接收到的左、右两侧的电机速度指令转换为CAN总线信号,传递给伺服电机控制器从而控制SSMR平台运动。工控机主要进行ROS节点通信,将SSMR运行通过电脑端控制得到的线速度、角速度转化为左、右两侧电机的电机速度发送给微控制器,其转换公式如下式:

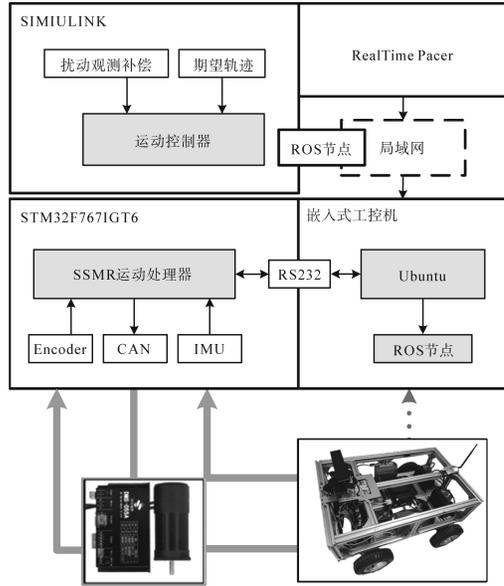


图7 系统整体框架

Fig.7 Overall framework of the system

$$\begin{bmatrix} v_l \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{L_{NM}}{2} \\ 1 & -\frac{L_{NM}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (27)$$

机器人转向半径计算如下:

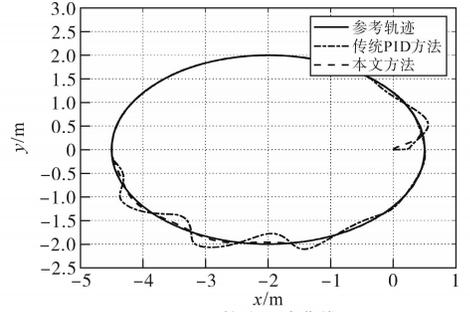
$$r_c = \frac{v_c}{\omega_c} = \frac{(v_l + v_r)L_{NM}}{2(v_r - v_l)} \quad (28)$$

说明:无量纲参数 γ 通过姿态传感器测得的转动角速度 ω_c 和通过编码器反馈的电机实际速度 v_c 利用式(28)结合式(1)求得。

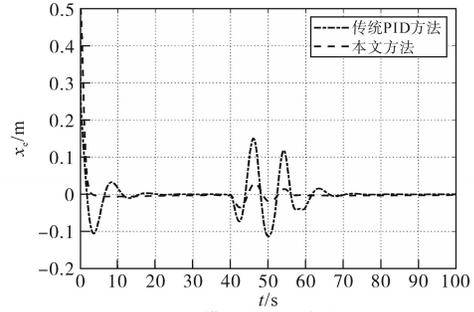
在SSMR平台测试实验中,实验参数与仿真参数保持一致,期望跟踪轨迹设为

$$\mathbf{q}_r = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.5\cos(0.1t) - 2 \\ 2\sin(0.1t) \end{bmatrix} \quad (29)$$

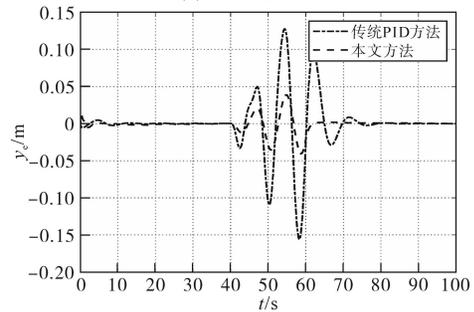
在 $40\text{ s} \leq t \leq 60\text{ s}$ 时间内受外界扰动影响,处理器采样频率为 100 Hz ,实验结果如图8所示。可以看到,实际运行结果与仿真实验结果都反映了本文控制方法对抗扰的抑制能力更强,说明本文所设计的方法在实际的四轮SSMR轨迹跟踪控制中,是切实有效的;并且从图8b、图8c中可以看出,本文方法的横向和纵向跟踪误差在 $\pm 0.05\text{ m}$ 以内,相比传统PID方法的 $\pm 0.15\text{ m}$ 误差,抗扰性能提升了1倍以上。另外,值得一提的是相比仿真实验结果,实际运行过程中,不难发现传统PID控制方法效果变差了,这是由于实际机器人受到了一些未知因素的影响,机器人的数学模型能在一定程度上描述机器人系统,但是并不能实现“完美描述”,这也是需要进一步实验验证必要性



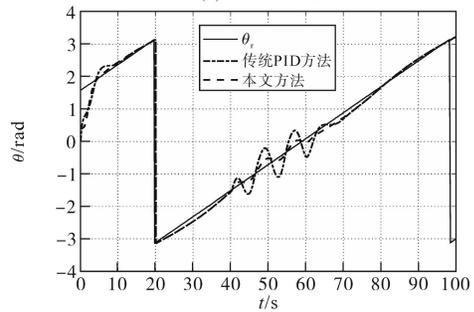
(a)轨迹跟踪曲线



(b)横向误差跟踪误差



(c)纵向跟踪误差



(d)方向角跟踪曲线

图8 SSMR平台实验结果

Fig.8 Results of SSMR platform experiment

的体现。

4 结论

为了实现SSMR受外界干扰影响下的高精度轨迹跟踪控制,首先,通过实验的方法,计算出在本文实验场景中的无量纲参数 γ ,找出SSMR虚拟轮间距,从而得到更合理的SSMR运动学模型;根据运动学模型,设计了基于双闭环结构的自抗扰轨迹跟踪控制器,并对闭环系统做出了稳定性分析。仿真对比实验与半实物实时仿真对比实验

反映出本文控制方法在控制器参数较少的情况下,仍然能够表现出较强的鲁棒性能与较高的轨迹跟踪精度。今后,将本文方法作为控制方法基础,应用于SSMR机器人路径规划等其他方面的研究。

参考文献

[1] 李新海,徐宝军,肖星,等.变电站挂轨机器人智能巡检系统技术研究[J].电气传动,2021,51(19):43-49.
LI Xinhai, XU Baojun, XIAO Xing, et al. Research on key technologies of intelligent inspection system for track-hanging robot in substation[J]. Electric Drive, 2021, 51(19):43-49.

[2] WEN Shuhuan, LIU Xin, ZHANG Hong, et al. Dense point cloud map construction based on stereo VINS for mobile vehicles[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 178(10):328-344.

[3] 欧阳森,张真.基于树莓派的预防性轻型除冰机器人行走控制系统设计[J].电气传动,2021,51(8):71-76.
OUYANG Sen, ZHANG Zhen. Design of preventive light deicing robot walking control system based on raspberry pie[J]. Electric Drive, 2021, 51(8):71-76.

[4] HAN Yuxing, CHENG Yi, XU Guowei. Trajectory tracking control of AGV based on sliding mode control with the improved reaching law[J]. IEEE Access, 2019, 1(7):20748-20755.

[5] 彭继慎,仇文超,李军锋,等.农业轮式移动机器人反演自适应滑模轨迹跟踪控制[J].计算机应用与软件,2019,36(11):86-90.
PENG Jishen, CHOU Wenchao, LI Junfeng, et al. Inversion adaptive sliding model path tracking control of agricultural wheeled mobile robot[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(11):86-90.

[6] YANG Zhengfu, WANG Caiwang, YAN Ming. An optimization design of adaptive cruise control system based on MPC and ADRC[J]. Actuators, 2021, 10(6):110-113.

[7] 赵娜,吕成兴.基于反步法的SCARA机器人轨迹跟踪控制[J].山东科学,2021,34(3):119-124.
ZHAO Na, LÜ Chengxing. Trajectory tracking control of SCARA robot via backstepping approach[J]. Shandong Science, 2021, 34(3):119-124.

[8] 马东,董力元,王立玲,等.移动机器人RBF神经网络自适应设计[J].电气传动,2022,52(5):8-13.
JIN Shuhui, ZHANG Ce, WANG Huan, et al. Design of a high power AC drive parallel inverter[J]. Electric Drive, 2022, 52(5):8-13.

[4] 天津电气科学研究院有限公司.电气传动自动化技术手册[M].第三版.北京:机械工业出版社,2011:557-558.
Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd.. Electrical transmission automation technical manual[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2011:557-558.

PD跟踪控制[J].控制工程,2020,27(12):292-298.

MA Dong, DONG Liyuan, WANG Liling, et al. RBF neural network adaptive PD tracking control of mobile robot[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(12):292-298.

[9] 姜俊豪,陈刚.驾驶机器人转向操纵的动态模型预测控制方法[J].上海交通大学学报,2021,1(2):1-10.
JIANG Junhao, CHEN Gang. Dynamic model predictive control method for steering control of driving[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 1(2):1-10.

[10] WANG Shuai, ZHAI Junyong. A trajectory tracking method for wheeled mobile robots based on disturbance observer[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2020, 18(4):2165-2169.

[11] IOSSAQUI J G, CAMINO J F, ZAMPIERI D E. A nonlinear control design for tracked robots with longitudinal slip-science direct[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1):593-597.

[12] YE H, WANG S. Trajectory tracking control for nonholonomic wheeled mobile robots with external disturbances and parameter uncertainties[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2020, 12(7):315-322.

[13] LI Shu, DING Liang, GAO Chen, et al. Adaptive neural network tracking control-based reinforcement learning for wheeled mobile robots with skidding and slipping[J]. Neurocomputing, 2017, 28(29):120-128.

[14] LOW C B, WANG Danwei. GPS-based path following control for a car-like wheeled mobile robot with skidding and slipping[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(2):340-347.

[15] WANG Tianmiao, WU Yao, LIANG Janghong, et al. Analysis and experimental kinematics of a skid-steering wheeled robot based on a laser scanner sensor[J]. Sensors, 2015, 15(5):681-702.

[16] HAN Jinqing. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3):900-906.

[17] 刘金锴.先进PID控制MATLAB仿真[M].北京:电子工业出版社,2016.
LIU Jinkun. Xian jin PID kong zhi MATLAB fang zhen[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.

收稿日期:2022-03-21

修改稿日期:2022-04-08

(上接第89页)

[5] 马小亮.高性能变频调速及其典型控制系统[M].北京:机械工业出版社,2010:1-2.
MA Xiaoliang. High performance frequency control technology and its typical control system[M]. Beijing: China Machine Press, 2010:1-2.

收稿日期:2022-10-25

修改稿日期:2022-11-20