

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)06-0007-06

安防巡检机器人变预瞄距离 LQR 横向控制

李亚男, 万熠, 梁西昌, 侯嘉瑞

(山东大学 高效洁净机械制造教育部重点实验室 机械工程学院, 山东 济南 250061)

摘要:针对安防巡检机器人动力学参数难以测量、运动控制精度低的问题,提出一种基于动力学模型的自适应变预瞄横向控制算法。首先,建立阿克曼转向运动学及二自由度侧向动力学模型。针对模型中未知或难以测量的动力学参数,设计基于M序列的系统辨识实验,以前轮转角为输入、横摆角速度为输出,拟合得到机器人动力学模型传递函数,拟合度达95.87%,解决了参数难以准确获取的难题。其次,基于动力学模型提出变预瞄距离线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)控制方法,引入前馈控制消除道路曲率引起的稳态误差;为进一步提升自适应能力,采用模糊控制方法,根据当前车速与道路曲率动态调节预瞄距离。结果表明,自适应预瞄LQR控制算法最大横向跟踪误差控制在 ± 5 cm以内,相较于无预瞄方法跟踪精度提高51%,相较于固定预瞄方法提高26%,有效提升了安防巡检机器人在复杂道路条件下的轨迹跟踪性能。

关键词:安防巡检机器人;系统辨识;运动控制;LQR;变预瞄距离

中图分类号: TP273;TP242

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)06-0007-06

LQR lateral control of security inspection robots with variable preview distance

Li Yanan, Wan Yi, Liang Xichang, Hou Jiarui

(Key Laboratory of High Efficiency and Clean Manufacturing, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: To address the challenges of difficult-to-measure dynamic parameters and low motion control accuracy in security inspection robots, an adaptive preview lateral control algorithm based on a dynamic model is proposed. First, the Ackermann steering kinematic model and a two-degree-of-freedom lateral dynamic model are established. To handle unknown or difficult-to-measure parameters, an M-sequence-based system identification experiment is designed. Using the front wheel steering angle as input and the yaw rate as output, the transfer function of the robot's dynamic model is obtained through fitting, achieving a goodness of fit of 95.87%. Second, a variable preview distance linear quadratic regulator (LQR) control method is proposed, with feedforward control to eliminate steady-state errors caused by road curvature. Additionally, a fuzzy control method is employed to dynamically adjust the preview distance according to vehicle speed and road curvature. The results show that the proposed algorithm maintains a maximum lateral tracking error within ± 5 cm. Compared to the non-preview method, tracking accuracy is improved by 51%, and compared to the fixed preview method, by 26%, effectively enhancing trajectory tracking performance under complex road conditions.

Keywords: security inspection robot; system identification; motion control; LQR; variable preview distance

随着机器人及人工智能等技术的不断进步,安防巡检机器人在监控、巡逻和应急响应等领域的应用日益广泛。然而,由于其复杂的结构和强耦合性,安防巡检机器人在运动控制方面存在着诸多挑战,如动力参数难以测量、轨迹跟踪精度差等问题^[1]。

机器人轨迹跟踪技术研究机器人如何从起始点位置按照已经规划好的参考轨迹到达指定目标位置,并且尽可能使机器人始终接近规划位置及规划状态,保证行驶轨迹与参考轨迹误差较小^[2]。

近年来,作为自动驾驶核心技术的轨迹跟踪受到了广

泛关注和应用^[3],各种控制方法也不断涌现,包括PID、滑模控制(sliding mode control, SMC)、LQR、模型预测控制(model predictive controller, MPC)等^[4-5]。随着研究的深入,越来越多的新型算法和改进方法被提出和验证,以提高轨迹跟踪的精度和鲁棒性。尽管如此,安防巡检机器人在轨迹跟踪方面仍面临诸多挑战,例如,精确的动力学参数难以测量,无法准确建立动力学模型。此外,参数的不确定性和外部环境变化使得轨迹跟踪问题更加复杂,从而也对轨迹跟踪控制算法提出了更高的要求^[6-7]。

针对上述问题,本文设计了系统辨识实验,获得机器

收稿日期:2024-09-18;录用日期:2024-11-25

基金项目:山东大学教育教学改革研究项目(2023Y121);山东省农机研发制造推广应用一体化试点项目(NJYTHSD-202323);山东大学教育教学改革研究重点项目(2023Z04);山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0831);烟台市科技计划项目(2023JMRH005)

作者简介:李亚男(1993—),男,实验师,研究方向:移动机器人运动规划与控制。

引用本文:李亚男,万熠,梁西昌,等. 安防巡检机器人变预瞄距离 LQR 横向控制[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(6):7-12. (Li Yanan, Wan Yi, Liang Xichang, et al. LQR lateral control of security inspection robots with variable preview distance[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(6):7-12.)

人动力学模型的传递函数,解决机器人动力学模型难以测量的问题;并提出一种基于模糊控制的变预瞄距离 LQR 横向控制方法,根据机器人当前速度以及道路曲率,对预瞄距离进行动态调节,从而提高轨迹跟踪精度^[8]。

1 安防巡检机器人硬件系统设计

根据安防巡检机器人的功能需求分析,采用模块化设计理念,将机器人系统划分为 5 个子系统,如图 1 所示。各子系统分别承担不同的功能:感知子系统包括激光雷达、深度相机等负责采集外界环境信息,驱动控制子系统负责机器人移动,通讯子系统用于图像等数据信息传输,应急处置子可以进行现场紧急处理,主控子系统则处理各子系统数据并发布相关控制指令。

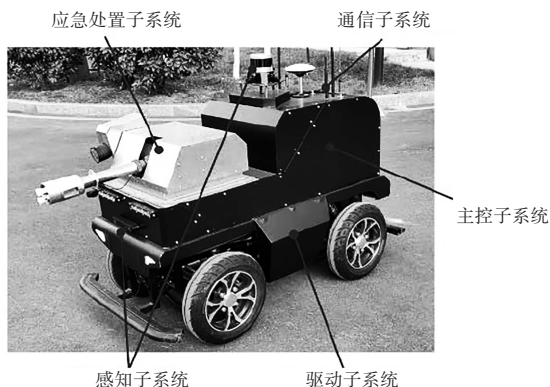


图 1 安防巡检机器人系统组成

Fig. 1 System composition of the security inspection robot

2 运动学及动力学模型

2.1 运动学模型

本文采用阿克曼转向移动平台,为简化模型的复杂度提出了以下假设^[9]:将机器人视为刚体,左右车轮合并为一个轮组,所有车轮无侧向滑移;且车轮与地面接触近似为点接触,无相对滑动。这些假设旨在减少计算复杂性,使模型更加可控和易于分析。基于这些假设,在世界坐标系下建立机器人的运动学模型,并为后续的控制算法设计提供基础。

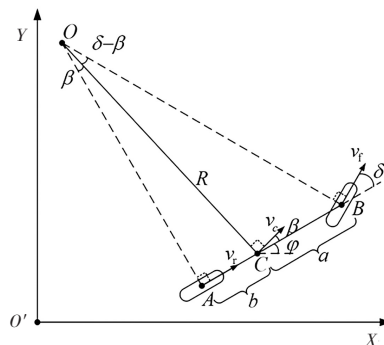


图 2 机器人运动学模型

Fig. 2 Robot kinematic model

2.2 动力学模型

阿克曼转向机器人纵向运动和侧向运动之间存在相互耦合关系,横向运动受到其纵向运动的影响。为了简化控制系统的复杂性,采用 Frenet 坐标系将横向和纵向控制进行解耦,建立二自由度侧向动力学模型^[10-11],如图 3 所示,其物理参数符号含义见表 1。

根据动力学模型建立状态方程为

$$\begin{pmatrix} \dot{v}_y \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{C_f + C_r}{m v_x} & \frac{a C_f - b C_r}{m v_x} - v_x \\ \frac{a C_f - b C_r}{I_z v_x} & \frac{a^2 C_f + b^2 C_r}{I_z v_x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_y \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{-C_f}{m} \\ \frac{-a C_f}{I_z} \end{pmatrix} \delta \quad (1)$$

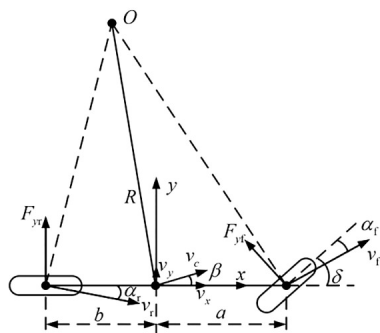


图 3 机器人动力学模型

Fig. 3 Robot dynamic model

表 1 物理参数符号含义

Tab. 1 Physical parameters and their meanings

参数	参数含义	参数	参数含义
F_{yf}	前轮侧向力	a	前轴到质心距离
F_{yr}	后轮侧向力	b	后轴到质心距离
α_f	前轮侧偏角	L	车轮轴距
α_r	后轮侧偏角	v_x	纵向速度
C_f	前轮侧偏刚度	v_y	横向速度
C_r	后轮侧偏刚度	ω	横摆角速度
m	机器人质量	β	质心侧偏角
I_z	机器人绕 Z 轴转动惯量	δ	前轮转角

3 动力学模型系统辨识

阿克曼动力学模型的发展至今已相当成熟。然而,模型中存在一些参数是未知的或难以精确测量的。本文旨在利用系统的输入和输出数据,通过系统辨识的方法,确定动力学模型^[12]。

3.1 输入信号设计

系统辨识方法要求输入信号必须能够充分激励系统所有可能的响应模态。本文选择使用M序列作为输入信号。选取机器人前轮转角作为输入控制信号,转角区间为 $(-24^\circ, 24^\circ)$,M序列幅值为 $\pm 5^\circ$ 、周期 T_p 为15s。若取M序列长度 $N_p = 15$,则基本电平时间为1s。输入控制信号如图4所示。

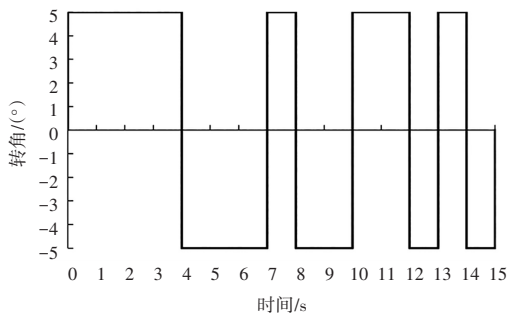


图4 M序列输入信号

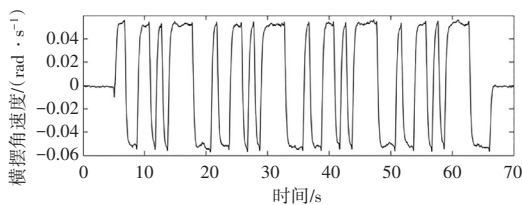
Fig. 4 M-sequence input signal

3.2 数据采集及预处理

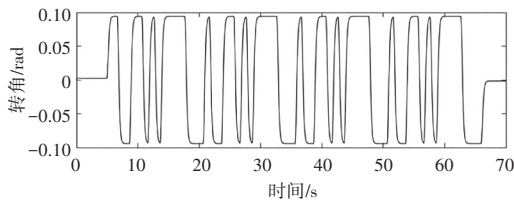
选择便于测量的横摆角速度作为输出信号,对前轮转角输入信号、横摆角速度输出信号进行数据采集。前轮转角的数据信息通过从阿克曼运动平台控制器CAN信号读取;横摆角速度则通过安装在机器人上的惯性测量单元(IMU)直接测量。为了减少噪声的影响,对数据进行滤波预处理。

3.3 辨识结果及验证

利用MATLAB中System Identification工具箱进行系统辨识。将滤波后的前轮转角控制输入数据和横摆角速度输出数据导入工具箱,如图5所示。



(a) 横摆角速度



(b) 转角

图5 输入输出数据

Fig. 5 Input and output data

当输出 $y = \omega$ 时,将机器人动力学模型状态空间表达式转换为传递函数表达式为

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{\delta(s)} = C(sI - A)^{-1}B = \frac{a_1s + b_1}{s^2 + c_1s + d_1} \quad (2)$$

根据传递函数表达式,该系统有2个极点和1个零点,工具箱中配置相应的极点和零点,最终拟合出系统模型传递函数为

$$G(s) = \frac{52.95s + 646.6}{s^2 + 85.22s + 1166} \quad (3)$$

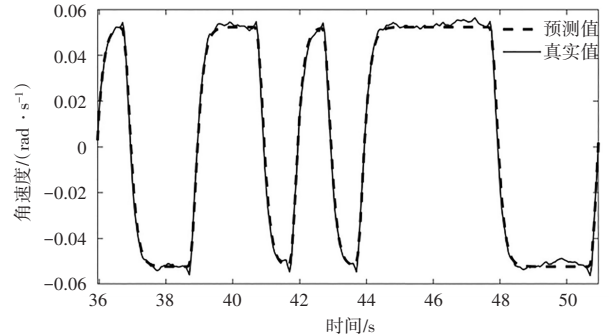


图6 传递函数拟合度

Fig. 6 Goodness of fit of the transfer function

在System Identification工具箱中选取第3个周期的数据进行对比验证,如图6所示。辨识出的传递函数系统模型仿真结果与第3个周期的数据拟合度为95.87%,可以准确表达机器人运行状态,验证了辨识结果的准确性^[13]。

4 变预瞄距离LQR横向控制

4.1 LQR横向控制器设计

在世界坐标系下,假定一条预期规划轨迹, X_r 为规划轨迹上某时刻的预期规划状态, X 为当前时刻真实状态。以此,建立机器人轨迹跟踪误差模型,如图7所示。

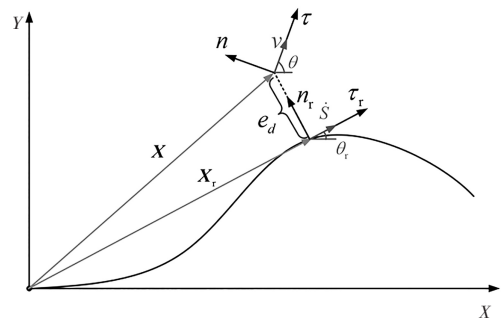


图7 轨迹跟踪误差模型

Fig. 7 Trajectory tracking error model

令航向误差 $e_\varphi = \varphi - \theta_r$,则有

$$\begin{cases} \dot{e}_\varphi = \dot{\varphi} - \dot{\theta}_r \\ \ddot{e}_\varphi = \ddot{\varphi} - \ddot{\theta}_r \approx \ddot{\varphi} \\ \dot{e}_d = v_y + v_x e_\varphi \\ \ddot{e}_d = \dot{v}_y + v_x \dot{e}_\varphi \end{cases} \quad (4)$$

由式(1)和式(4)得

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_d \\ \dot{e}_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_f + C_r}{mv_x} & -\frac{C_f + C_r}{m} & \frac{aC_f - bC_r}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{aC_f - bC_r}{Iv_x} & -\frac{aC_f - bC_r}{I} & \frac{a^2C_f + b^2C_r}{Iv_x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_d \\ e_\varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{C_f}{m} \\ 0 \\ -\frac{aC_f}{I} \end{pmatrix} \delta + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{aC_f - bC_r}{mv_x} - v_x \\ 0 \\ \frac{a^2C_f + b^2C_r}{Iv_x} \end{pmatrix} \dot{\theta}_r \quad (5)$$

则误差微分方程可表示为

$$\dot{e} = \bar{A}e + \bar{B}u + \bar{C}\dot{\theta}_r \quad (6)$$

利用LQR消除 $\dot{e} = \bar{A}e + \bar{B}u$ 线性方程的误差,引入前馈控制,消除 $\bar{C}\dot{\theta}_r$ 误差项,设最终控制率为

$$u_\delta = -Ke + \delta_f \quad (7)$$

其中, $K = R^{-1}B^T P$ 可通过黎卡提方程求解, δ_f 满足 $\dot{e} = 0$ 和 $e = 0$,则

$$\delta_f = k \left[a + b - bk_3 - \frac{mv_x^2}{a+b} \left(\frac{b}{C_f} + k_3 \frac{a}{C_r} - \frac{a}{C_r} \right) \right] \quad (8)$$

其中, k 为规划轨迹点的曲率, k_3 为 $K = (k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4)$ 矩阵中的第3项。

综上,可得最终控制率

$$u_\delta = -Ke + \delta_f = -Ke + k \left[L - bk_3 - \frac{mv_x^2}{L} \left(\frac{b}{C_f} + k_3 \frac{a}{C_r} - \frac{a}{C_r} \right) \right] \quad (9)$$

4.2 变预瞄距离横向控制

根据驾驶员预瞄经验可知,预瞄距离不仅与当前速度有关,还受道路曲率影响^[14]。预瞄距离与速度、道路曲率的关系非常复杂,难以通过数学模型进行表示,本文基于模糊控制原理设计了变预瞄距离控制器^[15-16]。综合考虑当前速度以及道路曲率因素设计模糊控制器,控制算法流程如图8所示。

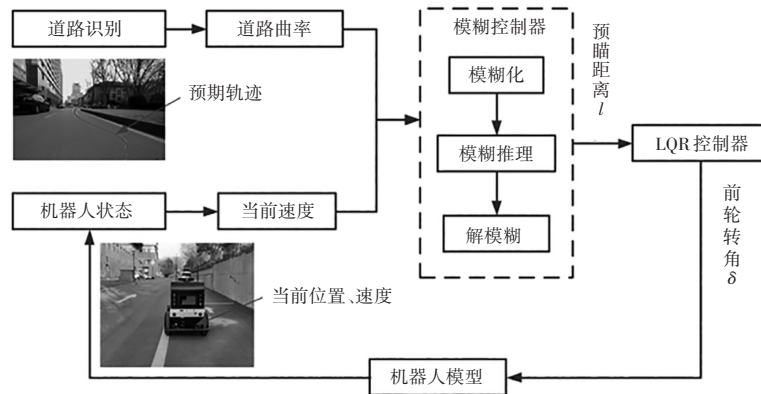


图8 变预瞄距离控制流程

Fig. 8 Process of variable preview distance control

将速度 v_x 、道路曲率 k 以及预瞄距离 l_d 分别划分为5、4、7个等级,并选用三角形隶属函数模糊化。速度、道路曲率和预瞄距离隶属度函数分别如图9和图10所示。

根据驾驶员预瞄经验(速度越高道路曲率越小预瞄距离越长,反之则越短),设计模糊规则如表2所示,模糊特征曲面如图11所示。

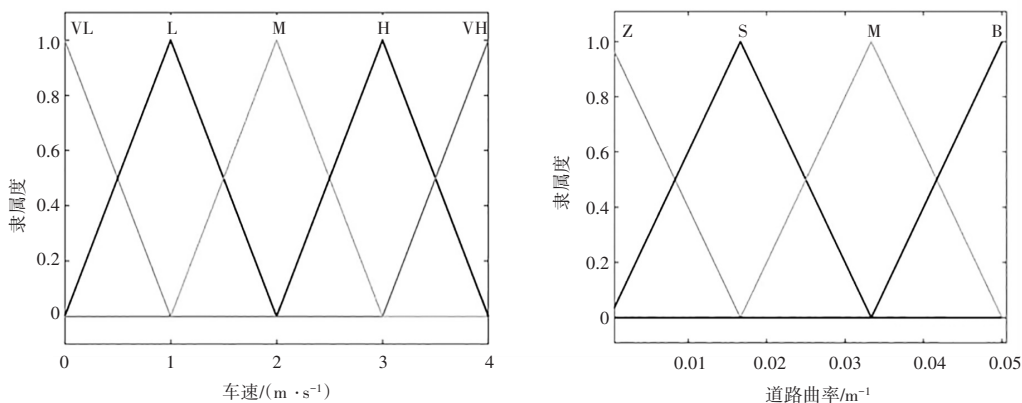


图9 速度及道路曲率隶属度函数

Figure 9 Membership functions of velocity and road curvature

选用灵敏度较高的重心法进行解模糊运算。

$$u_a = \frac{\sum_{i=0}^n i \times \mu_i}{\sum_{i=0}^n \mu_i} \quad (10)$$

其中, u_a 为解模糊得到的精确值, μ_i 表示对应论域的隶属度。

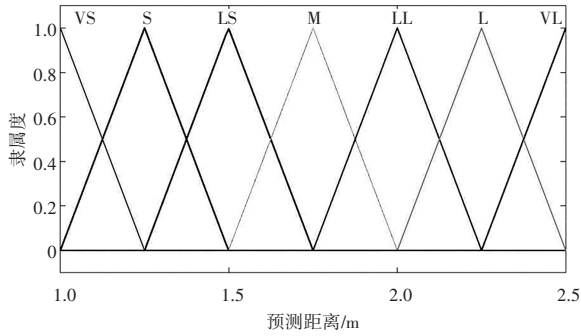


图 10 预览距离隶属度函数

Fig. 10 Membership functions of preview distance

表 2 模糊控制规则表

Tab. 2 Fuzzy control rule table

k	l_d				
	VL	L	M	H	VH
Z	LS	M	LL	L	VL
S	LS	M	LL	LL	L
M	S	LS	M	LL	LL
B	VS	S	LS	M	LL

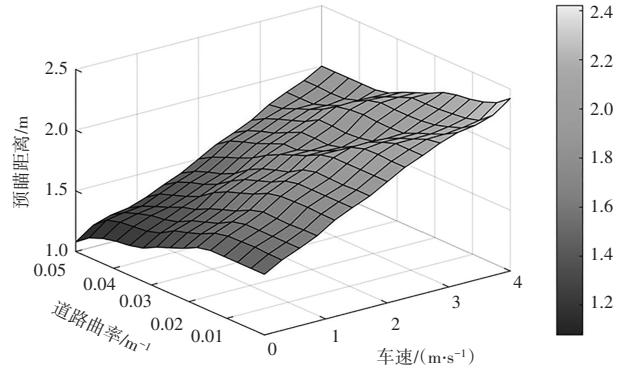


图 11 模糊特征曲面

Fig. 11 Fuzzy characteristic surface

5 轨迹跟踪仿真分析

5.1 仿真系统

通过 MATLAB/Simulink 建立机器人轨迹跟踪仿真系统如图 12 所示,包括轨迹规划、模糊控制、预览距离预测、LQR 控制等模块。

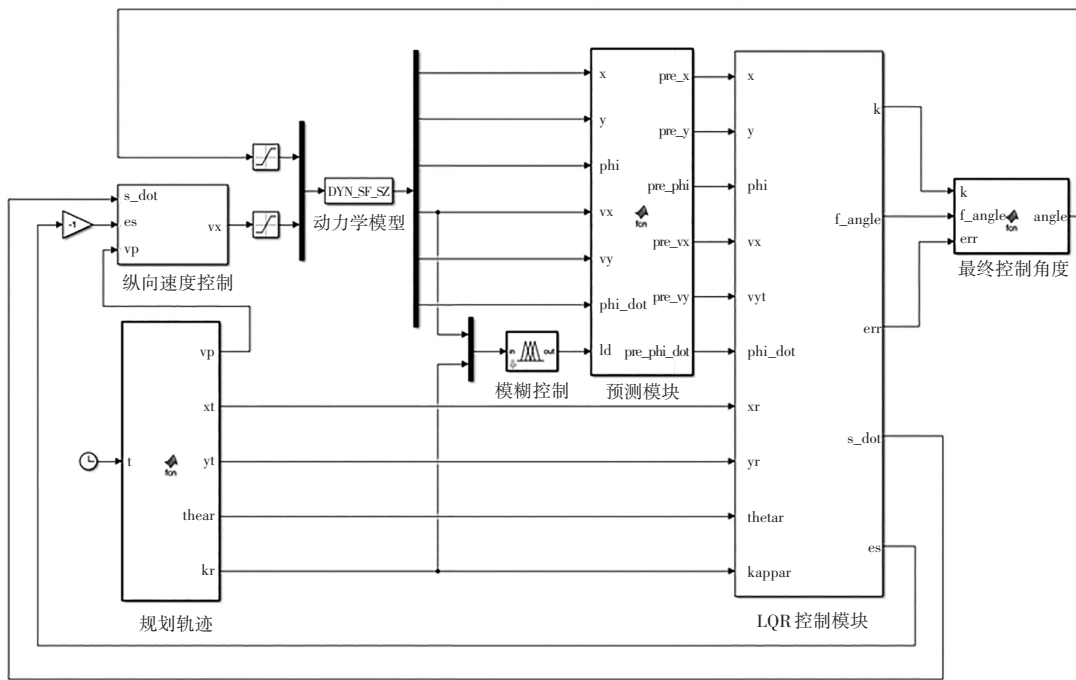


图 12 仿真系统

Fig. 12 Simulation system

5.2 仿真实验

为证明本文方法能够适应不同的速度及道路曲率,设计具备不同曲率的道路如图 13 所示。并以 3 种不同的速度(4 m/s、2 m/s、1 m/s)进行仿真验证。

速度为 4 m/s 时,不同曲率道路下无预览、固定预览、变预览距离横向误差仿真结果如图 14 所示。

速度为 2 m/s 时,不同曲率道路下无预览、固定预览、变预览距离横向误差仿真结果如图 15 所示。

速度为 1 m/s 时,不同曲率道路下无预览、固定预览、变预览距离横向误差仿真结果如图 16 所示。

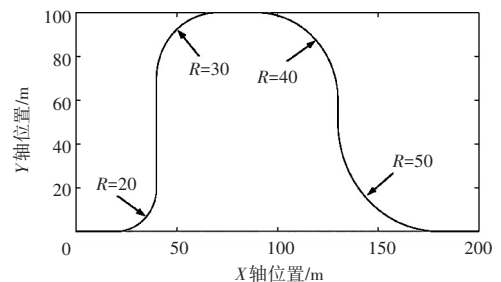


图 13 道路设计

Fig. 13 Road design

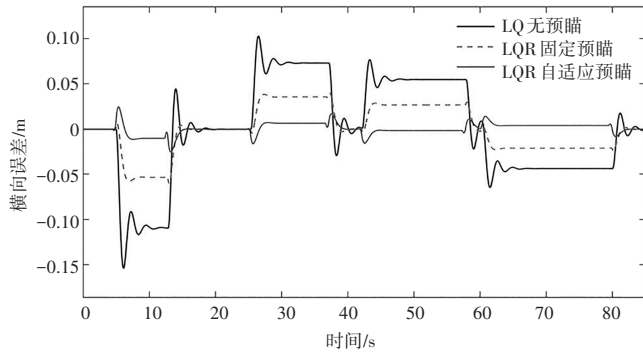


图 14 跟踪仿真结果

Fig. 14 Tracking simulation results

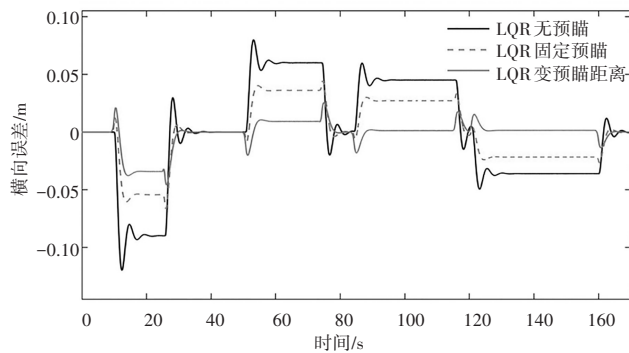


图 15 跟踪仿真结果

Fig. 15 Tracking simulation results

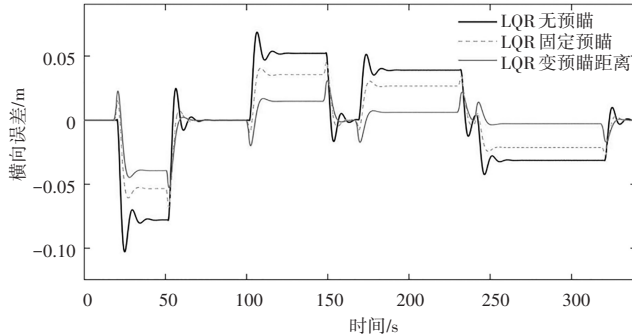


图 16 跟踪仿真结果

Fig. 16 Tracking simulation results

仿真结果表明,本文提出的变预瞄距离 LQR 控制算法,能够有效适应不同的道路曲率以及速度,最大横向跟踪误差在 ± 5 cm 以内,相较于无预瞄提高 51%,相较于固定预瞄提高 26%。

6 结论

本文基于阿克曼移动平台建立了机器人运动学及动力学模型。通过参数辨识获得动力学模型传递函数。基于模糊控制方法,设计了变预瞄距离横向控制方法,使机器人能够适应不同的速度以及道路曲率。仿真结果表明,本文提出的变预瞄距离控制算法跟踪精度相较于无预瞄提高 51%,相较于固定预瞄提高 26%。

参考文献

- [1] 聂振邦, 于海斌. 基于参考轨迹的移动机器人避碰决策及轨迹跟踪方法[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(9):2879-2889.
- [2] 侯嘉瑞. 侦察巡检机器人路径规划及轨迹跟踪技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [3] 李雪峰, 李涛, 邱权, 等. 果园移动机器人自主导航研究进展[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5):156-164.
- [4] 吴晨, 宋真玉, 陈玮. 自动驾驶车辆横向控制模型研究综述[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(12):5-9,33.
- [5] 李艳, 雷佳琦. 扰动作用下的多移动机器人编队模型预测控制[J]. 信息与控制, 2023, 52(2):166-175.
- [6] 李金贺, 封岸松, 范晓亮, 等. 基于改进 RRT 算法的机器人路径规划[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(11):7-10.
- [7] 许万, 周航. 基于路径评价模型的自适应轨迹跟踪控制[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(24):336-344.
- [8] Liu W, Wang R, Xie C, et al. Investigation on adaptive preview distance path tracking control with directional error compensation[J]. Journal of Systems Control Engineering, 2019, 234(4):484-500.
- [9] 朱立成, 赵智宇, 韩振浩, 等. 基于自抗扰控制的双重转向运动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1):391-401.
- [10] 刘强, 杨蔡进, 张卫华, 等. 基于阿克曼原理的 4WID/4WIS 汽车循迹控制研究[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(1):36-44.
- [11] Reina G, Aiano M, Blanco-Claraco J. Vehicle parameter estimation using a model-based estimator[J]. Mechanical Systems Signal Processing, 2017(87):227-241.
- [12] 李伯雄, 王立勇, 孙鹏, 等. 无人车辆横向跟踪控制研究[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(2):197-202.
- [13] 董慧芬, 姚勤燃, 王俊峰. 基于动力学参数辨识的两轮机器人平衡控制[J]. 控制工程, 2025, 32(2):345-353.
- [14] 梁永彬, 付广, 林智桂, 等. 基于改进预瞄控制模型的车道保持系统设计[J]. 中国机械工程, 2024, 35(3):548-558.
- [15] 石振新, 冯剑波, 王衍学. 基于 MPC 和模糊控制的智能汽车路径追踪研究[J]. 车辆与动力技术, 2022(2):7-11.
- [16] Min X, Li Y, Tong S. Adaptive fuzzy optimal control for a class of active suspension systems with full-state constraints[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(5):371-381.