DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0001-05

一种基于 2D 激光的差速车滑模控制算法

文 喆[1,2], 李 庆[2], 庞 华[1], 雒建斌[1], 刘大猛[1]

(1.清华大学 高端装备界面科学与技术全国重点实验室,北京 100084; 2.季华实验室,广东 佛山,528200)

摘 要:从 2015 年至今,智能工业移动机器人发展迅猛,并基于新一代的可移动底盘技术衍生出诸多产品,如潜伏式物流机器人、工业叉车机器人、工业巡检机器人等,这些产品在各个领域得到广泛应用。现有产品更倾向于以差速驱动底盘为主体,通过深入研究导航问题,针对难点和痛点进行策略上的优化和创新。目前市面上工业物流移动机器人的定位精度可以达到±5 mm,代表者有新松机器人、海康机器人、极智佳机器人,而有的场景甚至要求 1 mm 的定位精度,这无疑是一个技术难点问题。本文同样以差速模型为研究对象,目标是实现 AGV 轨迹跟踪偏差的快速收敛(达到 50 ms 的动态响应速率),且重复定位精度可以达到±3 mm, 并且可以通过修订控制参数实现单独对 x 或者 y 方向偏差量的控制。 通过研究局部路径跟踪的相关技术,一方面,多角度分析适用于差速底盘的轨迹跟踪算法并提出一种滑模控制算法,通过创新性地提出一种态平面系统,最优化误差收敛表现、解决控制参数互耦的问题;另一方面,基于一款真实的差速移动底盘,将该轨迹跟踪算法编程化并应用于其主控板中,通过跟随三阶贝塞尔曲线以验证算法的有效性。本文展示了滑模算法推导过程,并应用于实体 AGV,获得了真实的小车轨迹跟踪数据, 实验数据验证了该创新态平面有效地解决了 x 与 y 偏差量的解耦问题, 并且达到了重复定位精度的目标要求±3 mm。

关键词:轨迹跟踪;自主导引小车;差速移动机器人;滑模控制算法;移动机器人位姿预测

中图分类号: TP273;TH22 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)08-0001-05

A sliding mode control algorithm for differential drive vehicles based on 2D laser

Wen Zhe[1,2], Li Qin[2], Pang Hua[1], Luo Jianbin[1], Liu Dameng[1]

(1. State Key Laboratory of Tribology in Advanced Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Jihua Laboratory, Foshan 528200, Guangdong, China)

Abstract: Since 2015, industrial mobile robots have developed rapidly and have given rise to many products based on the new generation of mobile chassis technology, such as low-profile industrial logistics robots, industrial forklift robots, and industrial inspection robots. Existing products tend to use differential drive chassis as the main body and optimize and innovate strategies by in-depth research on navigation issues. Currently, the positioning accuracy of industrial logistics mobile robots on the market can reach ±5 mm, with representatives such as Siasun Robotics, Hikvision Robotics, and Geek+ Robot. However, some scenarios even require a positioning accuracy of 1 mm, which undoubtedly poses a technical challenge. This paper also takes the differential model as the research object and studies the local path tracking method. On the one hand, it analyzes the trajectory tracking control algorithms suitable for differential mobile chassis from multiple perspectives and proposes a sliding mode control algorithm, which optimizes the error convergence performance by adjusting the control parameters in real time. On the other hand, based on a real differential mobile chassis, it verifies whether the designed algorithm is effective and feasible and obtains an empirically valid conclusion.

Keywords: trajectory tracking; autonomous guided vehicle; differential drive mobile robot; sliding mode control algorithm; mobile robot pose prediction

移动机器人(AGV/AMR)产业联盟调研 120 家移动机器人本体企业及近百家供应链企业数据后发布的《2023 年度中国移动机器人(AGV/AMR)产业发展研究报告》数据显示,2023 年中国 AMR 销售台数约 125 000 台,2024 年预测为 155 000 万台,其中二维码导航与 SLAM 激光导航的比例约为 61%与 29%[1]。近几年随着无人驾驶产业的快速兴起,激光导航技术得以高速发展,2D 激光导航移动机器人的移动精度因此受益[2]。移动机器人导航方式有轨式(词条/色带)导航、二维码导航、激光/视觉导航、多传感器融合导航。目前主流的是二维码导航、激光导航,二维码导航的突出特点是很高的工作效率与定位精确性,但是移动自由度低、柔性差,维护成本高(二维码需要定期更换且间距要求精确到毫米)[1]。而 2D 激光导航的 AGV 可以通过调度系统根据需求画出路径网络,网络

收稿日期:2025-07-07;**录用日期**:2025-09-01

作者简介:文 喆(1992—),男,硕士,工程师,研究方向为机器人软件编程与控制算法。

通信作者:刘大猛(1979—),男,工学博士,研究方向为机器视觉检测技术、表面工程和摩擦能量耗散。

引用本文:文喆,李庆,庞华,等.一种基于 2D 激光的差速车滑模控制算法[J].自动化技术与应用,2026,45(8):1-5.(Wen Zhe, Li Qin, Pang Hua, et al. A sliding mode control algorithm for differential drive vehicles based on 2D laser[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(8): 1-5.)

路径可以通过图形化的操作实现快速变更,并可配置路径属性(如路径是否单向、双向行驶),这给工厂物流赋予了更高的操作性、柔性。通过智能路径规划算法,激光导航移动机器人的调度系统可通过机器人终端感应工作空间,并根据可配置的避障逻辑规划出最优的移动路径,具备更高的环境感知性、部署柔性,而二维码导航的移动机器人是不具备环境感知能力的[3]。室内工业物流应用场景下,2D激光导航相比二维码导航的相对劣势在精度和执行任务效率上。拿目前广泛应用于物流仓库的主流潜伏式二维码导航AGV举例,其最高移动速度在1.5 m/s,且末端的定位精度在3~5 mm。而同期的激光导航竞品速度在1 m/s,且末端对位为5~10 mm。由于机器人移动的实现主要由定位、路径规划和轨迹跟踪(运动控制)三方面构成[4],而且轨迹跟踪的响应速度和偏差量决定了AGV搬运任务完成的速度和运货质量。所以,本文的重点研究方向为2D激光导航AGV的轨迹跟踪,讨论的重点是基于2D激光SLAM位姿反馈的一种滑模路径跟踪控制算法,并将具体推演一种滑模控制律。该控制律将通过Ubuntu系统应用到机器人上,其控制效果得到了真实数据的验证,该滑模控制算法对学术研究或是工程应用都有重大的意义。

1 自主导航小车运动模型

随着工业制造与民用消费场景的不断升级,移动机器人也发展出了多种多样的驱动方式,从最早的单舵轮发展到双差速,以及后来的四驱底盘。已有研究人员对现有底盘类型进行了整理并分别指出各自的优势与不足[5],还有一些研究人员以轨迹跟踪的效果为评判依据,对跟踪控制律进行多种设计,但该设计思路有制约控制效果的因素存在,即奇异点[6]。另外,控制器维数远超出合理范围也是制约实际应用的关键因素,超高的控制器维数带来大量的计算量提升,对AGV车载电脑的处理器性能要求会呈指数级增长。本文创造性地提出了一种新的态平面滑模控制率,旨在使系统不存在奇异点[7],但控制律对角加速度有相对严格的要求,在经过反复试错和改进后,这种技术差速驱动方式的AGV(如图1所示)被广泛地接受,这也是本文所研究的重点。为了方便统一表达,本文对AGV坐标系进行了如图3的建立,那么用来表示跟踪轨迹的公式可以定义为$f(x,y,\theta)=0$。对AGV坐标系原点加以表示,坐标系x轴和原点的夹角,便代表AGV的位姿θ。将差速驱动AGV看成以坐标系原点重合的质点,运行线速度表示为v_c、角速度ω_c。在AGV按照预定速度对预设轨迹进行跟踪的过程中,研究人员需要将规划轨迹与规划速度进行对应,规划速度与左右两个轮的转速进行对应,从而完成运动学模型的搭建。

如图2所示ω_r和ω_l分别代表左右轮的角速度,l代表轴距,则以车体中心为笛卡尔坐标系原点构建坐标和位姿方向的运动学模型可以表示为

$$\begin{cases}\dot{x}=v\times\cos\theta\\ \dot{y}=v\times\sin\theta\\ \omega_c=\dot{\theta}_d\end{cases}\tag{1}$$

则设计路径和速度可表示为

$$\begin{cases}\dot{x}_d=v_d\times\cos\theta_d\\ \dot{y}_d=v_d\times\sin\theta_d\\ \omega_d=\dot{\theta}\end{cases}\tag{2}$$

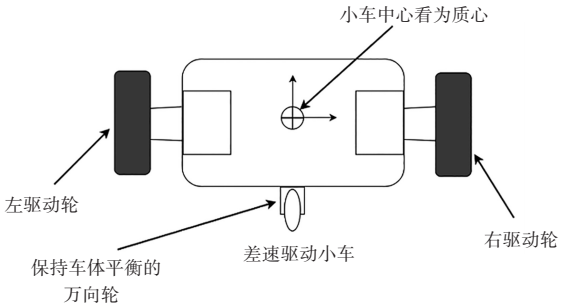


图1 差速移动机器人模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a differential mobile robot model

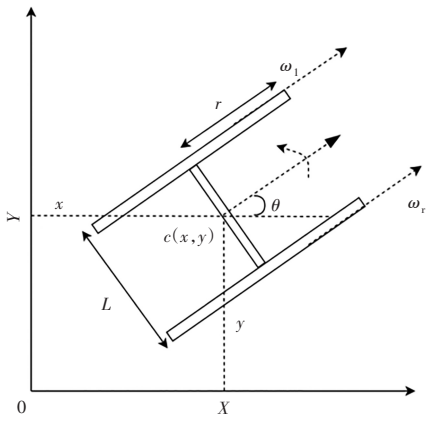


图2 差速AGV笛卡尔坐标系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the Cartesian coordinate system of a differential mobile AGV

假设小车的轮子转动时在地面不出现打滑的情况,则有:

$$\dot{x}\times\sin\theta-\dot{y}\times\cos\theta=0\tag{3}$$

同时,考虑车体线速度、角速度与左右车轮的数学关系,可以推得公式4如下:

$$\begin{cases}x_{k+1}=x_k+\Delta t\times\left(\dfrac{\omega_r+\omega_l}{2}r\right)\times\cos\theta_k\\ y_{k+1}=y_k+\Delta t\times\left(\dfrac{\omega_r+\omega_l}{2}r\right)\times\sin\theta_k\\ \theta_{k+1}=\theta_k+\Delta t\times\left(\dfrac{\omega_r+\omega_l}{l}\right)\end{cases}\tag{4}$$

进一步考虑左右两个车轮的位移量分别用Δs_l与Δs_r表示,则有:

$$\begin{cases}\Delta s_r=\left(\dfrac{\text{counts}}{\text{CPR}}\right)_r\cdot\pi\cdot d\\ \Delta s_l=\left(\dfrac{\text{counts}}{\text{CPR}}\right)_l\cdot\pi\cdot d\end{cases}\tag{5}$$

其中，d 为轮子直径，counts 代表在 Δt 时间内驱动器脉冲数，CPR 代表驱动器分辨率内所包含的脉冲数。最后，差速移动机器人里程计编码器的读数可按如下方式计算：

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + \left(\dfrac{\Delta s_r + \Delta s_l}{2} r\right) \times \cos\theta_k \\ y_{k+1} = y_k + \left(\dfrac{\Delta s_r + \Delta s_l}{2} r\right) \times \cos\theta_k \\ \theta_{k+1} = \theta_k + \left(\dfrac{\Delta s_r + \Delta s_l}{l}\right) \end{cases} \tag{6}$$

2 车体轨迹跟踪与滑模控制算法

2.1 基于激光 SLAM 的轨迹跟踪技术

定位技术是 2D 激光 SLAM 导航中最重要的一个环节，工业产品级 2D 激光传感器普遍具备超广角感知（270°）、精度高的特点[8]。机器人首先通过 2D 激光进行建图（如图 2 所示），建图的同时通过定位技术进行定位。通常情况下，使用者对建图的精度没有严格的要求而是对定位有着很高的要求，其中定位又分为相对精度和绝对精度。相对精度是指没有基准的精度，机器人在移动前不需要知道在地图中的绝对位置；绝对精度是指有基准的精度，机器人在移动前必须知道在地图中的绝对位置[9]。在 2D 激光导航 SLAM 研究中，高位置精度意味着机器人位置姿态较建图后的地图位置相对准确，机器人不需要知道每次移动发起前在实际场景中的绝对位置，同时惯性导航和测程法通常作为相对位置计算的工具，图形匹配定位和概率定位通常被用于绝对位置精度的计算[4]。



图 3 2D-SLAM 激光建图示例

Fig. 3 2D-SLAM Lidar mapping sample

本文创新的滑模轨迹跟踪算法跟踪对象为三阶贝塞尔曲线，地图辅助反光条为 2D-SLAM 激光导航提供更稳定的数据，激光头以固定频率（10～50 Hz）扫描周围环境生成二维点云数据。点云数据通过数据滤波算法与去畸变技术形成环境轮廓特征清晰的点云数据[6,10]，这样可以提升 SLAM 建图、定位精度。SLAM 过程包括前端匹配和后端优化，前端匹配通过扫描匹配算法如 scan-to-scan，scan-to-map；后端优化则基于图优化，如改进的循环三边组合测量方法[11]，旨在消除全局累积误差，构建全局一致的地图。2D-SLAM 通常生成占据栅格地图，标记出环境中的可行区域和障碍物[12-13]。有了准确的环境信息，AGV 小车可以进行路径规划和导航控制。导航分为局部路径规划和全局路径规划。全局规划基于构建的地图，使用全局路径规划算法（如 A* 和 Dijkstra 算法）生成静态最优路径[14-16]；局部规划则通过局部路径规划算法如动态窗口法（DWA）或模型预测控制避开动态障碍物[17-18]。再将规划的速度指令通过运动学解算转换为差速底盘的左右轮速，最后通过速度控制器跟踪目标轨迹。AGV 小车运动中的滑移、轮胎磨损、机械结构变动会导致运动学模型失配，进而影响系统的轨迹跟踪精度，因此可考虑基于自适应规则的指导，能实时调整控制律的路径跟踪算法是提高 AGV 轨迹跟踪精度的关键技术。

2.2 估计小车位姿

通过控制轮速是最直接控制小车姿态的方式[19]，车轮和地面的运动状态为相对运动，因此，在某些时刻极易出现预设位姿与实际位姿不符的情况，而本文所研究运动控制项目提出的初衷，便是以车载传感器为依托，根据检测外界环境、运动状态所得结论，对 AGV 进行自定位，在此基础上，参考目标位置和当前位姿，通过实时调整控制量的方式，达到轨迹跟踪的目的。由此可见，位姿估计是极为重要的环节。在估计小车位姿时，要确定状态变量，而状态变量的计算公式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{Y} = [\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{M} = [\varphi_r, \varphi_l, \omega_c]^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{7}$$

式中，$\Delta\varphi_l$ 代表控制周期内左驱动轮转过角度，$\Delta\varphi_r$ 代表右驱动轮转过角度。

对测量数值加以确定的公式为

$$\boldsymbol{Z}(i) = [\boldsymbol{N}_l(i), \boldsymbol{N}_r(i), \boldsymbol{N}_g(i)]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{N}_l(i)$ 代表控制周期内左轮编码器脉冲增量，$\boldsymbol{N}_r(i)$ 代表右轮编码器脉冲增量，$\boldsymbol{N}_g(i)$ 代表 2D-SLAM 激光的 A/D 值。

此时，可被用来表现 AGV 状态的方程为

$$\boldsymbol{Y}(i+1) = \boldsymbol{C}(i)\boldsymbol{Y}(i) + \boldsymbol{D}(i)M_e(i) + \boldsymbol{\xi}(i) \tag{9}$$

式中，$\boldsymbol{C}(i)$ 代表状态转移阵，$\boldsymbol{D}(i)$ 代表输入矩阵，$\boldsymbol{\xi}(i)$ 代表系统干扰，$\boldsymbol{M}_e(i)$ 代表式（7）状态变量的误差矩阵。由此可见，量测矩阵适用公式为

$$\boldsymbol{H}(i+1) = [\boldsymbol{O}_{3\times 3}, \boldsymbol{H}_M(i+1)] \tag{10}$$

研究表明，地面和车轮的关系是非完整约束[20]，在 AGV 处于运动状态时，其位姿出现偏差的情况难以避免，越长的移动距离，通常对应越大的位姿偏差，这便是运动精度无法达到预期的主要原因。这也间接证明了运动控制需要以运动轨迹为依据，对运动控制量进行实时调节，确保跟踪轨迹和设计轨迹完全重合。要想使所设计系统发挥出应有作用，要明确以下内容：其一，运动控制器强调基于设计路径进行参考输入，将测得位姿视为反馈信号，确保运动控制量能够得到准确输出；其二，滑模控制的本质是以系统模型为基础，通过优化态平面方程、寻找适合当前机器人的态平面参量和反馈校正的方式，达到控制的最终目的，其优势主要表现为鲁棒性佳、对模型精度所提出要求相对宽松[20-22]。

2.3 融合位姿观测器的滑模控制

如图 4 展示的是融合位姿观测器后的滑模控制系统闭环图,其中位姿预测器请参照 2.2 节的内容。

图 4 中的数据流描述具体如下。“机器人姿态设计值”表达为 $[x_e, y_e, \theta_e]$;“设计速度,设计角速度”表达为 $[v_d, \omega_d]$;“真实车体线速度,真实角速度”表达为 $[v_r, \omega_r]$;“机器人姿态实际值”表达为 $[x_r, y_r, \theta_r]$;“机器人姿态偏差值”表达为 $[x_e, y_e, \theta_e]$。

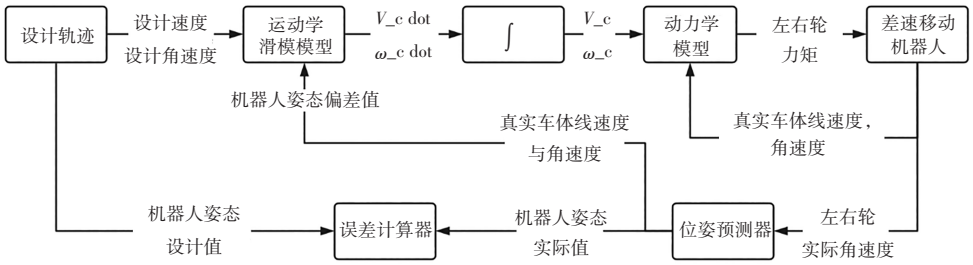


图 4 基于 2D-SLAM 激光定位的差速移动机器人滑模控制图

Fig. 4 Sliding mode control diagram of differential mobile robot based on 2D-SLAM laser positioning

结合图 3 可以得到误差方程与误差微分方程分别为

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_d & \sin\theta_d & 0 \\ -\sin\theta_d & \cos\theta_d & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_d \\ y - y_d \\ \theta - \theta_d \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_e = -v_d + y_e \cdot \omega_d + v \cdot \cos\theta_d \\ \dot{y}_d = v_d \cdot \sin\theta_d - x_e \cdot \omega_d \\ \dot{\theta}_d = \omega - \omega_d \end{cases} \tag{12}$$

目标是通过滑模控制推动 $[x_e, y_e, \theta_e]$ 趋近零,此时引入本文路径跟踪控制器的设计核心---解耦的滑模平面。该滑模平面组由两个态平面构成,第一个平面由 x 方向偏差量 x_e 和该偏差量的变化率构成,且只对 x_e 进行参数控制,这样设计的意义在于可以单独对 x_e 进行控制且不会产生过调的效果,如果对 $\dot{x}_e$ 进行参数控制会使得 x_e 的收敛产生过多抖动;第二个平面则与纵向偏差量 y_e 和航向角偏差量 θ_e 相关,分别对 y_e 和 θ_e 进行正比例控制同样不对 $\dot{\theta}_e$ 进行干预。根据以上设计思路,得到态平面公式为

$$\begin{cases} s_1 = k_1 x_e + \dot{x}_e \\ s_2 = k_2 \theta_e + \dot{\theta}_e + k_0 y_e \end{cases} \tag{13}$$

进而得到求导后的滑模平面,有

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = k_1 \dot{x}_e + \ddot{x}_e \\ \dot{s}_2 = k_2 \dot{\theta}_e + \ddot{\theta}_e + k_0 \dot{y}_e \end{cases} \tag{14}$$

式中,k_0, k_1, k_2 是正参数。根据滑模接近定律:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -\boldsymbol{Q}_1 s_1 - \boldsymbol{P}_1 \mathrm{sgn}(s_1) \\ \dot{s}_2 = -\boldsymbol{Q}_2 s_2 - \boldsymbol{P}_2 \mathrm{sgn}(s_2) \end{cases} \tag{15}$$

式中,$\boldsymbol{Q}_1, \boldsymbol{Q}_2, \boldsymbol{P}_1, \boldsymbol{P}_2$ 是正定矩阵,整合滑模平面求导公式、机器人运动学公式与滑模接近定律,最后可以得到图 4 中滑模控制器的输出方程为

$$\begin{cases} v_c = \dfrac{-\boldsymbol{Q}_1 s_1 - \boldsymbol{P}_1 \mathrm{sgn}(s_1) - k_1 \dot{x}_e + \dot{V}_d + v \cdot \sin\theta_e \cdot \dot{\theta}_e - \dot{y}_e \omega_d - y_e \dot{\omega}_d}{\cos\theta_e} \\ \omega_c = -\boldsymbol{Q}_2 s_2 - \boldsymbol{P}_2 \mathrm{sgn}(s_2) - k_0 \dot{y}_e + \dot{\omega}_d - k_2 \dot{\theta}_e \end{cases} \tag{16}$$

公式(16)即为图 4 中“运动学滑模模型”模块的输出,也是控制律的最终表达式,观察发现该控制律主要与态平面参数、AGV 设计速度与速度误差矩阵相关。

3 实验分析

本节将展示 3.4 节中的滑模控制算法应用在实体移动机器人上的轨迹追踪效果。小车采用研华系列工控机(x86-Linux 系统)配合 STM32 单片机的电气架构,通过 USB 接口进行通讯,单片机负责通过 CANBUS 控制驱动器,而工控机连接了包括 2D 激光雷达、IMU 等外部传感器。局域路径规划与跟踪算法通过 C++语言在 Linux 系统上运行。需要说明的是,三阶贝塞尔曲线在实际应用场景中最为常见与普遍[23-24]。本次试验通过给定三阶贝塞尔曲线(图 6 中实线)为设计轨迹观测小车角度与角速度跟踪情况。图 5 为三阶贝塞尔曲线的一部分,实线为实际跟踪结果,虚线为目标曲线。

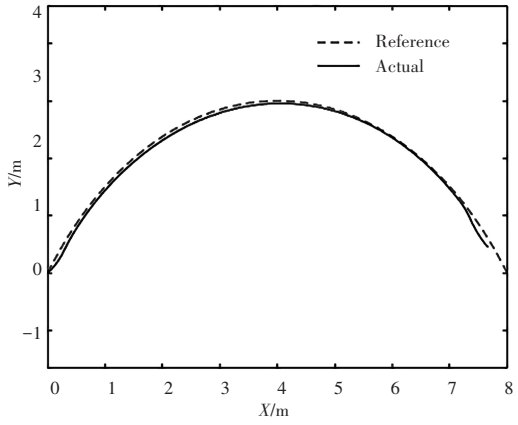


图 5 车体轨迹跟踪图

Fig. 5 Vehicle body trajectory tracking diagram

轨迹位置误差如图 6 中虚线所示,实线为展示的三阶贝塞尔曲线,每 10 ms 为一个采样点。

车体航向角误差如图 7 所示。设置合适的滑模控制器参数 k_0, k_1, k_2(式(16)中),设置一条跟踪轨迹,运行移动机器人代码,通过驱动器编码器获得左右脉冲数并计算

角速度,同时通过陀螺仪与 2D 激光雷达可以获得小车实际角度即可获得图 6 角速度跟踪图与图 7 角通过图 6 与图 7 车体角度误差图。通过图 6 与图 7 可观测到在 500 ms 时车体角速度、车头指向与设计朝向的偏差成功收敛。

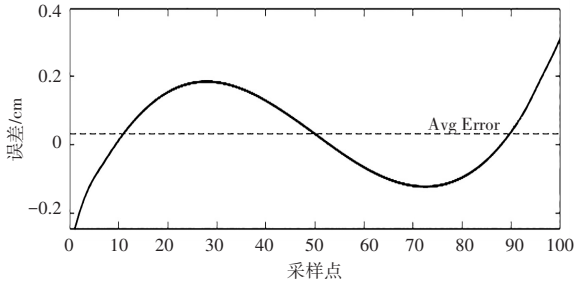


图 6　车体位置偏差图

Fig. 6　AGV position deviation diagram

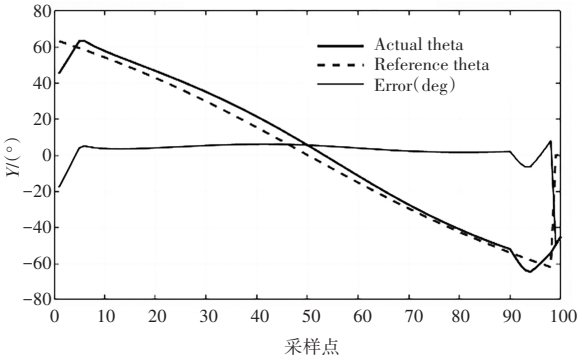


图 7　车体航向角跟踪图与航向角误差

Fig. 7　AGV heading angle tracking diagram and heading angle error

数据结果证明,该滑模控制算法通过引入陀螺仪与 2D 激光雷达构成位姿感应系统的实时数据成功实现了移动机器人的轨迹跟踪,同时验证了多传感器融合 SLAM 具备更好的位姿反馈[25]。在工程应用方面,该算法应用在 x86 架构下的 Linux 系统,该系统具备实现多传感器融合的轨迹跟踪计算能力。在控制器刷新频率方面,该系统表现略差,这是由于本项目使用的 2D 激光雷达的扫描频率是 150~200 ms。该算法的优势为在地面平整度较差的环境下仍有很好的路径跟随效果与鲁棒性。

4　结论

针对 AGV/AMR 轨迹跟踪问题,依靠基于 2D-SLAM 激光雷达数据构建的位姿预测器,进行改进滑模制器设计。算法在一款真实的移动机器人上进行了移植,闭环操纵控制系统的稳定性得到证明。所提出算法的亮点在于创新性地构建了一种态平面体系,并改进态平面间的解耦关系。第一个态平面的构建参考横向偏移量和横向偏移量变化率,而第二态平面参考航向角偏移量、航向角偏移量变化率和纵向偏移量。通过调节特定参数可以实现系统对特定偏移量的响应效果解决了单一态平面不能解耦控制的问题。试验验证该算法的有效性,但其局限性在于假设轨迹都是三阶贝塞尔曲线,后续将研究更多曲线下的轨迹跟踪效果。

参考文献

[1]移动机器人(AGV/AMR)产业联盟. 2023 年度中国移动机器人(AGV/AMR)产业发展研究报告[R]. 沈阳:CMR 产业联盟(中国移动机器人产业联盟),2023:40-50.
[2]席瑞,李玉军,侯孟书. 室内定位方法综述[J]. 计算机科学,2016,43(4):1-6,32.
[3]刘艳亮,张海平,徐彦田,等. 全球卫星导航系统的现状与进展[J]. 导航定位学报,2019,7(1):18-21,27.
[4]王卫华. 移动机器人定位技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
[5]杜博文,倪晓昌,孔维敬,等. 多传感融合的激光雷达 SLAM 及应用进展[J]. 天津职业技术师范大学学报,2023,33(3):1-5,85.
[6]王晋. 基于 ROS 的低速无人车 2D 激光 SLAM 建图方法研究[J]. 山西电子技术,2023(1):95-98.
[7]余翎瑞,卢秋红,薛阳. 移动机器人滑膜变结构轨迹跟踪控制[J]. 科技与创新,2024(15):30-32,36.
[8]王昭东. 室内环境下基于 UWB 和激光雷达的移动机器人二维定位的研究[D]. 南京:东南大学,2021.
[9]杜博文,倪晓昌,孔维敬,等. 多传感融合的激光雷达 SLAM 及应用进展[J]. 天津职业技术师范大学学报,2023,33(3):1-5,85.
[10]朱成杰,张东升. 基于 2D-SLAM 算法的机器人建图定位分析[J]. 无线互联科技,2022,19(20):115-119.
[11]姜伟. 一种改进的室内激光导航 AGV 定位方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2021(7):91-94.
[12]马志艳,邵长松. 移动机器人 2D 激光 SLAM 算法仿真与实现[J]. 湖北工业大学学报,2024,39(2):5-9.
[13]刘铭哲,徐光辉,唐堂,等. 激光雷达 SLAM 算法综述[J]. 计算机工程与应用,2024,60(1):1-14.
[14]姜炳辉. 基于蚁群算法的机器人全局路径规划算法改进[J]. 中国新技术新产品,2024(17):7-10.
[15]马占玺. 基于 ROS 的移动机器人 SLAM 建图与路径规划研究[D]. 曲阜:曲阜师范大学,2024.
[16]王庆,孙秋凤,李霞,等. 基于 ROS 的全局路径规划算法的仿真教学设计[J]. 软件,2023,44(10):37-40.
[17]赵卫东,章争生,陈文博. 基于 A* 算法的局部路径规划算法[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版),2023,40(1):70-75.
[18]马晓录,李如意,吴立辉. 智能车辆局部路径规划算法研究综述[J]. 汽车实用技术,2022,47(23):232-237.
[19]冯冰玉. 基于轮速控制的移动机器人轨迹跟踪控制算法[J]. 拖拉机与农用运输车,2019,46(1):13-16.
[20]张鑫,秦东晨,谢远龙,等. 基于双环自适应滑模的移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2024,47(1):13-20.
[21]杨光永,陈旭东,徐天奇,等. 基于改进非线性滑模控制的轮式机器人轨迹跟踪[J]. 组合机床与自动化加工技术,2024(9):67-70,75.
[22]靳俊霞,王彩玲,于峰. 轮式移动工业机器人非奇异终端滑模轨迹跟踪控制[J]. 现代制造工程,2024(12):61-68.
[23]肖扬帆,李彦明,刘子翔,等. 四轮电驱动水田除草机器人运动建模与路径跟踪控制[J]. 农机化研究,2026,48(2):165-172,182.
[24]刘国平,徐彪,蔡建兵. 基于非时间参考系的贝塞尔轨迹跟踪算法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(9):72-75.
[25]易文泉,赵超俊,刘莹. 移动机器人自主定位与导航技术研究[J]. 中国工程机械学报,2020,18(5):400-405.