

基于机器视觉的智能小车转向系统滑模控制

王启明, 万璇, 张振东, 孙涛, 吴光辉

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对智能小车转向时跟踪精度差、响应时间较慢的问题, 提出了一种基于机器视觉的智能小车转向系统的滑模控制方法。首先, 以感知路面信息的智能小车为研究对象, 对其转向系统进行了原理分析及数学建模。通过对永磁直流电机工作过程的分析, 建立了电枢电压平衡方程和转矩平衡方程, 得出了相应的传递函数, 并采用实验方法对传递函数参数进行了辨识。其次, 针对上述被控对象, 设计了滑模控制器, 并进行了稳定性证明。利用 Matlab/Simulink 仿真结果验证了滑模控制算法的有效性。理论结果和实验验证相结合表明, 相较于 PID(proportional integral differential)控制, 滑模控制具有较好的跟踪精度和响应速度。在频率为 20 Hz 时, 跟踪精度提高了 89.3%。此外, 滑模控制能够克服系统的不确定性, 尤其是对于非线性系统, 显示出良好的控制效果。

关键词: 转向差速控制; 智能小车; 滑模控制; 机器视觉

中图分类号: U 461.6

文献标志码: A

Sliding mode control of intelligent car steering based on machine vision

WANG Qiming, WAN Xuan, ZHANG Zhendong, SUN Tao, WU Guanghui

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To solve the problem of poor tracking accuracy and slow response of intelligent car steering systems, a sliding mode control method of intelligent car steering system based on machine vision was proposed. Firstly, the intelligent car, which senses road information, was the research object. The principal analysis and mathematical modeling of the steering system were carried out. By analyzing the working process of the permanent-magnet direct current motor, the armature voltage balance equation and torque balance equation were listed, the transfer functions were obtained, and the transmission parameters were identified by experimental methods. Secondly, the sliding mode controller was designed for the above-mentioned controlled object, and its stability was proven. Matlab/Simulink simulation results verify the effectiveness of the sliding mode control algorithm. Finally, the combination of theoretical results and experimental verification shows that compared with PID(proportional integral differential) control, sliding mode control has better tracking accuracy and

收稿日期: 2022-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175239); 上海市科委青年英才扬帆计划(19YF1434600); 上海市高校本科重点教改项目(AA4306001-2020-003)

第一作者: 王启明(1991-), 女, 副教授。研究方向: 新能源汽车动力与控制。E-mail: wang.qiming2008@163.com

response speed at 20 Hz, the tracking accuracy is increased by 89.3%, and the system uncertainty can be overcome, especially for nonlinear systems.

Keywords: *steering differential control; intelligent car; sliding mode control; machine vision*

随着我国逐步迈入工业 4.0 时代，汽车行业也面临着新四化的发展趋势，即“智能化、网联化、电动化、共享化”，这为工业自动化及智能车辆交通安全等领域提出了更高要求。智能机器人，尤其是以智能车辆^[1]为代表的智能机器人，在市场上受到越来越多的青睐。与此同时，计算机芯片、人工智能和 5G 通信技术的发展使得智能车辆技术得以实现。智能小车集成了环境感知^[2]、路径规划^[3]、网联通信、决策控制^[4]等功能，被广泛应用于后疫情时代的无人派送物流车^[5]等场景。智能小车实验平台^[6-8]通常由摄像头模块、单片机模块、电机驱动模块、电源转换模块以及速度采集模块等组件构成。本文以配置 MT9V034 摄像头感知路面信息的智能小车为研究对象，开展了包括路面图像处理及识别、后轮差速转向、电机滑模控制及仿真实验验证等一系列研究。

戴家兴等^[4]在小车上增设了机器视觉识别系统，搭载了基于深度学习的机器视觉图像检测技术，实现了对小车前方道路状况的实时检测^[9]。吕彦卿^[10]根据智能车辆的位置状态进行了实时判断，并进行了决策控制规划等工作。王丽梅等^[11]针对永磁同步平面电动机的高性能定位伺服控制问题，提出了一种基于干扰观测器的滑模控制方法，证明了滑模控制器能够消除干扰观测误差，提高了系统的鲁棒性和抗干扰能力。郭小定等^[12]从改进滑模结构及趋近律的角度提出了一种新型的指数趋近律，用于改善永磁同步电机的动态品质。李永刚等^[13]研究了基于扩展观测器的一类 n 阶未知不确定系统的滑模控制问题，提出了基于扩展观测器的方法。为了消除抖振引入边界层，并通过李雅普诺夫 (Lyapunov) 函数证明了系统的稳定性。沈伟等^[14]针对基于网络的液压伺服系统网络延时和伺服马达建模不确定性问题，提出了一类鲁棒积分自适应控制器，以提高控制方法的高精度跟踪性能。

综上所述，本文提出了一种基于机器视觉的智能小车转向系统滑模控制方法。首先，利用机器视觉感知当前道路路面及交通等状况信息，根

据图像中特征点的坐标，计算出车道线偏转角以及小车距离左右车道线的距离等关键参数；其次，进行了智能小车转向系统的原理分析和数学建模，通过分析永磁直流电机的工作过程，得出了电枢电压平衡方程和转矩平衡方程，进而获得了传递函数，并采用实验方法辨识传递函数的参数；最后，针对上述被控对象设计了滑模控制器，并进行了 Lyapunov 稳定性证明。通过 Matlab/Simulink 的仿真结果验证了该控制方法具有较好的跟踪精度和响应速度，在克服系统不确定性方面表现出色，特别适用于非线性系统的控制。

1 智能小车转向系统建模

1.1 智能小车转向原理

智能小车的动力来源于后轮的两个永磁直流电机，前轮仅用于转向。为实现小车的转向，伺服舵机输出扭矩控制前轮偏转角度，并辅以后轮的差速控制。差速的大小则由车道线偏转的角度来确定，该角度可以通过机器视觉方法得到。

异步电机转速 n 与同步转速 n_0 之差与同步转速 n_0 之比 $S = (n_0 - n)/n_0$ ，称为转差率，又称为“滑差率”。当 S 不大时，电机的输出功率与转矩成正比。

在分析智能小车的速度时，忽略两个前轮打转角度一致和轮胎宽度尺寸的影响，只考虑轮距和轴距等主要因素进行计算。图 1 为智能小车简化模型。在该模型中： L 为小车轮距； H 为轴距； α 为伺服舵机输出扭矩控制前轮打转角度，即基于机器视觉识别图像中车道线偏转角度。假设后轴

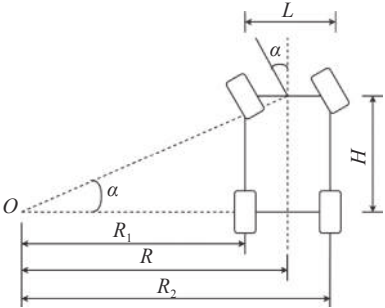


图 1 智能小车简化模型
Fig. 1 Simplified model of smart car

的延长线与垂直于两个前轮的线相交于点 O , 点 O 被称为转向中心。智能小车的质心位于中心线与后轴交点处。 O 点到智能小车转向内侧后轮、中心线及转向外侧后轮的距离分别为 R_1 , R , R_2 。

在小车转向过程中, 由于两个后轮心到转向中心 O 的距离不同, 可以得到以下关系式

$$\frac{v_1}{R_1} = \frac{v_2}{R_2} = \frac{v}{R} \quad (1)$$

式中, v_1 和 v_2 分别为智能小车转向内侧后轮和外侧后轮的速度。

结合图1和式(1)的几何关系, 可得

$$R_1 = \frac{H}{\tan \alpha} - \frac{L}{2} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{H}{\tan \alpha} + \frac{L}{2} \quad (3)$$

结合式(1)~(3), 化简可得

$$k = \frac{v_2}{v_1} = \frac{2H + L \tan \alpha}{2H - L \tan \alpha} \quad (4)$$

式中, k 为 v_1 , v_2 的倍数关系。

1.2 电机传递函数模型搭建

驱动电机传递函数的精确建模是电机转速能够精准控制的前提, 同时辅以两个后轮差速控制来实现转向。

后轮驱动电机型号为 RN380。通过分析永磁直流同步电机的工作过程, 可以分别得到电枢电压平衡方程和转矩平衡方程

$$\begin{cases} u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \varepsilon \\ \varepsilon = C_e \Phi n \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} J \frac{dn}{dt} = M - M_L \\ M = C_M \Phi i_a \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_a , i_a , R_a , L_a 分别为电枢电压、电流、电阻、电感; ε 为电枢反电势; Φ 为每极磁通量; C_e 为直流电机电势常数; C_M 为直流电机转矩常数。

对式(5)进行拉普拉斯变换可得电枢电流 I_a 与电枢电压 u_a 之间的传递函数为

$$\frac{I_a}{(u_a - \varepsilon)} = \frac{1/R_a}{1 + sL_a/R_a} = \frac{K_a}{1 + sT_a} \quad (7)$$

式中: $K_a = 1/R_a$ 为电枢回路放大倍数; $T_a = L_a/R_a$ 为电枢回路电磁时间常数。

对式(6)进行拉普拉斯变换可得 n 与动态转矩 $(M - M_L)$ 之间的传递函数

$$\frac{n}{M - M_L} = \frac{1}{sJ} \quad (8)$$

依据式(7)和(8)可以确定以 u_a 为输入、 n 为输

出的电机传递函数方框图, 具体结构如图2所示。

化简图2, 可得 n 与 u_a 的传递函数为

$$\frac{n(s)}{u_a(s)} = \frac{1/C_e \Phi}{T_m T_a s^2 + T_m s + 1} \quad (9)$$

式中: $T_m = \frac{J R_a}{C_M C_e \Phi^2}$ 为机电时间常数。

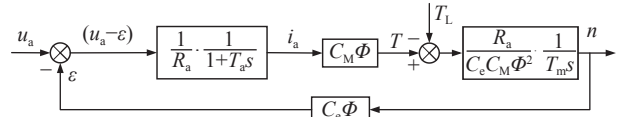


图2 n 与 u_a 之间的传递函数框图

Fig.2 Block diagram of transfer function between n and u_a

在实际过程中, 由于电枢回路的电磁时间常数 T_a 较小, 且与 T_m 相差较大, 因此可以忽略传函二阶项, 系统被简化为一阶系统

$$n(t) = [\Phi/T_m C_e] (1 - e^{-t/T_m}) = K(1 - e^{-t/T_m}) \quad (10)$$

选用阶跃电压法确定一阶系统参数 K 和 T_m 。系统的激励采用了阶跃电压, 运用光电增量式编码器测量小车后轮转速的响应, 具体数据如图3所示。

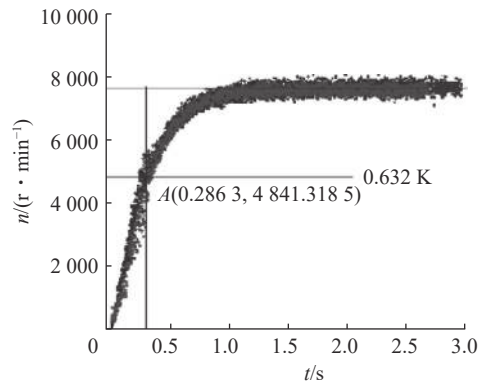


图3 n 与 t 的关系

Fig.3 Relationship between n and t

进而辨识转速 n 与时间 t 的关系为

$$n(t) = 7\,626.85(1 - e^{-3.6t}) \quad (11)$$

对式(11)进行拉氏变换, 可得系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{n(s)}{u_a(s)} = \frac{3.6}{s + 3.6} \quad (12)$$

2 滑模控制器设计

基于被控对象电机传递函数模型, 设计了滑模控制器, 用于实现两个后轮的差速控制, 以达到稳定转向的目的。

2.1 控制器设计

对式(12)进行拉氏逆变换,得到电机的动态模型,也称为状态空间表达式,并利用此模型求解滑模控制量 u 。

$$\dot{x} = -3.6x + 3.6u$$

(13)

设 x_d 为跟踪目标, e 为偏差值, 则有

$$\begin{cases} e = x_d - x \\ \dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x} \end{cases}$$

(14)

设滑模函数

$$\begin{cases} s = Ce \\ \dot{s} = C\dot{e} \end{cases}$$

(15)

选用指数趋近律设计滑模控制器, 则有

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \varepsilon > 0, k > 0$$

(16)

结合式(13)和式(16)可知

$$C(\dot{x}_d - \dot{x}) = C(\dot{x}_d + 3.6x - 3.6u) = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks$$

(17)

可得控制器 u 的表达式如下, 且 u 可使 e 趋近于0。

$$u = \frac{1}{3.6C}(C\dot{x}_d + 3.6Cx + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks) = \frac{1}{3.6}\dot{x} + x + \frac{\varepsilon \operatorname{sgn}(s)}{3.6C} + \frac{1}{3.6C}ks$$

(18)

2.2 稳定性证明

定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2}s^2$$

(19)

则有

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(-\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks)$$

(20)

根据 Lyapunov 稳定性可知, 当 $\dot{V} \leq 0$ 时, 可以确保控制器的稳定性。因此, 存在以下3种情况:

当 $s > 0$ 时, $\dot{V} = -s\varepsilon - ks^2 < 0$

当 $s < 0$ 时, $\dot{V} = s\varepsilon - ks^2 < 0$

当 $s = 0$ 时, $\dot{V} = 0$

3 实验验证

3.1 实验平台硬件选型及软件流程设计

如图4所示, 智能小车实验平台属于一种轮式机器人, 能够自主完成识别及控制任务。该平台主要由摄像头、单片机、电机驱动、电源转换和速度采集等模块组成, 硬件组成和选型如表1所示。对电机驱动部分的主要电路设计, 选用了IR2104来控制MOS管, 以实现电机转速和方向的控制。同时, 根据单片机类型选用了AURIX™ Development Studio作为编译器, 并设计了相应的软件流程图(图5)。

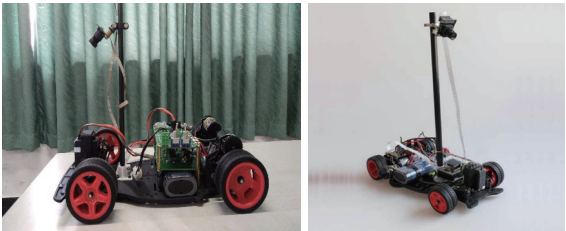


图4 智能小车实验平台

Fig. 4 Experiment platform of intelligent car

表1 实验平台硬件选型

Tab.1 Hardware selection of experimental platform

小车部件	选型
小车底盘	C1车模
动力模块	RN380直流电机
速度采集模块	1024线光电增量式编码器
转向系模块	S3010伺服舵机
环境感知传感器	MT9V034数字摄像头
控制系统核心模块	TC212

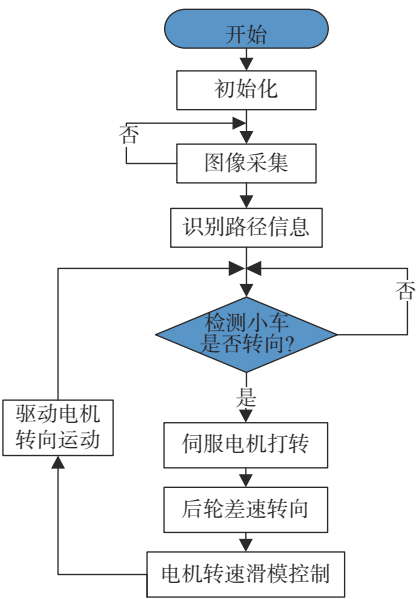


图5 软件设计流程图

Fig. 5 Flow chart of software design

3.2 基于机器视觉的图像处理及识别

如图6所示, MT9V034 数字摄像头能够实时采集路面的原始图像, 并在自动曝光后输出灰度图像。在图6中, 车道线呈现为白色, 边界为黑色。针对这种类型的图像, 所提出的图像处理识别算法主要分为3个部分: 区域生长算法、Canny边缘检测算法和车道偏转角识别算法。

3.2.1 区域生长算法

通常, 摄像头采集的源图像中存在许多由于

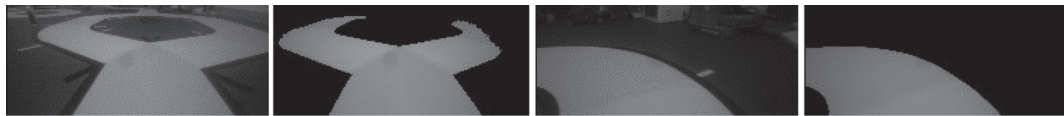


图 6 区域生长算法效果

Fig.6 Effect of region growing algorithm

道路边缘检测导致的障碍物或环境噪声。采用多种子点区域生长算法, 自主选择合适的种子点, 使其在遍历图像时找到的第 1 个非零像素点成为边界点。在该边界点的八邻域内再次进行遍历, 经此处理可以显著减少环境噪声和道路障碍物对道路边界检测的影响。

3.2.2 Canny 边缘检测算法

a. 高斯滤波处理是对整幅图像进行加权平均操作的过程。具体操作为使用 1 个大小为 $(2N+1)$ 的模板 (也称为卷积核或掩模), 依次扫描图像中的每个像素。通过模板确定邻域内像素的加权平均灰度值, 以替代模板中心像素点的灰度值。滤波后图像上每个像素的灰度值由其本身和邻域内其他像素的共同影响决定。由于高斯函数是单值函数, 因此每个邻域像素点的权值随着该点与中心点的距离单调递减。高斯滤波在平滑图像的同时可以消除和降低图像噪声的影响。然而, 由于边缘是一种局部特征, 平滑运算可能导致图像失真。

二维高斯函数式(21)中: μ 为服从正态分布的随机变量的均值, 在实际图像处理中通常取为 0; σ 为标准差, 定义了正态分布数据的离散程度, 数值越大表示数据越分散。

$$G(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (21)$$

采用尺寸为 5×5 的高斯卷积核。图 7 和图 8 对比了 σ 取 1 和 2 时的处理结果。 σ 值越大, 图像平滑效果越显著, 但也导致图像模糊程度增加, 并且丢失了更多细节。因此, 可以得知 σ 取 1 时效果更佳。

b. 局部非极大值抑制处理。求车道偏转角的计算需要提取道路边缘轮廓, 选取了 Sobel 算子。Sobel 算子执行速度快, 对噪声有平滑作用, 同时能够提供较为精确的边缘方向信息。Sobel 算子梯度方向垂直于边缘方向信息, 因此在梯度方向上进行局部非极大值抑制, 有助于细化边缘。具体操作如下: 首先, 对待边缘检测图像 a 在水平 x 和垂直 y 两个方向进行求导, 得到图像的 x 和 y 方向梯度 G_x (式 22)、 G_y (式 23); 然后, 获得 Sobel 梯



图 7 高斯滤波 $\sigma=1$

Fig. 7 Gaussian filtering $\sigma=1$



图 8 高斯滤波 $\sigma=2$

Fig. 8 Gaussian filtering $\sigma=2$

度图像 G (式 24); 接下来, 在梯度方向上比较当前像素点的梯度值与其前后相邻两点的梯度大小, 如果大于这两点的梯度值, 则保留该点, 否则将其值置为 0。

$$G_x=\begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}a \quad (22)$$

$$G_y=\begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}a \quad (23)$$

$$G=\sqrt{G_x^2+G_y^2} \quad (24)$$

c. 双阈值处理。由于 Sobel 边缘定位精度不高, 因此需要通过双阈值处理进一步消除非边缘区域的噪点, 以提升边缘细化效果。具体操作如下: 分别选取 1 个低阈值 A 和 1 个高阈值 B 。一般情况下, 选取的高阈值 B 约为图像整体灰度值分布的 70%, 并且设定高阈值 B 为低阈值 A 的 1.5~2 倍大小; 对于灰度值小于低阈值 A 的像素, 将其值置为 0; 对于灰度值大于高阈值 B 的像素, 将其值置为 255。

d. 连接处理。对于灰度值介于低阈值 A 和高阈值 B 之间的像素, 考虑其周围 8 个相邻像素是否存在灰度值为 255 的情况。若无, 则表示为孤立的局部极大值点, 置 0; 若有, 则表示其与边缘有“接壤”, 置 255。

3.2.3 车道偏转角识别

扫描并提取图像中相应特征点的坐标，接着计算出车道线偏转角以及当前小车与左右车道线轮廓的距离。如图 9 所示，以随机一帧图像为

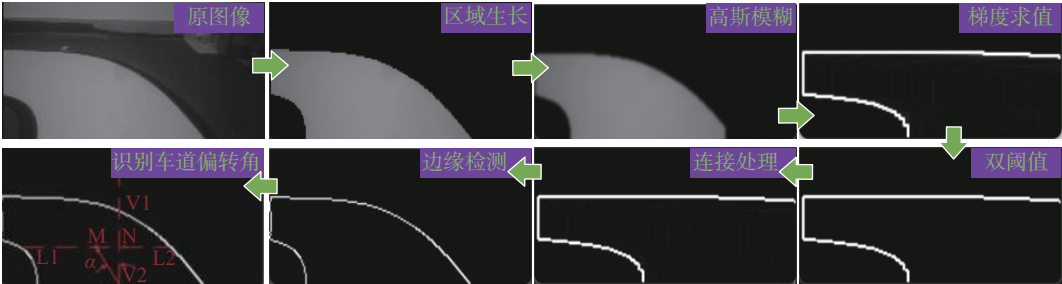


图 9 路面图像处理及识别过程图

Fig.9 Process diagram of road image processing and recognition

表 2 随机 3 幅图处理前后对比

Tab.2 Comparison of three random images before and after processing

序号	原始图像	区域生长算法	边缘检测
样本1			
样本2			
样本3			

表 3 随机 3 幅图像在 Matlab/Simulink 命令窗口的输出信息

Tab.3 Output information of three random images in Matlab/Simulink command window

编号	偏转度/(°)	与左线距离/mm	与右线距离/mm
样本1	右偏1.43	55	54
样本2	左偏34.02	58	50
样本3	左偏18.01	63	46

智能小车沿着一定的连续线路行驶，利用搭载的 MT9V034 摄像头对道路图像进行逐帧采样，分析此路面数据集，计算出车道偏转角，并与实测值进行对比，如图 10 所示。图 11 给出了实测值与计算值的误差，实测值与计算值基本吻合，出现较大偏差的情况主要是由于车辆转向达到 90°时所导致的。

3.3 滑模控制性能验证实验

根据第 1.2 和 2.1 小节计算得到的被控对象传递函数和控制器模型，运用 Matlab/Simulink 进行

例，详细描述了路面图像处理及偏转角识别的过程。

3.2.4 图像识别实验验证

在表 2 和表 3 中，随机选取了智能小车行进过程中的 3 帧不同图像进行图像信息的识别验证。

建模，如图 12 所示。对系统在阶跃输入、0~20 Hz 线性扫频等不同输入信号下的跟踪性能和控制器能量进行了比较分析。

滑模控制器 u 中的参数 c 影响收敛速度， k 影响跟踪精度，但是其值过大会使系统产生较大的振荡。考虑系统的稳态误差 $e(t)$ 和控制能量 $u(t)$ 等因素的影响，确定 $c = 8$ 和 $k = 800$ 。图 13 和图 14 分别为系

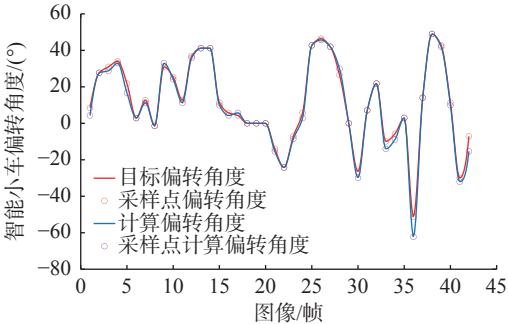


图 10 车道偏转角度实测值与计算值对比

Fig. 10 Comparison between measured and calculated values of lane deflection angle

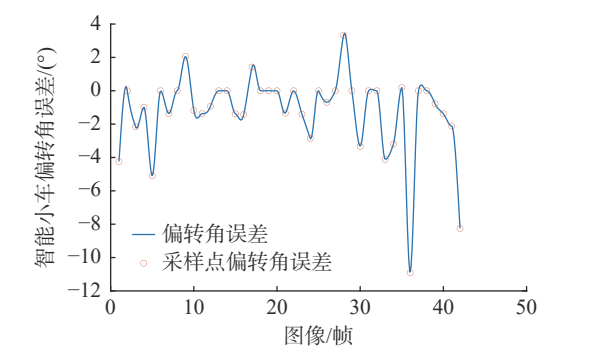


图 11 车道偏转角度误差

Fig. 11 Error of lane deflection angle

统在阶跃信号下和 0~20 Hz 线性扫频信号下, PID (proportional integral differential) 控制和滑模控制的跟踪精度和控制能量的对比结果。可以看出, 滑模控制整体精度要高于 PID 控制, 误差等级优于 PID 控制 1~2 个数量级, 且误差减小的速度明显。图 13 显示, 在初始控制阶段, 滑模控制的控制能量(控制律的输出值)瞬间高于 PID 控制, 但很快在不到 0.05 s 的时间内降低到明显低于 PID 控

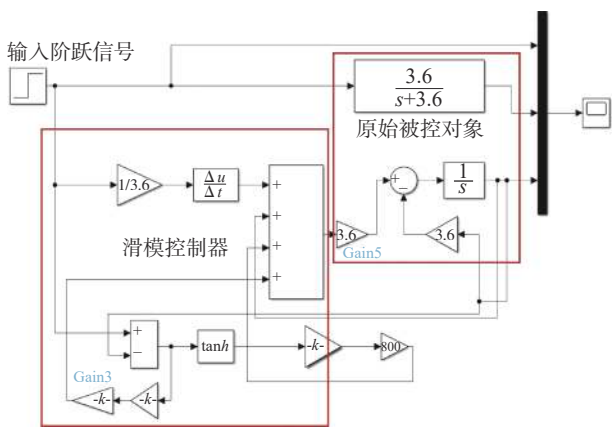


图 12 Matlab/Simulink 仿真各模块搭建

Fig. 12 Building of Matlab/Simulink simulation modules

制的水平。图 14 显示: 在 0~4 Hz 低频段内, 两种控制器的控制能量相差不大; 但随着系统频率的增大, PID 控制的精度明显下降, 控制能量仍保持不变, 而为了获得更高的控制精度, 滑模控制则付出了更大的控制能量。这一结果呼应了滑模控制器参数选择的原则, 即控制能量越大, 精度越高, 稳态误差越小。

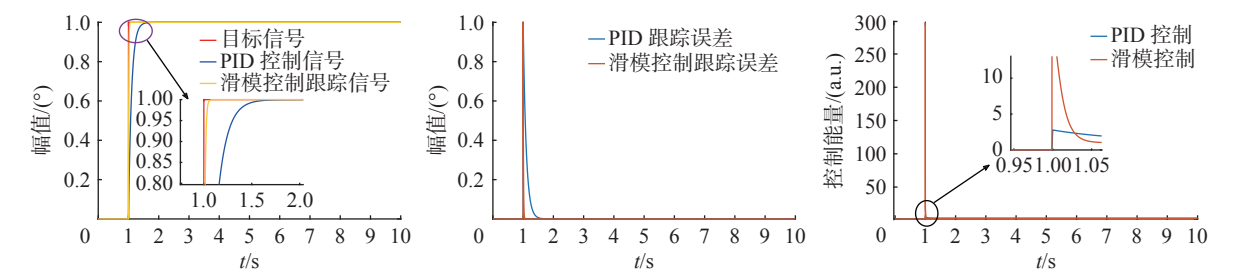


图 13 阶跃信号下 PID 控制和滑模控制跟踪性能和控制能量对比

Fig.13 Comparison of tracking performance and control energy between PID control and sliding mode control under step signal

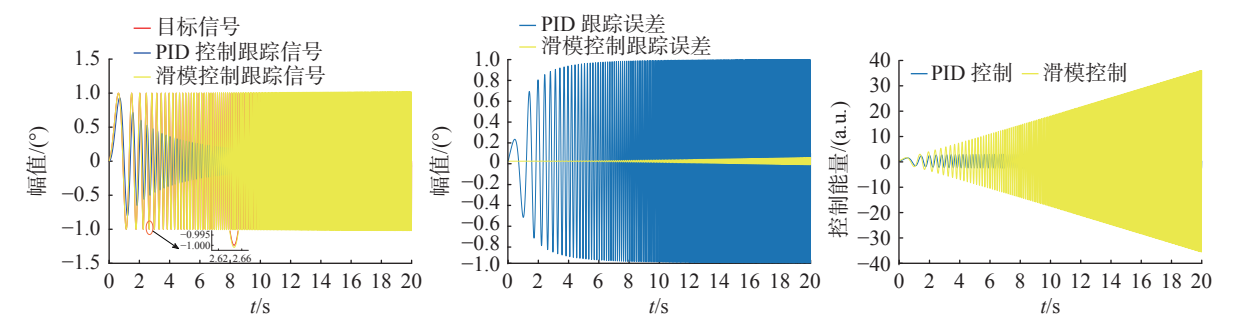


图 14 0~20 Hz 扫频信号下 PID 控制和滑模控制跟踪性能和控制能量对比

Fig.14 Comparison of tracking performance and control energy between PID control and sliding mode control under 0~20 Hz sweep signal

通过 Simulink 搭建滑模控制器, 并进行仿真验证其控制前后的跟踪效果, 滑模控制器模块可直接转化为 C 语言对智能小车进行实际控制^[15-16]。

4 结 论

以感知路面信息的智能小车为研究对象, 进

行了转向系统的原理分析及数学建模。在分析了永磁直流同步电机的工作过程后，推导出电枢电压平衡方程和转矩平衡方程，得到了传递函数，并通过实验方法识别了传递函数参数。针对这一被控对象，设计了滑模控制器，并对其稳定性进行了验证。通过 Matlab/Simulink 仿真结果验证了滑模控制算法的有效性。结合理论结果和实验验证，相较于 PID 控制，滑模控制具有较好的跟踪精度及响应速度，能够克服系统的不确定性，特别是对于非线性系统具有良好的控制效果。该机器视觉感知与滑模控制方法在智能车辆的决策控制领域具有重要的理论意义和实际应用价值。

参考文献:

[1] 董峰. 工业机器视觉产业发展白皮书在世界计算大会发布 [J]. 机器人产业, 2021(5): 32–37.

[2] DEWANGAN D K, SAHU S P. Towards the design of vision-based intelligent vehicle system: methodologies and challenges[J]. *Evolutionary Intelligence*, 2023, 16(3): 759–800.

[3] 薛俊韬, 徐少朋, 王烨. 基于计算机视觉的智能小车路径规划 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(7): 236–241,247.

[4] 戴家兴, 谈杰, 褚清清, 等. 基于机器视觉的智能小车自动辅助驾驶系统 [J]. 工业控制计算机, 2021, 34(10): 122–123.

[5] 曾志恒, 刘怡沛, 江龙韬, 等. 一种基于机器视觉的自主循迹智能车 [P]. 中国, 113885529A. 2022-01-04.

[6] 高庆华, 王洁, 崔承毅, 等. 适于单片机实验教学的智能

小车模块化系统设计 [J]. 实验室科学, 2018, 21(1): 10–12,17.

[7] 施芸, 杨晓艳, 雷刚, 等. 基于 STC15 单片机的模块化智能小车实训平台开发 [J]. 电子技术与软件工程, 2021(4): 85–86.

[8] 于波, 张强, 李建成, 等. 基于单片机的智能小车系统 [J]. 化工自动化及仪表, 2022, 49(3): 345–350,361.

[9] WANG Q M, XU J M, SUN T, et al. Research on road adhesion condition identification based on an improved ALENet model[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, (2021): 1-4.

[10] 吕彦卿. 室内智能小车的轨迹跟踪控制研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

[11] 王丽梅, 郑浩, 贾启. 永磁同步平面电动机的滑模控制器设计 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(7): 101–106.

[12] 郭小定, 柏达, 周少武, 等. 一种新型趋近律的永磁同步电机滑模控制 [J]. 控制工程, 2018, 25(10): 1865–1870.

[13] 李永刚, 李星野, 史先鹏. 基于扩张状态观测器的一类未知非线性不确定系统滑模控制 [J]. 上海理工大学学报, 2010, 32(2): 110–114.

[14] 沈伟, 刘帅, 武毅. 基于网络的液压马达伺服位置系统自适应鲁棒积分控制 [J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(4): 325–331.

[15] 王启明, 毛作龙, 张栋林, 等. 基于轨迹预测与模型预测换道路径跟踪控制 [J]. *控制工程*, 2022: 1–9.

[16] XU B, ZHANG L, JI W. Improved non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance observer for PMSM drives[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(4): 2753–2762.

(编辑: 董 伟)

[上接第 625 页]

[15] CEHLIN M, MOSHFEGH B. Numerical modeling of a complex diffuser in a room with displacement ventilation[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(10): 2240–2252.

[16] 谢海英, 王晓晓, 杨怡, 等. 紊流模型预测街道峡谷流场能力的定量指标评价 [J]. *能源研究与信息*, 2021, 37(2): 71–77.

[17] TOMINAGA Y. Flow around a high-rise building using steady and unsteady RANS CFD: effect of large-scale fluctuations on the velocity statistics[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 142: 93–103.

[18] 姜国义, 冉无忌, 胡婷荏. 考虑浮升力影响的建筑群内线源污染扩散的大涡模拟 [J]. *环境工程*, 2018, 36(6): 122–127.

[19] SALIM S M, BUCCOLIERI R, CHAN A, et al. Numerical

simulation of atmospheric pollutant dispersion in an urban street canyon: comparison between RANS and LES[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(2/3): 103–113.

[20] 王昕, 宋冰岩, 张玉洁, 等. 轴对称面源羽流运动特性的 PIV 实验研究 [J]. *制冷学报*, 2021, 42(2): 145–150.

[21] 曾水平, 郭宇奇. 小波分析层数对信号特征提取的影响 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(S8): 9–12.

[22] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 195–251.

[23] COURANT R, FRIEDRICHS K, LEWY H. On the partial difference equations of mathematical physics[J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1967, 11(2): 215–234.

(编辑: 丁红艺)