

智能车辆动力学模型辨识与自主控制

王 萌, 史忠科

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 针对试凑法优化控制参数困难、控制精度不高、控制律环境适应性差的问题, 对智能车辆的动力学模型和自主控制进行了研究. 在地面车辆实验中, 通过给小车施加伪随机序列舵控信号, 使得小车的行驶状态被充分激励; 在获得充分激励的小车速度、位置、姿态、横摆角速率状态后, 利用系统辨识方法建立了智能小车动力学模型; 在动力学模型的基础上, 设计了小车自动驾驶控制律. 跑车试验表明所提模型的预测结果与测量结果具有较好的一致性; 控制仿真结果表明, 设计的控制律能够保证小车完成预定轨迹自动驾驶.

关键词: 智能车辆; 模型辨识; 自主控制; 伪随机序列

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)07-0142-05

Identification of Dynamics Model and Self-control for Intelligent Vehicle

WANG Meng, SHI Zhong-ke

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: As to the problems of trial-and-error method like the difficulty of control parameters optimization, low control precision and poor adaptability of control law, this paper researches the dynamics model and self-control for Intelligent Vehicle. In the vehicle experiments, the running state of the vehicle is sufficiently excited by applying pseudo-random sequences signals to the car steering control. After obtaining this vehicle's speed, position, attitude and yaw rate, dynamics model of the Intelligent Vehicle is established by use of system identification. Based on the dynamics model, designing autonomous driving control law of Intelligent Vehicle. The ground experiments suggest good consistency between predicted results of proposed model and actual measured results. The control simulations show that designed control law ensure the completion of vehicle autonomous driving under given track.

Key words: intelligent vehicle; identification of dynamics model; self-control; pseudo-random sequence

1 引言

近年来, 国内外对无人驾驶汽车的自主控制做了大量研究, 主要可以分为以下几个方面: Rong-Jong Wai^[1]提出了一种无模型的神经网络控制器, 提升了系统的自适应能力, 但是复杂的学习规则增加了系统潜在的稳定性下降的问题. ZhuangDe-Jun^[2]等人提出的车辆方向控制分数阶 PD_μ 控制器控制算法, 基于预瞄-跟随理论, 实现了在线调整方法的分阶数 PD_μ 控制器设计, 改进了驾驶员-车辆系统的控制性能. Rerngwut Choomuang^[3-5]等人使

用 kalman 滤波技术将磁强计、轮速计、位置传感器和视觉传感器数据进行融合, 设计了模糊控制算法, 实现了车辆运行过程的避障功能. 现有的车辆自主控制研究中基于无模型控制方法设计的控制系统在复杂路况环境下存在控制系统参数优化困难、控制精度不高、控制率环境适应性差的问题, 为了提升系统控制效果本文主要研究基于模型的车辆自动驾驶控制系统设计.

本文通过地面车辆实验, 利用系统辨识的方法建立了智能小车动力学模型, 按照模型设计控制律进行控制仿真完成预定轨迹自主控制实验.

收稿日期: 2013-10-28; **修回日期:** 2013-12-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61134004)

2 智能小车动力学模型建立

车辆动力学包括横侧向动力学和纵向动力学. 本文主要研究车辆横侧向动力学模型, 将方向盘转角作为系统输入, 在建立模型之前需要对车辆运动过程提出以下假设: (1) 车辆行驶在平坦路面, 忽略侧倾运动; (2) 汽车以恒定的速度前进, 空气阻力被忽略; (3) 忽略转向系统, 将输入—前轮转角直接施加于车轮; (4) 车辆在行驶过程中不考虑轮胎左右载荷的转移.

对图1中各参数解释如下:

m —整车质量; $\psi, \dot{\psi}$ —横摆角和横摆角速度; δ —前轮转角; u, v —车辆纵向速度和侧向速度; l_f, l_r —前、后轴到质心间的距离; I_z —车身绕 z 轴的转动惯量; C_{af}, C_{ar} —前、后轮的侧偏刚度.

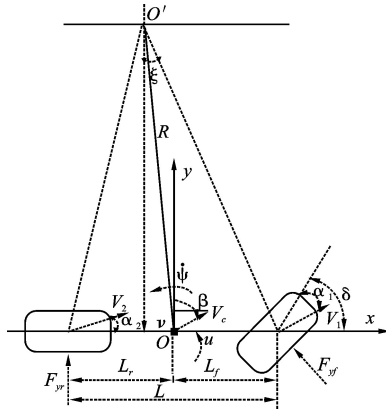


图1 二自由度车辆动力学模型

结合车辆二自由度转向动力学模型可以得到状态空间形式的车辆横侧向动力学方程如式(1)所示^[6-8].

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(C_{af} + C_{ar})}{mu}, -u - \frac{(l_f C_{af} - l_r C_{ar})}{mu} \\ -\frac{(l_f C_{af} - l_r C_{ar})}{I_z u}, -\frac{(l_f^2 C_{af} + l_r^2 C_{ar})}{I_z u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_{af}}{m} \\ \frac{l_f C_{af}}{I_z} \end{bmatrix} \delta \quad (1)$$

3 智能小车动力学模型辨识

3.1 动力学模型辨识方法

车辆横侧向动力学模型写成状态空间方程的一般形式如式(2)、式(3)所示.

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \delta = A \begin{bmatrix} v \\ \psi \end{bmatrix} + B\delta \quad (2)$$

$$y = [C_1 \ C_2] \begin{bmatrix} v \\ \psi \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} v \\ \psi \end{bmatrix} \quad (3)$$

为了能够获取辨识上述二自由度车辆动力学模型需要的数据, 在数据采集过程中使用了两套采集系统分别获取不同的车辆信息, 系统1为一块基于TMS32F2407的电路板用于车辆方向控制和GPS数据采集; 系统2为已有的车辆导航控制系统, 该采集系统带有一个MIN900型IMU系统和一台GPS接收机. 两套采集系统同时固定在实验用小车上, 小车行驶过程中为了保证智能小车行驶状态充分被激励, 系统1给小车施加一组M序列形式的舵控制量, 系统2采集小车行驶过程中的角速率、航向角、速度等信息, 因为两个采集系统都带有GPS, 因此根据GPS输出的时间信息对两套系统采集的数据进行对准, 保证两组数据的同步性.

在进行传感器和采集系统加装时, MIN900型IMU安装于智能小车前端, X轴与小车纵轴平行, Y轴与小车横轴平行, Z轴垂直于水平面, 为了更好地接收GPS信号, GPS天线固定在小车中央支架, 支架距离地面40 cm.

3.2 IMU的标定与校准

在进行车辆动力学模型辨识过程中, 需要利用IMU采集车辆运行过程中的横摆角速率、偏航角和滚转角, 车辆运行过程中存在着的振动会引起IMU输出的角速率信息出现误差, 角速率信息的误差会直接导致模型辨识结果的不准确, 对于这种数据测量源头引入的误差项要在实验开始阶段尽可能的消除, 因此, 在使用IMU获取车辆运行状态时首先必须对IMU进行振动环境下的标定实验, 消除由于振动引起的传感器输出不准确. 本系统所使用的IMU将在实验室的高精度转台GDL3-XGD上进行了标定实验和校准测试.

3.2.1 振动环境下的IMU标定

将IMU系统固定在三轴转台上, 通过转台上的数据通信接口将IMU的输出数据与串口线连接, 保证IMU系统的输出数据能够实时传给上位机进行采集. 转台按照幅值为1°, 频率从0.5 Hz到3 Hz每0.5 Hz递增进行振动实验, 测量IMU输出值和转台设定值之间的角速率偏差, 对IMU的动态测量性能进行标定. 以1 Hz振动频率下的俯仰角速率标定过程为例, 标定曲线如图2和图3所示.

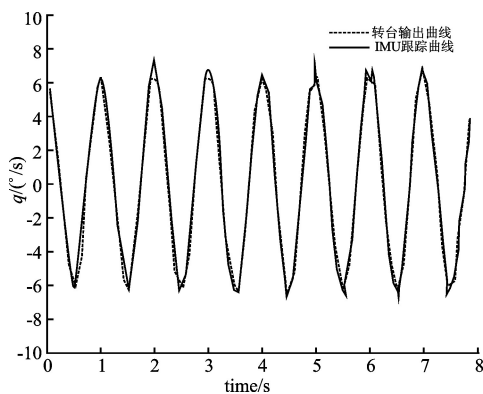


图2 1 Hz 俯仰角速率跟踪曲线

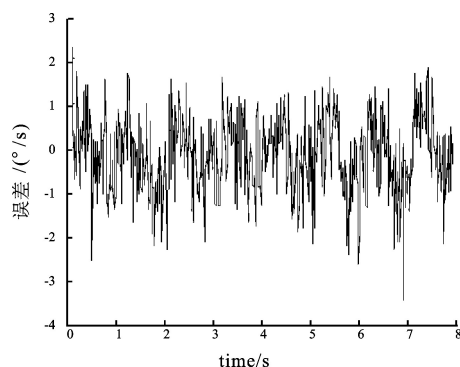


图3 1 Hz 俯仰角速率误差曲线

3.2.2 校准结果

根据上一步的标定过程,可以发现 IMU 输出存在一个与转台设定频率相同的振动误差,在使用 IMU 输出的角速率进行车辆动力学模型辨识时必须通过变换消除这部分偏差以给出相对准确的横摆角速率输出,校准过程以 1 Hz 俯仰角速率为例,校准变换方程如式(4)给出:

$$q' = 1.25q + 1.7 \quad (4)$$

式中, q' 为转台运行过程采集角速率, q 为 IMU 采集角速率。

1 Hz 俯仰角速率跟踪曲线见图 4,校准后误差曲线见图 5。

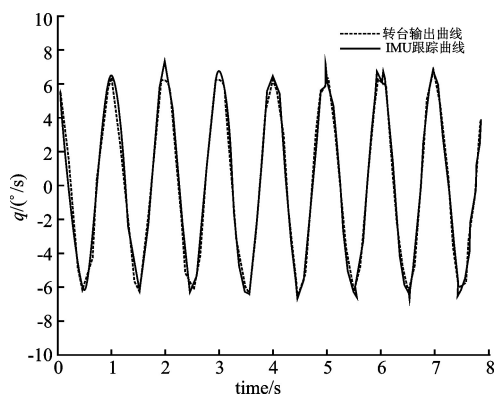


图4 1 Hz 俯仰角速率跟踪曲线

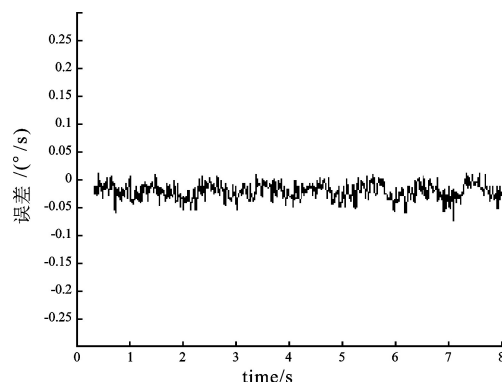


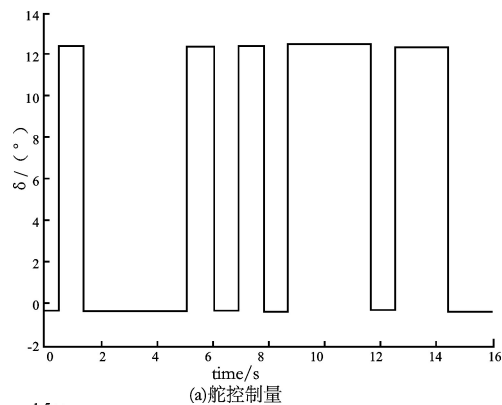
图5 校准后误差曲线

3.3 动力学模型辨识

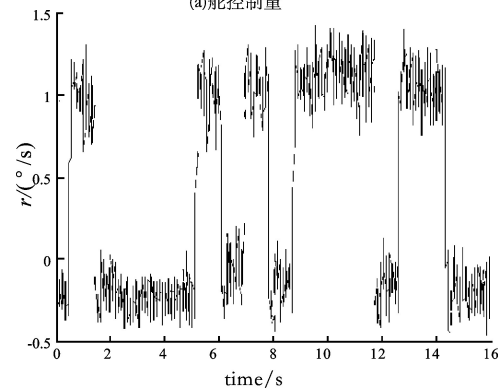
利用已校准过的 IMU 和 GPS,采集伪随机形式舵输入信号下的车辆运行状态数据,在数据处理的过程中选择一段速度相对平稳的数据区间用于模型辨识,所用数据如图 6 所示。

利用上述数据辨识模型时,选取 $[v, \dot{\psi}]$ 为系统状态变量, δ 为输入变量, $[v, \dot{\psi}]$ 也同时为输出变量,则求取的离散化模型的系数矩阵如式(5) 所示。

$$\begin{aligned} A_D &= \begin{bmatrix} 0.9777 & -0.1146 \\ 0.0022 & 0.7121 \end{bmatrix} \\ B_D &= \begin{bmatrix} 0.0034 \\ 0.0262 \end{bmatrix} \\ C_D &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D_D = 0 \end{aligned} \quad (5)$$



(a) 舵控制量



(b) 偏航角速度

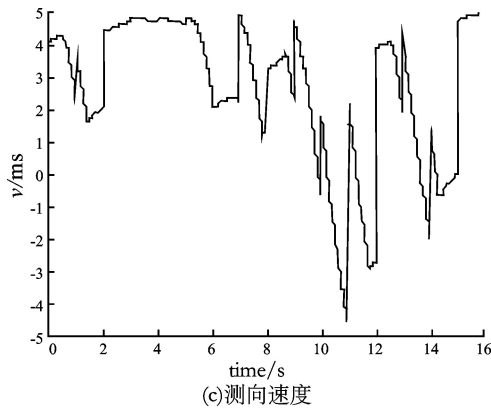


图6 车辆运行状态数据

将离散化模型改写为 v 和 $\dot{\phi}$ 分别对应的传递函数如式(6)所示.

$$\begin{aligned} H_{1(s)} &= \frac{0.4071s - 14.07}{s^2 + 27.6s + 46.41} \\ H_{2(s)} &= \frac{2.357s + 4.113}{s^2 + 27.6s + 46.41} \end{aligned} \quad (6)$$

4 控制器设计与仿真结果分析

4.1 导航控制算法设计

本文所设计的控制算法整体流程图如图7所示.

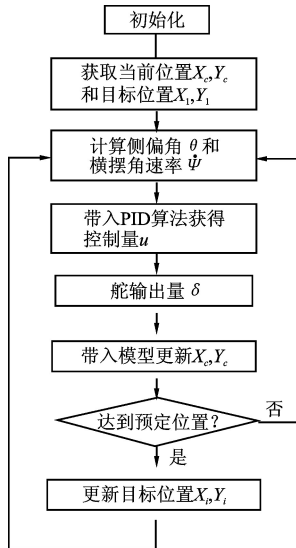


图7 控制算法流程图

在进行转向偏角控制时,使用了PID控制算法,PID控制算法结构简单,适合于智能小车自动驾驶过程的轨迹控制.PID算法的连续表达式为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

式中, $e(t)$ 对应小车运行过程中距离目标点的侧偏角;将式(7)离散化成差分方程,其中 T_s 为采样周期,可得表达式(8):

$$\begin{aligned} u(k) &= K_p \\ &\left\{ e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \right\} + u_0 \end{aligned} \quad (8)$$

在本文的控制仿真中,主要使用的是增量式PID算法,即

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + \\ &\quad K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned} \quad (9)$$

4.2 仿真结果分析

利用式(5)得到的动力学模型对车辆行驶过程进行控制仿真,仿真过程要求车辆沿着一个 $1000\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的长方形运动,其中仿真参数设定为: $T_s = 0.1$, $K_p = 0.5$, $K_i = 0.1$, $K_D = 0.5$;仿真结果如图8所示.

如图8(c)所示,仿真轨迹基本拟合了预设目标路径,之所以存在误差是由于:(1)在仿真过程中使用的二自由度车辆动力学模型存在简化;(2)智能小车运行过程中没有前轮转角采集装置只能以指令输出角度代替,存在误差.图8(a)给出了小车运行过程中当前运行位置与目标位置之间的偏离角度,图8(b)给出了小车在控制过程中的舵输出量.可以看出在小车运行在直行轨迹上时小车舵输出比较平稳,在转弯过程中角度控制能够在较小转弯半径实现转弯过程,满足了小车自动驾驶过程中稳定性和机动性的要求.

5 结束语

在智能小车模型辨识过程中,使用实验室现有的两块电路板一块给出一组基于M序列的舵偏角信号,另一块采集小车运行过程中的角度率、航向角、速度等信息,利用系统辨识方法,获得智能小车横侧向动力学模型,基于小车运行数据的模型辨识方法获得的车辆动力学模型更加真实地反映了小车实际运行过程中的动态性能.基于模型的控制方法相对试凑法提高了控制参数调整的效率,同时满足智能小车自动驾驶过程中的稳定性和机动性要求.

参考文献:

- [1] Wai R J. Tracking control based on neural network strategy for robot manipulator[J]. Neurocomputing, 2003, 51(4): 425-445.

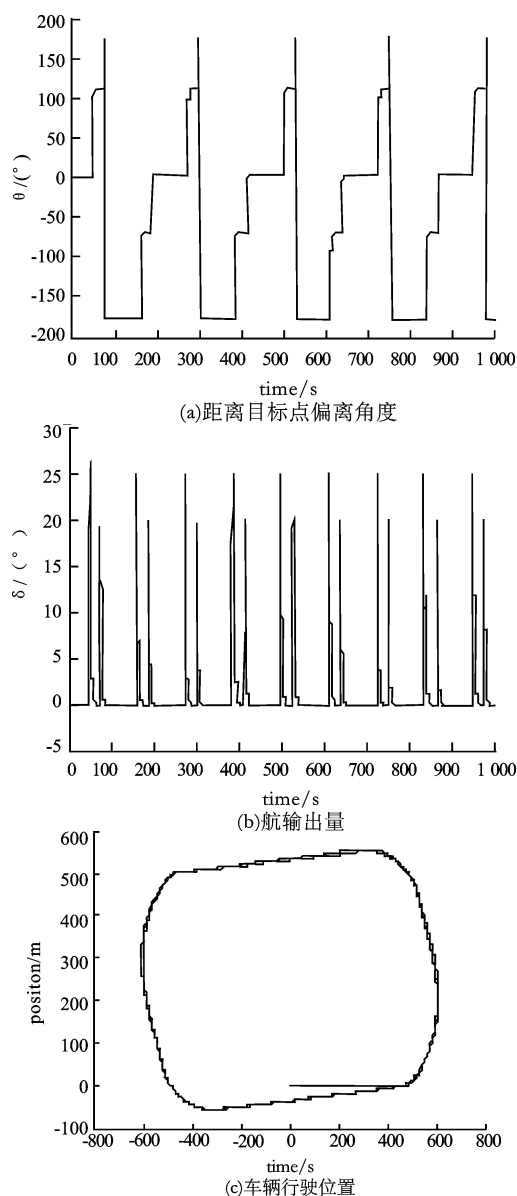


图8 控制仿真结果

tional control with a fractional order $pd\mu$ controller [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 9 (6): 679-685.

- [3] Choomuang R, Afzulpurkar N. Hybrid kalman filter/fuzzy logic based position control of autonomous mobile robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2005, 2 (3): 197 -208.
- [4] 宗长富,潘钊,胡丹,等. 基于扩展卡尔曼滤波的信息融合技术在车辆状态估计中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 272-277.
- [5] Guivant J, Nebot E, Baiker S. High accuracy navigation using laser range sensors in outdoor applications [C]//Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco:IEEE,2000.
- [6] Bevly D M, Ryu J, Gerdes J C. Integrating INS sensors with GPS measurements for continuous estimation of vehicle sideslip, Roll, and Tire Cornering Stiffness[J]. IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(4): 483-493.
- [7] Sotelo M A. Lateral control strategy for autonomous steering of Ackerman-like vehicles[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 1016(10):223-233.
- [8] Scheduling S, Dissanayake G. An experiment in autonomous navigation of an underground mining vehicle[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(1): 85-95.

作者简介:

王 萌 男,(1988-),硕士研究生.研究方向为嵌入式系统设计、飞行控制.

史忠科 男,(1956-),博士,教授,博士生导师.研究方向为飞行试验、飞行控制.

[2] Zhuang D J, Yu F, Lin Y. Evaluation of a vehicle direc-

(上接第 141 页)

[10] 胡洁萍,杨树林. JPA 与 SSH 架构整合方案及应用研究[J]. 北京印刷学院学报, 2012(6): 51-52.

作者简介:

冀汶莉 女,(1973-),硕士,副教授.研究方向为云计算、物联网技术.

李向军 男,(1988-),硕士.研究方向为面向服务的软件开发模式、SaaS 软件开发的模式.

陈夏玉 女,(1988-),硕士.研究方向为数字通信与个人通信.