文章编号:1671 - 5497(2005)02 - 0174 - 05

高速智能车辆状态观测器设计

马 雷[1],王荣本[2]

(1. 南京航空航天大学 机电学院,南京 210016; 2. 吉林大学 交通学院,长春 130022)

摘 要:基于 JLUIV- Ⅳ型智能车辆状态变量 v_y(车辆侧向速度)的不可测性,结合二自由度转向动力学模型和预瞄运动学模型建立了 Kalman 滤波模型,并运用 Kalman 滤波理论设计了状态观测器。仿真和实验结果表明:该状态观测器对模型中不确定参数和事变参数具有良好的适应性,可满足车辆导航控制的要求。

关键词:自动控制技术;状态观测器;智能车辆; Kalman 滤波理论

中图分类号: TP242. 62 **文献标识码**: A

State Observer Design on High Speed Intelligent Vehicle

MA Lei[1], WANG Rong-ben[2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing* 210016, *China;* 2. *College of Transportation, Jilin University, Changchun* 130022, *China*)

Abstract: Base on the impossibility of JLUIV- Ⅳ intelligent vehicle lateral velocity's measurement, Kalman filter model was established by combining two-freedom steering dynamic model and preview kinematics model, and observer was designed by applying Kalman filter theory. Simulation and experimental results show that the observer has good adaptability for time-varying and uncertain parameters, so it can satisfy the requirement of vehicle steering control.

Key words: automatic control technology; state observer; intelligent vehicle; Kalman fitler theory

0 引 言

在现代控制理论中常采用状态反馈方法,因此在控制求解时均假设系统的状态量都是可量测的,但是由于不易直接量测或由于量测设备在经济性和使用性上的限制,实际上不可能获得系统的全部状态变量,从而使状态反馈的物理实现成为不可能。在这种情况下,大都采用设计状态观测器的方法解决这个问题。在车辆转向动力学模型[1]中含有车辆侧向速度 v_y,对 JLUIV - Ⅳ型智能车辆上安装的传感器而言,状态变量是不可测的,因此需设计状态观测器求解。

伦伯格状态观测器[2]只适用于线性定常系统,对于参数变化的系统适应性比较差,特别是当系统参数矩阵 A、B 和 C 的摄动量较大时,难以解出满意的反馈控制矩阵。利用滑模变结构控制理

收稿日期:2004-09-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50175064).

作者简介:马雷(1973 -),男,现在南京航空航天大学作博士后研究. 研究方向:智能车辆. E-mail: malei97yan @163.com

通讯联系人:王荣本(1946 -),男,教授,博士生导师. 研究方向:智能车辆及自主导航、汽车安全辅助驾驶、视觉 AGV 及自动化物流运输系统. E-mail: wrb @jlu. edu. cn

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

论设计状态观测器[3],需对系统进行较多的假设,而一般系统很难满足假设条件。文献[4]把系统简化为单输入单输出系统,即参数矩阵 C 为一个列向量,这种简化也是不合适的。也有一些文献介绍用神经网络[5,6]设计状态观测器,但是其大多用于慢时变系统。作者运用 Kalman 滤波理论[7]设计了状态观测器。

1　Kalman 滤波模型的建立[8,9]

结合二自由度转向动力学模型与预瞄运动学模型建立 Kalman 滤波模型,式(1)和式(2)为二自由度转向动力学模型表达式,图 1 为车辆预瞄运动学示意图,式(3)和式(4)为预瞄运动学模型表达式。

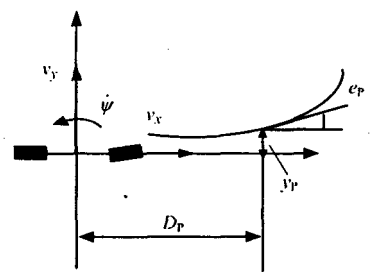


图 1　车辆预瞄运动示意图

Fig. 1　Sketch map of vehicle preview kinetics

$$\dot{v}_y = -\frac{K_f + K_r}{mv_x}v_y + \left(\frac{K_rL_r - K_fL_f}{mv_x} - v_x\right)\dot{\psi} + \frac{K_f}{m}\delta \tag{1}$$

$$\dot{\psi} = \frac{-L_fK_f + L_rK_r}{Iv_x}v_y - \frac{-L_f^2K_f + L_r^2K_r}{Iv_x}\dot{\psi} + \frac{L_fK_f}{I}\delta \tag{2}$$

$$\dot{y}_p = v_xe_p - v_y - \dot{\psi}D_p \tag{3}$$

$$\dot{e}_p = v_x\rho_r - \dot{\psi} \tag{4}$$

式中:v 为车辆质心处的速度,m/s;$\dot{\psi}$为横摆角速度,rad/s;δ为前轮实际转向角,rad;I 为车辆转动惯量,kg·m^2;m 为车辆质量 kg;L_f、L_r 分别为车辆质心到前、后轮的距离 m;K_f、K_r 分别为前、后轮胎的侧偏刚度,N/rad;$\dot{y}_p$ 为车辆预瞄点处的侧向偏差,m;$\dot{e}_p$ 为车辆预瞄点处的方位,rad;ρ_r 为道路的曲率,rad;D_p 为预瞄距离,m。

连续滤波模型的状态方程为:

$$\dot{X} = A_0X + Bu + D\rho_r \tag{5}$$

$$Y = CX$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} -\frac{K_f + K_r}{mv_x} & \frac{K_rL_r - K_fL_f}{mv_x} - v_x & 0 & 0 \\ \frac{-L_fK_f + L_rK_r}{Iv_x} & -\frac{L_f^2K_f + L_r^2K_r}{Iv_x} & 0 & 0 \\ -1 & -D_p & 0 & v_x \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{K_f}{m} \\ \frac{L_fK_f}{I} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_x \\ 0 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} v_y \\ \dot{\psi} \\ y_p \\ e_p \end{bmatrix}$$

以上系统模型是连续的,模型的输入为车辆前轮转角 δ,实际车辆质量 m = 1997 kg,转动惯量 I = 3149 kg·m^2,质心到前后轮距离 L_f = 1.33 m,L_r = 1.269 m,前后轮胎的侧偏刚度 K_f = K_r = 80 000 N/rad,车辆的预瞄距离 D_p = 14 m,取模型中时变参数 v_x 为 45 km/h。由于在车辆导航控制时其控制频率是 10 Hz,因此按采样周期 0.1 s 对以上系统的连续模型进行离散化处理,即可得到离散 Kalman 滤波模型,如式(6)所示:

$$\begin{aligned} X(k+1) &= \Phi(k)X(k) + r(k)u(k) + G(k)\omega(k) \\ Y(k) &= H(k)X(k) + v(k) \end{aligned} \tag{6}$$

式中:$\Phi(k)$为状态转移矩阵;$u(k)$为系统的非随机控制输入;$v(k)$为系统的量测噪声;$Y(k)$为系统的量测输出;$X(k)$为系统的状态,$X(0)$表示系统的初始状态;$H(k)$为状态观测矩阵;$\{\omega(k)\}$,$\{v(k)\}$是独立、零均值的高斯白噪声,$R_1 = E\{\omega(k), \omega^T(k)\}$,$R_2 = E\{v(k), v^T(k)\}$。

Kalman 滤波可由下列方程表示:

滤波方程:

$$\hat{X}\left(\frac{k+1}{k}\right) = \Phi(k)\hat{X}\left(\frac{k}{k-1}\right) + r(k)u + K(k)\left[Y(k) - H(k)\hat{X}\left(\frac{k}{k-1}\right)\right] \tag{7}$$

$$P\left(\frac{k}{k}\right) = P\left(\frac{k}{k-1}\right) - K(k)H(k)P\left(\frac{k}{k} - 1\right) \tag{8}$$

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

预报估计方程:

$$P\left(\frac{k+1}{k}\right) = \Phi(k)\,P\left(\frac{k}{k}\right)\Phi^{T}(k) + G(k)\,R_1(k)\,G^{T}(k) \quad (9)$$

滤波器增益方程:

$$K(k) = P\left(\frac{k}{k}-1\right)H^{T}(k)\left[H(k)\,P\left(\frac{k}{k}-1\right)H^{T}(k) + R_2(k)\right]^{-1} \quad (10)$$

式(7)具有很强的直观意义。它说明 k 时刻状态的滤波估计 $\hat{X}\left(\frac{k+1}{k}\right)$ 由两项构成,第一项是基于前一时刻和以前所有的数据对 k 时刻状态的一步预报 $\hat{X}\left(\frac{k}{k-1}\right)$;第二项相当于经过本时刻的实际量测后而作的修正,修正量的大小与 $K(k)$ 和 $[Y(k) - H(k)\hat{X}\left(\frac{k}{k-1}\right)]$ 有关。

设 R_1、R_2 为对角阵,其中横摆角速度 $\dot{\Psi}$、侧向偏差 y_p 和方位偏差 e_ψ 的协方差通过实验确定为 0.001、0.05 和 0.003。假定侧向速度 v_y 为 0.001,根据 Kalman 滤波原理,即使系统不够精确,对计算结果影响也不会太大。

2 Kalman 滤波状态观测器仿真

在仿真时,系统模型采用车辆动力学转向模型[10]。模型中只有 v_x 是变量,用 Matlab 软件模拟智能车辆这一时变系统。系统在控制器的作用下收敛,并输出车辆状态,以前轮转角 δ 作为状态观测器的输入,横摆角速度 $\dot{\Psi}$、侧向偏差 y_p、方位偏差 e_ψ 作为状态观测器的状态,仿真示意图如图2所示。

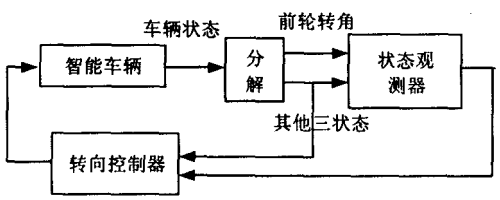


图2 仿真示意图

Fig. 2 Sketch map of simulation

仿真时系统的初始状态取为 $x_0 = [0.0, 0.0, 0.3, 0.1, 0.0]$。图3为 v_x = 45 km/h 时的仿真系统与状态观测器输出状态 v_y 的比较曲线。从仿真结果可知,状态观测器通过递推算法很快向仿真系统收敛。图4~图7分别为侧偏刚度为 60 000 N/rad 和 120 000 N/rad,速度均为 45 km/h 时的仿真曲线和以状态观测器作为状态输入时的系统收敛曲线。通过曲线可知,当轮胎侧偏刚度较大时,状态观测器估计的状态值比仿真

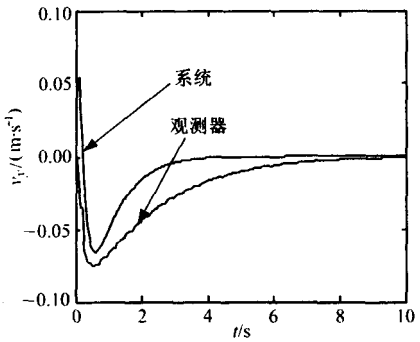


图3 v_x = 45 km/h 时的仿真曲线

Fig. 3 Simulation curve when v_x at 45 km/h speed

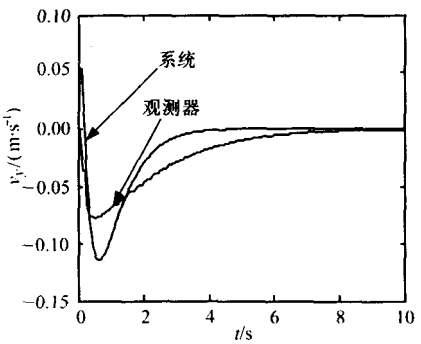


图4 侧偏刚度为 60 000 N/rad 时的仿真曲线

Fig. 4 Simulation curve when stiffness at 60 000 N/rad

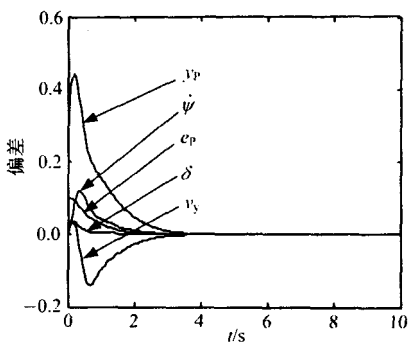


图5 侧偏刚度为 60 000 N/rad 时的状态收敛曲线

Fig. 5 Convergent curve when stiffness at 60 000 N/rad

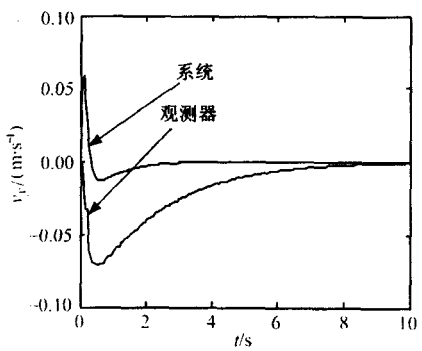


图6 侧偏刚度为 120 000 N/rad 时的仿真曲线

Fig. 6 Simulation curve when stiffness at 120 000 N/rad

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

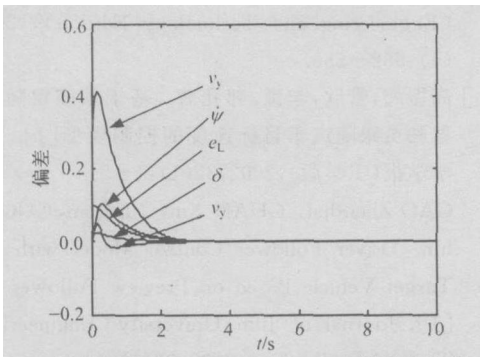


图 7　侧偏刚度为 120 000 N/rad 时的收敛曲线

Fig. 7　Convergent curve when stiffness at 120 000 N/rad

系统的小;当轮胎侧偏刚度较小时,状态观测器估计的状态值比仿真系统的大,这与理论是相符的。即使侧偏刚度值取为较极端的值,系统以状态观测器作为状态输入也可取得较好的控制效果。同时状态变量 v_y 在系统中的作用较小,对控制的影响不大,因此这样的差异是可以接受的。

3　现场实验与结论

图 8 为试验用模型车照片。由图 9～13 的实验曲线可知,车辆在加速导航时预瞄点处侧向偏差小于 0.3 m,说明状态观测器能很好地满足车辆导航要求。作者通过设计状态观测器,在满足车辆导航控制的前提下简化了车辆硬件。



图 8　智能车辆

Fig. 8　Intelligent vehicle

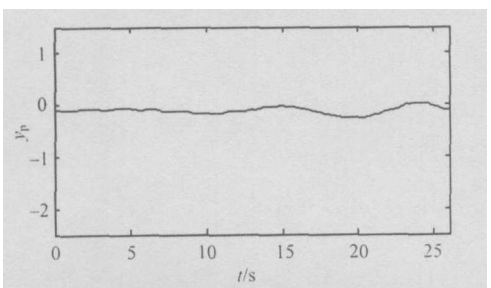


图 9　车辆侧向偏差 y_p 的收敛曲线

Fig. 9　Convergent curve of y_p

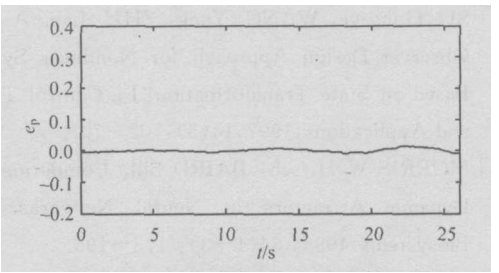


图 10　车辆方位偏差 e_p 的收敛曲线

Fig. 10　Convergent curve of e_p

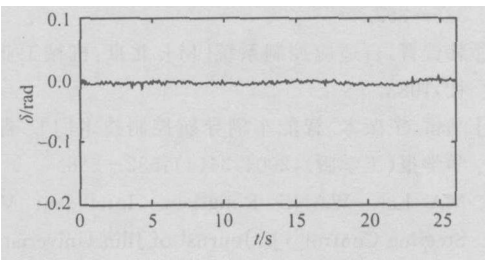


图 11　车辆前轮转角 δ 曲线

Fig. 11　Convergent curve of δ

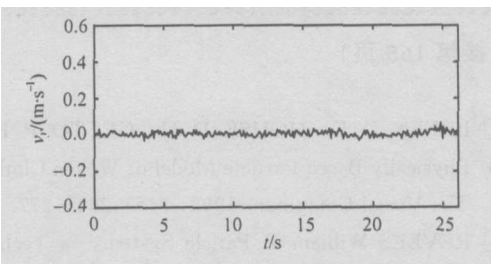


图 12　车辆侧向速度 v_y 曲线

Fig. 12　Convergent curve of v_y

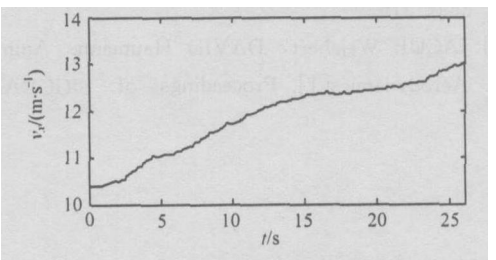


图 13　车辆行驶速度 v_x 曲线

Fig. 13　Convergent curve of v_x

参考文献:

[1] 郭孔辉.汽车操纵动力学[M].长春:吉林科学技术出版社,1991.

[2] 郑大钟. 线性系统理论[M]. 北京:清华大学出版社,1990.

[3] 田宏奇.滑模控制理论及其应用[M].武汉:武汉出版社,1995.

[4] 苏宏业,汪洋,诸健. 单输入\单输出非线性系统的状态观测器设计[J]. 控制理论及应用,1997,14(5):702 - 707.

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

SU Hong-ye, WANG Yang, ZHU Jian. A State Observer Design Approach for Nonlinear Systems Based on State Transformation[J]. Control Theory and Applications, 1997, 14(5): 702 - 707.

[5] MORRIS W Hirsch, BAIRD Bill. Computing with Dynamic Attractors in Neural Networks [J]. Biosystems, 1995, 34(1 - 3): 173 - 195.

[6] LI Y T. Nonlinear Observer Design Via Passivation of Error Dynamics[J]. Automatica, 2003, 39(5): 885 - 892.

[7] 韩曾晋. 自适应控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 1983.

[8] 马雷, 王荣本. 智能车辆导航控制技术[J]. 吉林大学学报(工学版), 2004, 34(4): 582 - 586.
MA Lei, WANG Rong-ben. Intelligent Vehicle Steering Control[J]. Journal of Jilin Univeristy (Engineering and Technology Edition), 2004, 34(4): 582 - 586.

[9] 高振海, 管欣, 李谦, 郭孔辉. 基于预瞄跟随理论的驾驶员跟随汽车目标速度的控制模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2002, 32(1): 1 - 5.
GAO Zhen-hai, GUAN Xin, LI Qian, GUO Kong-hui. Driver Follower Control Model with Vehicle Target Vehicle Based on Preview Follower Theory [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2002, 32(1): 1 - 5.

[10] 马雷. 高速智能车辆滑模变结构转向控制系统的研究[D]. 长春:吉林大学交通学院, 2003.
MA Lei. Research of High-speed Intelligent Vehicle Sliding Variable Structure Steering Control System [D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2003.

(责任编辑 李 桃)

(上接第165页)

[3] BREEN D E, HOUSE D H, GETTO P H. A Physically-Based Particle Model of Woven Cloth[J]. The Visual Computer, 1992, 8(5): 264 - 277.

[4] REVEES William T. Paticle Systems —a Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects[J]. ACM Computer Graphics (SIGGRAPH '83), 1983, 17(3): 359 - 376.

[5] JACUB Wejchert, DAVID Haumann. Animation Aerodynamics[J]. Proceedings of SIGGRAPH91 Computer Graphics, 1991, 25(4): 19 - 22.

[6] OpenGL Programming Guide[Z]. SGI Inc. 2000.

[7] FOSTER N, METAXXAX D. Realistic Animation of Liquids[J]. GM &IP, 1996, 58(5): 471 - 483.

[8] 李松维, 励映群, 陈蕾. 计算机成像技术与应用[M]. 长春:吉林人民出版社, 2001.

[9] 辛晨昀. 基于虚拟现实技术的分布式实时仿真平台中视景仿真的研究和实现[D]. 南京:南京邮电学院, 2002.

(责任编辑 张祥合)

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.