

DOI: 10.7652/xjtuxb201306013

车辆行驶转向角的图像检测方法

杨隽楠, 史忠科, 舒甜

(西北工业大学自动化学院, 710072, 西安)

摘要: 针对车辆建模及安全分析所需转向角数据的简便自动化检测问题,提出了一种新的车辆行驶转向角的图像检测方法。该方法将 CCD 传感器搭载于车辆上构成视觉检测系统,对 CCD 采集的转向轮图像进行轮廓边缘点提取,并对边缘点进行了椭圆拟合。根据圆的旋转角度检测法,计算了初步转角值及转向,利用车辆运动的连续性特点对数据进行有效性判断,根据转角增量的统计量对角度增量进行修正,得到了当前车辆的转向角度及转向。实验表明,该方法测得的转角值与方向盘转角检测系统测得的车辆转角值之间的平均误差为 $0.256\ 24^\circ$,在车辆转角所在的密集区间 $[-4.15^\circ, 4.15^\circ]$ 内,两者的误差均值约为 0.1° ,并且该方法可在日间有效地实现车辆行驶转向角的检测。

关键词: 转向角检测;椭圆拟合;圆的旋转角度

中图分类号: TP751;U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)06-0073-06

An Image-Based Method to Detect Steering Angle of Moving Vehicle

YANG Junnan, SHI Zhongke, SHU Tian

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A novel image-based method is proposed to automatically detect steering angle for vehicle modeling and safety analysis. A CCD sensor is installed on vehicles to construct a visual detection system, and edge extraction is implemented on the image captured by the CCD sensor. The extracted edge points of the steering wheel are then used in an ellipse fitting, and a preliminary steering angle is calculated using the algorithm for detecting the rotation angle of circle. The continuity of the vehicle movement is used to analyze the effectiveness of the resulting preliminary steering angle. The statistical values of steering angle increments are used to modify the steering angle and to obtain the final steering angle of the vehicle. Experimental results show that the average error between values of angles measured by the proposed method and those measured by the steering wheel-based method is $0.256\ 24^\circ$, while the average error between both of the angles is approximately 0.1° when the steering angles are in the concentrated interval $[-4.15^\circ, 4.15^\circ]$. The results show that the proposed method is able to effectively detect steering angles of moving vehicle during daytime.

Keywords: steering angle detection; ellipse fitting; rotation angle of circle

在车辆系统建模中,车辆的运动与转向轮的输出转向角息息相关,转向角作为输出数据是建立车辆动力学模型的必要数据^[1]。车辆在转向不足或转

向过度时都可能导致车辆发生侧滑,甚至急转或翻车,若能得到车辆的实时转向角,则可结合车辆动力学模型分析转向角对车辆行驶安全的影响^[2]。在车

收稿日期: 2012-09-01。 作者简介: 杨隽楠(1985—),女,博士生;史忠科(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(61134004)。

网络出版时间: 2013-04-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130423.1659.008.html>

辆辅助驾驶中,转向角信号作为人工神经网络的输入用于判定驾驶行为是否属于困倦行为,可避免由于驾驶员困倦而影响了行车的安全^[3]。此外,在智能车辆中,必须把车辆的转向角实时反馈给控制系统,才能实现智能车辆的闭环反馈控制,从而提高控制的实时性和准确性,确保智能车辆的行驶安全^[4]。

文献[5]在车辆方向盘上安装增量式光电编码器,检测准确度较高,但该方法改变了车辆原有的结构,不利于车辆的上路行驶。Cucchiara 等建立了方向盘运动模型,通过检测跟踪方向盘上的主要特征实现方向盘转角检测^[6]。Malinen 等通过运动学约束估计方向盘转角^[7],并用于主动转向系统的设计中,该算法得到的方向盘转角是估计值,可以监测转向盘的异常操作,避免重大事故的发生,但由此得到的车辆转向轮转向角的准确性不高,因此不能用于系统的精确控制设计。文献[8]以车辆方向盘转角输入的状态方程为基础,以闭环仿真得到的侧向加速度响应作为逆系统输入,逆系统的输出即为原系统的输入方向盘转角,该方法识别的方向盘转角和实验车辆的方向盘转角运动趋势相似,但文中并未对其识别角度的误差进行分析。Paul 等提出了一种利用光媒介进行角度检测的无线方向盘转角传感器,给出了对无线转向传感器和有线转向系统的建模及仿真结果^[9],并基于仿真结果对系统进行了可行性讨论。De 等根据建立的操纵动力学模型,设计了 2 种观测器,通过偏航率和车速来估计转向角^[10]。

在直接实现转向轮转向角检测的各方法中,主要采用非图像传感器实现转向轮的转向角检测,如采用台板转盘机构检测转向角^[11],但该方法无法在车辆正常行驶中实现对转向角的检测。文献[12]通过光电编码器和 PLC 实现对转向角的检测,检测准确度较高,但文中设计仅针对全向侧面叉车,且传感器不便安装于其他车辆。文献[13]采用了硬件角位移传感器法,但仅给出了一个转角方向的实验结果,只是将 2 个转向轮的检测结果进行了相互比较,而没有将检测值与其他方法进行比较。

采用图像传感器实现车辆转角检测的关键在于传感器易于安装、且检测准确度高,能够在车辆正常行驶中实现对转向角的检测。为保证检测的准确度,除了易于安装外,CCD 传感器的安装位置、角度的选取,应以获取的图像特征突出有利于识别为原则来进行,图像的分辨率还应大于 240×320 像素,以利于对图像特征的提取。本文给出一种基于图像的车辆转向角检测方法,先对安装在车辆上的 CCD

传感器采集到的转向轮图像进行轮廓边缘提取,并对边缘点进行椭圆拟合;然后根据圆的旋转角度检测法,来计算初步转角值及转向;最后利用车辆运动的连续性特点对数据进行有效性判断,并根据转角增量的统计量来进行角度增量的修正,从而得到了当前车辆的转向角度及转向。

1 算法

1.1 图像特征选取

以桑塔纳 2000 车型为例,将 CCD 传感器固定在车辆转向轮前方,以车辆右前轮为例,图 1 是一组由 CCD 获取的车辆转向轮的局部灰度图像,提取的各转角对应的车辆转向轮边缘曲线如图 2 所示。车辆转向轮的边缘曲率随转角的变化而变化,因此将车辆转向轮的外边缘曲线作为转向角图像检测的特征曲线。

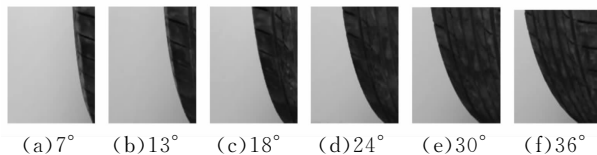


图 1 车辆转向轮右转角度的局部灰度图像

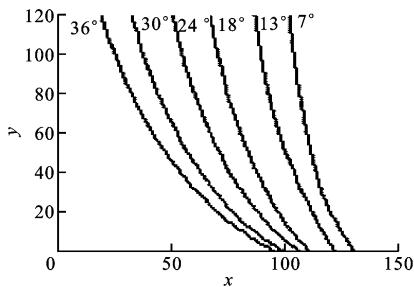


图 2 各转角对应的车辆转向轮局部边缘曲线

1.2 圆的旋转角度检测方法

在图 3 所示的直角坐标系中,初始位置时圆的透视图垂线绕垂直直径方向旋转,圆的透视图由垂线过度为椭圆。随着旋转角的增大,椭圆短轴不断增大,长轴保持不变。当旋转角度增大到 90° 时,椭圆的长轴与短轴相等并呈圆形。由图可知,旋转角度

$$\alpha = \arcsin a/b \quad (1)$$

式中: a 为旋转椭圆短轴; b 为圆的半径,即旋转椭圆长轴。已知椭圆方程为

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

$$\frac{1}{a^2}x^2 - \frac{2x_0}{a^2}x - \frac{2y_0}{b^2}y + \left(\frac{y_0^2}{b^2} + \frac{x_0^2}{a^2}\right) = 1 - \frac{1}{b^2}y^2 \quad (3)$$

式中: x_0 、 y_0 为椭圆圆心的横、纵坐标值。式(3)可表示为

$$Ax^2 + Bx + Cy + D = 1 - \frac{1}{b^2}y^2 \quad (4)$$

其中

$$A = \frac{1}{a^2}, A > 0; \quad B = -\frac{2x_0}{a^2}; \quad C = -\frac{2y_0}{b^2};$$

$$D = \frac{y_0^2}{b^2} + \frac{x_0^2}{a^2}, D > 0; \text{且 } A > 0, D > 0$$

若能得到式(4)中的椭圆参数 A 、 B 、 C 、 D , 则可求得 a 、 b 的值, 圆的旋转角度即可由式(1)获得。

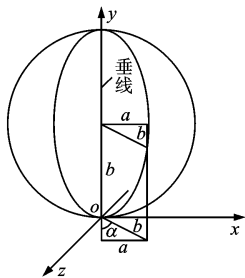


图3 圆的旋转变化规律

1.3 转向角检测算法

车辆在行驶过程中, 前轮会出现外倾角及前束角, 相对于转向轮的转向角, 外倾角一般很小, 可忽略, 即可以认为转向轮仅在垂直于地面的方向上有转角。转向轮外边缘呈现近似为圆的特征, 为此将转向轮用圆替代, 可采用圆的旋转角度检测方法实现对转向角的检测^[14]。为了消除噪声及异常值, 本文在圆的旋转角度检测法的基础上增加了有效性判断及数据修正步骤, 给出了车辆转向角的检测算法, 流程图如图4所示。

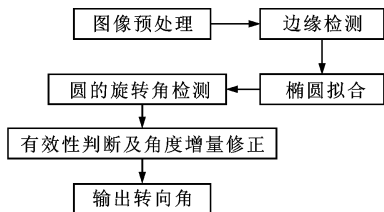


图4 车辆转向角的检测算法流程

1.3.1 图像预处理及边缘检测 根据先验知识截取 CCD 采集图像中的感兴趣区域, 截取后的图像分辨率为 240×320 像素。将截取后的图像进行滤波处理并转换为灰度图像, 采用 Canny 方法提取灰度图像的边缘点。

1.3.2 椭圆拟合 最小二乘法是常用的曲线拟合方法, 而直接最小二乘法并未考虑各样本点误差的

差异, 背景较为复杂时将直接导致椭圆参数的估计产生偏差, 使得拟合结果不理想。尤其当转向角较小时, 拟合出来的曲线可能并非椭圆, 因此根据最小二乘法的原理, 采用一种具有高抗干扰能力的随机椭圆检测算法, 对边缘点进行椭圆拟合。其原理如下: ①随机从边缘点集中取出 4 个点, 利用最小二乘法拟合椭圆参数 A 、 B 、 C 、 D ; ②判断参数 A 、 D 是否同时满足式(4)的条件, 若不满足, 则返回①, 若满足则将这 4 个点存入数组 F , 并且令计数器数值 $c=4$; ③由于边缘点为整数坐标, 因此设定临界阈值 T_d 来检验其他的样本点, 若第 i 个边缘点 (x_i, y_i) 满足下式

$$|Ax_i^2 + Bx_i + Cy_i + D - 1 + \frac{1}{b^2}y_i^2| < T_d$$

则认为该点在所求得的椭圆上, 将该点的坐标存入数组 F , 并且令 $c=c+1$, 重复此过程直到遍历边缘点集 E ; ④判断 c 的值是否大于计数器阈值 T_c , 并根据图像分辨率以及边缘点的多少决定 T_c , 若 c 的值大于 T_c 则认为该椭圆为转向轮边缘的拟合椭圆, 若 c 的值小于 T_c 则返回①。

1.3.3 圆的旋转角度检测 定义 α_p 为车辆的初步转向角, 根据圆的旋转角度检测法可得

$$\alpha_p = \arcsin a/b$$

同时可以判定车辆的转向, 若拟合点在右半椭圆, 车辆为左转, 若拟合点在左半椭圆, 车辆为右转。

1.3.4 有效性判断及角度增量修正 由于车辆的行驶环境复杂, 因此必须滤除获得的 α_p 中存在的噪声和异常值。车辆正常行驶时转向角变化连续, 而相邻两帧图像的时间间隔仅为 0.04 s, 因此相邻两帧图像的转向角不应出现大幅度的跳变。经过大量实验与多种方法的对比发现, 根据连续几组相邻帧角度的变化量, 可知车辆的转向趋势, 并利用这个信息来选择统计函数以计算新的角度增量。动态失效阈值与相邻帧的角度变化量的均值有关, 即第 i 帧的失效阈值

$$T_i = \begin{cases} \frac{1}{i-1} \sum_{n=1}^{i-1} T_{f_n, f_{n-1}}, & 1 < i \leq 5 \\ \frac{1}{5} \sum_{n=i-5}^{i-1} T_{f_n, f_{n-1}}, & i > 5 \end{cases} \quad (5)$$

式中: i 为当前帧数; $T_{f_n, f_{n-1}} = \alpha_{f_n} - \alpha_{f_{n-1}}$ 为第 n 帧转向角相对第 $n-1$ 帧转向角的角度变化量, α_{f_n} 为第 n 帧图像的转角值。由式(5)可见, T_i ($i=2, 3, 4, 5$) 从第 2 帧开始计算, 由于数据量不足, 需通过所有已得转角值计算, 而后续各帧图像的失效阈值则由距 T_i

最近的前 5 个转角值计算得到。

当前的初步转角值

$$\alpha_{f_i} = \begin{cases} \alpha_{f_{i-1}} + T_i, & |T_{f_i, f_{i-1}}| > |T_i| \\ \alpha_{f_i}, & |T_{f_i, f_{i-1}}| \leq |T_i| \end{cases} \quad (6)$$

当 $|T_{f_i, f_{i-1}}| > |T_i|$ 时,认为当前测得的初步转角值为无效值,需按式(6)进行修正;否则,当前测得的初步转角值为有效值,初步转角值可直接更新为车辆当前的转向角。

2 实 验

2.1 实验系统

车辆实验系统主要由方向盘转角检测模块与车轮转向角视频记录模块构成,改装后的实验车辆系统如图 5 所示。实验系统的各设备及其型号如表 1 所示。

表 1 车辆实验系统

实验设备	型号	数量	备注
实验车辆	桑塔纳 2000GLS	1	改装后使用
旋转变压器	BR6820E11	1	
CCD 传感器	KWR180B2-1	1	1/4 CCD,焦距 3.7 mm 彩色
SD 卡录像机	微型 SD 卡录像机 (MINI DVR)	1	最大像素 720×576 最高帧率 30 f/s
视频显示器	彩色 TFT LCD TV	1	
笔记本电脑	ThinkPad	1	
电源		1	车辆自带电瓶



(a)方向盘 (b)转向轮图像记录模块 (c)实验车辆内部
图 5 改装后的车辆实验系统

如图 6 所示:当 CCD 传感器俯视转向轮时,由于车辆的车身一般较车轮突出,因此在转向角较小时,CCD 难以拍到车轮;当 CCD 传感器前视转向轮时,拍摄到的转向轮图像具有良好丰富的特征,且便于传感器的安装。综合考虑,本文将 CCD 传感器安装在车轮前方,CCD 与车辆间为刚性连接。此外,在圆的旋转角度检测算法中,圆在旋转时,透视图由垂线过度为椭圆。因此,在安装 CCD 时需对安装位

置进行人工校准,使得车辆在零转向时,车轮外边界在 CCD 采集的图像中为垂直于地面的直线,即当车轮外边界在采集的图像中为直线时,车轮的位置为零转向位置。这种安装确保了转向轮在零转向与非零转向时,可通过一致的算法来实现转向角的检测。



(a)转向轮俯视图 (b)转向轮前视图 (c)转向轮后视图
图 6 CCD 传感器在不同视角下获取的转向轮图像

实验采用 Matlab7.1 软件为编程平台,运行环境为 AMD Sempron Processor,1.81 GHz,512 MB 内存。

2.2 实验方法

实验总体思路如图 7 所示。在实验车辆上安装有 2 套系统:基于 CCD 的图像系统以及旋转变压器系统,2 套实验系统自动记录保存各自的相关数据,然后离线处理所得实验数据。旋转变压器的输出值为方向盘转角值,车辆转向角可通过转向传动比得到。旋转变压器的电气误差为±10',轿车的传动比一般在 15:1~20:1 之间^[15],由旋转变压器测得的车辆转向角的电气误差小于±0.667'。因此,将旋转变压器所测转角数据用于分析验证本文方法所测转向角的准确性。

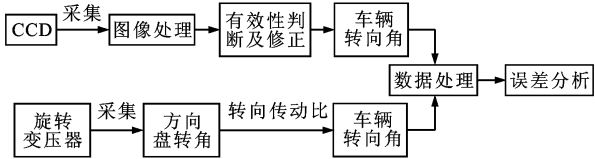


图 7 实验总体思路框图

由于安装误差的存在,旋转变压器每次重新安装后的初始值都可能不同且不是标准零位,因此将其初始值作为基准零位,其他各采样时刻值减去初始值即得到每个采样时刻方向盘的绝对转角值。图 7 中的转向传动比是指转向盘转角与车轮转向角的比值^[15],实际中转向传动比并非常数,但为了简化模型并减少计算量,通常将传动系数作为常值,其中桑塔纳 2000 的传动系数一般为 22.4^[16]。由于传动比的数值会随着车辆的使用损耗情况产生变化,因此通过实验测定了适合于本文实验车辆的近似传动比。此外,方向盘自由行程也会影响车辆的转向,在自由行程区间中,转向轮的转角不会随着方向盘的转动发生相应的变化,因此本文在实验前消除了方

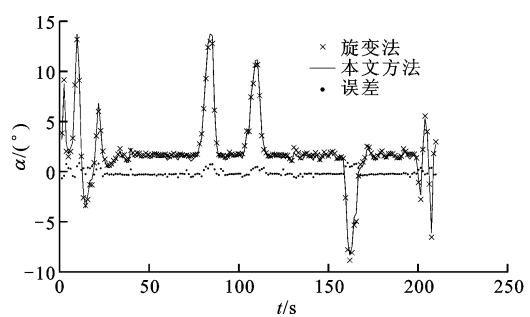
向盘自由行程的影响。旋转变压器信号采集板的采样周期为 0.050 45 s,图像记录器的采样周期为 0.04 s,需对旋转变压器的采集数据进行插值处理,才可与图像数据进行同步对比。

2.3 实验结果与分析

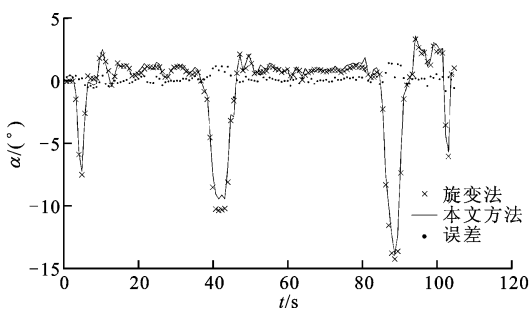
桑塔纳 2000 车型在空载时内轮的最大转角(向左)为 $40^{\circ}18'$,外轮的最大转角^[16](向右)为 $35^{\circ}36'$,为区别转向轮的 2 个转向,实验中左转角度为正值,右转角度为负值。共进行了 9 组实验,各组的实验条件为:前 6 组实验车辆的载荷约为 290 kg,后 3 组车辆的载荷约为 165 kg;前 6 组实验在光线变化不大的阴天进行,没有阴影干扰,后 3 组实验在晴朗天气的下午,光线强度适中时进行,有阴影干扰;各组实验车辆的胎压均正常;实验路况为标准化水泥路面。典型的 3 组实验结果如图 8 所示。

9 组实验的结果显示,本文方法相对于旋转变压器方法测得转角的平均误差为 $0.256\ 24^{\circ}$,标准差平均为 $0.313\ 16^{\circ}$,且淡阴影及在车辆承载范围内的载荷变化对本文方法的影响不大。造成各组实验误差不同的主要原因为行驶路况的不同,即路面破损、斑马线、道路标线、井盖等的影响所致。

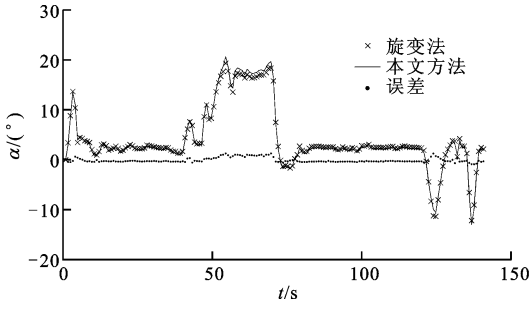
9 组实验转向角的变化区间为 $[-20.765\ 2^{\circ}, 20.768\ 6^{\circ}]$,将其分为 10 个子区间,即各子区间的角度范围为 4.15° 。划分后各子区间的端点为 $[-20.765\ 2^{\circ}, -16.611\ 8^{\circ}, -12.458\ 5^{\circ}, -8.305\ 1^{\circ}, -4.151\ 7^{\circ}, 0.001\ 7^{\circ}, 4.155\ 0^{\circ}, 8.308\ 4^{\circ}, 12.461\ 8^{\circ}, 16.615\ 2^{\circ}, 20.768\ 6^{\circ}]$,各子区间对应的转角误差均值 e 、误差标准差 s ,以及各子区间中转角值的分布数 m 如图 9 所示。可见,车辆的绝大部分转角值落在了 $[0.001\ 7^{\circ}, 4.155\ 0^{\circ}]$ 区间,且在此区间内的转角



(a)第 1 组

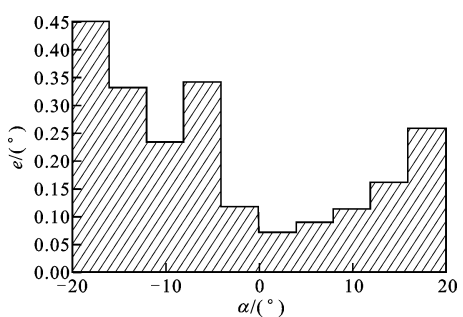


(b)第 2 组

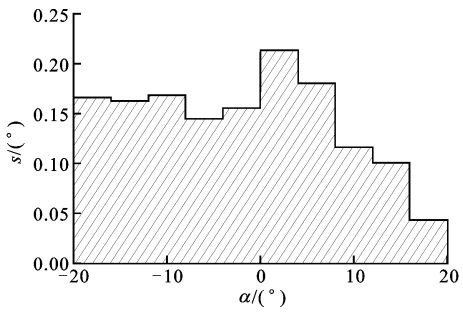


(c)第 3 组

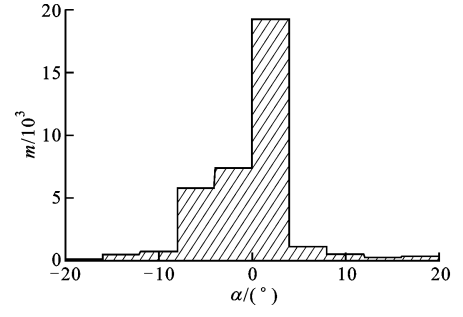
图 8 本文方法与旋变法的 3 组实验结果对比



(a)误差均值



(b)误差标准差



(c)转角值分布

图 9 各子区间的转角值分布与误差分析

误差均值最小。总体观察可知,随着转向角的增大,转角误差均值有所增大,但误差标准差则有所减小。

本文通过实验选择了一个最适合实验车辆的转向传动比常值,而实验车辆随着转向角的增大,转向传动比减小,且右转时转向传动比减小更明显,从而导致由旋转变压器测量值对应的车辆转向轮转向角偏离真实值误差的增大,并出现转角值增大对比误差均值也增大的现象。

3 结论及展望

(1)本文提出了一种基于图像特征信息的车辆行驶转向角的检测方法,根据圆的旋转角度检测法计算了车辆的初步转角值及转向,并利用车辆运动的连续性对初步转角值进行有效性判断及修正。与旋转变压器检测结果的对比表明,该方法在日间能够有效地检测行驶车辆转向轮的转角值及转向。

(2)由于车辆的实际传动比并非常值,且在左、右2个转向上的传动比也不对称,因此引起车辆转角误差均值随着车辆转角的增大而增大。

(3)夜间转向角的检测可考虑采用红外摄像头传感器实现。由于CCD传感器安装在车辆转向轮的前方,在雨雪天气下,特别是道路有积水时,泥浆可能会溅到CCD传感器的镜头上,因此CCD传感器不宜在雨雪天气下安装使用。

参考文献:

- [1] DAILEY D J, CATHEY F W. A novel technique to dynamically measure vehicle speed using uncalibrated roadway cameras [C]// Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 777-782.
- [2] 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 213-217.
- [3] SAYED R, ESKANDARIAN A. Unobtrusive drowsiness detection by neural network learning of driver steering [J]. Journal of Automobile Engineering, 2001, 215(9): 969-975.
- [4] 史忠科, 杨隽楠. 交通车辆道路行驶安全分析方法: 中国, 200910219166.1 [P]. 2010-06-16.
- [5] 高一鸣, 杨汝清, 刘亚洲. 一种基于DSP的测量车辆转向方位角的新方法 [J]. 机电一体化, 2006(5): 44-47. GAO Yiming, YANG Ruqing, LIU Yazhou. A new method for measuring vehicle turning-angle based on DSP technology [J]. Mechatronics, 2006(5): 44-47.
- [6] CUCCHIARA R, PRATI A, VIGETTI F. Steering wheel's angle tracking from camera-car [C]// Proceed-

ings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 406-409.

- [7] MALINEN S, LUNDQUIST C, REINELT W. Fault detection of a steering wheel sensor signal in an active front steering system [C]// Proceedings of 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes. Baden-Baden, Germany: SafeProcess, 2006: 510-515.
- [8] 张丽霞, 潘福全. 基于逆系统方法的汽车方向盘转角识别 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 40-43. ZHANG Lixia, PAN Fuquan. Vehicle steering angle identification based on inverse system method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 40-43.
- [9] PAUL D, KIM T H. On the feasibility of the optical steering wheel sensor: modeling and control [J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(5): 661-669.
- [10] DE-FILIPPI P, TANELLI M, CORNO M, et al. Design of steering angle observers for the active control of two-wheeled vehicles [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 155-160.
- [11] 陈文华. 双轴转向汽车车轮转角自动测试系统研究 [J]. 公路交通科技, 2008(9): 183-185. CHEN Wenhua. The biaxial steering car wheel angle automatic test system [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008(9): 183-185.
- [12] 张宝富, 穆希辉, 杜峰坡, 等. 基于光电编码器和PLC的车轮转角检测显示系统 [J]. 机械与电子, 2009(7): 62-63. ZHANG Baofu, MU Xihui, DU Fengpo, et al. A wheel angle measuring and displaying system based on photoelectric encoder and PLC [J]. Machinery & Electronics, 2009(7): 62-63.
- [13] 张浩杰, 龚建伟, 陈慧岩. 智能车辆速度和前轮转向偏角测量系统研究 [EB/OL]. (2010-08-04) [2012-07-10]. <http://wenku.baidu.com/view/0a12030e7cd184254b353500.html>.
- [14] 史忠科, 杨隽楠. 车辆侧滑运动的图像检测方法: 中国, 201110247527.0 [P]. 2011-12-21.
- [15] THOMAS D G. 车辆动力学基础 [M]. 赵六奇, 金达锋, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006: 199.
- [16] 李宪民. 桑塔纳2000系列轿车使用与维修问答 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 335.

(编辑 管咏梅 武红江)