

# 基于 GPS/IMU 数据的汽车转向角重现方法研究<sup>\*</sup>

曾桓涛, 余 志, 张 辉

( 中山大学 智能交通研究中心 广东省智能交通系统重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘 要:** 汽车操纵角是表征驾驶员控制汽车的最主要的参数之一。利用行驶记录仪( 汽车黑匣子) 的 GPS 和惯性传感器数据, 重现驾驶员的操纵过程, 对于事故分析、驾驶员行为分析等应用都有积极的意义。根据汽车单轨模型, 提出了基于汽车行驶速度和加速度的转向角的计算方法。用汽车动力学仿真和实车行驶等实验, 证明方法的可行性和可靠性。计算结果受汽车侧倾和侧偏两种现象的影响, 经误差分析可知, 在一般的转向行为中( 时速 35 km/h 内), 计算结果的相对误差在 10 % 以内。

**关键词:** 驾驶员行为分析; 汽车侧偏; CarSim 汽车动力学仿真

中图分类号: TP27; U27

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787( 2013) 01-0059-04

## Research on method for reappearance of vehicle steering angle based on GPS/IMU data<sup>\*</sup>

ZENG Huan-tao, YU Zhi, ZHANG Hui

( Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Research Center of Intelligent Transportation System, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Steering angle is one of the most important parameters that indicate the process of drivers handling vehicles. To obtain the data of steering from GPS and inertial sensors is of a great sense in accident and driver behavior analyzing or other applications. Based on vehicle kinematics model, a method for steering angle determining derived from longitudinal velocity and lateral acceleration is proposed. Simulation and experimental test are given to prove feasibility and reliability of the method. The computation result is affected by vehicle sideslip and roll motion, but the relative error is within 10 % when the vehicle velocity is within 35 km/h according to error analysis.

**Key words:** driver maneuver analysis; vehicle sideslip; CarSim vehicle kinematics simulation

### 0 引 言

在我国, 交通安全问题日益突出, 公路交通中重大、特大事故屡有发生。造成交通事故的各种因素中, 人的因素占的比例最大( 占 55 % ~ 90 % )。因此, 采集、记录和分析车辆行驶过程中的行驶姿态或驾驶员的操作过程, 对于事故原因分析、事故责任认定以及驾驶员行为研究( 如反应速度、操纵习惯等) 都具有重要意义<sup>[1~3]</sup>。

目前, 获取驾驶员对方向盘的操纵过程, 最直接的方法是采用方向盘转角传感器。这种传感器造价较高, 目前已应用于配备有主动控制系统( 如 ESP、VSC 等) 高档轿车中, 但数据主要用于控制系统内部处理, 一般不易获取, 很难被用于监控分析<sup>[4~6]</sup>。而作为目前车辆行驶监控的主要装置, 行驶记录仪( 黑匣子) 已经得到了广泛的应用, 特别在美国、欧共体、巴西等国家和地区都在法律上强制规定特定车

型安装行驶记录仪<sup>[7,8]</sup>, 在我国受到的重视也日益广泛。随着惯性传感器的快速发展, 加速度传感器和角速度传感器等惯性测量单元( inertial measurement unit, IMU) 被引入到一些新型的行驶记录仪中, 其采集记录得到的惯性数据为采集和提取驾驶员的操纵行为提供了途径, 为行驶记录仪实现了新的功能。

在已知汽车模型、汽车的运动状态( 汽车响应, 包括速度、加速度等) 的基础上, 反求驾驶员的操纵输入, 属于汽车操纵动力学“逆问题”, 到目前为止, 关于汽车操纵逆动力学问题的研究还处于初期阶段。文献[9,10]根据动力学模型, 利用逆系统理论提出了汽车方向盘转角识别的方法, 该方法需要确定一些汽车参数, 但如车轮侧偏刚度、整车绕铅垂轴转动惯量等参数通常难以获得。本文基于运动学模型, 行驶记录仪的行驶速度和三轴加速度信息, 提出了

收稿日期: 2012-04-22

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家科技支撑计划资助项目( 2011BAG02B02)

汽车转向角的估计方法,并证明了其可行性,避免了对汽车参数的过度依赖,为驾驶行为采集和监控提供了有效手段。

### 1 转向角估计模型

四轮汽车可以简化为一个H形车架的单轨模型,用前轴中点转向角描述前轮转向角如图1所示,由正弦定理可得<sup>[11]</sup>

$$\rho / \sin [90^\circ - (\delta - \alpha_f)] = l / \sin [\delta - (\alpha_f - \alpha_r)] .$$

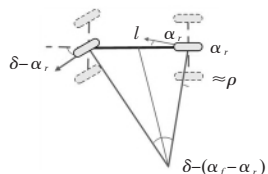


图1 前轮转向汽车的转向几何模型

Fig 1 Steering geometry model of front-wheel-steer vehicle

根据小角度近似可得

$$\delta = \frac{l}{\rho} + (\alpha_f - \alpha_r) . \quad (1)$$

其中  $\delta$  为前轮转角  $l$  为汽车轴距  $\rho$  为转弯曲率半径,  $\alpha_f$   $\alpha_r$  分别为前后轮胎侧偏角。

车辆曲率半径

$$\rho = v_x / (\beta + r) = v_x / (\dot{\beta} / v_x + r) , \quad (2)$$

式中  $v_x$   $v_y$  分别为汽车质心纵向和侧向车速,  $\beta$  为质心侧偏角  $r$  为横摆角速度。

侧向加速度

$$a_y = \dot{v}_y + v_x r . \quad (3)$$

将方程(2) (3)代入方程(1)得出

$$\delta = \frac{a_y l}{v_x^2} + (\alpha_f - \alpha_r) . \quad (4)$$

当汽车前后轮侧偏差异较小时,可得

$$\delta \approx \frac{a_y l}{v_x^2} . \quad (5)$$

该模型中  $l$  为可知参数  $a_y$  和  $v_x$  可通过传感器测得。因此,可由该模型实现转角的近似估计。

### 2 模型误差分析

该转向角估计模型的推导基于二自由度单轨模型,并假设侧偏角足够小。实际上,由于汽车弹性部件的影响,模型的精度受侧偏与侧倾两方面因素制约。

#### 2.1 汽车侧偏特性

根据轮胎弹性力学,侧向力表示为

$$F = k\alpha , \quad (6)$$

式中  $k$  为轮胎弹性刚度  $\alpha$  为侧偏角。

汽车整体侧向受力为

$$F = ma_y = mv_x^2 / \rho , \quad (7)$$

式中  $m$  为车质量。

前后轮受力分别为

$$F_f = \frac{a}{l} m \frac{v_x^2}{\rho} , \quad (8)$$

$$F_r = \frac{b}{l} m \frac{v_x^2}{\rho} , \quad (9)$$

式中  $a$  为质心到前轴距离  $b$  为质心到后轴的距离。

联立方程(6) (8) (9)即可得到

$$\alpha_f - \alpha_r = \frac{k_r b - k_f a}{2k_f k_r l} m \frac{v_x^2}{\rho} = K a_y , \quad (10)$$

$$K = \frac{k_r b - k_f a}{k_f k_r l} \cdot m , \quad (11)$$

式中  $K$  被定义为不足转向梯度。根据定义,当  $K = 0$ ,即  $\alpha_f - \alpha_r = 0$  时,汽车的转向特性为中性转向<sup>[12]</sup>。此时,式(5)所得的估计模型不受汽车侧偏特性影响。但实际上,汽车一般会存在一定的转向不足或转向过度的情况。对于小型轿车,轮胎的侧偏刚度  $k_f k_r$  值一般在 28 000 ~ 80 000 N/rad 范围内<sup>[13]</sup>,侧偏刚度越大,侧偏的影响越小。根据车辆质心的位置,  $a/(a+b) = a/l$  一般在 [0.4 ~ 0.6] 之间。对于前重车辆( $a/l = 0.4$ ),  $\alpha_f - \alpha_r > 0$ ,此时,汽车为不足转向,轮胎侧偏会导致转向角估计过小;对于后重车辆( $a/l = 0.6$ ),则相反。

#### 2.2 汽车侧倾影响

由于汽车车厢是悬架结构,在转弯的时候产生横向力,会导致厢体发生侧倾<sup>[15]</sup>。而行驶记录仪一般固定于厢体底部,所以,行驶加速度的测量会受到汽车侧倾的影响。

侧向加速度的测量值为

$$a_{y-s} = a_y \cos \phi + g \sin \phi , \quad (12)$$

式中  $\phi$  为侧倾角。

由于侧倾角  $\phi$  一般较小,根据泰勒展开,方程(13)可近似为

$$a_{y-s} = a_y + g\phi . \quad (13)$$

而侧倾角  $\phi = k_\phi a_y$ ,  $k_\phi$  为汽车平均侧倾角增益,根据统计,轿车平均侧倾角增益值大约为  $7.00^\circ/g_n$ <sup>[13]</sup>(约为  $0.12 \text{ rad}/g_n$ )。

侧向加速度的真实值为

$$a_y = \frac{a_{y-s}}{(1 + gk_\phi)} . \quad (14)$$

#### 2.3 综合分析

联立方程(4) (5) (10) (14),可得

$$\gamma = \frac{\delta - \delta_{\text{est}}}{\delta} = 1 - \frac{l(1 + gk_\phi)}{l + Kv_x^2} . \quad (15)$$

其中  $\gamma$  为相对测量误差  $\delta_{\text{est}}$  为转角的估计值  $\delta$  为实际的理论值。

假设汽车质量  $m = 1500 \text{ kg}$ , 轴距为  $l = 2.5 \text{ m}$ , 为前重汽车( $(b-a)/l = 0.2$ )。前后轮使用相同轮胎,侧偏刚度  $k_f = k_r = 28000 \text{ N/rad}$ ,以使侧偏的影响最大化。 $k_\phi$  取  $7.00^\circ/g_n$ ,代入式(10),式(15),则相对误差与车速的关系为如图2

所示。

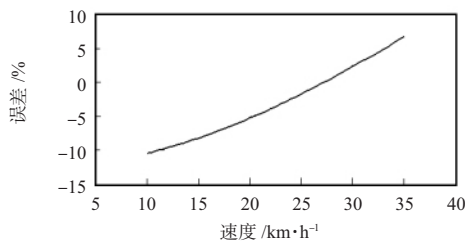


图 2 相对测量误差与车速的关系

Fig 2 Relation between relative measurement error and speed

由图 3 可知,当车速较低时( $v < 27 \text{ km/h}$ )  $\delta_{\text{est}} > \delta$ ,侧倾的影响为估计误差的主要因素,导致转角的估计值偏大,相对误差在 10% 以内;当车速较高时( $27 \text{ km/h} < v < 35 \text{ km/h}$ )  $\delta_{\text{est}} < \delta$ ,侧偏的影响为主要因素,导致转角估计值偏小,相对误差控制在 7% 以内。根据方程式(12)、(15)可知,当轮胎的侧偏刚度越大时,估计误差将越小,重现的转向角可信度越高。

### 3 实验验证

#### 3.1 仿真实验

使用 Mechanical Simulation Corporation 公司基于密歇根大学公路交通研究所(UMTRJ)多年的试验与研究开发的整车动力学仿真软件 CarSim 建立仿真模型<sup>[14,15]</sup>。CarSim 可以通过参数化建模建立仿真汽车模型、道路模型、传感器类型和布局等,以驾驶员的角度设计控制策略,包括入车路闭环控制,以转角和车速为控制变量的开环控制等,可以模拟稳态行驶、或极限工况等各种场景,主要用来预测和仿真汽车整车的操纵稳定性、制动性、平顺性、动力性和经济性。

实验中,选取 C 级车型 C-Class Hatchback,其中,车质量为 1274 kg,轴距 2.578 m,于后轴上方布置加速度传感器组,使汽车以 50 km/h 的目标时速进行双变线(躲避障碍物)的开环控制,如图 3 所示。并以 100 Hz 采样,记录前轮转角、侧向加速度、行驶速度等信息。

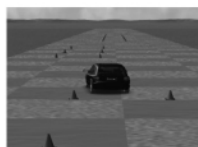


图 3 CarSim 仿真场景

Fig 3 CarSim simulation scene

将 CarSim 仿真输出汽车后轴处侧向加速度  $a_y$  和行驶速度  $v$  代入方程(5)。将求得的转向角与实际转向角比较,如图 4 实线为实际仿真输出转向角,虚线为通过加速度间接求得的转向角,两条曲线基本吻合,在转弯的过程(第 3 s ~ 第 12 s),两者平均误差为  $0.0025^\circ$ 。由于估计方法假设前后轮侧偏差异较小,当在侧向加速度较大时,侧偏特性影响较为严重,从图中可见,重现的转角与实际值之间存在一定偏差,据统计,驻点处,两者最大绝对误差为  $0.18^\circ$ ,最

大相对误差为 5.7%。

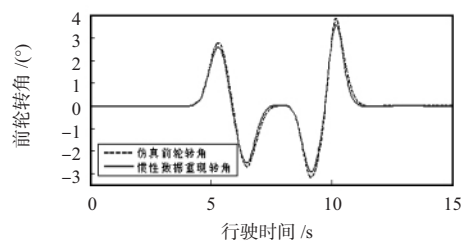


图 4 转角估计结果比较

Fig 4 Estimation result comparison of steering angle

仿真实验中,车质量  $m$  为 1274 kg,轴距为 2.578 m,轮胎侧偏刚度为  $k_f = k_r = 48700 \text{ N/rad}$ ,质心到前轴距离  $a = 1.016 \text{ m}$ ,将参数代入式(15),则相对测量误差与车速的关系为如图 5 所示。

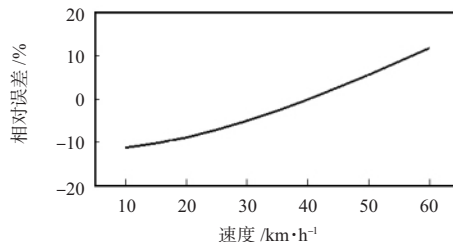


图 5 仿真实验相对测量误差与车速的关系

Fig 5 Relation between relative measurement error and speed

可见,当轮胎侧偏刚度较大时,侧偏特性影响较轻微,即使在高速操纵(50 km/h)的情形下,重现的转角仍有较高的可信度(相对误差  $< 6\%$ )。

#### 3.2 真车实验

实验采用一部前轮转向的 SUV 汽车,车质量约 1.4 t,轴距 2.510 m,将配置有 GPS、加速度传感器等传感器的行驶记录仪固定于车厢后轴上方位置,其中,GPS 采用 GStar GS-87 模块,数据采样率为 1 Hz,加速度传感器采用 ADXR300 模块,数据采样率 1000 Hz。在车辆运动过程中同步记录传感器数据,以一段急速右转弯过程为例,侧向加速度数据经滤波降噪后,与从 GPS 数据中获取的汽车行驶速度  $v$  共同代入测量方程(5),得到前轮转角的估计值,如图 6 所示。

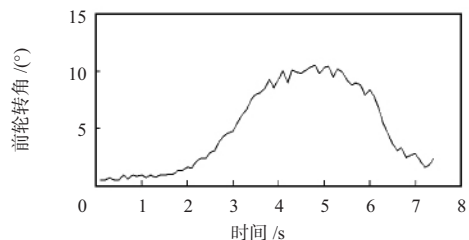


图 6 前轮转角的估计值随时间的变化

Fig 6 Estimated value change of steering angle of front wheel with time

在汽车实际的行驶过程中,由于前轮转角一般难以直接获取,所以,考虑采用仿真还原验证,以证明估计结果的可靠性。根据实验汽车的参数,在 CarSim 中建立相近的汽

车模型,将前轮转角的估算结果和记录的车速作为仿真操纵模型的输入,进行开环控制,还原汽车的行驶过程。

图7所示为实验汽车在如上所述右转过程的行驶轨迹。其中,实线表示GPS采集的轨迹,虚线为将前轮转角估计值输入CarSim仿真还原得到的行驶轨迹。在转弯过程中,平均时速为30 km/h(约8.33 m/s),两条轨迹最大误差为4.3 m。实验证明:估计得出的汽车转向角能够一定程度上反映真实的操纵过程。

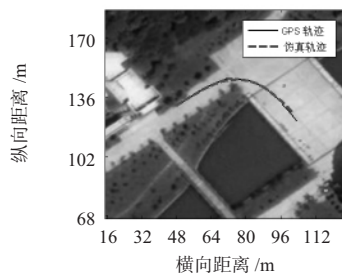


图7 行驶轨迹

Fig 7 Trajectory

#### 4 结论

根据汽车运动学模型,提出了基于汽车行驶速度和加速度等惯性数据的转向角计算方法。测试结果的精度主要受汽车侧偏和侧倾2种现象影响,经分析可知,在一般的行驶工况下(时速35 km/h),2种因素的综合影响在10%以内,并且对于轮胎刚度较大的车辆(如重型车、货车等),精度更高。通过仿真和真车等实验,证明通过运动学模型解算汽车转向角基本能够还原驾驶员的操纵过程。这种方法的优点在于计算简便,无需涉及汽车不确定参数,而且无需对汽车原有结构和部件进行改造,适用于汽车后装信息采集系统的应用(如行驶记录仪),可以为事故分析、驾驶操纵分析、汽车状态估计等相关应用提供了简便可靠的途径。

#### 参考文献:

- [1] 郭孜政. 驾驶行为险态辨识理论与方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [2] Brown I D. Drivers' margins of safety considered as a focus for re-

search on error[J]. Ergonomics, 1990, 33(10-11): 1307-1314.

- [3] 邹铁方, 余志, 蔡铭, 等. 人车碰撞事故再现仿真结果不确定性问题研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(7): 110-3.
- [4] 杨财, 周艳霞. 方向盘转角传感器研究进展[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(11): 1-4.
- [5] Noguchi A, Yamawaki K, Yamamoto T, et al. Development of a steering angle and torque sensor of contact-type[J]. Furukawa Review, 2004, 25(1): 36-41.
- [6] Gao J, Petovello M, Cannon M E. Integration of steering angle sensor with global positioning system and micro-electro-mechanical systems inertial measurement unit for vehicular positioning[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2008, 12(4): 159-167.
- [7] 陆文昌. 汽车行驶记录仪的现状与发展趋势[J]. 汽车电器, 2005, 5(1): 1-2.
- [8] Zhao W M. New generation of vehicle traveling data recorder based on data collection system chip[J]. Auto Electric Parts, 2008, 12(1): 57-61.
- [9] 赵又群, 尹浩, 张丽霞, 等. 汽车操纵逆动力学的现状与发展[J]. 中国机械工程, 2005, 16(1): 77-82.
- [10] 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.
- [11] Manfred M H W. 汽车动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [12] Gillespie T D. 车辆动力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [13] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [14] 李志魁. 基于CarSim的整车动力学建模与操纵稳定性仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [15] Kinjawadekar T, Dixit N, Heydinger G J, et al. Vehicle dynamics modeling and validation of the 2003 Ford Expedition with ESC using CarSim[R]. SAE Technical Paper, 2009.

#### 作者简介:

曾恒涛(1984-), 男, 广东梅州人, 博士研究生, 主要研究为惯性导航技术、车辆状态检测与控制方向。

(上接第58页)

5°以内; 而利用磁阻传感器与加速度计复合解算姿态角, 误差范围能控制在3°以内, 可有效降低因地磁原因导致的误差突变, 从而能实现在尽量保证精度的前提下, 同时测量3个姿态角, 为姿态角检测技术提供了一种新思路。

#### 参考文献:

- [1] 高峰, 张合. 基于基准角和补偿角的常规弹药滚转角磁探测算法研究[J]. 探测与控制学报, 2008(5): 11-15.
- [2] 曹红松, 冯顺山, 赵捍东, 等. 地磁陀螺组合弹药姿态探测技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006(3): 142-145.
- [3] 鲍亚琪, 陈国光, 吴坤, 等. 基于磁强计和MEMS陀螺的弹箭全姿态探测[J]. 兵工学报, 2008(10): 1227-1231.
- [4] Maus S, Macmillan S, Mclean S, et al. The US/UK world magne-

tic model for 2010-2015[R]. NOAA NESDIS/NGDC, 2010.

- [5] 刘晓娜. 地磁传感器及其在姿态角测试中的应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2008.
- [6] 丁明理, 王祁. 无陀螺惯性测量组合研究现状概述[J]. 中国惯性技术学报, 2005(4): 83-88.
- [7] 施闻明, 杨晓东, 徐彬. 无陀螺捷联惯导系统现状及其发展研究[J]. 战术导弹控制技术, 2006(3): 46-51.
- [8] 魏颖. 利用加速度计确定弹道修正弹的滚转姿态[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [9] 田小芳, 陆起涌, 熊超. 基于加速度传感器的倾角仪设计[J]. 传感技术学报, 2006, 19(2): 361-363.

#### 作者简介:

唐玉发(1986-), 男, 安徽安庆人, 博士研究生, 主要从事简易制导控制相关研究。