

8-15-2022

Development of Vehicle Dynamics Virtual Simulation System Based on CarSim

Jianlei Liu

School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; jianleiliu2018@163.com

Xuejian Jiao

School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; jeosword@126.com

Huaiqian Wang

School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Development of Vehicle Dynamics Virtual Simulation System Based on CarSim

Abstract

Abstract: Aiming at the "high cost, high consumption and high risk" of real vehicle test, a virtual simulation system of vehicle dynamics based on CarSim is developed. *The real-time vehicle model is created by CarSim. A virtual scene is built in Unity3D, and an active stereoscopic display technology is used to realize the 3D visual effects. The driver's operation information is collected by simulating the steering wheel of Fanatec racing car and LabView, and the vehicle dynamics model is solved in NI-Pxie8840 controller to ensure the real-time operation. The calculated data is fed back to the driver through the six-degree-of-freedom motion platform.* The results show that the virtual vehicle can follow the driver's intention, and the system has sensitive response, safe operating environment, better immersive feeling, accurate and reliable test data, which is conducive to the design and development of automobiles.

Keywords

vehicle dynamics, carsim, driving simulation, real-time simulation, six-degree-of-freedom motion platform, hardware in the loop

Recommended Citation

Jianlei Liu, Xuejian Jiao, Huaiqian Wang. Development of Vehicle Dynamics Virtual Simulation System Based on CarSim[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(8): 1847-1854.

基于CarSim的车辆动力学虚拟仿真系统开发

刘建磊, 焦学健*, 王怀谦

(山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 为了解决实车实验因“高成本、高消耗、高危险性”而无法开展的问题, 开发了一套基于CarSim的车辆动力学虚拟仿真系统。利用CarSim创建实时车辆模型; 在Unity3D中搭建虚拟场景, 并使用主动立体显示技术实现3D视觉效果; 通过Fanatec赛车模拟方向盘和LabView采集驾驶员操作信息, 在NI-Pxie8840控制器中求解车辆动力学模型以确保其运算的实时性; 将解算数据通过六自由度运动平台反馈给驾驶员。结果表明: 虚拟车辆可以遵循驾驶员的意图行驶, 整套系统反应灵敏、操作环境安全、沉浸式感受较强、实验数据准确可靠, 对汽车的设计研发具有一定意义。

关键词: 车辆动力学; CarSim; 模拟驾驶; 实时仿真; 六自由度平台; 硬件在环

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)08-1847-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0300

Development of Vehicle Dynamics Virtual Simulation System Based on CarSim

Liu Jianlei, Jiao Xuejian*, Wang Huaqian

(School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Aiming at the "high cost, high consumption and high risk" of real vehicle test, a virtual simulation system of vehicle dynamics based on CarSim is developed. The real-time vehicle model is created by CarSim. A virtual scene is built in Unity3D, and an active stereoscopic display technology is used to realize the 3D visual effects. The driver's operation information is collected by simulating the steering wheel of Fanatec racing car and LabView, and the vehicle dynamics model is solved in NI-Pxie8840 controller to ensure the real-time operation. The calculated data is fed back to the driver through the six-degree-of-freedom motion platform. The results show that the virtual vehicle can follow the driver's intention, and the system has sensitive response, safe operating environment, better immersive feeling, accurate and reliable test data, which is conducive to the design and development of automobiles.

Keywords: vehicle dynamics; carsim; driving simulation; real-time simulation; six-degree-of-freedom motion platform; hardware in the loop

引言

汽车工业是机械、电子、液压、材料、化工、信息等多行业高度集成融合的行业。与车辆相关的一些实验运行成本高、危险系数大、破坏性强,

专业实验室的建设费用巨大, 一般高校难以承担高昂的实验运行费用^[1-2]。汽车驾驶模拟器有不受场地和天气环境影响等特点, 被广泛应用于汽车设计、驾驶培训和驾驶行为研究等领域。但传统的汽车驾驶模拟器由于不具备实时性和专业的车

收稿日期: 2021-04-07 修回日期: 2021-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(51975341)

第一作者: 刘建磊(1996-), 男, 硕士生, 研究方向为汽车系统动力学。E-mail: jianleiliu2018@163.com

通讯作者: 焦学健(1977-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为汽车系统动力学。E-mail: jcosword@126.com

辆动力学模型，其实验数据不够准确可靠^[3-7]。本文在传统汽车驾驶模拟器的基础上，结合专业整车动力学仿真软件CarSim、NI实时控制器和六自由度运动平台，开发出了一套全新的车辆动力学虚拟仿真系统。通过本系统可以在安全的环境下完成汽车操纵稳定性等实验，得到汽车各项性能参数曲线，并很好地解决专业性和实时性等问题。

1 系统方案设计

车辆动力学虚拟仿真系统主要由驾驶信息采集模块、车辆动力学解算模块、六自由度平台反馈模块和视景显示模块构成，设计方案如图1所示。

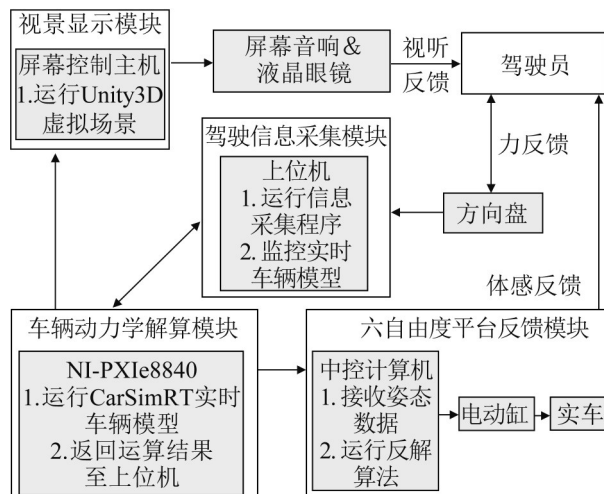


图1 系统设计方案
Fig. 1 System design

驾驶信息采集模块利用Fanatec方向盘输入驾驶员的操纵信息，并由上位机中的LabView程序完成对其的采集、处理和发送工作；车辆动力学解算模块包括CarSim RT实时车辆模型和NI-RT实时系统平台2部分，用户通过CarSim RT可根据需要自行定义实时车辆模型，而NI-RT则为该实时车辆模型的运行提供了实时环境；六自由度平台反馈模块利用平台控制柜接收车身姿态信息，并通过六自由度平台和实车为驾驶员提供真实的体感反馈；视景显示模块采用Unity3D专业游戏引

擎和虚拟现实技术搭建逼真的虚拟驾驶环境，配合大屏幕和液晶快门眼镜为驾驶员营造身临其境的沉浸式感受。通过以上4个模块搭建的人-车-路闭环系统可以为驾驶员提供视觉、听觉和体感反馈，并以此对自己的驾驶行为作出调整，完成训练和相关科研实验^[8-10]。

2 虚拟仿真系统开发

2.1 车辆动力学解算模块设计

2.1.1 车辆仿真模型

车辆动力学模型是通过CarSim开发的。CarSim作为专业的车辆系统仿真软件被国际上众多的汽车制造商和零件供应商所采用，是车辆行业的标准软件。CarSim采用面向系统的参数化建模方式，用户仅需从模型数据库中选取各车辆组件模块，并根据需要配置相应参数即可快速完成车辆动力学模型的搭建^[11-13]。CarSim提供了包括轿车、轻型货车、SUV在内的多种车辆模型，本文以某前置前驱自动挡轿车为例搭建车辆动力学模型。车辆模型主要由车体、轮胎、动力传动系统、转向系统、制动系统、悬架系统构成，参数如表1所示。

表1 建模车辆主要参数

Table 1 Main parameters of experiment vehicle

参数	数值
长/mm	4 933
宽/mm	1 836
高/mm	1 469
整车质量/kg	1 470
轮胎规格	215/55/R17
车轮侧偏刚度/(N/rad)	-73 000
质心到前轴距离/mm	1 112
质心到后轴距离/mm	1 759
最大功率/kW	125
最大扭矩/(N·m)	258
对x轴的极惯性矩/(kg·m ²)	671
对y轴的极惯性矩/(kg·m ²)	1 973
对z轴的极惯性矩/(kg·m ²)	2 315

动力传动系统采用7档自动变速器, 发动机最大功率125 kW, 最大扭矩258 N·m, 前后悬架类型均为独立悬架, 轮胎模型采用实验数据插值的办法确定轮胎的侧向力和纵向力, 转向和制动系统采用默认的配置方案。在车辆动力学模型中, 将制动主缸压力、节气门开度、方向盘角度作为输入变量, 将侧倾角、俯仰角、横摆角、横向加速度和纵向加速度等作为输出变量。

2.1.2 实时系统设计

CarSim中的模型方程为微分方程, 通常采用定步长积分算法解算, 速度可达实时的3~6倍, 因此其具备较好的实时运算能力, 但为了达到实时仿真, 需将CarSim拓展为CarSim RT, 即实时车辆模型可以按实时的速度运行。此外, 为确保该车辆模型运行的实时性还需要实时系统平台的支持。目前, 常见的实时仿真平台有xPC、dsPACE、RT-LAB等, 本文采用NI-RT实时仿真平台, 软件使用LabView RT实时模块, 硬件使用PXIe-1082机箱搭配PXIe-8840控制器的方案。

在进行实时仿真之前, 需要在主机上利用LabView开发出联合实时车辆模型的应用程序。首先调用数据通信函数, 搭建UDP协议客户端用于接收采集到的驾驶员操作信息, 但接受到的一组字符串并不能直接参与运算, 此时需要通过强制类型转换函数将其转换为双精度数组。随后使用CarSim RT提供的3个VI (virtual instrument) 子程序, 将车辆动力学模型与LabView关联起来, 其中Initialize子程序主要通过访问simfile文件, 在CarSim RT与LabView之间建立起数据传输通道, 并初始化实验的输入和输出变量; 使用Update子程序将转换后的操作信息输入给车辆动力学模型求解器, 并从中获取解算结果数据, 同时构建UDP服务端将解算结果中的车身姿态数据转换为40 byte的数据包, 发送给六自由度平台中控计算机; Terminate子程序负责关闭LabView与CarSim的数据传输通道, 用户界面如图2所示。

应用程序编写完后, 即可使用LabView RT实时模块工具将其下载至实时运行着的操作系统NI-PXie8840控制器中求解, 实时步长为0.02 s。使用仪器驱动程序和IP通讯将解算结果数据传输回上位机中, 用波形图表可直观监视车辆的运行状况, 如图3所示。



图2 虚拟仿真系统用户界面

Fig. 2 User interface of virtual simulation system



图3 车辆动力学解算模块

Fig. 3 Vehicle dynamics solution module

2.2 驾驶信息采集模块设计

方向盘是驾驶员与汽车直接交互的硬件, 驾驶员根据视觉、听觉和体感反馈对虚拟汽车进行控制。操作信息采集模块作为系统的输入端, 既要做到响应迅速, 又要保证数据精确、振动和力反馈逼真^[14]。为满足以上条件, 本文选用搭配直驱系统的Fanatec模拟赛车方向盘作为输入设备, 可为驾驶员提供更为真实细腻的力反馈体验。

Fanatec方向盘通过USB连接到上位机中, 在

LabView 中通过输入设备控制函数对方向盘等硬件设备进行检测和采集,采集对象为方向盘转角、制动踏板和油门踏板深度^[15]。为使采集到的数据符合 CarSim 的输入变量要求,需对数据做进一步的插值处理,使方向盘转角数值控制在 $-540\sim+540$ 之间,油门踏板数值在 $0\sim 1$ 之间,制动踏板数值在 $0\sim 15$ 之间。将以上数值创建成数组后再将数据类型转换为字符串,最后构建 UDP 协议服务端,把字符串发送至动力学模型解算模块。

用户界面以简洁实用为原则,使用波形图表和数值显示控件实时记录转向、制动和油门等信息,方便用户通过本界面数据对驾驶员的操作信息进行分析 and 评价,如图4所示。

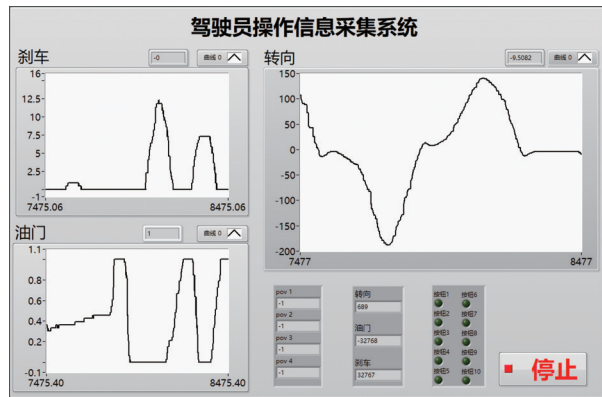


图4 驾驶信息采集用户界面
Fig. 4 Driving information collection UI

2.3 六自由度平台反馈模块设计

驾驶员的感受也是衡量一个硬件在环仿真系统好坏的关键因素,本文虚拟仿真系统在视觉、听觉、触觉和体感方面,为驾驶员提供尽可能真实的驾驶环境,其中体感反馈主要通过实车和六自由度运动平台来实现。六自由度平台主要由控制柜、电动缸、万向铰链、底座和上平台组成^[16]。底座固定在地面上,平台中控计算机通过 UDP 通讯协议接收车身姿态数据,利用内置反解算法求解出6只电动缸的伸长量,随后通过伺服驱动器控制电动缸做伸缩运动,实现上平台在空间6个自由度上的姿态变化,即:俯仰、侧倾、横摆的转动,

横向、纵向、垂向的平动。为提高驾驶环境的逼真度和系统的安全性,根据平台的承载能力将一辆减重后的实车固定在上平台上,并将方向盘套件移植到实车中,经测试六自由度平台反馈模块可以为驾驶员提供车辆在坡路、颠簸路面、加减速、转向等工况下,较好的运动临场感。

2.4 视景显示模块设计

视景显示模块是虚拟仿真系统的重要组成部分,场景的逼真度和合理性不仅影响模拟驾驶体验,还会干扰驾驶员的操作对实验数据的有效性产生影响。本文采用 Unity3D 虚拟现实引擎搭建驾驶场景,Unity3D 支持 DirectX 和 OpenGL 渲染环境,具有强大的物理系统和丰富的软件接口,同时还支持通过 C# 语言程序实现与其他软件的交互,满足虚拟仿真系统的要求。

虚拟驾驶场景主要由地形、赛道、路障、车辆、树木、天空等元素组成。其中最主要的是赛道的创建,为保证赛道数据的真实,在广泛查阅现实汽车综合实验场后,本文首先在 CAD 中设计出合理的跑道原型,随后导入 3Ds Max 对实验赛道等主要物体建模。利用 Unity3D 中的地形编辑系统,创建新地形并调整海拔高度将赛道模型融入其中,使用草地、沙地、岩地等纹理贴图 and 法线贴图给地形赋予材质,在保证渲染速度的前提下增强了画面的立体感。场景光照特效采用平行光和环境光混合渲染方案,同时在山坡和道路两旁种植花草树木,并加入风力和阴影效果使场景更加真实合理。实验路段以蛇形实验为例构造,按照实验要求在赛道上布置 10 根标桩,出入口处各 2 根,中间 6 根每根间距为 30 m^[17],如图5所示。

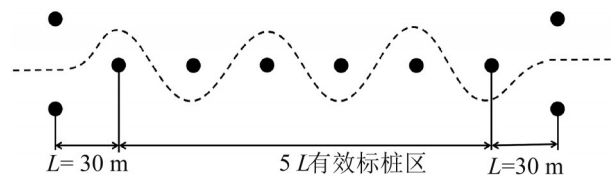


图5 实验场地设计
Fig. 5 Design of experiment site

Unity3D中车辆模型的运动是通过C#程序控制的,在C#程序中编写UDP协议客户端代码接收实时车辆模型解算出的车辆实时位置、车身姿态、转向盘转角等数据,并借助此数据来控制场景中车辆的行驶状态。由于UDP属于无连接协议即数据传输前服务端和客户端不需提前建立连接,因此其数据传输速度会更快,这也为视景系统运行的流畅性和可靠性提供了保障。

为实现主动立体的视觉效果,显示装置采用的是120 Hz高刷新率虚拟现实沉浸式大屏和液晶快门眼镜,虚拟场景采用LinkVR软件进行适配。现实中人们看到的物体之所以是立体的是因为人的两眼之间有4~6 cm的间距,在观察物体时两眼看到的图像是不同的,当这2幅图像传到大脑后呈现的便是具有景深的图像。据此立体显示原理首先利用LinkVR提供的SDK插件在Unity3D中,动态生成2个相机分别模拟左右眼,并以一定频率交替播放渲染的画面,再根据LinkVR配置文件将创作的内容适配到大屏幕上。观看时驾驶员需佩戴液晶快门眼镜接收同步信号,以与视频源相同的频率通过控制左右镜片是否透光,来确保左右眼看到的画面和2个相机交替播放的画面是一一对应的,显示效果如图6所示。

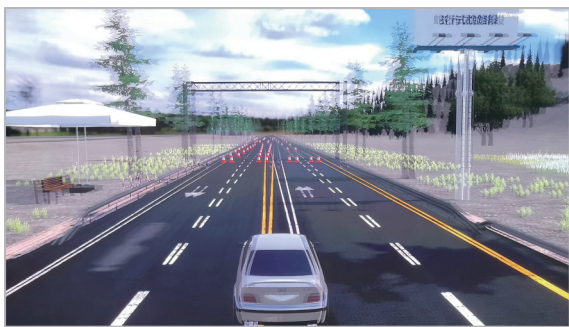


图6 主动立体显示
Fig. 6 Active stereoscopic display

3 虚拟仿真系统硬件在环实验

3.1 蛇行实验

本文通过汽车操纵稳定性实验中的蛇行实验,

来检验虚拟仿真系统的性能和实验效果。根据蛇行实验要求,驾驶员应具有较丰富的驾驶经验。在正式实验之前,按图5所示路线,练习5个往返。在进入实验路段前,保持以35 km/h的车速直线行驶,然后再蛇行通过实验路段并确保不碰倒标桩,此作为一次有效实验并记录该过程中的方向盘转角、车身侧倾角、横摆角速度等实验数据。为检验实验数据的可靠性,本文分别设计了使用CarSim内部驾驶员模型的路径跟随实验,和应用虚拟仿真系统的真人驾驶员硬件在环实验,实验实况如图7所示。



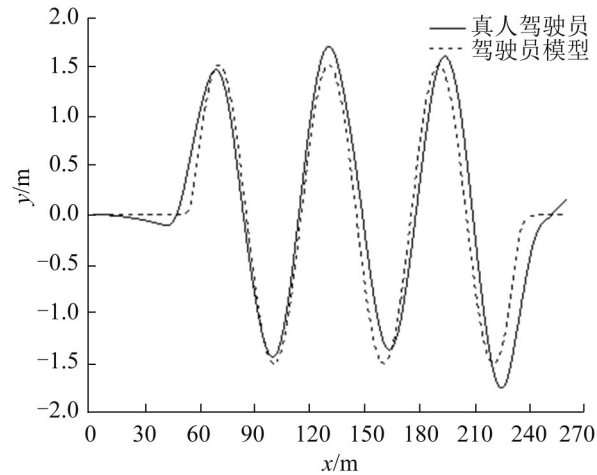
图7 实验实况
Fig. 7 Experiment scene

3.2 实验结果分析

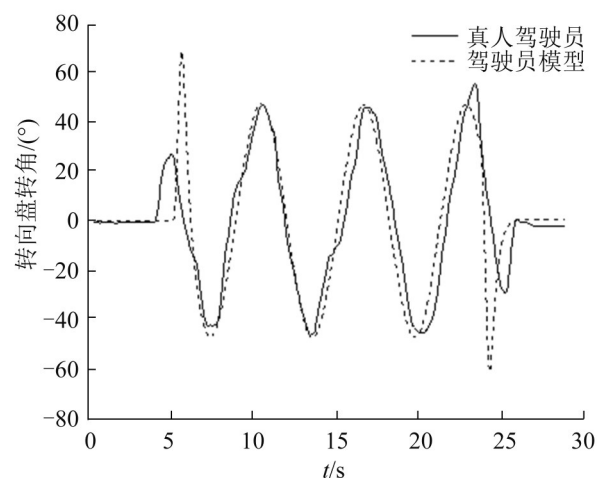
根据2次记录的实验数据和驾驶员的反馈,对系统进行主客观评价^[18-19]。其中实验数据选取车辆行驶路径、转向盘转角、横摆角速度、车身侧倾角和侧向加速度进行对比,仿真曲线如图8所示。

从图8(a)中可以得出,由于CarSim驾驶员模型采用路径跟随的方式控制车辆行驶,而路径是根据标桩位置和车宽通过正弦函数设计出的,因此车辆行驶路径看上去较为匀称平滑。真人驾驶员则根据自身驾驶习惯和对路况的判断来控制车辆,其驶过每个标桩时的路径略有变化,但与正弦函数路径相差不大,虚拟车辆可以合理地驶过蛇行路段。同时从图8(b)~(e)中可以看出,除去进

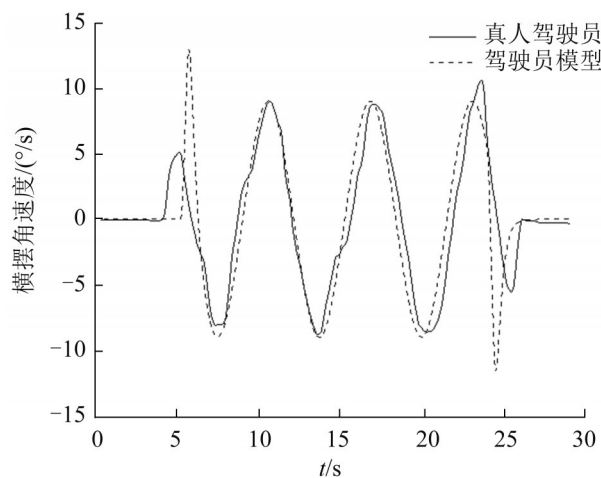
入和离开实验路段时驾驶员的动作有所不同外，在过桩时的各项数据最大值基本一致。



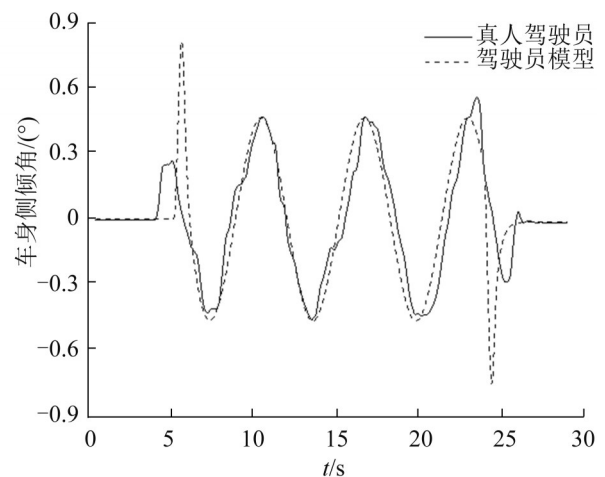
(a) 车辆行驶路径



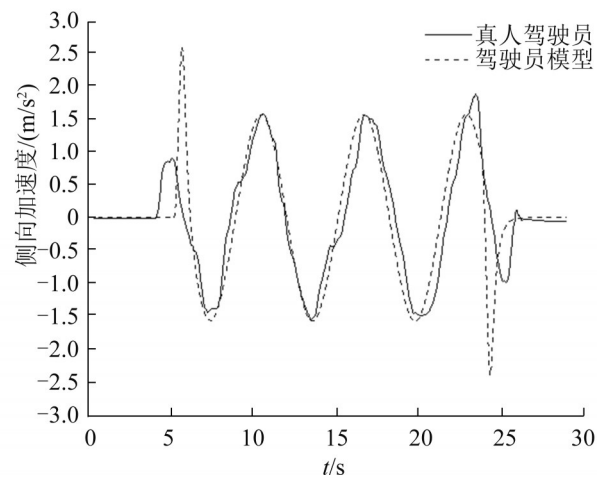
(b) 转向盘转角



(c) 横摆角速度



(d) 车身侧倾角



(e) 侧向加速度

图8 仿真结果曲线

Fig. 8 Simulation result curve

根据汽车稳定性实验国标要求对实验数据作进一步处理，其中实验车速按式(1)确定：

$$v = (18L)/t \quad (1)$$

式中： L 为标桩间距； t 为通过有效标桩的时间。

在去掉车辆过第一个和最后一个标桩时波动较大的数据后，取过中间4个标桩的数据计算平均转向盘转角：

$$\bar{\delta}_{sw} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |\delta_i| \quad (2)$$

式中： $\bar{\delta}_{sw}$ 为平均转向盘转角； δ_i 为在有效标桩区间内转向盘曲线的峰值。用同样的方法算出平均横摆角速度、平均车身侧倾角和平均侧向加速度，如表2所示。

表2 实验数据处理结果
Table 2 Experiment data processing results

参数	驾驶员模型	真人驾驶员
标桩间距离/m	30	30
基准车速/(km/h)	34.82	34.84
平均转向盘转角/(°)	46.86	45.58
平均横摆角速度((°)/s)	9.02	8.77
平均车身侧倾角/(°)	0.468	0.460
平均侧向加速度/(m/s ²)	1.580	1.550

从表2中可以看出,驾驶员模型和真人驾驶员在蛇行实验中的数据十分相近,其中平均转向盘转角相差1.28°,平均横摆角速度相差0.25°/s,平均车身侧倾角相差0.008°,平均侧向加速度相差0.03 m/s²,误差在允许范围内。综上所述,在本文虚拟仿真系统上进行的硬件在环实验可以得到与纯软件仿真相近的结果,车辆模型性能参数在合理区间内,实验数据具有较高的参考价值,实验过程中车辆整体可控,未发生明显的侧滑现象。

主观感受方面,视景显示模块运行流畅,场景构建和光照渲染逼真,主动立体效果代入感较强;系统响应迅速、车辆模型操控手感较好;方向盘具有一定的回正力矩和路感反馈力矩;六自由度平台运行稳定体感反馈真实,沉浸式感受较强。

4 结论

本文开发了一套车辆动力学虚拟仿真系统,将CarSim和六自由度平台应用其中,并应用了虚拟现实技术中的主动立体显示技术,在提高系统专业性的同时,也增加了系统的沉浸式感受。为了验证本虚拟仿真系统的性能,本文参照汽车操纵稳定性国标设计并完成了蛇行实验。实验数据表明:CarSim车辆动力学模型构建合理,虚拟车辆可以根据驾驶员的意志很好的通过标桩,六自由度平台可及时做出相应的姿态变化,实验数据准确可靠。在实验中系统运行稳定,体感反馈逼真,实时性较好,基本满足车辆动力学虚拟仿真实验的要求,在实验教学和汽车设计开发中具有

一定意义。

参考文献:

- [1] 唐克双,王亚晴,王鹏飞.汽车驾驶模拟器在交通研究中的应用[J].城市交通,2011,9(6):78-85.
Tang Keshuang, Wang Yaqing, Wang Pengfei. Driving Simulator in Transportation Research[J]. Urban Transport of China, 2011, 9(6): 78-85.
- [2] 刘东波,缪小冬,王长群,等.汽车驾驶模拟器及其关键技术研究现状[J].公路与汽运,2010(5):53-58.
Liu Dongbo, Miao Xiaodong, Wang Changqun, et al. Research Status of Vehicle Driving Simulator and Key Technologies[J]. Highways & Automotive Applications, 2010(5): 53-58.
- [3] 齐成华.智能汽车驾驶模拟器在汽车驾驶教学中的应用意义[J].智能网联汽车,2018(20):44-45.
Qi Chenghua. Application Significance of Intelligent Car Driving Simulator in Automobile Driving Teaching[J]. Automobile Applied Technology, 2018(20): 44-45.
- [4] 常鑫,李海舰,荣建,等.基于驾驶模拟器的车联网环境搭建及对驾驶行为的影响[J].科学技术与工程,2019,19(15):330-335.
Chang Xin, Li Haijian, Rong Jian, et al. Connected Vehicle Environment Simulation Platform Construction and Its Impact on Driving Behavior Based on Driving Simulator[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(15): 330-335.
- [5] Melanie K, Edmund W, Michael F, et al. The Ability of Young, Middle-Aged and Older Drivers to Inhibit Visual and Auditory Distraction in a Driving Simulator Task[J]. Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour(S1369-8478), 2020, 68: 272-284.
- [6] Milleville Pennel I, Marquez S. Comparison Between Elderly and Young Drivers' Performances on a Driving Simulator and Self-Assessment of Their Driving Attitudes and Mastery[J]. Accident Analysis & Prevention (S0001-4575), 2020, 135: 105317.
- [7] 张俊友,焦学健,柴山.基于虚拟现实的汽车驾驶模拟器设计与实现[J].机械设计与制造,2013(4):39-41.
Zhang Junyou, Jiao Xuejian, Chai Shang. Design and Realization of Driving Simulator System Based on Virtual Reality[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(4): 39-41.
- [8] Marteaux F, Saad C. Diesel Engine Combustion Modeling for Hardware in the Loop Applications: Effects of Ignition Delay Time Model[J]. Energy(S0360-5442), 2013, 57(8): 641-652.
- [9] 杨果.基于虚拟现实的驾驶模拟仿真系统开发[D].重庆:重庆大学,2016.

- Yang Guo. Development of Driving Simulation System Based on Virtual Reality[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [10] 张玉洁. 基于CarSim的电动助力转向系统仿真与硬件在环验证[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- Zhang Yujie. Electric Power Steering System Simulation and Hardware in Loop Simulation Based on CarSim[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [11] 王慧然, 黄鹤, 罗家亮. 基于LabView-RT和CarSim的EPS硬件在环实验台开发与仿真研究[J]. 合肥工业大学学报, 2017, 40(7): 877-882.
- Wang Huiran, Huang He, Luo Jialiang. Development and Simulation Research of EPS Hardware-in-Loop Experiment Platform Based on LabView-RT and CarSim [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2017, 40 (7): 877-882.
- [12] 宋安兴. 汽车稳定性控制驾驶模拟仿真系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- Song Anxing. Study on Driving Simulation System for Vehicle Stability Control[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [13] 赵雪. 汽车半实物模拟驾驶系统设计[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2017.
- Zhao Xue. The Design of Semi Physical Simulation Driving System for Automobile[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2017.
- [14] 谢潇. 基于虚拟现实的六自由度驾驶模拟仿真系统开发[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- Xie Xiao. Development of Driving Simulation System with Six Degree of Freedom Platform Based on Virtual Reality[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [15] 孙荣强, 陈焕明, 刘大维. 硬件在环汽车驾驶模拟器系统开发[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2019, 34(2): 85-89.
- Sun Rongqiang, Chen Huanming, Liu Dawei. Development of Hardware in Loop Vehicle Driving Simulator System[J]. Journal of Qingdao University (E&T), 2019, 34(2): 85-89.
- [16] 胡淦. 基于洗出滤波算法的六自由度汽车驾驶模拟实验平台设计开发[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- Hu Gan. Design and Development of 6-DOF Driving Simulation Experiment Platform Based on Washout Filter Algorithm[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 汽车操纵稳定性实验方法: GB/T 6323-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Controllability and Stability Experiment Procedure for Automobile: GB/T 6323-2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [18] 张凯旋, 徐霖. 汽车操纵稳定性实验与评价标准研究[J]. 北京汽车, 2021(1): 1-5.
- Zhang Kaixuan, Xu Lin. Research on Vehicle Handling Stability Experiment and Evaluation Standard[J]. Beijing Automotive Engineering, 2021(1): 1-5.
- [19] 徐亮, 石娟. 汽车驾驶模拟器主客观评价方法的应用研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(10): 1420-1427.
- Xu Liang, Shi Juan. Application Research on Subjective and Objective Evaluation Method of Vehicle Driving Simulator[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(10): 1420-1427.