

基于 Vortex 与 Vega Prime 的车辆模拟器 动力学与视景仿真*

罗竹辉, 周晓军, 魏燕定

(浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州, 310027)

摘要 由于 Vortex 软件在车辆驾驶模拟器动力学与视景仿真中存在虚拟路面离散化程度与建模难度、视景图像渲染速率之间的矛盾, 提出了联合 Vortex 和 Vega Prime 进行车辆驾驶模拟器动力学与视景仿真方法。建立了同一路面、不同离散程度的三维模型以供 Vortex 和 Vega Prime 分别调用, Vortex 进行车辆动力学实时解算, Vega Prime 进行视景图像特效渲染, 利用 HLA 实现 Vortex 和 Vega Prime 仿真例程的同步和数据交互。仿真结果表明, 该方法在提高路面离散化程度的同时, 不影响场景建模难度和图像的渲染速率, 满足实时性和交互性的要求, 能较好地完成车辆驾驶模拟器动力学与视景仿真。

关键词 车辆驾驶模拟器; 动力学; 视景; Vortex; Vega Prime

中图分类号 TP391.9

引言

驾驶模拟器是用于汽车产品开发、驾驶培训、人车操纵稳定性闭环系统研究的一种重要工具^[1-3]。车辆实时动力学模型是驾驶模拟器的核心, 它根据驾驶员对车辆的操作信息, 实时计算车辆运动状态, 进而控制和协调驾驶模拟器的运动系统、视景系统和声响系统等^[4]。Vortex 是用于地面车辆、机器人等多体系统动力学建模的实时交互式动力学仿真引擎, 含有轮式、履带式车辆专用模块。其动力学输出可作为模拟器运动系统或作动器的精确驱动信号, 同时 Vortex 内嵌了先进的图形引擎——一种开源的先进三维仿真软件 (open scene graph, 简称 OSG), 可以实现简单的桌面显示、多通道显示和沉浸式渲染等, 是较为理想的车辆驾驶模拟器动力学解算和视景渲染软件, 已成功应用于模拟操作训练和机器人远程控制仿真等, 如 NASA 开发的火星探测器三维仿真平台^[5-7]。

路面是车辆最主要的外界激励, Vortex 仿真所用的虚拟路面是将实际车辆行驶的路面离散化而成的三维网格模型; 因此, 离散化程度越高, 对实际路面的模拟越准确, 但是建立的路面三维模型多边形 (顶点) 个数会增多, 这样会增加三维场景的

建模难度, 同时影响视景图像渲染速率。当模型多边形达到一定数值时, 驾驶模拟仿真便达不到交互性、实时性的要求^[8-9]。

针对上述问题, 笔者提出联合 Vortex 和 Vega Prime 的车辆驾驶模拟器动力学与视景仿真方法。Vega Prime 是美国 MPI 公司推出的主要用于实时视景仿真、声音仿真等虚拟现实软件^[10], 与 OSG 一样存在顶点数目与渲染速率之间的矛盾, 因此建立了同一路面、不同离散程度三维模型供 Vortex 和 Vega Prime 分别调用。Vortex 只进行动力学解算, 解算出的车辆状态数据通过高层体系结构 (high level architecture, 简称 HLA) 发送给 Vega Prime 进行图像、特效渲染, 完成车辆驾驶模拟器视景仿真。

1 仿真原理

Vortex 与 Vega Prime 车辆驾驶模拟器动力学与视景仿真方法原理如图 1 所示。驾驶员通过操纵机构对虚拟车辆进行操纵, Vortex 根据采集到的操纵信号, 载入的高离散程度路面地形和车辆当前状态进行车辆动力学解算。解算出来的车辆状态参数 (车辆位置, 姿态和各车轮位置姿态等) 通过 HLA 传递给 Vega Prime。Vega Prime 依据接收到得的

数据对车辆状态、低离散程度路面地形场景以及特效等进行渲染,将视景音效等反馈给驾驶员。同时,Vortex 解算出的数据可以驱动模拟器和作动器,形成运动感觉反馈给驾驶员,视景、运动感觉和音效等一起为驾驶员提供逼真的模拟驾驶环境。

Vortex 与 Vega Prime 联合仿真时间推进如图 2(a)所示。Vortex 和 Vega Prime 仿真例程作为 HLA 的两个联邦成员分别在两台计算机上运行,在第 K 步仿真时间内,Vortex 接收驾驶员操纵信息进行动力学解算,通过 HLA 将车辆状态参数传递给 Vega Prime 计算机。Vega Prime 根据第 $K-1$ 步接收到的车辆状态参数进行车辆状态更新、场景和特效渲染;HLA 等待所有联邦成员仿真例程均结束后才推进到第 $K+1$ 步仿真,实现各仿真例程的同步。在每一步的仿真过程中,Vortex 计算机只需接收驾驶员操纵信息、进行动力学解算和数据发送,不需要进行图像渲染,极大地提高了 Vortex 仿真例程的运行效率,同时充分发挥了 Vega Prime 的视景渲染能力。

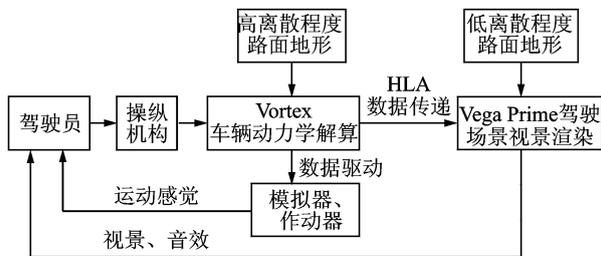


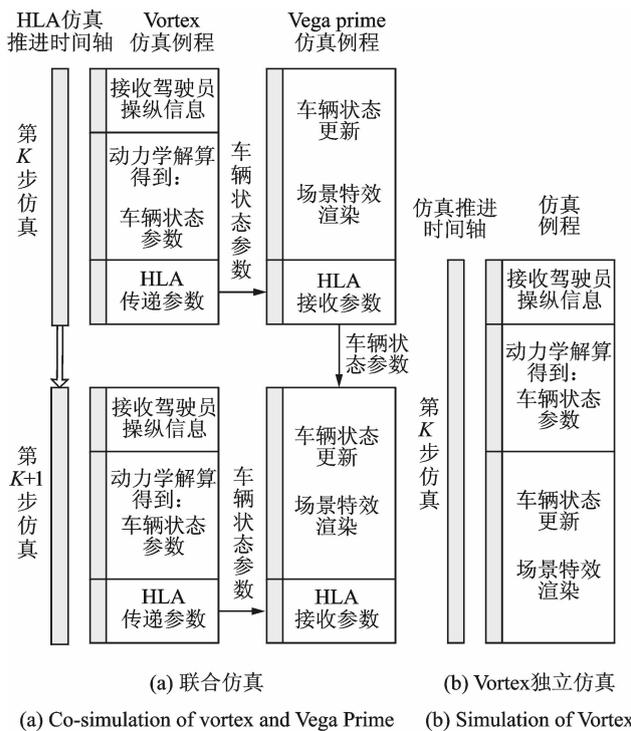
图1 Vortex 与 Vega Prime 动力学与视景仿真原理

Fig.1 Schematic of co-simulation of Vortex and Vega Prime

Vortex 独立进行仿真时,如图 2(b)所示,在第 K 步仿真时间内,仿真例程不仅需要完成车辆动力学解算,还需要进行车辆、场景视景状态的更新和特效的渲染。由于联合仿真和独立仿真所消耗的时间主要为动力学解算和场景渲染,因此 Vortex 独立仿真的仿真步长比联合仿真要长。联合仿真第 $K+1$ 步渲染的是第 K 步传递过来的车辆状态参数,由于 HLA 传递数据速度较快,与独立仿真一致,联合仿真中视景渲染一般滞后于驾驶员操作一个动力学解算时间长度,考虑到仿真步长的设置一般大于 $1/24$ s,人眼不会感知到这个滞后时间。

2 路面模型离散化程度及建模

图 3 为同一正弦路面不同离散程度(纵向采样



(a) 联合仿真 (b) Vortex 独立仿真

(a) Co-simulation of vortex and Vega Prime (b) Simulation of Vortex

图 2 联合仿真与独立仿真时间推进

Fig.2 Time advance of co-simulation and Vortex simulation

长度分别为 1 m 和 4 m)的虚拟路面网格模型的对比,显然离散化程度越高,对路面的模拟更加准确。

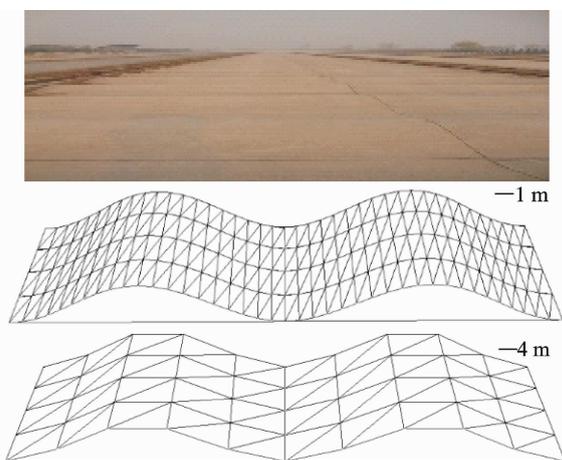


图 3 不同分辨率正弦路面三维模型

Fig.3 3-D sine road surface model with different resolution

对于随机激励路面,以离散化采样长度 0.1 m 为例^[11],面积为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的的驾驶试验场地三角形个数为 200 万个,如果直接将该含 200 万个三角形的三维模型作为车辆模拟器动力学激励路面和视景场景,则存在如下问题:a. 在一定的计算机硬

件条件下,对于常用的虚拟场景三维建模软件,当三角形个数超过一定数值(如 Creator 一般为 20 万)后,建模操作如旋转、缩放、切割、纹理贴图和保存文件等将会非常困难,如果将同一块场地分块建模,必须考虑到块与块之间的边界融合问题、场景的协调问题,块数越多,建模难度越大^[12]; b. 如果使用细节居次(levels of detail,简称 LOD)技术,增加建模难度的同时增加了 Vortex 检测碰撞地形的时间;c. 三角形越多,图像渲染速率可能会低于视景仿真要求的 24 Hz。因此,必须建立两种不同离散程度地形,作为动力学激励的高离散程度路面只需通过数据直接生成三维模型进行简单的处理,作为视景渲染的路面场景则用低离散程度模型,这样便于场景的建模和美化及添加更多的场景模型,提高驾驶场地视景显示的逼真度。

不同离散程度路面建模流程如图 4 所示。a. 路面高程数据的获取既可以利用已有的数据(如测取到的路面不平度),也可以根据路面的数学模型(如正弦路面、随机激励等级路面)编制程序生成数据;b. 根据实际需要确定所需建立路面的离散程度,如用于汽车产品开发和人车闭环系统研究的驾驶模拟器所用的路面,一般采样长度不大于 0.1 m,而用于驾驶培训的则可以稍大一点,同时需考虑计算机的硬件能力;c. 利用高程数据建立不同离散程度三维模型,建立方法有 Polymesh, Delaunay, 规划三角网(triangulated irregular network,简称 TIN)等,其中低离散程度模型还需进一步处理(如纹理贴图等)已增加模型的逼真度;d. 建立路面外模型,如花草树木、路障等; e. 将建立的模型综合在一起,转换成 Vortex 和 Vega Prime 适应的格式,即完成了同一

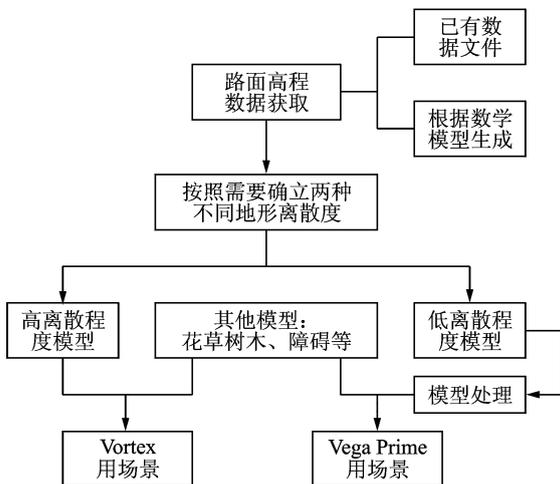


图 4 不同离散程度路面建模流程

Fig. 4 Flow of modeling of different resolution 3-D road

场景、不同离散程度路面模型的建立。图 5 即为采用 Polymesh 法建立的不同分辨率 C 级随机路面三维模型局部投影图。

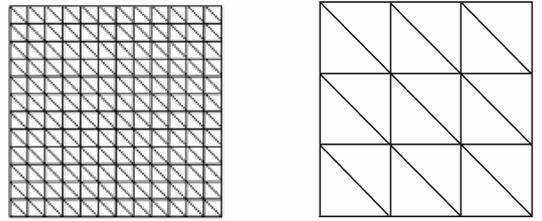


图 5 Polymesh 法建模原理

Fig. 5 Modeling with Polymesh

值得注意的是,如果高、低离散程度模型的分辨率之间差别过大,会导致动力学感觉和视野场景不协调;因此选取不同分辨率建模时,应根据实际场景的特点和所应用的车辆模拟器的需求而定。例如,对于高等级水泥硬路面,由于路面较为粗糙,其高、低离散程度模型的分辨率差别不宜过大。若地面为草地、泥土等,如果使用了较为逼真的纹理,则高、低离散程度模型的分辨率差别可稍大一点。

3 仿真实例

笔者以 Vortex 软件 4.1.2 版本自带的多体动力学车辆模型 Audi A6 为例进行车辆动力学和视景仿真,仿真效果如图 6,7 所示。Vortex 和 Vega Prime 仿真例程均在 HP 图形工作站 XW9400 上进行。Vortex 计算机进行车辆动力学解算和车辆状态的显示。Vega Prime 计算机利用桌面显示进行场景、特效的渲染,驾驶员操纵装置采用 Saitek R660 力反馈方向盘、油门刹车模拟系统。试验结果显示,Vortex 能正常接收驾驶员操纵动作,驾驶员未感觉车辆姿态在场景中出现异常,能很好地完成



图 6 仿真效果图

Fig. 6 Computer simulation with co-simulation

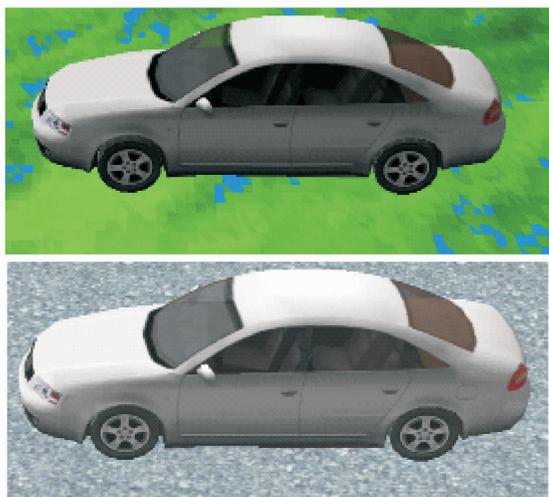


图7 Vortex与Vega Prime中同一时刻车辆状态

Fig. 7 Vehicle state in Vortex and Vega Prime

车辆驾驶行为。

对同一场景不同离散程度三维模型,将车辆放置在同一位置进行驾驶操作时(联合仿真中Vega Prime所用三维模型多边形个数为 32×10^4 个),Vortex与Vega Prime联合仿真与Vortex独立仿真推进速率如表1所示。由表1可知,联合仿真均按设定的30 Hz推进,而独立仿真随着多边形个数的增多,仿真速率逐渐降低,当三角形个数为 130×10^4 个时,仿真速率低于24 Hz,不能满足实时性、交互性要求。

表1 多边形个数和渲染速度关系

Tab. 1 Relationship between the number of polygons and rendering speed

多边形个数/ 10^4 个	联合仿真速率/Hz	独立仿真速率/Hz
32	30	30
64	30	30
130	30	16
196	30	12
260	30	10
520	30	6

车辆以60 km/h速度行驶在C级随机水泥硬路面上,路面采样长度分别为0.1,0.2,0.4 m。车辆质心垂向加速度功率谱密度如图8所示,图中: f 为归一化频率($0 \sim \pi$); $G_a(f)$ 为加速度功率谱密度。由图可知:同一等级路面离散化程度越高,垂向加速度功率谱密度高频部分幅值越大,这与实际情况相符。对于随机路面,采样长度越小,路面越粗糙,车辆垂向高频振动幅度越大。因此,路面离散化程度

越高,Vortex解算出来驱动驾驶模拟器运动系统的数据包含的频率成分越丰富。

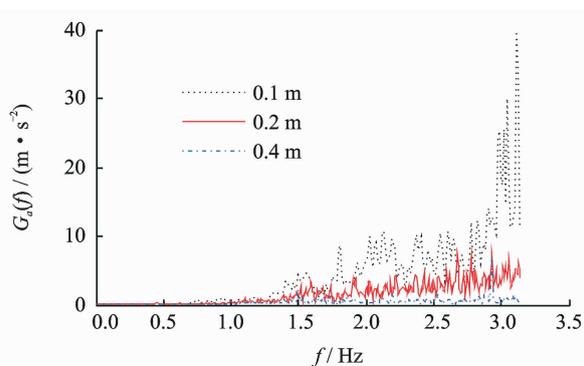


图8 车辆垂向加速度功率谱密度

Fig. 8 Power spectral density of vehicle vertical acceleration

4 结束语

利用Vortex和Vega Prime进行车辆驾驶模拟器动力学和视景仿真,建立了同一场景、不同离散程度路面模型。Vortex进行动力学解算,Vega Prime进行图像渲染,HLA进行同步和数据交互,能很好地完成车辆驾驶行为,仿真均能在设定速率下进行,满足车辆驾驶模拟器交互性、实时性的要求。该方法在增加路面激励模拟准确度的同时,不增加建模难度,为模拟器或作动器提供更为丰富的驱动信号,同时可利用Vega Prime加入天气特效、声效、虚拟仪表等以增强驾驶模拟器场景交互的真实感。

参 考 文 献

- [1] 李勋祥,陈定方. 分布式汽车驾驶交互仿真系统的实现[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2008,20(1): 129-137.
Li Xunxiang, Chen Dingfang. An implementation of distributed interactive driving simulation system[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics,2008,20(1): 129-137. (in Chinese)
- [2] 熊坚,曾纪国,丁立,等. 面向道路交通过的汽车驾驶模拟器的研究及应用[J]. 中国公路学报,2002,15(2): 117-123.
Xiong Jian, Zeng Jiguo, Ding Li, et al. Application and research of vehicle driving simulator for road traffic problems [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002,15(2): 117-123. (in Chinese)
- [3] 王云超,高秀华,邵明亮. 多轴车辆操纵稳定性试验

- [J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4): 527-530.
- Wang Yunchao, Gao Xiuhua, Shao Mingliang. Vehicle handling and stability test of multi-axle vehicle [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4): 527-530. (in Chinese)
- [4] 郭孔辉, 丁海涛, 宗长富. 人-车闭环操纵性评价与优化的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 102-107.
- Guo Konghui, Ding Haitao, Zong Changfu. Research progress about evaluation and optimization of human-vehicle closed-loop system for handling stability [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 102-107. (in Chinese)
- [5] Melchior N A, Kwak J Y. Particle RRT for path planning in very terrain [C] // NASA Science Technology Conference. Roma, Italy: IEEE, 2007: 1617-1624.
- [6] 王哲, 高峰, 陈志伟, 等. 基于地面力学的月面巡视探测器动力学实时交互仿真研究[J]. 振动与冲击, 2011, 40(1): 172-176.
- Wang Zhe, Gao Feng, Chen Zhiwei, et al. Real-time interactive dynamic simulation for a lunar rover based on terramechanics [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 40(1): 172-176. (in Chinese)
- [7] Servin M, Backman A, Bodin K, et al. Visual simulation of machine concepts for forest biomass harvesting [C] // 10th International Conference on Virtual Reality. Bergsten, Sweden; Department of Forest Ecology and Management, 2008: 1-5.
- [8] Floriani L D, Marzano P, Popa E. Multi resolution models for topographic surface description [J]. The Visual Computer, 1996, 12(7): 317-345.
- [9] 王宏武, 董士海. 一种与视点相关的动态多分辨率地形模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(8): 575-579.
- Wang Hongwu, Dong Shihai. A view-dependent dynamic multi-resolution terrain model [J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2000, 12(8): 575-579. (in Chinese)
- [10] 王云翔, 赵经成, 付战平, 等. 基于 Vega Prime 的视景仿真驱动技术研究[J]. 微型计算机信息, 2008, 24(3): 214-216.
- Wang Yunxiang, Zhao Jingcheng, Fu Zhanping, et al. Research of scene simulation drive technique based on vega prime [J]. Microcomputer Information, 2008, 24(3): 214-216. (in Chinese)
- [11] 吴参, 王维锐, 陈颖, 等. 三维路面谱的仿真建模与验证 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43(10): 1935-1938.
- Wu Can, Wang Weirui, Chen Ying, et al. Simulation and validation of three-dimensional road surface spectrum [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 43(10): 1935-1938. (in Chinese)
- [12] 彭光雷, 郭茂耘, 柴毅. 基于 Multigen Creator 的三维地形应用实现[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(4): 115-119.
- Peng Guanglei, Guo Maoyun, Chai Yi. Implementation of three-dimensional terrain based on multiGen creator [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(4): 115-119. (in Chinese)



第一作者简介: 罗竹辉, 男, 1987年4月生, 博士研究生。主要研究方向为车辆动力学、虚拟现实、车辆模拟器和机电一体化。曾发表《随机激励三维路面空间域模型建模与仿真》(《振动与冲击》2012年第31卷第21期)等论文。
E-mail: Luozhuhui@126.com

