

文章编号:1671-1637(2015)03-0118-09

车路协同系统的视景仿真模型

上官伟^{1,2,3}, 郭弘倩¹, 刘朋慧¹, 蔡伯根¹, 王 剑^{1,2}

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044; 3. 伦敦大学学院 交通技术研究中心, 伦敦 WC1E 6BT)

摘要:在车路协同系统仿真的基础上,以局部交通网络的实时交通仿真为例,建立了车路协同系统视景仿真模型库,确立了视景仿真系统的框架体系结构。将视景仿真集成为整个仿真系统的一个联邦成员,建立了车车信息交互、车路信息交互的典型视景仿真功能模型。使用 LOD 模型简化技术对视景仿真功能模型进行分解,生成了 5 个不同精细程度的 LOD 模型。采用 DOF、LOD、Switch 功能化节点,从节点结构上优化了典型应用场景中的交叉口信号灯、车辆运动等相关模型,建立了一套类似模型几何形状的层级节点结构。构建了车路协同系统可视化视景仿真平台,包括 HLA/RTI 信息交互与控制模块、车路协同数据处理模块、信息交互模块、模型引导控制模块、视角动态切换模块与模型状态参数动态显示模块。采用建模优化相关技术,对典型交通场景进行了视景仿真。仿真结果表明:通过 LOD 模型简化技术,模型简化率最高可达 95.5%,内存占用减少 86.3%;通过视景仿真方法的使用,提高了渲染效率与系统仿真效率,车路协同典型交通场景验证了仿真方法的可行性。

关键词:智能交通系统;车路协同系统;HLA;RTI;信息交互;节点优化;视景仿真

中图分类号:U495

文献标志码:A

Visual simulation model of CVIS

SHANGGUAN Wei^{1,2,3}, GUO Hong-qian¹, LIU Peng-hui¹, CAI Bai-gen¹, WANG Jian^{1,2}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Centre for Transport Studies, University College London, London WC1E 6BT, UK)

Abstract: Based on the simulation of cooperative vehicle-infrastructure system(CVIS), the real-time traffic simulation of local region traffic network was taken as an example, the visual simulation model library of CVIS was constructed, and the infrastructure and framework of visual simulation system were established. Visual simulation was integrated as a federate member of whole simulation system, and the typical visual simulation functional models for vehicle-vehicle and vehicle-infrastructure information interactions were built. The visual simulation functional models were divided by using LOD reduction technique, and 5 LOD models with different detail degrees were built. By using the functional nodes of DOF, LOD and switch, the related models like intersection signal lamp and vehicles movement in the typical application scenarios were optimized based on node structure, and a similar model geometry node hierarchy structure was constructed. CVIS visual simulation platform including HLA/RTI information interaction and

收稿日期:2014-12-27

基金项目:国家 863 计划项目(2011AA110405);国家自然科学基金项目(61273089, U1334211);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2012JBZ009, 2013JBM007);北京高等学校“青年英才计划”项目(YETP0538)

作者简介:上官伟(1979-),男,陕西乾县人,北京交通大学副教授,工学博士,从事智能交通系统研究。

control module, vehicle-infrastructure cooperative data processing module, information interaction module, model guidance and control module, view angle switching module and dynamic display module of model status parameters were constructed. Typical traffic scenario was visually simulated by using modeling optimization technique. Simulation result indicates that by using LOD reduction technique, the model reduction ratio reaches 95.5%, and memory occupancy ratio decreases by 86.3%. By using visual simulation method, rendering efficiency is improved, the efficiency of system simulation is accelerated, and the feasibility of simulation method is verified at typical cooperative vehicle infrastructure scenario. 1 tab, 12 figs, 21 refs.

Key words: intelligent transportation system; cooperative vehicle-infrastructure system; high-level architecture; run time infrastructure; information interaction; node optimization; visual simulation

Author resume: SHANGGUAN Wei(1979-), male, associate professor, PhD, +86-10-51687111, wshg@bjtu.edu.cn.

0 引言

车路协同系统是一种功能复杂的大系统,进行系统功能仿真测试是系统投入运营前的必备环节。视景仿真技术具有现场测试所无法比拟的优势,因此,有必要研究基于虚拟的视景仿真方法,针对车路协同运行控制系统的功能测试需求,建立可视化的仿真平台以支持系统的全面、高效、可重复测试。

目前,国内外学者对视景仿真的研究取得了一定进展。在仿真系统研究方面,早在1983年,美国就实施了SIMNET计划,通过计算机网络将分布于美国和德国的11个基地连接起来,用于各种复杂战术任务的综合训练^[1];美国阿姆斯特朗实验室开发完成的DEPTH系统采用虚拟现实技术实现对飞机的维修性和保障性分析^[2];美国的自动虚拟环境实验室CAVE是一个长、宽、高均约为3 m,配备了多个反射镜、投影仪及三维音视频设备的实验室,利用全息图创造虚拟现实环境,模拟人的视觉、听觉和触觉,是一个典型的虚拟现实系统^[3];Jönsson等利用虚拟现实技术开发了虚拟数控机床仿真系统^[4];Popa等利用虚拟现实技术开发了虚拟医学穿刺仿真系统^[5];赵沁平研究了如何在虚拟环境中表征对象的物理特性,设计了分布式虚拟现实网络,开发了飞行模拟训练系统^[6];丁浩杰等采用虚拟现实技术,开发了汽车驾驶仿真系统^[7];李华兵等开发了用于对战环境、场景进行快速仿真模拟的虚拟现实系统^[8];殷宏等通过对战场环境的研究,建立了基于MultiGen Creator/VEGA软件的战场视景仿真系统^[9];陆铁坚等研究了以扫描法和参数化特征造型为桥梁模型的主要造型方法,建立了桥梁的三维视

景仿真系统^[10];郭凤香等应用虚拟视景生成系统建立了路段三维静态与动态模型,用于评价山区公路交通安全保障措施^[11]。

在模型研究方面,国内外学者针对模型简化等相关问题开展了一系列研究。Muralidharan等进行了基于宏观连接点元胞传输模型的高速公路交通流仿真,讨论了元胞传输模型的交通仿真问题^[12];Hsin等提出在智能高速公路交通系统体系结构中实现商业交通模拟器MODSIM和通信模拟器COMNET的集成系统,并采用状态机对宏观交通流与通信特征进行建模^[13];Hamann在研究三维网格化的基础上,给出了一种基于三角形移去的模型简化方法^[14];Brodsky等基于顶点聚类的方法,实现了一个并行模型简化算法^[15];杨帆等通过建立单车道微观交通流模型,对车路协同系统进行研究,提高了通行效率^[16];王蕊等提出了一种基于自组织特征映射神经网络的三维模型区域分割算法,对模型进行区域分割与简化^[17];刘博等构建了列车运行和事故场景模型,提出了完整的视景建模方法,通过纹理、节点等组织建模方法建立了列车的三维仿真模型^[18];郑海春等研究了MultiGen Creator建模的效率,依据层次细节(Level of Details, LOD)、冗余多边形删除与平台融合优化等技术对作战坦克模型进行优化,降低了模型复杂度,缩短了建模时间,增强了模型的真实感^[19];刘晓平等通过对大规模地形建模的实践,提出了一种基于四叉树网格剖分的并行简化算法,对大规模地形进行LOD模型优化与改进,通过并行性达到提高算法效率的目的。除上述方法外,还可利用模型实例化、模型外部引用、纹理贴图、冗余多边形删除、Switch节点转换、自由度

(Degree of Freedom, DOF)节点设置等多种模型组织与优化方法进行研究^[20-21]。

从已有的研究成果来看,视景仿真作为一种前沿科技,在相关行业已取得成功应用并积累了一定实践经验,但当前中国较为成功或完备的公路智能交通行业的可视化仿真案例较为少见,直接面向车路协同系统的成果更为少见,使得车路协同系统的仿真局限在图表与数据层面,缺乏一个实时可视化的图形展示方法,大大限制了智能交通的发展。

本文基于车路协同系统仿真平台,研究了视景仿真方法在车路协同系统中的应用,通过三维建模软件 MultiGen Creator 构建车路协同系统视景仿真所需的路侧设备、信号灯与信息交互行为等相关场景仿真模型,并对建立的模型进行结构优化和简化,减少内存占用,提高渲染效率,并通过编程实现场景的综合仿真管理,建立车路协同系统可视化视景仿真平台,并对模型进行评估。

1 车路协同仿真系统视景仿真

视景仿真依托于车路协同仿真系统,通过与高层体系架构(High-Level Architecture, HLA)提供的运行时间支撑框架(Run Time Infrastructure, RTI)仿真支撑环境建立与外部信息的传输通道,承担系统的可视化场景展现,是车路协同系统仿真的一个重要组成部分。

1.1 视景仿真平台与车路协同系统的关系

视景仿真平台定义为一个单独的联邦模块加入到车路协同仿真的大系统当中,通过与系统内部其他联邦成员之间进行信息交换获取实时的仿真状态信息,并予以实时的可视化仿真显示。视景仿真平台与车路协同系统的关系见图 1。

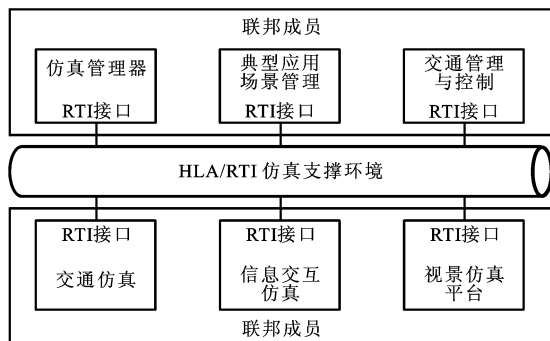


图 1 视景仿真平台与车路协同系统的关系

Fig. 1 Relationship between visual simulation platform and CVIS

1.2 视景仿真平台模型组织方法

视景仿真平台通过 RTI 仿真支撑环境接收其他联邦成员发送的车路协同系统仿真信息,通过内部的数据处理、转换与执行,将结果反馈至 RTI 供其他联邦成员参考。

根据 OpenFlight 模型的结构特点,利用 MultiGen Creator 建模软件提供的功能节点对模型进行构建与优化,其功能类节点主要有光照节点、DOF 节点、LOD 节点、Switch 节点、实例化节点及外部引用节点等,用于改善模型的属性和层次结构。在仿真过程中合理设置功能节点,如利用 DOF 节点模拟车辆内部的仪表盘与方向盘,可使其在限定的范围内运动。

车路协同系统中的视景仿真模型按分辨率的不同进行层次建模,形成车路协同系统视景仿真模型库,见图 2。在后期的仿真过程中,通过实时的动态调入,加载相应的视景仿真模型到仿真场景中,利用 VEGA 虚拟仿真管理软件,在后台对仿真场景中的模型进行管理和控制,实现车路协同系统的视景仿真效果。

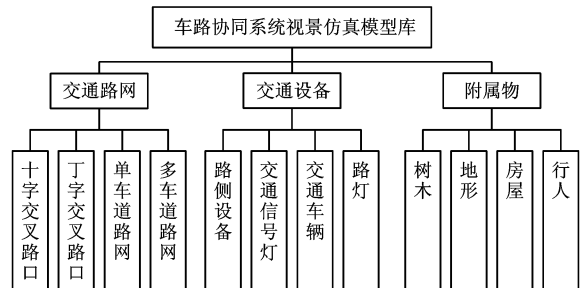


图 2 视景仿真模型库

Fig. 2 Library of visual simulation models

2 车路协同系统典型场景建模及其优化方法

车路协同系统仿真模型主要根据车路协同系统仿真的需要进行构建,能够同时对多交叉路口、多车辆进行实时可视化仿真,建立的仿真模型见图 3。车路协同视景仿真系统主要模拟车辆行驶、信息发布和周边交通环境的变化等相关现象。车路协同系统仿真模型主要包括典型场景车车信息交互模型、车路信息交互模型、路侧设备信息交互模型、车辆模拟驾驶模型与信号灯相位实时切换模型等。

2.1 车路协同系统典型场景建模

在车路协同系统进行多车仿真时,车车信息交互模型将模拟车辆之间的信息交互。构建车车信息

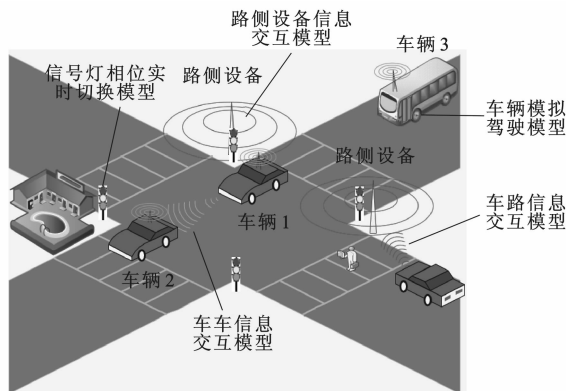


图3 车路协同系统仿真模型

Fig. 3 Simulation model of CVIS

交互模型时,考虑到车车通信多采用广播方式,针对视景仿真的特点,将车车信息通信方式分解为2个单双工的通信方式表达与实现,即关键信息由本车向目标车进行传递时,采取单向有源的信息传递方式,反向亦如此。在建模时考虑到单向有源信息传递的特点,构造的车车信息交互模型具有在一定范围内进行有源定向成角度辐射功能,同时信息交互模型能够在一定传输阶段后根据传输的距离和方向,收缩至目标车辆。车车信息交互模型具体仿真效果见图4,发送的车辆状态参数及其他相关信息能够通过无线通道传递至目标车辆。

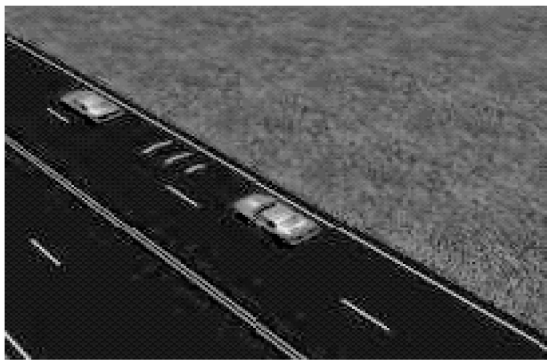


图4 车车信息交互模型仿真效果

Fig. 4 Simulation effect of vehicle-vehicle information interaction model

视景仿真的一个重要特点为构想性,尽量构建出逼真的现场仿真环境,最大限度地接近现实条件,以检验仿真系统的仿真能力,为现场的实地测试提供决策参考。构建车辆模型时,考虑大规模仿真的需要,应设置不同分辨率下的车辆仿真模型。在高分辨率条件下,细化车辆内部结构,在保证车辆形体结构满足要求的同时,细化车辆内部的操控面板,对车辆内部的车载人机界面(Driver Machine Interface, DMI)进行建模,采用DOF节点控制DMI面板模型

的展出与收入,采用Dial Gauge模块快速建立仿真所需的车辆仪表盘模型,再对模型插入DOF节点组成面片,以指示和控制仪表盘指针的位置,在车路协同仿真系统运行时,显示车辆运动的实时速度、位置、车轮转速等相关参数信息。

车路信息交互模型针对车路协同系统中的通信系统进行仿真。在对通信系统进行建模时,仿真过程中车路之间的信息交互仿真行为包括移动车辆向固定的路侧设备发送信息和路侧设备向移动车辆发送信息。在仿真移动车辆向固定的路侧设备发送相关信息时,采取有源辐射方式建立相应的信息仿真模型类似车车之间的信息交互仿真。路侧设备向移动车辆发送的信息是通过一个有源的路侧设备节点,向路侧设备周围所覆盖区域内所有的车辆广播车路协同系统信息,发送的信息为有源环形辐射方式,建模时应采取有源式,发送方式则为全方位发送。车路信息交互模型仿真效果见图5。



图5 车路信息交互模型仿真效果

Fig. 5 Simulation effect of vehicle-infrastructure information interaction model

2.2 LOD模型简化技术

多细节层次模型的构建能够提高系统渲染效率并降低系统仿真复杂度。模型的精细度在一定程度上反映了模型的真实程度,模型的精细程度越高,模型子面数越多,所占用内存也会越大,将大幅度增加系统的资源消耗。多细节层次模型优化技术,为同一个模型数据库内包含多个精细程度不同的模型,且在不同的条件下显示精细程度不同模型的技术。

在车路协同系统中,涉及到的局部交通网络内部均存在大量的交通元素,由于同一时刻的观察对象或目标有限,采用LOD模型简化技术对模型进行精细程度的调整可以有效提高仿真系统效率。对于能够近距离观察的仿真模型都需要进行多细节层次模型的简化,以增强仿真的真实感。远离观察视

点的模型采用精细程度较低的模型进行显示。LOD 模型简化技术主要是对此类模型进行简化制作,在不同的层次显示不同的细节特性,提高系统的仿真效率。本文中不同层级的 LOD 模型生成方法为:基于自组织特征映射(Self-Organizing Feature Map, SOFM)区域分割算法对模型进行前期划分,同时兼顾模型的特征细节,采用基于特征的模型简化算法对模型进行有效可控的简化。简化算法具体步骤如下。

Step 1:以 SOFM 区域分割算法为基础,对模型进行区域划分,根据需要确定总体的合并规模 D 。

Step 2:依次选择其中的划分区域 i ,根据区域 i 内顶点数 N_i 在总体模型顶点数 M 中所占的比例,可作为该区域内的合并权值,计算区域 i 内的合并规模 E_i 为

$$E_i = DN_i/M$$

Step 3:计算划分区域 i 内每个顶点与周围相邻顶点的直线平均距离 d_i ,排序找出其中的较大者,进行删除重组。

Step 4:判断划分区域 i 内的合并点数是否达到本区域的合并规模 E_i ,如果达到,转入 Step 5,否则,返回至 Step 3。

Step 5:所有区域合并完毕,结束;否则,返回至 Step 2。

通过上述 5 个步骤对行人模型进行简化,控制模型的总体合并规模可得到精细程度不同的多个模型。对于车路协同系统而言,由于仿真数据量较大,且处理信息过程较复杂,以进一步简化模型在程序中的处理为原则,采用静态 LOD 模型简化技术,通过建立多个不同细节的层次模型实现 LOD 模型的平稳过渡,提高仿真效率。LOD 模型主要针对原模型建立多个不同细节的模型,并根据相应的控制条件进行多个细节的切换显示。以行人模型为例,采用 LOD 模型简化技术生成方法构造的模型见图 6, LOD 0~LOD 4 模型精细度逐级递减。不同行人模型精细度的对比见表 1,其中点简化率、面简化率与内存占用减少率均相对 LOD 0 模型计算。由表 1 可知,LOD 4 模型相对于 LOD 0 模型点数简化 94.0%,面数简化 95.5%,内存占用减少 86.3%。根据模型距观察视点的远近显示不同等级的模型,近距离显示精细程度较高的模型,远距离显示精细程度较低的模型,既能够照顾近距离观察物体的需要,又能兼顾远距离观察物体的习惯,提高仿真的真实性。

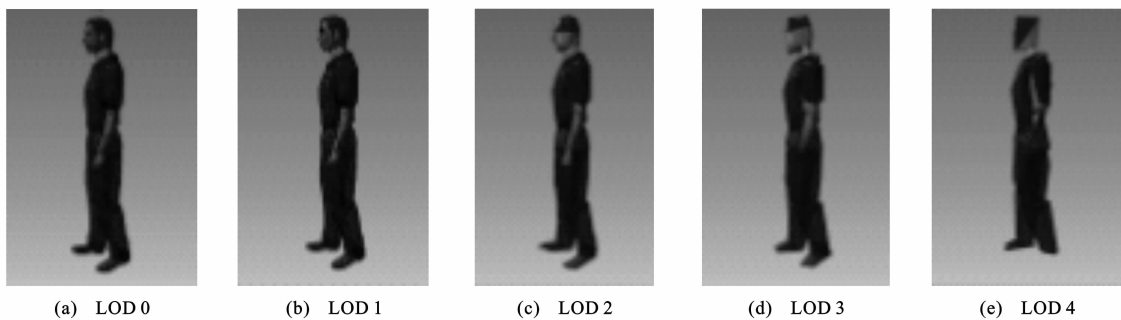


图 6 不同精细程度的 LOD 模型
Fig. 6 LOD models with different detail degress

表 1 不同行人模型对比
Tab. 1 Comparison of different pedestrian models

模型	点数	面数	内存占用/ kB	点简化率/ %	面简化率/ %	内存占用 减少率/%
LOD 0	1 978	3 888	473			
LOD 1	1 584	3 100	460	19. 9	20. 3	2. 7
LOD 2	1 192	2 316	403	39. 7	40. 4	14. 8
LOD 3	405	742	203	79. 5	80. 9	57. 1
LOD 4	118	176	65	94. 0	95. 5	86. 3

2.3 功能节点优化

在车路协同视景仿真系统中,三维仿真模型需根据系统仿真指令实时动态地在几何形态上进行相

关可见效果的调整,因此,在构建视景仿真模型初期即对模型进行节点结构上的调整势必会提高系统的仿真效率。整个模型的原始组织节点为

$$V = \{v_1, v_2, v_3, \cdots, v_j\}$$

式中: V 为模型的原始节点集合; $v_1 \sim v_j$ 分别为第 1~ j 个模型的组织节点。

几何顺序结构节点采用二叉树的组织结构进行存储,表示为

$$B = \{b_1, b_2, b_3, \cdots, b_m\}$$

式中: B 为模型的树形组织节点集合; $b_1 \sim b_m$ 分别为第 1~ m 个二叉树节点。

通过循环对比 V 与 B 的差异,调整 V 的节点组织顺序,以达到与几何特征相类似的效果,从而加快仿真系统对模型的读取速度。对虚拟模型的功能节点进行优化,首先提取模型的功能节点,相同的静态节点采取实例化方法进行处理,减少内存占用。对于动态转换的功能节点可采用 DOF、LOD、Switch 功能节点进行转化,以实现模型在不同状态下的实时切换问题,如信号灯相位转变、行人模型的简单动作实现、仪表盘的指针转动、LOD 功能节点远近切换等。然后提取功能节点的组织顺序并按照模型节点的空间顺序对其进行调整,最终获得优化后的功能节点。功能节点优化算法流程见图 7。

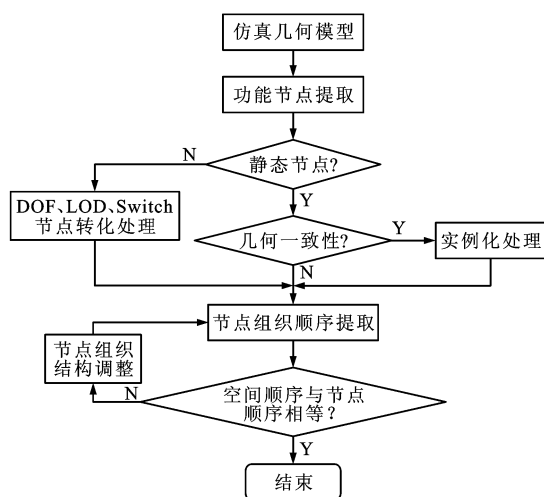
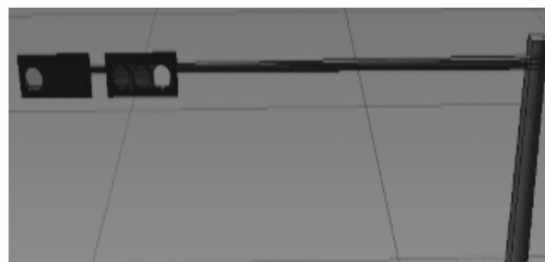


图 7 功能节点优化算法流程

Fig. 7 Flow of function-node optimization algorithm

在构建车路协同仿真系统整体环境模型时,丰富公路两侧的路灯与周围的树木等能够营造一个较为逼真的现场环境,增强真实感。以构建交通网络中的信号灯与路灯为例,信号灯按功能归属动态节点,路灯则归属静态节点,采取功能节点优化算法对信号灯和路灯进行优化。

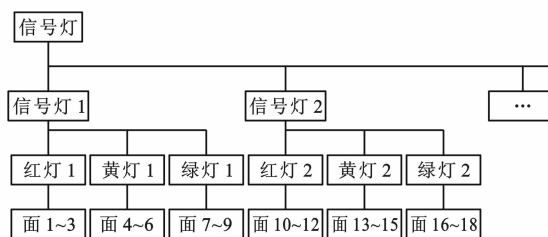
在局部交通网络中,公路两侧的路灯往往较多,而且随路灯精细程度的不同,模型占用的内存往往较大。在对路灯进行建模时,可采用实例化建模方法。实例化建模的本质是将一个已建立的模型设为模板,通过相对应的矩阵变换,达到移动、复制、放大的目的,在系统中实际上只存在一个模型几何体。实例化建模方法虽然增加了计算量,但是可减少模型的内存占用,能够大幅度地优化交通仿真中的路灯与路侧重复出现的模型,提高仿真模型的载入效率。功能节点优化效果见图 8,其中,图 8(a)为仿真中的信号灯三维模型,图 8(b)、(c)分别为优化前后模型节点的组织结构。对比图 8(b)、(c)可以发现,



(a) 信号灯三维模型



(b) 优化前模型节点的组织结构



(c) 优化后模型节点的组织结构

图 8 功能节点优化效果

Fig. 8 Optimization effect of function nodes

优化后模型节点的组织结构更加清晰,去除了冗余节点,与真实模型的物理结构相似,方便于模型的快速查找。

纹理贴图可在不增加多边形个数的前提下,使模型对象获得较为逼真的视觉效果,能够在不增加内存占用的情况下,提高模型的真实感,大幅度降低模型的精细度,提高建模效率,构建较为逼真的仿真环境。OpenFlight 数据库格式支持的纹理图像格式包括 RGB、RGBA、INT、INTA、BMP 和 JPEG 格式,对于 JPEG 纹理格式的支持部分地依赖于独立的 JPEG 组的工作,且纹理贴图文件可通过相应的纹理插件或图像编辑软件等制作。纹理图片的长宽大小配置为 2^n 时(n 为任意正整数),最终的仿真效果不会发生扭曲变形等现象。对周边环境进行美化时,可充分依赖纹理贴图,对诸如路面、草坪、房屋墙壁等周边环境进行美化,从而减少建模的工作量,大幅度精简模型三角形面数。

应用上述方法对车路协同系统的可视化典型仿真场景进行构建,最终将各个功能模块通过外部节点引用整合为一个 FLT 文件,成为一个能够漫游的可视化局部交通网络,仿真效果见图 9。

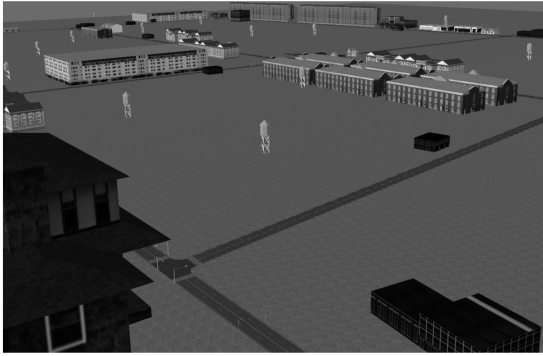


图 9 局部交通网络仿真效果
Fig. 9 Simulation effect of local traffic network

3 车路协同系统视景仿真平台构建

车路协同系统视景仿真平台的构建是验证可视化仿真技术的关键,在进行视景仿真平台构建时,采取分块实现方式,以构建的典型场景仿真模型库为基础,动态载入相关模型,简化仿真的复杂度,提高画面渲染和内存分配效率。

3.1 视景仿真平台组织结构

视景仿真平台采用 VEGA 后台管理软件对仿真模型进行管理,通过 Visual C++ 6.0 对仿真平台进行控制和管理。视景仿真平台的内部信息流见图 10。

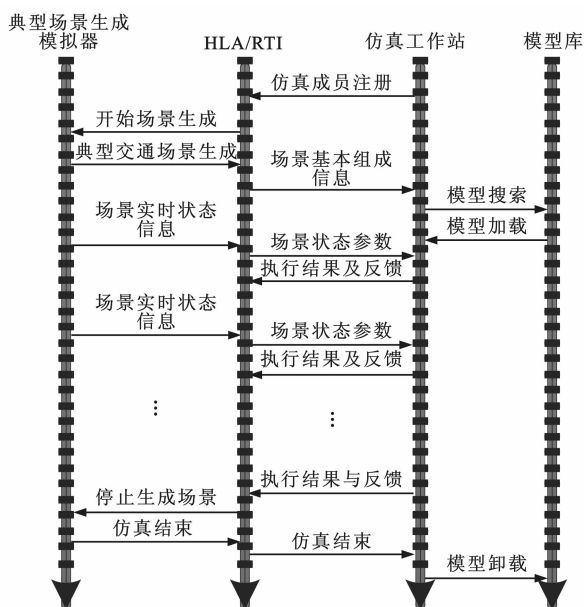


图 10 视景仿真平台内部信息流
Fig. 10 Information flow in visual simulation platform

仿真系统还应包括外部 HLA/RTI 信息交互及控制模块、车路协同数据处理模块、模型间信息交互模块、模型引导控制模块、视角动态切换模块与模型状态参数动态显示模块。

3.2 平台仿真

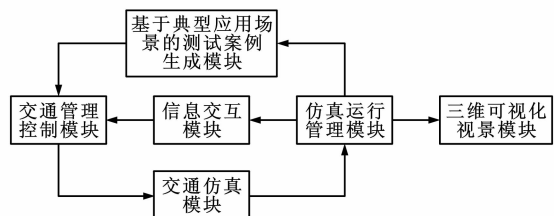
通过构建场景模型和搭建仿真框架体系,构建车路协同系统可视化视景仿真平台,通过外部程序接口,导入相应的仿真原始数据,使得系统具备更好的兼容性与可扩展性。车路协同仿真系统中部分模块见图 11(a)、(b),视景仿真平台与车路协同仿真系统中其他模块的信息交互结构见图 11(c),车路协同系统可视化视景仿真平台仿真效果见图 12。



(a) 测试案例生成模块



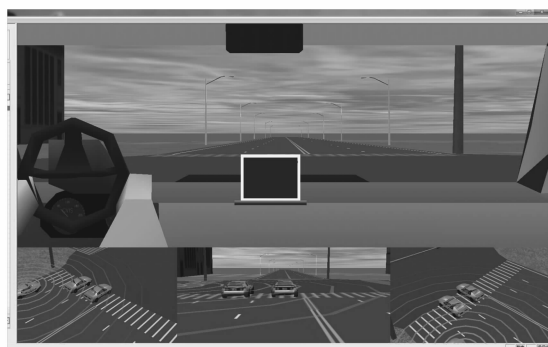
(b) 信息中转仿真模块



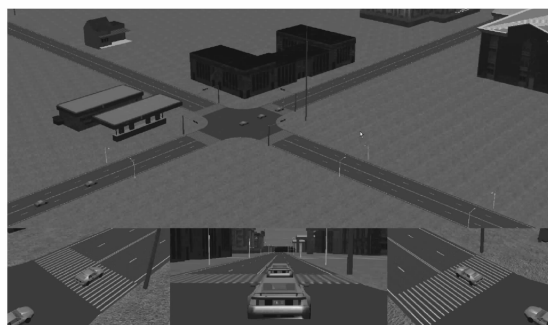
(c) 信息交互结构

图 11 车路仿真系统内部信息交互
Fig. 11 Information interaction in simulation system of CVIS

车路协同视景仿真平台能够根据车路协同大系统中的实时仿真数据及时提供可视化显示与仿真,采用的数据库优化技术实现了视景仿真平台对模型相关功能节点的有效控制,同时具备一个外部程序接口,可实时接收外部仿真系统提供的仿真数据,并将其视景仿真界面输出至软件显示终端,具备良好的可扩展性,满足了系统仿真需求。



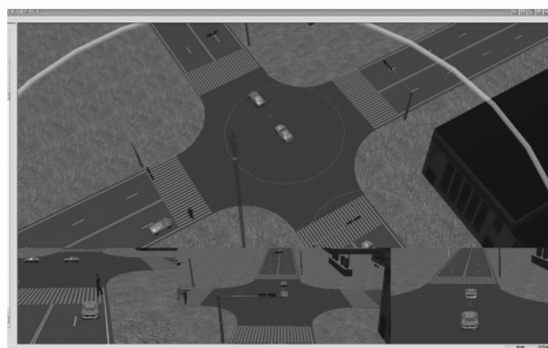
(a) 车内视角



(b) 交叉口视角



(c) 交叉口行人行为模拟



(d) 交叉口车辆行为模拟

图 12 仿真效果

Fig. 12 Simulation effects

4 结 语

本文通过对 OpenFlight 数据库格式进行分析,以车路协同系统仿真的需求分析为例,探讨了可视化仿真建模的几种关键技术和数据库优化方法,并

对车路协同系统中的多个仿真模型进行了合理的构建,对构建的仿真模型进行优化,减少了模型在仿真过程中的内存占用,提高了车路协同系统可视化仿真的效率。针对车路协同系统的典型应用场景进行平台搭建,构建了适应性较强的可视化视景仿真平台,为车路协同系统的交通仿真提供了重要的可视化决策参考依据,同时,对城市公共交通的数字化仿真、城市公共交通与环境的相互影响、车辆在路网中的安全行驶问题等研究具有重要的参考价值。

在对车路协同系统视景仿真平台的研究过程中,采取了修改节点组织结构和属性的方法对模型进行优化研究,但深层次的模型简化仍有一定空间。下一步可针对模型简化做进一步研究,从 OpenGL 层面对模型进行合并和简化,进一步减少模型内存占用,提高仿真效率。

参考文献:

References:

- [1] POPE A R. The SIMNET network and protocols[R]. Cambridge: BBN Systems and Technologies Corporation, 1986.
- [2] GLOR P J, BOYLE E S. Design evaluation for personnel, training and human factors (DEPTH)[C] // IEEE. 1993 Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium. New York: IEEE, 1993: 18-25.
- [3] CRUZ-NEIRA C, SANDIN D J, DEFANTI T A, et al. The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment[J]. Communications of the ACM, 1992, 35(6): 64-72.
- [4] JÖNSSON A, WALL J, BROMAN G. A virtual machine concept for real-time simulation of machine tool dynamics[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(7/8): 795-801.
- [5] POPA D O, SINGH S K. Creating realistic force sensations in a virtual environment: experimental system, fundamental issues and results[C] // IEEE. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 1998: 59-64.
- [6] 赵沁平. 分布式虚拟仿真战场环境——现代战场的实验场[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(增): 1-7.
ZHAO Qin-ping. Distributed virtual battlefield environment—experimental theater of modern wars[J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(S): 1-7. (in Chinese)
- [7] 丁浩杰, 徐福培, 徐 斌, 等. 主动式三维汽车驾驶训练模拟器的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(3): 287-290.
DING Hao-jie, XU Fu-pei, XU Bin, et al. The design and implementation of active 3D automobile driving training simulator[J]. Journal of System Simulation, 2000, 12(3): 287-290. (in Chinese)
- [8] 李华兵, 王耀华, 王永凤, 等. 全视景飞机牵引与加油训练仿真器的设计与实现[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版,

- 2001, 2(3): 82-85.
- LI Hua-bing, WANG Yao-hua, WANG Yong-feng, et al. Research on whole visual angle training simulator of plane towing and refueling[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2001, 2(3): 82-85. (in Chinese)
- [9] 殷 宏, 王志东, 许继恒. 基于 Creator/Vega 的战场视景仿真[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2005, 6(2): 137-141.
- YIN Hong, WANG Zhi-dong, XU Ji-heng. Battlefield scene simulation based-on Creator/Vega[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2005, 6(2): 137-141. (in Chinese)
- [10] 陆铁坚, 蒋友良, 余志武. 桥梁三维造型及其视景仿真[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(3): 501-505.
- LU Tie-jian, JIANG You-liang, YU Zhi-wu. Research on three dimensional-modeling and scene simulation[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(3): 501-505. (in Chinese)
- [11] 郭凤香, 熊 坚, 秦雅琴, 等. 山区公路交通安全保障措施模拟评价[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(5): 120-126.
- GUO Feng-xiang, XIONG Jian, QIN Ya-qin, et al. Simulation evaluation of safeguard measure for traffic safety on montane highway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 120-126. (in Chinese)
- [12] MURALIDHARAN A, DERIVISOGLU G, HOROWITZ R. Freeway traffic flow simulation using the link node cell transmission model [C] // AACC. 2009 American Control Conference. Washington DC: AACC, 2009: 2916-2921.
- [13] HSIN V J K, WANG P T R. Modeling concepts for intelligent vehicle highway systems (IVHS) applications[C]//SWAIN J J, GOLDSMAN D, CRAIN R C, et al. Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference. New York: IEEE, 1992: 1201-1209.
- [14] HAMANN B. A data reduction scheme for triangulated surfaces[J]. Computer Aided Geometric Design, 1994, 11(2): 197-214.
- [15] BRODSKY D, PEDERSEN J B. Parallel model simplification of very large polygonal meshes[C]//ARABNIA H R. Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications. Boston: CSREA Press, 2002: 1207-1215.
- [16] 杨 帆, 云美萍, 杨晓光. 车路协同系统下多智能体微观交通流模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(8): 1189-1196.
- YANG Fan, YUN Mei-ping, YANG Xiao-guang. Microscopic traffic flow model based on multi-agent in CVIS circumstance[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(8): 1189-1196. (in Chinese)
- [17] 王 蕊, 李俊山, 刘国庆, 等. 基于神经网络的几何模型区域分割算法[J]. 电光与控制, 2008, 15(11): 10-13.
- WANG Rui, LI Jun-shan, LIU Guo-qing, et al. Region segmentation method of geometric model based on neural networks[J]. Electronics Optics and Control, 2008, 15(11): 10-13. (in Chinese)
- [18] 刘 博, 徐元铭, 史红伟. 基于 Creator 的列车运行三维建模技术研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(30): 7545-7549, 7558.
- LIU Bo, XU Yuan-ming, SHI Hong-wei. The research based on Creator for three-dimensional modeling technique[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(30): 7545-7549, 7558. (in Chinese)
- [19] 郑海春, 董秀成, 王孝平, 等. MultiGen Creator 虚拟现实三维建模优化技术的研究与实践[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2011, 30(6): 26-29.
- ZHENG Hai-chun, DONG Xiu-cheng, WANG Xiao-ping, et al. Research on 3-D modeling optimization technology for Multi-Gen Creator virtual reality and its practice[J]. Journal of Xihua University: Natural Science, 2011, 30(6): 26-29. (in Chinese)
- [20] 刘晓平, 凌 实, 余 焯, 等. 面向大规模地形 LOD 模型的并行简化算法[J]. 工程图学学报, 2010(5): 16-21.
- LIU Xiao-ping, LING Shi, YU Ye, et al. A parallel model simplification algorithm for LOD-based large-scale terrain real-time rendering[J]. Journal of Engineering Graphics, 2010(5): 16-21. (in Chinese)
- [21] SHAW A A, GOPALAN N P. Finding frequent trajectories by clustering and sequential pattern mining[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(6): 393-403.