

复杂路网内大规模车辆运动的仿真

毛天露¹⁾ 王 华²⁾ 康星辰¹⁾ 徐明亮³⁾ 王兆其¹⁾

¹⁾ (中国科学院计算技术研究所移动计算与新型终端北京市重点实验室 北京 100190)

²⁾ (郑州轻工业学院计算机与通信工程学院 郑州 450002)

³⁾ (郑州大学信息工程学院 郑州 450001)

摘 要 为仿真现实生活中由纵横交错的道路路网、大规模的车辆及其运动组成的交通场景,文中提出一种复杂路网内大规模车辆运动的仿真技术.首先设计一种层次路网语义模型,根据输入的路网车道线矢量数据,通过语义建模,从几何、拓扑等不同层次描述错综复杂的交通路网.其次,由于现有的车辆运动仿真方法中基于个体的微观方法针对大规模车辆运动计算效率较低,而基于流的宏观方法无法仿真复杂的交通现象,提出了一组新的宏观流方程来描述路网内车辆的运动,使得宏观流模型能够与车辆换道行为模型有机地进行结合,从而逼真地描述各种复杂的交通现象.实验结果表明,文中方法在实现复杂路网内车辆运动高细节模拟的前提下,其计算效率与一般宏观流模型保持在同一数量级.通过在实际应用中对真实交通路网进行虚拟现实建模,并在其上进行大规模车辆运动仿真,进一步验证了方法的有效性.

关键词 大规模车辆;复杂路网;层次语义模型;车辆换道行为;宏观流模型;虚拟现实

中图法分类号 TP391 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2017.02466

Simulating Large-Scale Traffic in Complex Networks

MAO Tian-Lu¹⁾ WANG Hua²⁾ KANG Xing-Chen¹⁾ XU Ming-Liang³⁾ WANG Zhao-Qi¹⁾

¹⁾ (Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and the New Terminal,

Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

²⁾ (College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002)

³⁾ (College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

Abstract Traffic is one of the most important components in our daily life. In the real world, traffic scenes are complex including crossed road network and mass vehicles as well as their shifty motion. Simulating vivid complex traffic scenes is important for many traffic management applications, such as road network optimizing, traffic impact analysis and evacuation planning in some emergent situation. It is also very important for some virtual reality applications, like games, virtual tourism and virtual city. In this paper, a novel simulating method for complex networks with large-scale traffic is proposed. Firstly, a hierarchical semantic model is introduced to describe crossed road networks. It includes a geometrical layer which couples 3D geometrical lane data with its mileage representations together, so that the position query in traffic simulation could be fastened. It also has topological layers to make mass lane slices become an organic network. The topological layers are semantically completed, including links, road segments, their connectors and intersections, so that they could be built from the geometrical layer automatically. Secondly,

收稿日期:2016-01-12;在线出版日期:2016-01-13. 本课题得到国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2013AA013902)、公益行业科研专项课题(2013467058)、国家自然科学基金(61472370)、国家自然科学基金青年基金(61402269)资助. 毛天露,女,1977年生,博士,副研究员,中国计算机学会(CCF)高级会员,主要研究方向为虚拟现实与智能人机交互. E-mail:ltm@ict.ac.cn. 王 华,女,1982年生,博士,副教授,主要研究方向为智能建模. 康星辰,女,1991年生,硕士,主要研究方向为交通仿真. 徐明亮,男,1981年生,博士,副教授,主要研究方向为虚拟现实. 王兆其,男,1966年生,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为虚拟现实与智能人机交互.

a novel hybrid traffic model is proposed. It develops the traditional single lane traffic flow equations to describe the flow interaction between neighboring lanes and make it possible to combine a lane-changing model inside. Unlike existing macroscopic models which could not describe complex traffic phenomenon, and unlike existing agent-based models which have low efficiency in handling large-scale traffic, the proposed hybrid model could naturally combined lane-change behavior inside to simulate detailed complex traffic phenomenon while keeps high efficiency as most existing macroscopic models. The solving method of the hybrid traffic model is also introduced. Experimental results show that, compared with other macroscopic ones, the efficiency of our method has the same order of magnitude. It could simulate traffic on a 600 km network in real time. However, more than any other macroscopic models, it could demonstrate complex traffic scenes, like traffic accidents and traffic jams. We demonstrate the effectiveness of our method by modeling a real road networks in virtual reality and simulating complex traffic with mass vehicles. Compared with real traffic data and the simulation results have very high similarity, even in t complex scenes with frequent lane changes.

Keywords large-scale traffic; complex road networks; hierarchical semantic model; lane changes; macroscopic traffic model; virtual reality

1 引言

交通是人们日常生活“衣食住行”涉及的四大方面之一,是人类社会的重要组成部分.为了在计算机生成空间中逼真地展示现实世界,在虚拟环境中构建交通路网,并对车辆及其运动进行仿真,是构建虚拟世界必不可少的环节.

现实生活中的车辆运动,具有如下突出特点:首先交通路网结构复杂,各种平交路口和各种立体交叉线路纵横交错,错综复杂.其次是车辆规模庞大.因此,如何实现大规模车辆在复杂路网内运动的逼真模拟,是虚拟现实领域的重要问题,也是应急撤离预案、城市交通规划等,进行设计、分析和评估的有效技术手段.其意义和应用前景可归纳为几个方面:(1)实现预演性交通模拟,加强应对特殊情况、突发状况的能力(如福岛核危机中大量人口的撤离);(2)指导交通的设计、评估和规划等.通过大规模细致的仿真结果,可以避免不合理的交通规划,更有效地统筹整体交通状况,合理的采取交通管制、路网改造等措施;(3)增强虚拟场景中的用户体验.虚拟现实技术的飞速发展,虚拟城市、虚拟旅游等概念被广泛提出,将逼真的交通模拟融入其中,可以进一步加深用户身临其境的感觉.

目前国内外已有许多领域的学者投入到车辆运动仿真的研究中,形成了基于个体的微观模拟方法和基于流的宏观模拟方法两大类主流方法.微观模

拟方法在较细力度上模拟车辆运动^[1-3].现有模拟系统中绝大多数采用此类方法,如麻省理工学院智能交通系统实验室研制的 MITSIM 系统,德国 PTV 公司开发的 VISSIM 系统,英国 Quadstone 公司开发的 Paramics 系统以及西班牙 TSS 公司推出的 Aimsun 系统等.然而,微观模拟方法采用基于个体的微观交通模型模拟车辆运动,模拟计算的效率和车辆数目紧密相关,这类方法主要用于小规模的车辆运动模拟,当车辆规模达到数万或十万以上后,普通 PC 机已无法实现实时的模拟计算,所以不适合做城市级大规模车辆运动的模拟.

宏观模拟方法,采用基于流体的模型,从密度、速度等较为宏观的角度模拟道路上车流运动的变化^[4-6].模拟计算时间和车辆数目无关,主要用于大规模车辆运动的模拟仿真.采用该类方法的系统有英国 TRL 开发的 TRANSYT 和美国明尼苏达大学开发的 KRONOS 软件等.这些系统作为交通评价、规划和设计的工具,主要研究交通流的大致运动趋势.模型为了提高计算效率,简化甚至省略了个体车辆运动行为的模拟,无法逼真地描述各种复杂交通场景内车辆的运动行为(如各种换道行为),从而降低了模拟结果的准确性和真实性.

此外,路网是交通流的载体,是交通仿真中重要的基础数据.交通仿真中的路网数据,是对现实道路路网的数学抽象与规范化描述,从而构造可被计算机识别的道路网络.路网数据通常需要描述路网的几何信息和语义信息.上述方法在进行车辆运动仿

真计算时,同样需要以路网数据为基础.然而,现有方法对输入的路网数据要求比较高.这首先体现在输入数据量较大,比如在平面交叉路口处需要输入或手工设置交通相位以实现冲突线路的分离,工作量巨大且易产生错误.其次,模型用于车辆运动仿真时,在求取车辆位置坐标和方向角时,需要对路网数据进行查找和数值逼近计算,比较耗时,影响大规模仿真计算的效率.

针对上述问题,本文提出了一种复杂路网内大规模车辆运动仿真的方法.首先,针对路网数据及其建模,提出了一种路网层次语义模型,通过对输入的车道线几何数据进行拓扑生成和层次语义组织,从不同层次描述错综复杂的交通路网.其次,针对车辆运动仿真计算,提出一组新的宏观流方程来描述路网内车辆的运动,使得宏观流模型能够与车辆换道行为模型有机地进行结合,并通过优化求解得到车辆的运动状态.

与已有技术相比,主要贡献在于:首先,定义的路网数据层次语义模型,不仅可以实现路网内各路口处线路冲突自动分离,降低了数据输入量的需求,还为车辆在各种复杂路网结构中的细致模拟计算提供了语义基础,降低了查询、计算路网信息而造成的效率损耗;其次,以路网层次语义模型为基础,采用宏观流方程描述车道之间的交通耦合并将车辆换道可行性分析作为约束条件融入流方程的求解,在保证效率的前提下实现对复杂交通现象的仿真.

本文将在第2节中对论文所涉及的相关工作进行介绍;在第3节中对本文方法的技术框架进行简要说明;在第4节中详细阐述路网数据层次化语义建模,并从车辆换道模型、宏观车流模型和模型数值求解三个方面入手,在第5节中对车辆运动仿真计算方法进行详细阐述;在第6节中通过实验和应用实例对本文方法进行验证.

2 相关工作

2.1 车辆运动建模技术

根据描述的细节程度不同,车辆运动建模主要分为微观模型和宏观模型两大主流,此外还有非主流的介观模型.

微观模型,从车辆个体出发描述车辆的运动行为和反应.跟车模型和元胞自动机模型是两类常用的微观模型.跟车模型中,司机根据当前车道前车的状态、自身的加速限制以及道路曲率来确定车辆的加减速速度^[7].元胞自动机模型的基本思想是将所有

连续的变量离散化^[8].微观模型可以细致地描述车辆个体行为,和车辆换道模型相结合,能够得到较好的交通仿真模拟结果,展示各种复杂的交通现象、交通事故,例如,道路的拥堵、路口多股车流的交汇等等.然而,微观模型计算效率与车辆规模相关,面对复杂路网上的大规模车辆仿真,其计算效率存在瓶颈.

宏观模型通常也被称为连续流模型.该类模型主要用于涉及大规模车辆的交通模拟和分析.目前已有不少经典的宏观流模型.各向异性模型采用一个质量守恒方程和加速方程描述交通流动力学^[4,9].细胞传输模型采用离散化的LWR方程描述交通流^[10].另一类比较经典的交通流模型为格子流模型.受优化速度模型的启发,Nagatani^[11]首次提出了交通流格子动力学模型.司机根据当前车道前方的局部密度做出反应.由于该模型简单易用,随后一些改进了的格子流模型被相继提出.Ge等人^[5]提出了合作驾驶格子流模型(CDLH模型),模型认为车辆是根据前方全部路段(非局部)的密度信息做出反应.CDLH模型极大的提高了原格子流模型的稳定性和模拟效果的精确性.为了更好地描述复杂路网内的交通,学者们提出了一些改进了的格子流模型^[12-13].然而,所有上述宏观模型,对每辆车辆的运动及其变化进行了抽象,将车辆运动作为整体运动的流体进行计算,若将这些模型用于车辆运动仿真,无法得到车辆是否可以换道以及如何换道等细节信息,不仅精度有限而且无法仿真各种交通事故.

为了逼真再现车辆的运动行为,计算机图形学领域的研究者在宏观模型的基础上做了改进.具有代表性的是Sewall等人^[14]提出的ARZ车辆运动模拟方法,以及他们提出的混合车辆运动模拟方法^[15].在ARZ方法中,作者以经典的各向异性模型作为基础,采用一组规则控制车辆换道行为,车辆换道时通过“备份”密度来转移单位流量到达目标车道.这一方法存在的不足是,车流密度将会不断地产生突变,模拟结果会导致“上游”车辆不合理的刹车.文献[15]中,作者提出了车辆模拟混合模型:场景中大部分区域采用宏观模型仿真,对于用户关注的区域则采用微观方法展示逼真的细节.这一折衷方案,满足了部分应用的需求,但在宏观模型仿真的区域,仍然无法模拟复杂的交通现象.

微观模型虽然可以细致地描述车辆的运动行为,但计算效率存在瓶颈.宏观模型可以用于大规模车辆运动的模拟,但模拟粒度过于粗糙,模拟结果的准确性和可视化效果有限,特别是无法模拟各种复

杂的交通现象和交通事故. 因此, 大型复杂路网内车辆的运动建模与仿真, 存在较大的挑战.

2.2 车辆换道行为研究

车辆换道行为研究, 主要涉及到车辆换道决策和换道运动规划两方面内容.

Gipps^[16] 提出了第一个 rule-based 换道决策模型, 考虑了周围障碍物对车辆换道行为的影响, 但是文中没有统一给出这些约束的参数. 许多学者在 Gipps 模型基础上做了大量的改进. 这些模型也主要集中在对换道决策的研究上, 换道过程被简化为瞬间过程, 这类方法的仿真结果精度有限且无法直接用于虚拟现实展示.

为了逼真再现车辆换道行为, Shen 等人^[17] 采用动态控制换道过程中车间距的方法, 粗糙地描述了换道过程. Sewall 等人^[18] 根据车辆运动学和动力学属性, 采用回旋线描述车辆的换道轨迹. 由于对所有的换道行为采用同样的轨迹描述, 车辆在换道过程中只有三种状态可选: 最大速度加速、匀速和最大速度减速. Lu 等人^[19] 采用安全规则来决策换道行为并采用了和 Sewall 等人类似的方法模拟换道过程. 事实上, 一旦确定车辆换道后, 运动规划的方法可以被借鉴, 用来规划车辆的换道轨迹^[20-22].

车辆换道决策模型, 可以很好的确定换道行为是否可以发生, 但无法真实地描述换道过程; 路径规划的模型虽然可以补充用来描述车辆在换道过程中的行为, 然而计算过于耗时. 因此, 针对大型复杂路网内车辆运动建模, 尚缺乏一种高效的车辆换道模型.

2.3 路网语义建模技术

路网是交通行为发生的载体, 路网建模是场景建模和交通仿真的基础工作之一.

从场景建模的目标出发, 许多学者展开了对路

网建模方法的研究^[23-24]. 这些工作的目的是为了构建虚拟场景, 主要关注线路的几何矢量信息, 不能提供额外的路网语义信息, 如线路与线路之间的连接、邻接关系, 道路通行权分配等等. 其构建出来的路网数据, 由于缺乏必要的拓扑信息和语义信息, 无法直接用于车辆运动仿真.

针对车辆运动仿真和路径导航的需要, 许多路网模型在几何信息基础上增加了路网语义信息. Yang 等人^[25] 采用 nodes, links, segments 和 lanes 来描述路网语义, 这里 node 表示一个路口, 但是不组织路口处各方向线路的关系. 交通模拟软件 VISSIM 中采用 links 和 connectors 描述路网数据, 这一模型中没有路口的概念, 仅描述路段之间的连接关系, 无法处理路口处不同方向线路之间的冲突关系. Wilkie 等人^[26] 提出了一种新颖的路网模型, 将粗糙低细节的 GIS 路网数据转化为高细节的交通路网数据. 模型采用 arc road 形式存储车道线数据, 实现了平滑的车辆运动仿真. 然而, 该模型同样无法处理路口处不同方向线路之间的冲突关系, 需要额外输入或手工设置信号灯数据来实现对平交路口处道路通行权进行分配. 对于大型复杂路网, 不仅需要大量的手工输入, 而且易引入手工错误.

此外, 上述模型在三维空间中对车道线的位置进行定义, 而车辆运动模拟计算通常得到的是车辆在某一车道上的里程, 因此在交通仿真结果展示时, 需要根据车道里程求取车辆位置坐标, 由此产生大量的查找计算和数值逼真计算, 特别耗时.

3 技术框架

本文车辆运动仿真方法的技术框架如图 1 所示.

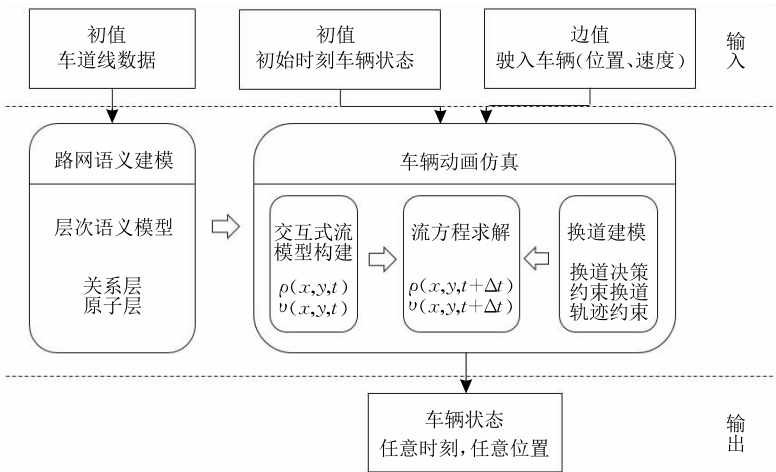


图 1 车辆运动仿真技术框架图

所需要的输入数据有车道线数据和车辆运动初始数据. 车道线数据, 即场景内道路中车道的中轴线几何矢量数据, 我们将在此基础上生成层次路网语义模型, 作为车辆运动仿真的基础数据. 车辆运动初始数据, 包括仿真初始时刻路网内所有车辆的运动状态信息, 以及模拟过程中流入路网的车辆运动信息. 这些数据将作为初边值条件, 用于车辆运动仿真的计算求解.

路网语义建模, 即基于输入的车道线数据, 根据仿真算法的需求, 建立路网的语义表达和描述. 在虚拟场景中, 车辆需要根据线路的走向、线路之间的拓扑关系以及周边车辆的运动情况确定自己的运动状态和位置. 进一步来说, 首先, 车辆一般是沿线路运动, 因此车道线应尽可能的平滑, 并且应能根据仿真计算得到的车辆较上一时刻的位置偏移快速获得车辆在当前时刻的坐标信息; 其次, 车辆在路网内运动, 为了到达目的线路, 在运动过程中需要进行换道和冲突避让等, 所以还需要从路网数据中能够方便地得到当各车道之间的连接、邻接关系以及各类路口处的冲突车道等语义信息. 因此, 如何组织和描述路网的语义信息, 对车辆运动仿真的计算效率和视觉效果均有较大的影响. 本文提出了一种描述复杂路网的路网数据层次化语义模型, 来满足车辆运动仿真的上述需求. 模型扩展了一般意义上车道线的定义, 并采用压缩点序列对其进行描述, 然后将其作为原子数据, 在其上定义层次语义信息来描述线路之间的复杂连接、邻接以及冲突关系. 本文将在第 4 节对该建模技术细节展开介绍.

车辆运动仿真, 即根据车辆的初始位置和目标位置以及路网语义数据, 计算仿真过程中每一时刻车辆的运动状态和位置, 从而模拟整个交通过程. 面向虚拟现实应用的复杂路网内车辆运动仿真, 不仅需要兼顾大规模车辆仿真计算的效率问题, 还需要有较高的细节程度展示各种复杂车辆运动行为(如跟车、超车、并线换道等), 从而模拟各种复杂的交通现象来保证仿真的可视化效果. 本文提出一组新的宏观流方程来描述路网内车辆的运动, 使得宏观流模型能够与车辆换道行为模型有机地进行结合, 并通过优化求解得到车辆的运动状态, 在保证效率的前提下实现了车辆运动的逼真模拟. 相关技术细节将在本文的第 5 节展开介绍.

本文方法的输出数据是仿真时长内任意时刻, 任意位置处的车辆状态信息. 根据这些信息, 可以做

直观的三维可视化展示, 得到流畅逼真的三维交通场景; 此外, 还可以对交通流量、拥堵情况进行统计分析.

4 路网语义模型

如上文介绍, 考虑到路径规划、坐标定位、运动平滑以及冲突避免等仿真中的具体问题, 车辆运动仿真对路网信息有较高的要求. 在已有的工作中, 出于虚拟场景构建、交通行为仿真、车辆导航等不同的应用需求, 有不少路网建模方法^[23-24, 26-27]. 然而这些方法或信息不够全面, 或查询、计算效率较低. 为此, 本文提出如图 2 所示的路网层次语义模型, 模型自下而上可分为车道层、路段层和道路层三层. 车道层, 仅包含车道中轴线 Lane, 是整个路网语义模型的基础. 路段层和道路层, 描述路网元素 Lane 的语义关系, 包括了基于 Lane 定义的路段 Link 和 Link 集合的 Segment、表示路段间连接的 Connector、表示路段间拓扑连接的 Intersection 以及表示位置从属关系的 Road.

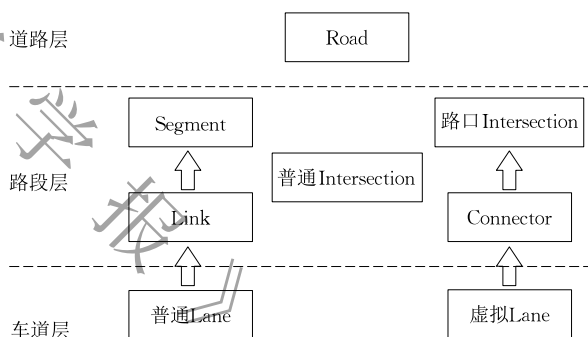


图 2 路网层次语义示意图

4.1 车道层

车道层为本文定义的广义车道线——Lane. 为便于描述车辆的运动轨迹, Lane 不仅包括实际意义上的车道中轴线, 还包括路口处描述车辆行驶轨迹的曲线, 称为虚拟 Lane (如图 3 所示). Lane 的矢量数据信息用 P 来描述. 其中 P 是由点列 $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$ 组成的有向折线段, 并满足一定“光滑性”. 折线本质上并无光滑性而言, 此处的光滑性是指组成该折线的点列要尽可能的靠近以点列拟合出来的光滑曲线. 其次, 除路口处外, 平均距离在一定阈值内的 Lane 走向基本一致, 长度需要大致相当. 最后, 所有内部节点的出度和入度都分别等于 1.

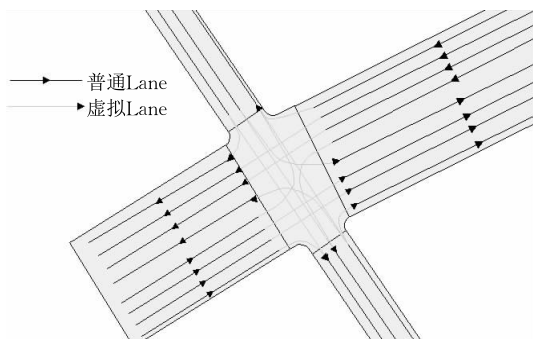


图3 Lane示意图

此外,与其他路网模型中的车道信息不同,组成 P 的每个节点 p_i 额外维护从折线起点沿折线到该点的总长度 $s_i = \sum |p_j p_{j+1}|$ (符号 $||$ 表示两点之间的距离),以及该点和下一点组成的方向角。总长度 s_i 可以快速转换为车道的里程信息,在车辆运动仿真中,便于根据车辆的位置偏移快速确定车辆在三维空间中的位置坐标。Lane 切向的方向角,在三维可视化展示中可作为车辆绘制时的车辆的朝向方向角。因此,上述定义的车道层 Lane,不仅描述了车道的几何信息,同时也为车辆仿真中车辆位置的高效计算提供了可能。路网几何数据,即 Lane 的矢量坐标信息,可以采用 GIS 数字化软件,在高分辨率遥感影像基础上加工;也可以在 GIS 道路数据(即道路中轴线矢量数据)基础上通过外延计算生成^[28]。

4.2 路段层和道路层

在车道层的基础上,定义组织原子数据之间各种关系的路段层。路段层包括 Link、Connector、Intersection 和 Segment 四部分。

Link 为一系列 Lane 的集合。一个 Link 包括互为邻居的 Lane 以及这些 Lane 的前继 Lane 中类型为路口的 Lane。和现有路网模型中采用的 Link 定义。相比,本文中的 Link 可以认为是这些模型中 Link 的扩展。

Connector 表示两个 Link 之间的连接关系,并根据这两个相连 Link 间的前后关系,分别将它们定义为 Connector 的 *fromLink* 和 *toLink*。为了方便车辆运动中车辆寻径,每个 Connector 还需要维护 *fromLink* 中和 *toLink* 相连的 Lane,以及 *toLink* 中和 *fromLink* 相连的 Lane。

Intersection 可以直观上理解为一个路口处涉及到的所有路段之间的拓扑连接关系的集合。进一步来说,Intersection 为具有指定关系 R 的 Connector 的集合。关系 R 满足如下条件:

- (1) 任意两个 Connector a 和 b ,若 a 和 b 有共同的 *fromLink* 或共同的 *toLink*,则 aRb ;
- (2) 任意三个 Connector a, b, c ,若 aRb 和 bRc 成立,则 aRc 成立。

需要特别强调的是,由于道路上某处车道的数目发生变化时,我们将其作为前后两个相邻的 Link。因此该处也包含了相应的 Connector 和 Intersection。为与路口 Intersection 相区别,我们称其为一般 Intersection。

道路层包含 Road 语义,Road 与其他路网语义要素间均存在从属关系:物理上与 Road 重叠的某路网要素属于该 Road。Road 要素由 Intersection 和 Segment 直接构成,分别对应传统路网模型中的“结点”和“弧段”。Segment 是同一道路上相连 Link 的有序集合。Road 要素能够为其他路网要素提供道路信息,从而更好地区分其他路网要素的拓扑关系,例如相邻 Lane 应属于同一路路。

基于上述语义描述,路网模型不但可以描述任意复杂的路网结构,包括各种平面交叉和立体交叉,还能够通过同一个 Intersection 涉及到的 Lane 的交点信息自动的实现路口处的相位分配,从而实现不同方向线路的冲突自动分离。模型中所有语义信息,都可以通过对 Lane 数据进行拓扑分析自动计算生成^[29],具体生成流程如图 4 所示。

5 车辆运动仿真计算

现有的绝大多数交通模拟软件,采用基于个体的微观模型仿真车辆的运动行为。这类模型计算效率上存在瓶颈,很难应用于大规模车辆运动仿真。基于连续流的宏观方法,从车流整体出发来模拟交通流的整体运动趋势,非常适合应用于大规模路网内的车辆运动仿真。然而,现有的宏观流模型都是在较粗粒度上模拟车辆的运动行为,过度简化车辆的运动细节,特别忽略了车辆的换道行为和过程,无法逼真地展示各种复杂的交通现象。

本文在经典宏观流模型——合作驾驶格子流模型^[5]基础上进行改进,提出一组新的宏观流方程,使其能够与车辆换道行为进行方便的耦合与求解。下面首先给出本文采用的车辆换道模型。

5.1 车辆换道模型

现有的换道模型大多是基于决策的模型。模型通过判断当前车辆和周围车辆的间隙大小给出换道

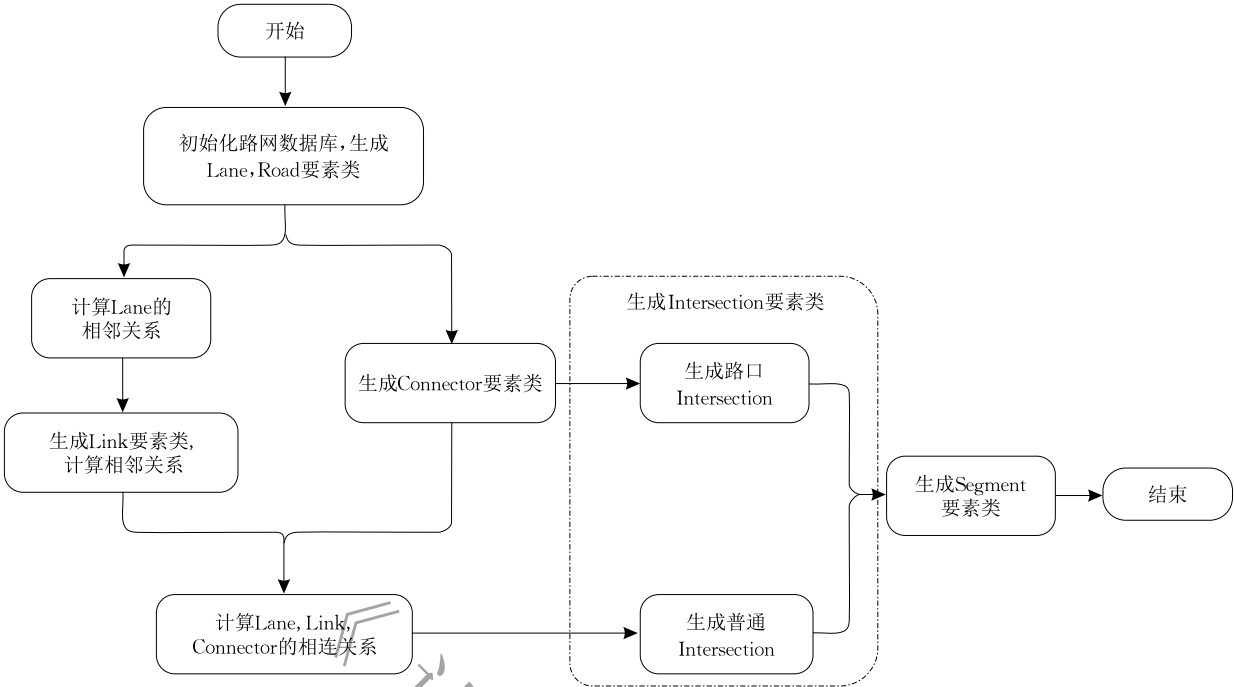


图 4 路网语义数据生成流程图

是否可行^[30]. 对换道过程的具体描述, 需要额外采用计算较为耗时的路径规划的方法^[22]. 本文采用一种基于轨迹约束的高效的换道行为模型^[31]. 模型设计思想如下: 首先, 影响车辆换道行为的因素主要包括车辆自身的运动学、动力学条件以及周围环境条件. 其次, 对具有换道需求的车辆, 通过将影响换道的因素, 转化为对换道轨迹的约束. 最后, 通过判断是否具有满足约束条件的换道轨迹, 来判断换道可行性.

采用这一车辆换道模型的好处在于, 在快速判断换道行为是否可以发生的同时, 也给出车辆换道的行进轨迹, 可直接用于后续换道行为的三维展示, 提高车辆运动仿真的逼真性.

5.2 宏观流模型

车辆运动过程中, 司机不仅可以得到当前车道前方的车流密度、速度信息, 还可以获得左右侧邻居车道上的密度速度信息. 基于此, 本文构建如下交互式合作驾驶格子流模型:

$$\begin{cases} \partial_t \rho + \nabla(\rho v) = 0 \\ \rho_{i,j}(t + \Delta t) v_{i,j}(t + \Delta t) = \\ \rho_0 \sum_{m=0}^2 [f_{2-m}(H_{i,j}(t)) V(\rho_{i+1,j-1+m}(t), \dots, \\ \rho_{i+N,j-1+m}(t), \rho_j^*)] \end{cases}$$

上述方程和经典合作驾驶格子流模型方程^[5]的区别在于添加了交互项

$$\sum_{m=0}^2 [f_{2-m}(H_{i,j}(t)) V(\rho_{i+1,j-1+m}(t), \dots, \rho_{i+N,j-1+m}(t), \rho_j^*)]$$

来描述当前车道、左右邻居车道前方车辆对当前位置车辆的影响. 该项中 (i, j) 表示沿车道线和垂直于车道线的第 (i, j) 个晶格.

其中, $f_0(*) = \left\lfloor \frac{*+1}{2} \right\rfloor$, $f_1(*) = ||*| - 1|$, $f_2(*) = \left\lfloor \frac{|*|-1}{2} \right\rfloor$.

ρ_j^* 表示平衡状态下 (i, j) 位置后当前车道上的车流密度. $H_{i,j}(t)$ 表示车流的方向, 当车流流入左侧车道时, $H_{i,j}(t) = -1$, 当车流流入右侧车道时, $H_{i,j}(t) = 1$, 其他情况下 $H_{i,j}(t) = 0$.

采用有限差分方法, 对上述微分-差分方程进行全离散化并进行数值稳定性分析, 可以得出只要唯一确定了 $H_{i,j}(t)$, 方程就存在唯一的稳定解. 借助换道行为模型, 可判断换道是否可行, 从而确定 $H_{i,j}(t)$, 实现车辆运动状态的求解.

5.3 模型求解

为了保持计算效率, 我们从路网出发, 将路网分为均匀路段和不均匀路段^[3]两部分. 对于均匀路段处, $H_{i,j}(t) \equiv 0$, 即认为此处不会发生换道行为. 而对于可能发生换道行为的路段, 定义其为不均匀路段, 利用换道行为模型对 $H_{i,j}(t)$ 值进行求解.

一般情况下, 司机并不会频繁地进行换道, 换道

行为发生通常有两种情况：一种是由于路径变换的需要，例如需要从一条道路转入另一条道路，这种情况的换道通常发生在距离路口、上下匝道口距离较近的 Lane 上。另一种情况，是由于相邻车道间的密度和速度存在一定差异，例如事故中某一车道受阻等。

因此，对于路网内任意格子 (i, j) ，若该格子满足如下任意条件，则该位置为不均匀路段：

- (1) (i, j) 处的车流密度远高于当前位置处邻居车道上的密度；
- (2) (i, j) 处的车流速度远低于邻居车道前方的车流速度；
- (3) (i, j) 所在的车道前方即将闭合（并线或交通故障）；
- (4) (i, j) 位于上匝道路段（加速道和主干道）；
- (5) (i, j) 位于下匝道口附近的主干道上；
- (6) (i, j) 位于路口附近。

不均匀路段的范围并不是固定的，而是动态改变的，若有事故或交通管制发生，不均匀路段范围将相应扩大。对于不均匀路段处，判断该位置处的个体车辆是否具有换道需求，并且是否可以获得满足约束条件的换道轨迹。若同时成立，则根据换道方向确定 $H_{i,j}(t)=1$ 还是 $H_{i,j}(t)=-1$ ，否则 $H_{i,j}(t)=0$ 。

通过在 Frenet 标架下对路网车道进行网格剖分^[28]，给定初值条件后，就可以结合车辆换道行为模型对宏观流模型进行求解，得到任意位置网格处任意时刻任意的车流速度和密度。求解流程如图 5 所示，其中边界数据包括两个部分，一是仿真初始时刻道路上车辆的运动状态（包括位置、速度等），二是仿真中间时刻流入路网内的车辆的运动状态，边界数据由用户根据需要定义并输入。

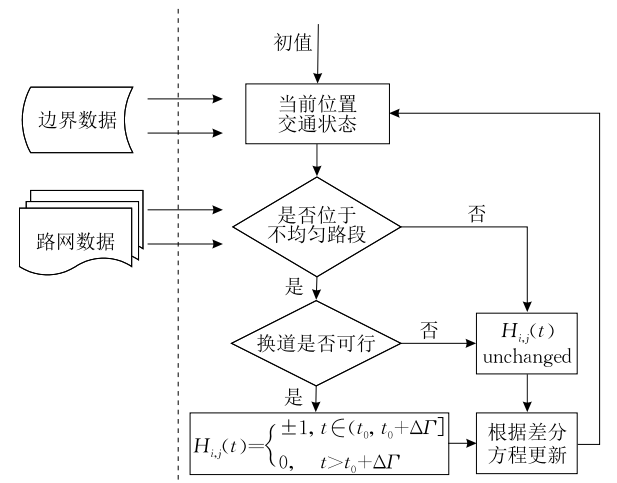


图 5 流方程约束求解流程图

6 系统仿真结果分析及应用案例

基于上述方法，我们实现了一个面向复杂路网的大规模车辆运动仿真系统，并在城市级路网上对本文方法进行了实际应用和有效性测试。本文的效率实验是在如下配置的工作站上实现的：Core 8 Xeon(R) E31240 3.4 GHz CPU, 4.0 GB RAM。

6.1 层次路网建模结果与分析

首先，从语义生成的角度，对本文提出的路网语义模型和 Wilkie 等人^[26]的路网模型进行对比，表 1 给出了语义数据生成的自动化程度对比。可以看出，Wilkie 等人的模型对于路口数据需要额外手工交互输入，还需要进一步对冲突线路进行交通相位分配设置，工作量大且容易产生错误。而本文模型需要的输入数据仅为车道线数据，其他数据包括路口数据和描述冲突关系的交通相位数据可以全自动的生成，减少了两大类数据的输入。这不仅减少了手工输入数据的工作量，也避免了人为误差的引入。并且，本文模型对路口的定义并不针对特定路口，而是根据在拓扑上相连通和相交来自动生成一个 Intersection，所以模型可以生成任意复杂的路口文模型和已有模型相比，在数据生成的自动化程度上有显著的优势。

表 1 语义数据生成自动化程度对比

	路口	邻接关系	连接关系	冲突关系
Wilkie 方法 ^[26]	手工交互生成	自动生成	自动生成	手工交互生成
本文方法	自动生成	自动生成	自动生成	自动生成

其次，给出路网语义数据自动建模的效果和效率测试结果。我们对半径为 5 km 的某城市市区道路，共有约 8000 条车道，进行了路网语义建模。语义建模基于输入的 Lane 数据完成。结果显示，该区域内所有实际中相邻以及相连的车道都完全正确在本语义数据中得以体现。所有路口，包括各种平交路口，环形路口，各类立体交叉路口等具有冲突的线路也通过自动生成路口处交通相位实现了冲突分离，证明了路网语义模型的有效性。图 6(a)和图 6(b)，分别给出了路网局部车道层矢量数据和路网局部层次关系数据图示，图 6(c)给出了该场景的遥感影像。此外，在合格的 Lane 数据基础上，该场景路网生成语义数据共耗时约 200 s，作为数据预处理过程，这一时间用户是完全可以接受的。

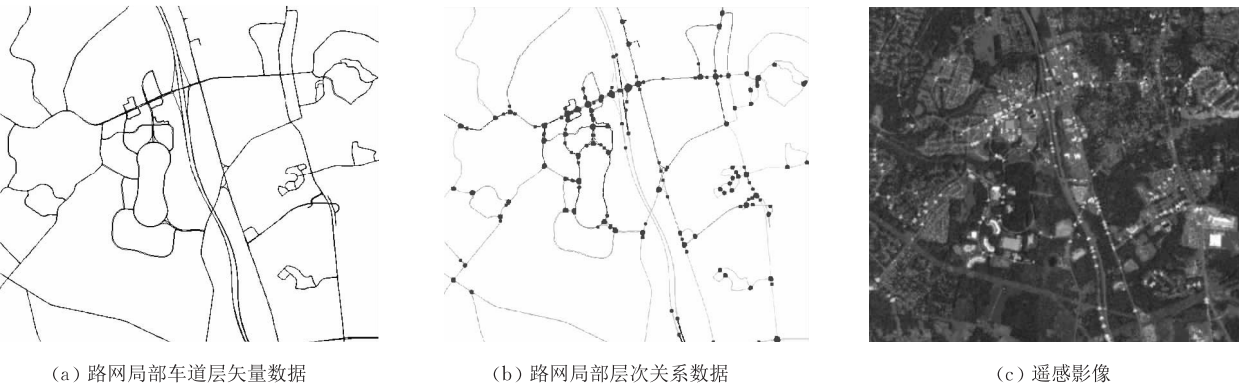


图 6 针对某实际区域道路进行层次路网语义建模结果

6.2 车辆运动仿真结果与分析

我们给出采用本文方法进行车辆运动实时仿真计算的效率和效果测试结果. 对于计算效率, 在路网规模给定的情况下, 系统的计算效率和车辆数目几乎无关(图 7), 并且与经典的宏观流模型^[5] (一维合作驾驶格子流模型) 保持在同一数量级, 说明所提出的方法能够用于大规模车辆运动仿真. 在上述配置的机器上, 本文方法可以实时仿真计算总里程为 600 km 的路网规模内的车辆运动.

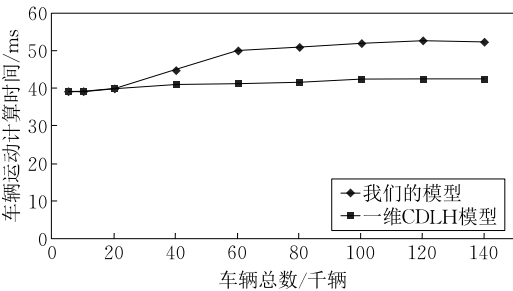


图 7 车辆数目和仿真计算时间之间的关系图(本实验的路网规模如下: 车道线总里程约为 600 km, 不均匀路段约占总路网的 20%. 菱形格折线是本文的结果, 方形格折线是经典合作驾驶格子流模型^[5]的结果)

为进一步验证本文方法的有效性, 我们选取车辆频繁发生换道行为的交通实例数据与本文方法进行对比. 我们采用 Next Generation Simulation (NGSIM) 网站^①发布的交通实例数据来进行对比.

NGSIM 是美国联邦高速公路运输管理局(FHWA)开创的网站. 我们采用了该网站上 San Francisco 城市的 Interstate 80 公路上的一段上匝道路段(如图 8 中两条粗直线标识区域所示). 我们对该路段内 1 分钟内所有换道车辆进行了跟踪. 该路段属于高速公路的上匝道路段, 车辆从匝道进入主道之后会频繁发生换道行为.

实测数据在该路段该时段内共发生 12 次换道行为. 这里一辆车从一个车道通过侧向运动(垂直于车道线方向)进入邻居车道算一次换道行为. 实测数据中换道开始时刻为车辆开始向目标车道侧向偏移的时刻, 结束时刻为换道车道到达目标车道后并且车辆朝向角平行于车道线方向时刻, 换道持续时长为换道结束时刻和换道开始时刻的差值.

我们将本文模拟的换道轨迹和实测数据中车辆的换道轨迹做了对比. 如图 9 所示为模拟结果和实测数据对比视频截图, 图中表示当前时刻共有三辆车正在进行换道行为. 圆点标识的为具有换道需求的车辆, 图中上子图表示的是本文模型模拟的车辆换道, 曲线表示的是模拟的换道轨迹, 下子图表示的是实测数据中车辆的换道, 曲线表示的是实测数据中车辆的换道轨迹, 中间子图表示的模拟轨迹和实测数据中车辆运行轨迹的对比结果图. 可以看出, 本文模型模拟的换道轨迹和实测数据在视觉上有很好的吻合性.

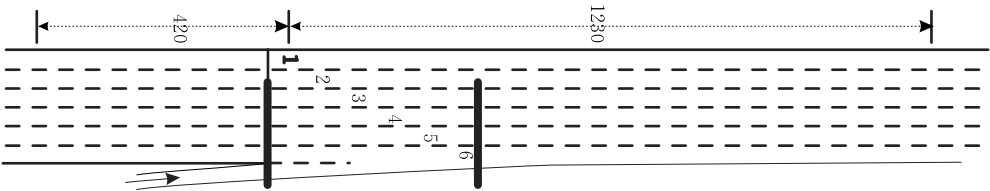


图 8 实例数据采集区域的道路状况

① Ngsim. <http://ngsim-community.org/>, 2013

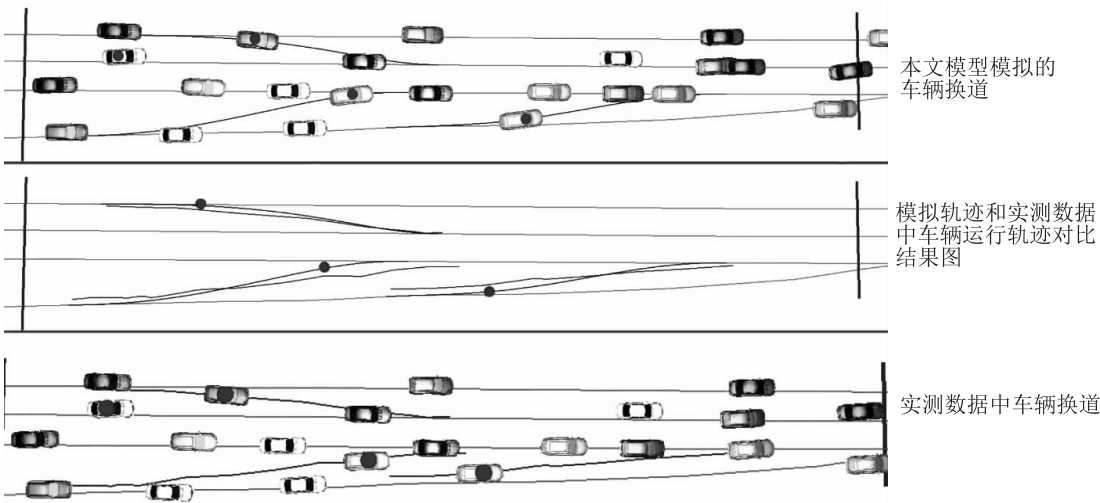


图 9 实例数据中换道轨迹与模拟得到的换道轨迹对比图

接下来我们将本文模拟的换道持续时长和实测数据中的换道持续时长做对比,如图 10 所示为对比

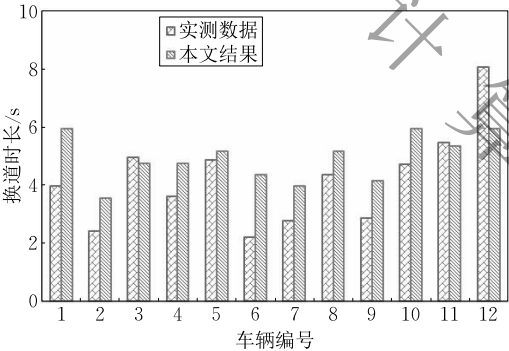


图 10 换道持续时长结果对比示意图

时段内 12 次换道行为的实际换道时长和模拟换道时长的对比图,可以看出,在绝大多数换道中,本文模型模拟结果和实测数据有大致相当的换道时长,通过进一步分析得出,本文模拟的换道时长和实测结果的平均误差约为 1.1 s.

目前,本文系统已针对我国秦山、福清等核电厂周边数十公里范围内的城镇、乡村路网进行了建模,对各种交通管制措施和交通状况下的车辆运动进行仿真计算,特别仿真并展示了其在应急疏散情况下的交通状况.图 11 为本文系统车辆仿真结果的三维展示图.



图 11 部分交通场景模拟效果图

7 小 结

随着虚拟现实技术的发展,虚拟城市研究得到了长足的发展.将高细节、高逼真度的车辆运动模拟技术融入到城市模拟中,对提高模拟的可信度和增强视觉体验以及交通设计、交通规划等具有重要作用.现有车辆运动模拟方法不仅对输入路网数据要求高,并且可以模拟城市级大规模车辆运动的宏观流模型仅能够描述交通流的大致运动趋势,无法模拟车道间的车辆个体交互行为,降低了模拟结果的真实度和可信度.本文提出了一种针对复杂路网内大规模车辆运动仿真的方法,给出了方法的技术框架,并从路网语义建模、大规模车辆运动仿真计算等方面,对方法的技术细节进行了阐述.实验结果和应用案例表明,该方法具有如下显著的优势:首先,方法对路网数据的输入量要求较低,仅需要输入车道线矢量数据即可满足动画仿真的需求;其次,方法实时模拟的效率和车辆数目几乎无关,使得方法适用于大规模车辆运动的模拟;最后,方法可以细致的描述车辆何时换道以及如何换道等行为,提高了模拟的逼真度和准确度.

然而,本文尚有一些不足亟待解决,同时车辆运动模拟领域还存在许多工作需要进一步的完善和研究,包括:(1)在实际应用中,需要将本文提出的车辆运动仿真方法同指导个体寻径的全局路径规划方法相结合,才能实现完整的城市交通仿真.而基于本文车辆运动仿真结果,结合目前新兴的车联网技术,可开展针对交通流量优化和个体最优路径规划的交通导引技术研究;(2)本文仅对车辆的运动模拟展开了分析,实际道路中人和车是密不可分的,特别在一些关键路口处,所以实现人车混行的模拟才具有重要的应用价值.

参 考 文 献

- [1] Shen J, Jin X. Detailed traffic animation for urban road networks. *Graphical Models*, 2012, 74(5): 265-282
- [2] Chao Q, Shen J, Jin X. Video-based personalized traffic learning. *Graphical Models*, 2013, 75(6): 305-317
- [3] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 2000, 62(2): 1805-1824
- [4] Zhang H M. A non-equilibrium traffic model devoid of gas-like behavior. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2002, 36(3): 275-290
- [5] Ge H X, Dai S Q, Xue Y, et al. Stabilization analysis and modified Korteweg—de Vries equation in a cooperative driving system. *Physical Review E*, 2005, 71(6): 066119
- [6] Pedersen M M, Ruhoff P T. Entry ramps in the Nagel-Schreckenberg model. *Physical Review E*, 2002, 65(5): 056705
- [7] Helbing D, Tilch B. Generalized force model of traffic dynamics. *Physical Review E*, 1998, 58(1): 133-139
- [8] Cremer M, Ludwig J. A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1986, 28(4): 297-303
- [9] Aw A, Rascle M. Resurrection of “second order” models of traffic flow. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2000, 60(3): 916-938
- [10] Daganzo C F. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1994, 28(4): 269-287
- [11] Nagatani T. TDGL and MKdV equations for jamming transition in the lattice models of traffic. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 1999, 264(3): 581-592
- [12] Sun D-H, et al. A continuum traffic flow model with the consideration of coupling effect for two-lane freeways. *Acta Mechanica Sinica*, 2011, 27(2): 228-236
- [13] Nagatani T. Jamming transitions and the modified Korteweg—de Vries equation in a two-lane traffic flow. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 1999, 265(1): 297-310
- [14] Sewall J, et al. Continuum traffic simulation. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(2): 439-448
- [15] Sewall J, Wilkie D, Lin M C. Interactive hybrid simulation of large-scale traffic. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(6): 135-146
- [16] Gipps P G. A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1986, 20(5): 403-414
- [17] Shen J, Jin X. Detailed traffic animation for urban road networks. *Graphical Models*, 2012, 74(5): 265-282
- [18] Sewall J, et al. Virtualized traffic: Reconstructing traffic flows from discrete spatiotemporal data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2011, 17(1): 26-37
- [19] Lu X, et al. AA-FVDM: An accident-avoidance full velocity difference model for animating realistic street-level traffic in rural scenes. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2014, 25(1): 83-97
- [20] Papadimitriou I, Tomizuka M. Fast lane changing computations using polynomials//*Proceedings of the 2003 American Control Conference*. Denver, USA, 2003: 48-53
- [21] Ammoun S, Nashashibi F, Laureau C. An analysis of the lane changing manoeuvre on roads: The contribution of inter-vehicle cooperation via communication//*Proceedings of the 2007 Intelligent Vehicles Symposium*. Istanbul, Turkey, 2007: 1095-1100

- [22] Xu W, Yao W, Zhao H, et al. A vehicle model for micro-traffic simulation in dynamic urban scenarios//Proceedings of the Robotics and Automation (ICRA). Shanghai, China, 2011: 2267-2274
- [23] Parish Y I, Müller P. Procedural modeling of cities//Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles, USA, 2001: 301-308
- [24] Chen G, Esch G, Wonka P, et al. Interactive procedural street modeling. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 103(1-9)
- [25] Yang Q, Koutsopoulos H N. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1996, 4(3): 113-129
- [26] Wilkie D, Sewall J, Lin M C. Transforming GIS data into functional road models for large-scale traffic simulation. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(6): 890-901
- [27] Galin E, Peytavi A, Mar Chal N, et al. Procedural generation of roads. Computer Graphics Forum, 2010, 29(2): 429-438
- [28] Mao Tianlu, Wang Hua, Deng Zhigang, Wang Zhaoqi. An efficient lane model for complex traffic simulation. Computer Animation and Virtual Worlds Journal, 2015, 26 (Special Issue): 397-403
- [29] Wang Hua, Kang Xing-Chen, Mao Tian-Lu, Wang Zhao-Qi. A semantic model of road networks for traffic animations. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(10): 1818-1826(in Chinese)
(王华, 康星辰, 毛天露, 王兆其. 针对车辆群组动画仿真的路网语义模型. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(10): 1818-1826)
- [30] Hidas P. Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2005, 13(1): 37-62
- [31] Wang Hua, Mao Tianlu, Kang Xingchen, Wang Zhaoqi. An all-in-one efficient lane-changing model for virtual traffic. Computer Animation and Virtual Worlds Journal, 2014, 25(3-4): 385-393



MAO Tian-Lu, born in 1977, Ph.D., associate professor. Her main research interests include virtual reality and human-computer interaction.

WANG Hua, born in 1982, Ph. D., associate professor. Her main research interest is intelligent modeling.

KANG Xing-Chen, born in 1991, M. S. Her main research interest is traffic simulation.

XU Ming-Liang, born in 1981, Ph.D., associate professor. His main research interest is virtual reality.

WANG Zhao-Qi, born in 1966, Ph.D., professor, Ph.D. supervisor. His main research interests include virtual reality and human-computer interaction.

Background

With the development of virtual reality technologies, there has been a significant development of the studies of virtual cities. There is a growing need to blend detailed traffic modeling into urban environment animations, since it not only can improve the credibility of the simulation results and enhance virtual experiences, but also plays a great role in traffic designing and planning. Existing methods need many inputs and they can't detailed describe lane-changing behaviors of large-scale urban traffic, which decreases the realism of the results. Our method can detailed describe lane changes only basing on vector data of lanes for road networks and the efficiency is nearly independent upon the numbers of vehicles.

This project belongs to the R&D Special Fund for Public Welfare Industry *Researches for Technology of Evaluating Evacuation Capabilities of Crowd and Population Centers*

Near Nuclear Plants. It is important to evaluate the capabilities of the crowd near nuclear plants because it is the foundation of site selections of nuclear plants, divisions of emergency planning zones, emergency response planning and decision-making dealing with accidents. However, existing methods that are used to the evaluation are mainly based on some relevant national regulations and standards. The evaluation results based on these methods are vague and rough. Our researches give quantitative studies and evaluations for crowd evacuation capabilities and can provide more reliable base for site selections of nuclear plants and divisions of emergency planning zones, etc. The studies in this paper belong to the research module of traffic evacuation capacities. We can analysis how traffic evacuations affect evacuation capacities by traffic simulation results.