

三维GIS及其在智慧城市中的应用

朱 庆

(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756)

摘要: 三维GIS是当今乃至未来GIS技术的主要标志性内容之一,它突破了空间信息在二维地图平面中单调表现的束缚,为各行各业以及人们的日常生活提供了更有效的辅助决策支持。本文重点介绍了三维GIS的数据模型、数据库管理和可视化分析等关键技术及其研究进展,并以武汉市为例展示了三维GIS对城市立体空间的整体表达,为大城市、全市域的三维数字城市建设奠定了基础,最后探讨了在智慧城市建设与城市安全中三维GIS将发挥日益重要的时空信息承载引擎与空间智能技术支撑作用。

关键词: 三维GIS; 三维可视化; 三维空间分析; 承载引擎; 智慧城市

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2014.00151

1 引言

作为国家发展战略,我国城镇化面临的最大挑战是城市人口增长与承载能力不协调,大型地上下空间开发呈现加速态势,而这种日益复杂的人口、设施和资源在空间的三维立体分布(从地上到地下、室外到室内),使得城镇化进程加快,并在聚集财富的同时,也聚集了大量的风险。例如,由于输油管道与城市排水管网规划布置不合理,2013年11月22日,中国石化位于青岛经济开发区的一输油管道发生原油泄漏爆炸,导致62人遇难,136人受伤,成为特别重大事故。血的教训再次说明,全面透彻的三维空间感知与认知已成为城市规划设计、建设和管理亟待解决的问题。城市信息化的同步建设已成为城镇化成功建设与安全的关键保障。GIS因为提供了日益强大的综合分析、解析分析、定量分析和可视化分析等功能,业已成为城市信息化的基本内容,并已成为人们在广泛的领域内理解现实世界和解决复杂问题的重要工具。经过十余年的发展,以GIS为核心的数字城市成为了城市信息化的主要标志之一,人们已经生活在2个城市中,即物质城市和数字城市。然而,传统GIS关于地理信息的思考是基于纸质地图的,而这种地图最大的局限就在于时间维和高度维的表达,这造成了传统地图的GIS方法空间跟真实地理空间及人们

认识空间之间的矛盾日益突出^[1]。智慧城市的本质是要通过信息流控制能量流和物质流,实现资源自主优化配置,因此,越来越复杂的城镇人口、资源与设施在三维立体空间的优化配置及其安全等日益严峻的问题急需三维GIS技术支撑。

为了突破传统二维地图“多张皮”和传统三维可视化GIS仅限于三维外观显示的局限,利用三维GIS对整个城市的三维立体空间进行统一描述,并充分准确地集成表达地下的地质、管线、构筑物,地上的土地、交通、建筑、植被,以及室内的设施、房产、人口等,形成与现实世界一致的三维立体空间框架,这已成为GIS技术研究与应用的国际前沿。以Google Earth为典型代表,地球空间信息的三维可视化大众化、并以其开放性、可量测性和可挖掘性一并成为了信息化服务的基本要求,三维地图也因此成为人们跟空间信息交互的基本方式和各种门户网站信息服务的基本内容。“三维数字城市模型在数字城市地理空间框架建设中,既是新颖生动的亮点、更是技术升华的结晶,越来越为人们所重视,越来越多的城市开展了三维建模和应用”^[2]。数字地球发展的首要成就是实现了从二维到三维的跨越^[3],而且中国的GIS技术“在3D领域,已经超过了其他许多国家”(http://news.3snews.net/2013/1030/27544.html)。

收稿日期:2013-12-01;修回日期:2014-01-08.

作者简介:朱 庆(1966-),博士,教育部长江学者特聘教授,新世纪百千万人才工程国家级人选,主要从事数字摄影测量、地理信息系统和虚拟地理环境的研究与教学工作。E-mail: zhuq66@263.net

2 三维GIS的关键技术

三维GIS的研究对象从二维地图转变为三维世界,使地形地物的空间形态、结构与相互之间的关联关系变得更加复杂,相应的GIS数据模型和技术方法都需要颠覆性的创新,比如传统分幅镶嵌的二维平面地图数据结构需要转变为无缝的三维模型(几何+外观+语义)数据结构;离散比例尺地图符号可视化需要转变为多细节层次(LOD)真实感场景的自适应可视化等^[4-5]。同时,三维实体空间一体化的高精度建模、准确度量分析、高效集成管理与实时可视化分析等一直是三维GIS研究的主题与核心,近年来取得了系统性的突破^[6]。本文针对三维GIS的关键技术进行重点分析。

2.1 真三维GIS数据模型

三维空间数据模型是三维GIS的基础,也是决定三维GIS系统能力的最基本因素。传统三维空间数据模型大都面向特定的专业领域,如地质模型、矿山模型、地表景观模型等,这些模型大部分针对单一数据类型,不能表示多源异构数据,并且缺乏统一的语义表达、在多尺度表达的一致性方面较差,需要在线进行坐标转换、数据结构转换,不同系统功能难以并行处理、增加三维绘制状态的切换频率等,导致三维GIS系统利用率低,多种应用需要多套数据和多种软硬件系统,难以满足地上下和室内外三维空间信息的精准表达、动态更新与一致性维护,以及综合分析的需要。因此,传统三维GIS难以提供一个城市完整的空间表达与管理的解决方案,尤其是宏观规划管理跟微观精细化管理之间的矛盾十分突出。针对地上下和室内外多粒度对象统一表达的复杂性与高效性难题,地上下和室内外一体化表达的真三维GIS模型(图1)刻画了三维空间对象几何、拓扑和语义的特征及其相互关系:统一的空间基准与数据结构、多层次语义与拓扑关系,以及几何与纹理的多细节层次表达等^[7-10]。特别是基于三维几何的精细化表达,实现了建筑、道路等设施及其部件级别的物理性能和功能的语义描述,使得三维GIS进一步拓展能有效支撑物联网信息的承载和关联分析,以及室内外无缝定位与导航应用。该模型扩展了国际OGC标准CityGML四种最主要的常用专题模型^[11]:建筑模型、道路模型、管线模型和地质模型,实现了将复杂的三维地理环境

划分为3个层次进行描述:地形表面层次、地上下立体空间层次和建筑物三维内部空间层次。

(1)地形表面层次是面向完整的2.5D地表空间管理,在整个区域地形表面空间层次上确保合理的空间划分与区域识别;

(2)地上下立体层次是基于基本的立体层次描述的三维空间,主要解决三维空间对象在二维抽象表示中产生的地上下交叠问题,满足三维空间层面的对象精确表达与分析需求;

(3)建筑物三维内部空间层次是基于建筑结构的语义关系进一步详细划分的内部空间层次,使用“位于”和“部分一组成”语义关系来表达建筑物的内部逻辑构成,从而建立完整的三维内部空间表示。

2.2 精确高效的三维GIS集成建模

2010年,国家住房和城乡建设部颁布了“城市三维建模技术规范”,统一了面向城市规划、设计、建设、管理等应用的城市三维建模技术规范。2012年,国家测绘地理信息局发布了面向基础地理信息产品生产的三维模型数据生产、产品、数据库3本规范,确定了模型的类型、内容,以及模型数据的采集、制作、质量控制、更新维护、数据入库等内容。近年来,倾斜摄影测量和激光扫描测量等高新技术的精度与速度都有了明显的提高,大量的研究致力于地物(尤其是人工地物)的三维自动重建,且依据分辨率、精度、时间和成本等的不同,已有许多适宜的技术方案可供选择。三维空间数据获取技术的成熟与规范化是三维GIS真正普及应用的重要保障。由于各个城市的自然与人文景观千姿百态,准确、逼真、精细、高效的城市三维建模仍然是一项十分复杂的系统工程^[2]。地上下和室内外不同环境的三维建模技术手段千差万别,根据已有地图信息和新获取的多角度高分辨率影像或激光扫描点云数据半自动化建模,再结合人工交互式建模的“集成化”模式成为当前乃至今后一段时期满足三维GIS建模精度、效果和效率的主要途径。

随着三维GIS在设施规划设计、建设与运行维护等全生命周期中的深化应用,三维CAD模型、三维建筑信息模型(BIM)与三维GIS模型的集成与融合成为新的前沿技术。如图2所示,建筑对象的工业基础类IFC(Industry Foundation Class)数据模型标准和CityGML两个标准定义的CAD/BIM模型与三维GIS模型分别采用2种不同的表达机制,即实

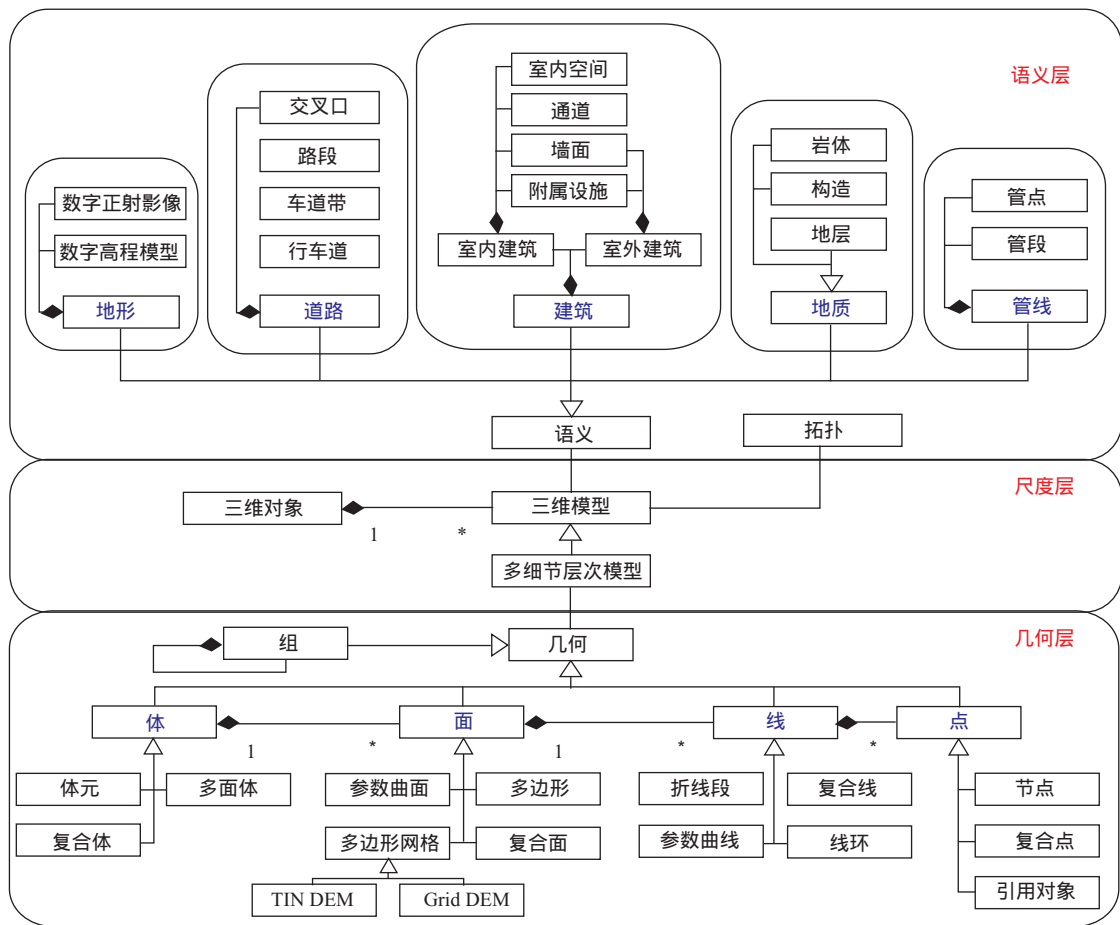


图1 三维GIS数据模型

Fig.1 Full 3D GIS Data Model

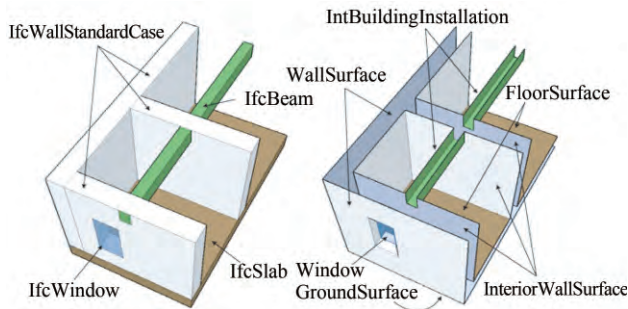


图2 IFC三维实体模型和CityGML三维表面模型的差异

Fig.2 The difference between IFC model and CityGML model

体模型和表面模型。因此，高细节层次的复杂建筑物或者城市尺度，以及高速铁路和高速公路等大范围三维GIS建模的技术难点在于从高细节层次模型到低细节层次模型的自动转化^[12]。

2.3 大规模三维GIS数据的高效组织管理模式

海量二维GIS数据以及瓦片式地形景观数据

的高效组织管理技术已经相对成熟，促进了虚拟地球的应用服务^[13]。而高效、一体化地组织与管理复杂的不均匀分布的地上下和室内外三维空间模型数据一直是研究的前沿难点问题，也是三维GIS从局部范围示范应用到城市级综合应用面临的主要技术挑战。三维GIS数据高效组织管理存在两大技术瓶颈：(1)由于模型数据量大、三维空间对象几何形状各异、空间分布稀疏不均、且结构化的二维纹理数据与非结构化的三维几何数据紧耦合引起的数据密集导致数据动态存取存在严重的I/O瓶颈；(2)三维空间数据分析与实时可视化等应用越来越复杂引起的计算密集导致了复杂空间数据操作存在服务器的性能瓶颈。传统三维GIS可视化系统由于采用一次性装载的数据组织管理方式，能处理的数据量受限于计算机内存和显存的大小，而且数据和软件常常还要绑定，难以充分发挥系统应用效能。针对这些技术瓶颈，国际上的研究一方面

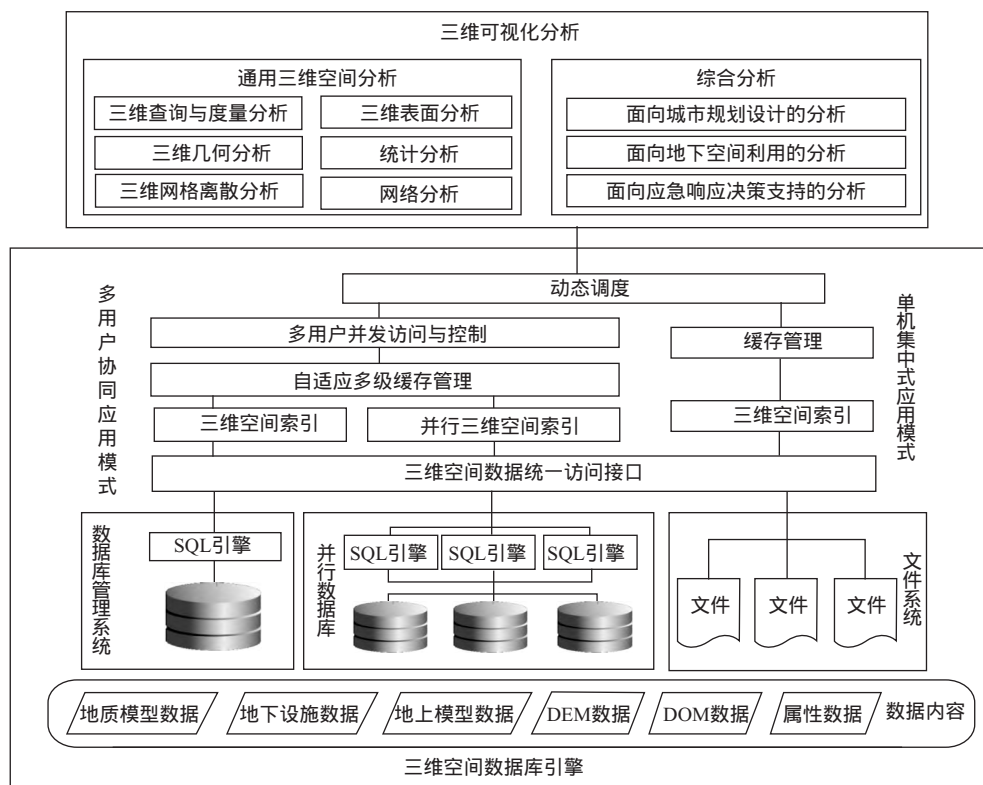


图3 三维GIS数据库引擎

Fig.3 3D GIS database engine

在最基本的模型表示和数据结构上通过标准化进行统一,尽量减少运行时不同格式模型的转换导致的时间和空间浪费;另一方面,在系统研制上主要是发展三维GIS特有的数据组织模式和相应的空间索引结构,以及动态调度机制。例如,基于数据内容的三维空间数据自适应多级缓存、顾及多细节层次的三维R树空间索引、三维GIS异步通信传输方法,以及文件系统、数据库系统与集群并行系统等灵活的数据库管理系统模式等^[14-16]。如图3所示,典型的三维GIS数据库引擎能灵活适应文件系统和关系数据库管理系统等多种存储管理模式,并满足多用户不同层次的实时可视化分析应用需求。

针对长大铁路、公路和地铁等大规模的复杂三维表面模型无缝的实时可视化分析应用,由于涉及很大范围的沿线地形地质景观模型和地物表面精细模型的多分辨率混合表达,往往要将多分辨率的规则格网Grid和不规则三角网TIN根据三维模型的复杂程度自适应地剖切为标准瓦片大小范围的数据进行高效组织管理。面向智慧城市建设,三维GIS一方面要不断优化改进数千平方公里范围TB级地上下和室内外三维模型数据的一体化组织管理性能,真正实现一个数据库共享应用的目的,显

著提升整个城市级多层次应用的效能;既能提供在线协同设计与精细化管理应用服务,也能提供在线轻量化与社会化的应用服务;同时,三维GIS作为时空数据的基本承载引擎,急需大大提升三维GIS支撑多维动态时空数据的组织管理能力,特别是时空关联和语义感知的数据库智能搜索能力。面向大型设施全生命周期的协同设计、施工管理、运营管理与综合养护等需要,三维GIS作为一体化的共享数据库平台,急需不断提升三维GIS组织管理与动态更新更加复杂的BIM/CAD模型,以及与各专业CAD系统之间有机协同的能力,支撑三维环境中的地理设计(GeoDesign)。

2.4 高性能三维可视化分析

众所周知,平滑流畅、逼真高效的三维可视化是三维GIS的基本功能之一。实际上,三维GIS可视化不同于传统二维GIS地图可视化最明显的特征就是真实感,或者说具有“相片质感”。这种真实感来自于精细的几何特征和逼真的纹理细节。同时,三维GIS数据的真实感可视化还特别强调人机交互响应的实时、低延迟和稳定的图像质量和逼真的场景效果。但对整个城市范围地上下和室内外

立体空间复杂的场景来说,由于数据量大且粒度不均匀,难达到实时性和逼真性。特别是从室外到室内随着精细度和逼真度的提高,图形的实时绘制工作量显著增加。场景的复杂性与实时绘制之间的矛盾一直是真实感可视化研究的核心难题。因此,传统三维GIS可视化在地上下和室内外等方面分别有所侧重,而且一般都需要对整个区域的数据进行预先的全局优化处理,以便系统运行时静态装载;即使动态装载也受限于场景复杂性和细节程度,难以兼顾大范围场景的宏观表现和局部场景的精细表现,动态漫游过程中视觉效果和性能易发生跳变。通过简化场景细节层次、图形硬件加速和并

行绘制等手段,以提高真实感三维图形可视化效率成为常用的主要技术途径。

如图4所示的高性能三维GIS可视化引擎充分利用计算机图形学研究的最新成果,基于高效的三维空间数据组织管理和动态调度机制,实现了整个城市范围三维空间数据的局部动态装载与优化,场景LOD自适应计算,视域内大量复杂物体的实时遮挡剔除,GPU/CPU协同的复杂三维场景实时绘制。支持地上下和室内外模型在同一流程里进行高效绘制,以及大范围地理场景的实时阴影等,满足了从精细模型到大范围景物多种不同复杂度场景的三维GIS实时可视化需要。

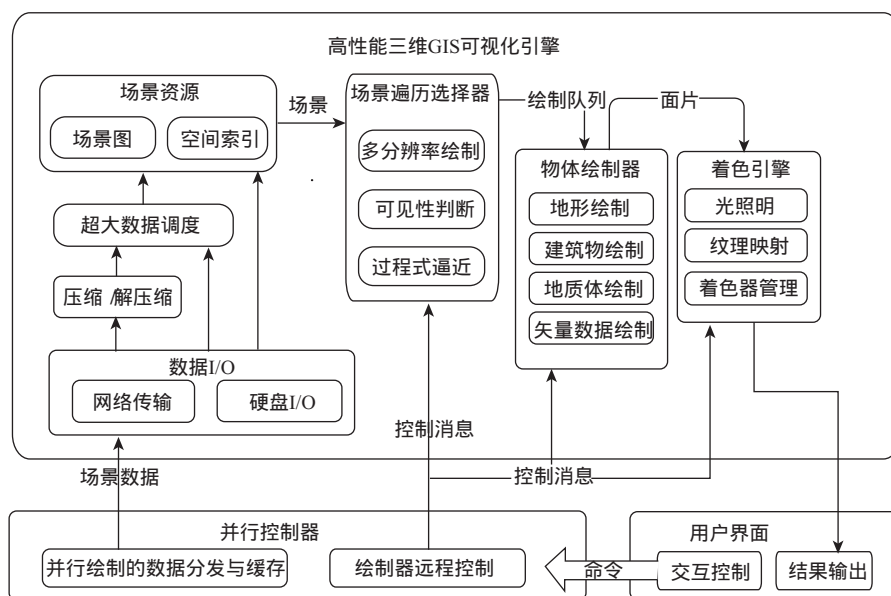


图4 高性能三维GIS可视化引擎

Fig.4 3D GIS visualization engine with high performance

随着三维GIS在规划设计与综合管理中应用的不断拓展和深化,三维可视化与三维空间分析的一体化日益密切。传统三维可视化分析局限于简单的三维空间关系和小范围场景数据,难以满足城市尺度的空间决策需要。基于整个城市范围地上下一体化的三维城市模型数据库,如何进行高效、精确的三维实体分析计算成为三维GIS可视化分析的主要难题之一。综合考虑复杂的三维语义拓扑关联关系,结合三维空间索引,发展矢栅结合的三维相交、三维离散和三维布尔运算等基础算法,以及分析过程与结果的实时可视化等成为三维GIS可视化分析研究的主要内容。而更加复杂的多维动态的陆、海、空一体化环境及时空过程模拟的真实感可视化、移动增强现实、地理协同与虚拟地理环境

(VGE)等已经成为三维GIS研究的前沿课题^[17]。

3 三维GIS典型应用案例

随着三维GIS技术的不断发展,三维数字城市正成为数字城市到智慧城市升级的主要建设内容之一,日益渗透到整个城市生活的方方面面。其中,三维数字武汉的建设和应用最具代表性。图5为真三维城市模型具有典型的地上下和室内外表达能力。

武汉市在2011年建成了全市8494 km²的三维框架模型、525 km²的三维现状模型和400多 km²地下管线三维模型,实现了地上下三维模型的一体化管理,是国内首个建成并投入使用的特大城市级真



图5 武汉三维GIS应用场景

Fig.5 The applications of full 3D GIS in Wuhan City

三维城市模型,并建立了数据采集、生产、管理、维护和应用的一体化循环体系,实现了城市三维模型数据、属性信息、规划信息等数据的动态可持续更新。三维城市模型在城市规划设计和管理工作中实现了常态化应用,实施了特大城市的规划管理从二维到三维的转变,并已应用于国土资源管理、交通规划和实有人口、实有房屋管理等领域300多项重点工程,大大提高了规划审批的效率,尤其是对于重大项目的审批,能够大幅缩短审批时间。其辅助实有人口、实有房屋管理,实现“图-房-地址-人”的动态链接和管理,做到了“房落地、人进房、查房知人、查人知住”,显著提升了城市管理和服务能力。特别的,基于三维城市模型,大大提高了整个城市运行信息的聚合与融合能力,不仅整合了规划编制信息、管理审批信息和调查评价信息,还整合了全市人口、房屋、法人、部件、事件等专题信息,这些信息的融合与集成应用都在城市规划管理和城市决策中发挥了重要作用,极大地促进了整个城市信息资源的综合利用,为“智慧武汉”的建设奠定了重要基础。

4 实时三维GIS在智慧城市中的作用

智慧是关于人的行为和事件的知识,都与人事、地点、设施、资产和组织的地理空间位置关联。智慧城市因为“知道的信息越多而越聪明”,这些信息无时无刻不在,随人、物和事而动,可计算、推理,

还可全息感知。面向城市运行的物联网和传感网信息的有效承载,急需从外到内构建一个活生生的实时三维GIS。实时三维GIS自然就成为各种动态信息实时接入、加载、时空关联与融合计算的引擎,是智慧城市的神经中枢,更是城市安全的关键保障,因此成为新一代GIS的主要标志。新一代GIS正逐步向VGE方向发展,在VGE中,有关现实世界的时空动态信息的获取、处理、共享与分发成为一个活的信息链路,将现实世界与数字世界有机联系在一起,为人们提供一个与日常活动密不可分的工作空间:主要包括历史、未来和现实紧密结合的活的数据环境、动态数据驱动且全程可控的地理过程建模与仿真环境、多维表达与多通道感知的虚实交互环境,以及协同式的地理综合感知与认知环境。这正是GIS发展和智慧城市建设所面临的最大挑战。

5 结论与展望

从三维GIS发展到实时GIS是GIS未来发展的又一大趋势。GIS已经形成二维GIS、三维GIS与实时GIS交相辉映的多维动态表示新格局,将大立体、高动态的现实世界更加全面准确地映射到计算机数据库,发挥其特有的功能,更好地为大众服务。

智慧地球是真实地理环境与虚拟地理环境的融合,智慧城市是真实城市环境与虚拟城市环境的融合与协同,三维GIS在其中发挥重要的时空信息承载和纽带作用,并提供了有力的可视化分析方法和支撑手段,正日益成为政府、企业和公众不可或缺的科学的、定量与定性结合的、直观方便的助手。随着组合导航与定位、高分辨率遥感和信息与通信技术的不断发展,全景影像和三维点云以及视频流等数据类型已经成为三维GIS新的数据内容,室内外无缝导航与位置智能服务以及与现实世界平行的虚拟地理环境建设正成为三维GIS不断丰富和完善新的发展动力。三维GIS虽呈现出快速发展的态势,但仍然面临巨大的挑战。为有效支撑智慧城市的建设与城市安全,三维GIS在数据模型与数据结构、数据组织与数据库管理、可视化与空间分析等方面需要新的概念框架、方法和技术。

参考文献:

- [1] 朱庆. 3维GIS技术进展[J]. 地理信息世界, 2011, 9(2):

- 25-27.
- [2] 宁振伟, 朱庆, 夏玉平. 数字城市三维建模技术与实践[M]. 北京: 测绘出版社, 2013.
- [3] 李德仁, 龚健雅, 邵振峰. 从数字地球到智慧地球[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(2): 127-132.
- [4] 张文彤等. 城市三维建模技术规范[M]. 中国建筑工业出版社, 2010.
- [5] Xu W P, Zhu Q, Zhang Y T. Semantic modeling approach of 3D city models and applications in visual exploration[J]. The International Journal of Virtual Reality, 2010, 9(3): 67-74.
- [6] 中国地理学会. 地图学与地理信息系统学科发展报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2014.
- [7] 刘刚, 吴冲龙, 何珍文, 等. 地上一体化的三维空间数据库模型设计与应用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2011, 36(2): 367-374.
- [8] Zhang Y T, Zhu Q, Liu G, *et al.* GeoScope: Full 3D geospatial information system case study[J]. Geo-Spatial Information Science, 2011, 14(2): 150-156.
- [9] Zhu Q, Li Y. Hierarchical lane-oriented 3D road-network model[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2008, 22(5): 479-505.
- [10] Zhu Q, Hu M Y. Semantics-based 3D dynamic hierarchical house property model[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(2): 165-188.
- [11] Gröger G, *et al.* OGC city geography markup language (CityGML) encoding standard V2.0[M]. OGC, 2012.
- [12] Zhao J, Zhu Q, Du Z Q, *et al.* Mathematical morphology-based generalization of complex 3D building models incorporating semantic relationships[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012(68): 95-111.
- [13] Wu H Y, He Z W, Gong J Y. A virtual globe-based 3D visualization and interactive framework for public participation in urban planning processes Original Research Article[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2010, 34(4): 291-298.
- [14] 李晓明. 顾及语义拓扑的大规模三维空间数据高效管理方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [15] 周东波. 顾及粒度的三维城市模型数据高效组织方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [16] Zhu Q, Gong J, Zhang Y T. An efficient 3D R-tree spatial index method for virtual geographic environments[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62(3): 217-224.
- [17] Lin H, Chen M, Lu G N, *et al.* Virtual geographic environments (VGEs): A new generation of geographic analysis tool[J]. Earth-Science Reviews, 2013(126): 74-84.

Full Three-Dimensional GIS and Its Key Roles in Smart City

ZHU Qing*

(Faculty of Geosciences and Environmental Engineering of Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Three-dimensional GIS (3D GIS) is one of the primary and typical contents of GIS technology at present and in the future, which overcomes the constraints of representing 3D GIS spatial information in two-dimensional map, as well as provides a more effective decision-making support for people's daily life. This paper focuses on the research progress and its key technologies of 3D GIS, including the data model, database management and visual analysis. The pilot applications of 3D GIS in Wuhan are also illustrated. The entire 3D space of the city is represented by 3D GIS. Then construction of the large-scale city digitalization is enabled with the improvement of city management. Finally, the applications of 3D GIS for spatio-temporal information bearing engine and spatial intelligence in smart city and city safety are investigated.

Key words: three-dimensional GIS; three-dimensional visualization; three-dimensional spatial analysis; bearing engine; smart city

*The author: ZHU Qing, E-mail: zhuq66@263.net