

引文格式:单杰,李志鑫,张文元.大规模三维城市建模进展[J].测绘学报,2019,48(12):1523-1540. DOI:10.11947/j.AGCS.2019.20190471.
SHAN Jie, LI Zhixin, ZHANG Wenyuan. Recent progress in large-scale 3D city modeling[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1523-1540. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190471.

大规模三维城市建模进展

单 杰¹, 李志鑫¹, 张文元^{2,1}

1. 普渡大学土木工程学院, 美国 西拉法叶 IN47907; 2. 华中师范大学国家文化产业研究中心, 湖北武汉 430079

Recent progress in large-scale 3D city modeling

SHAN Jie¹, LI Zhixin¹, ZHANG Wenyuan^{2,1}

1. Lyles School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette IN47907, USA; 2. National Research Center of Cultural Industries, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

Abstract: Large scale 3D city models become increasingly demanding for urban planning and management, environmental simulation, emergency response, navigation, virtual tourism and other scientific and public applications. Considerable achievements have been accomplished over the past two decades through joint efforts from multiple disciplines. The objective of this paper is to comprehensively summarize and discuss the current technologies and recent progresses of 3D city modeling in data sources, modeling methods and platforms, 3D city model representation and interoperability. Finally, several representative examples of open city models across the world are described. Driven by the increasing diverse data, advanced yet affordable technology, and growing public and scientific needs, 3D city modeling is accelerating to be automatic, meticulous, semantic, standardized, seamless, and open to the general public.

Key words: 3D city models; model representation; CityGML; level of detail; open data

摘 要:大规模三维城市模型在城市规划与管理、环境模拟、应急响应、导航、虚拟旅游以及其他科学和大众应用方面的需求越来越高。在过去的 20 年中,通过多学科共同努力,大规模城市三维建模已经取得了可观的成就。本文全面总结和讨论了三维城市建模在数据源、建模方法和平台、模型表达和互操作等方面的新技术和新进展,并描述了世界范围内开放城市模型的几个代表性示例。在日益多样化的数据,先进但价格可承受的技术以及不断增长的公共和科学需求的推动下,三维城市建模正在加速实现自动化、细致化、语义化、标准化、一体化和大众化。

关键词: 三维城市模型; 模型表达; 城市地理标记; 细节层次; 开放数据

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2019)12-1523-19

1 城市建模概述

城市是由多种要素及其空间关系构成的复杂系统。随着城市要素的类别、形状和结构的不断变化,其复杂性也越来越高。在全球城市化进程中,世界上已有一半以上的人口居住在城市。随着全球变暖和工业化程度提升,对城市每个细节的规划也变得至关重要。为了有效管理庞大的城市空间及人口,理解和处理城市的动态变化特征,有必要根据这种动态性和复杂性来创建三维

城市模型^[1]。(三维)城市模型是对城市环境中常见对象的三维几何和结构的数字表达。一般来说,城市模型既包含城市建筑物、地形、道路、植被、基础设施和景观等城市地物的三维几何表达,也包含地物之间空间关系、相关活动等一些抽象对象的动态表达,包含各种信息来源的集成,可用于不同应用领域中的各种表达、探索、分析和管理等任务^[2]。

城市模型的建立由来已久。早在 1933 年,意大利贝尼托·墨索里尼(Benito Mussolini)就命人创建了令人惊叹的古罗马城市塑料模型,它忠

实重现了公元 4 世纪君士坦丁大帝统治时期的城市外观,这些模型至今仍在罗马文明博物馆展出。美国纽约也在 1964 年世界博览会期间打造了名为“纽约全景”的城市沙盘模型,包含 895 000 个独立建筑。随后,莫斯科、悉尼、上海、重庆、东京、伦敦、多伦多等国际大都市先后创建了大规模城市沙盘模型^[3]。早期这些大规模城市模型都是依靠人工创建,制作周期长,成本高。近年来,无人机、倾斜相机、激光雷达的普及和推广,加上高分辨率卫星立体成像日趋成熟,不仅使得大规模城市模型的快速生产成为现实,而且建模周期逐渐缩短,成本也不断降低。与此同时,遥感、摄影测量、计算机图形学、立体视觉和机器学习等学科领域的蓬勃发展也为城市建模及其应用提供了强有力的理论和技术支撑,促使城市模型应用的广度和深度不断扩展。

得益于成本低廉的大规模三维数据快速采集与更新技术,苹果、谷歌和微软等大型公司也都纷纷角逐三维地理信息市场,将城市信息的三维可视化作为其公共地图服务的一部分,如 Apple Map、Google Earth、Microsoft Bing Maps 等,也由此引发了公众对城市模型的极大关注^[4]。截至 2016 年,Google Earth 三维影像就已经覆盖了全球 40 多个国家的上百个城市。此外,美国 CyberCity 3D 公司使用立体影像创建了超过 150 万栋高分辨率三维建筑模型,这些“智能”模型还附带高度、屋顶坡度等可测量数据,精度高达 15 cm,并兼容各种主流三维平台,适用于智慧城市表达、建筑物分析、上下文环境需求等各种地理空间分析领域。

三维信息丰富的城市模型不仅是传统二维地图或几何模型的扩展,还包括城市元素,属性和配置关系之间的复杂城市网络空间模型的构建。它允许将各种细节层次的多源异构地理信息集成到一个统一框架中,既可以表达地上的建筑物和各类活动,也可以有效描述地下空间设施,以此创建和管理复杂的城市信息空间^[5]。三维城市模型已经成为一种非常普遍的地理空间数据资源,成为了城市的必需品,对城市智能化管理至关重要。语义信息丰富的三维城市模型可以有效实现不同领域数据与 GIS 相关信息的高层次集成及互操作,从而在城市规划、环境模拟、应急响应和辅助决策等众多领域发挥作用^[6]。文献^[7]详细总结了城市模型在世界范围内上百种不同应用,包括

城市规划、三维地图导航、能源需求估算、可视域分析、阴影估算、光照模拟、城市噪声模拟、三维地籍、应急响应、变化检测、设施管理、文化遗产保护^[8]、智能交通、室内导航等众多领域。随着数字城市和智慧城市建设和在全国范围的逐步开展,城市三维模型在城市规划、建筑设计、导航、环境保护、旅游和房地产管理等领域也得到了广泛应用。

三维城市建模涉及空间数据获取、模型重建技术、模型表达、模型应用及资源共享等诸多环节,见图 1。在建模数据源方面,可以使用航天、航空和地面等各种平台获取的空间数据,如高分辨率多视卫星影像、航空影像、LiDAR 点云等,也能使用众源地理数据,如 OpenStreetMap 等。针对大规模三维城市模型的快速构建,目前主流方法有基于多视图点云的自动建模、基于 LiDAR 点云的三维重建、基于矢量数据的参数化建模,以及多源数据融合的建模技术等。而在三维模型表达与存储方面,需要考虑建模标准、语义表达、多细节层次(level of detail, LOD)生成与简化、互操作和空间数据库存储等技术细节。构建的三维城市模型可用于城市规划、环境模拟、灾害应急响应和导航等众多领域。最后,为了更加有效地发挥城市模型的价值,需要在开放模型标准、开放建模软件和开放数据库的基础上探讨更加广泛的模型开放与共享。本文将从城市建模数据源、建模方法、模型表达与操作、开放城市模型示例等方面展开介绍和讨论,全面梳理国际上三维城市建模技术及其进展。

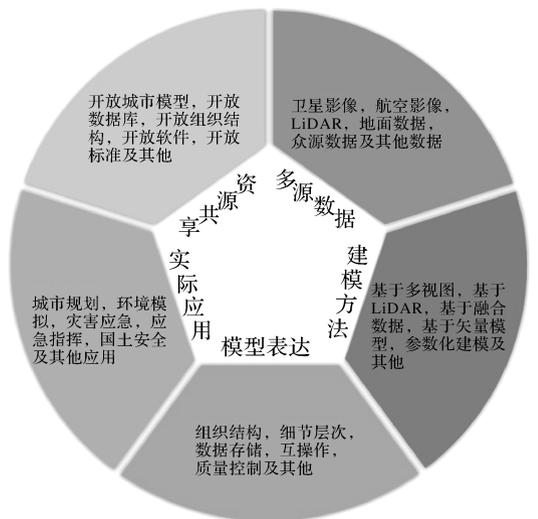


图 1 三维城市建模总体框架

Fig.1 The framework of 3D city modeling

2 城市建模数据源

随着空间数据获取技术的快速发展,越来越多的数据可用于大规模城市三维建模。下面针对高分辨率卫星影像、多视航空影像、机载激光雷达点云、地面数据和众源数据等几种典型城市建模数据源进行介绍。

2.1 卫星影像

2.1.1 高分辨率卫星影像

经过多年的发展,航天遥感技术无论在光谱分辨率、空间分辨率、时间分辨率等方面都有了巨大的进步,这些先进的航天遥感技术使基于高分辨率卫星影像的城市建模成为可能。部分遥感卫星搭载多视角光学传感器能获取多视光学影像,可以利用摄影测量技术实现大范围三维建模,从而提供了另一种城市建模方法。高分辨率卫星影像具有成像范围广、重访时间短,成像光谱波段多,数据可获取性强等重要特征,逐渐成为城市级三维重建项目的数据源。

随着星载传感器的逐步发展,卫星影像的空间分辨率和光谱分辨率逐步提高,甚至可以媲美机载航空相片。例如,美国 2008 年发射的 GeoEye-1 卫星具有分辨率高、测图能力强、重访周期短等特点,其提供的全色影像分辨率高达 0.41 m。美国 DigitalGlobe 公司的商业卫星 WorldView-1 和 WorldView-2 卫星能够提供 0.5 m 全色图像和 1.8 m 分辨率的多光谱图像,并且 2014 年发射的 WorldView-3 卫星更是能够生产 0.31 m 分辨率全色影像和 1.24 m 多光谱影像。法国 2011 年发射的 Pléiades (1A and 1B) 两颗卫星均搭载了高分辨率光学传感器,可以提供 0.5 m 分辨率的全色遥感影像,并且幅宽达到了 20 km × 20 km。由韩国空间局研制的 KOMPSAT-2 卫星也能提供 1 m 分辨率的全色影像。2019 年 11 月中国成功发射的立体测绘卫星高分七号搭载了双线阵立体相机、激光测高仪等有效载荷,其不仅具备同轨道前后视立体成像能力及亚米级空间分辨率优势,还能利用激光测高仪获得的高精度高程信息,大幅提升立体影像的高程精度,有望成为大规模城市建模的重要数据源。

2.1.2 微型卫星影像

自 2013 年起,随着美国 Planet 公司的 Dove1、Dove2 等卫星的成功发射,微纳卫星

(NanoSat)开始在遥感领域得到飞速发展^[9]。该公司的 Dove 小卫星群,是迄今为止最大的微纳卫星群,该卫星群利用线阵扫描传感器向地面提供时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 3~5 m 的可见光和近红外数据。德国 BlackBridge 公司于 2008 年发射的 RapidEye 小卫星群由 5 颗相同的小卫星组成,可提供 5 m 空间分辨率的可见光和近红外数据。Terra Bella 小卫星群,更名自 2014 年被谷歌收购的 Skybox,其发射的 SkySat 小卫星可提供时间分辨率较高的亚米级彩色影像和地球高清视频。2017 年 Planet 公司将 Terra Bella 收购并将 SkySat 并入其小卫星群中,至此 Planet 小卫星群以其包含的 300 多颗小卫星成为世界上最大的小卫星群。中国的北京二号、吉林一号等商业卫星星座,可提供覆盖全球的 1 m 左右分辨率的遥感影像,吉林一号还包括分辨率为 1.12 m 的高分辨率视频成像系统。

小卫星的优势非常明显,有效利用了信息、微电子技术、微机械、新材料和新能源技术等,在重量、功能密度、性价比、研制模式等方面显著区别于传统卫星。采用标准化星体及模块化设计技术,能够在流水线上批量生产,极大地降低了卫星研发和制造的成本,缩短了研制周期、降低了投资风险,有利于大量生产和发射,形成卫星群,提供大卫星所不具备的超强的整体数据采集能力。以 Planet 微纳卫星群为例,30 cm × 10 cm × 10 cm 的尺寸看上去更像是玩具,一次性通过火箭发射或国际空间站释放的方式运送 30 余颗卫星进入轨道,在传统卫星领域更是闻所未闻,平均到每颗星发射的成本可想而知。Planet 小卫星群大多分布在约 420 km 高度的国际空间站轨道 (ISS) 和约 475 km 的太阳同步轨道,相比来说通信延时和信号衰减都会少一些。随着技术的发展和进步,小卫星群的快速更新也能够保证技术的先进性。

2.2 航空数据

航空数据主要包括倾斜摄影航空影像和机载激光雷达点云两种数据。早期这两类数据的获取主要依靠载人飞机,随着无人机技术的发展和成熟,灵活和便携的无人机航空数据得到长足发展,逐步成为载人飞机航空数据的补充。

2.2.1 航空影像

机载航空相片作为主要的城市重建数据源,具有空间分辨率,覆盖范围广及数据获取周期短等特点。目前大部分开源城市模型的数据源均为

机载航空影像。但由于易受到天气及空中管制的影响,基于机载航空相片的城市建模成本普遍偏高。因此,廉价的无人机倾斜影像逐渐成为热点研究对象。由于飞行高度普遍偏低及飞行速度适中,无人机影像通常具有厘米级空间分辨率和极高的影像重叠范围。与此同时,无人机影像的处理方式同机载航空影像相似,这使得无人机影像正在逐步替代专用机载航空影像。

倾斜摄影技术是摄影测量领域近年来发展起来的新技术。该技术可以通过 1 个垂直、4 个倾斜、5 个不同的视角同步采集影像,并使用拍摄到的建筑物顶面及侧面高分辨率影像进行重建。该技术不仅能够真是地反映地物情况,获取高精度物方纹理信息,还可以通过先进的定位、融合、建模等技术,生成真实的三维模型。倾斜航空摄影技术不仅可以提高地表特征的航摄解译,而且可以大幅提高城市三维模型生产效率,已经广泛应用于城市规划、应急指挥、国土安全、建设和管理等方面^[10]。

2.2.2 激光雷达

机载激光扫描(airborne laser scanning, ALS LiDAR),也是大规模三维数据采集的一种重要手段。激光扫描技术通过非接触式测量快速获取物体表面大量的三维点云坐标和纹理颜色信息,是一种主动遥感技术,可快速、精确、高效地进行地形及其表面物体的三维建模;具有扫描范围大、数据获取周期短、精度高、时效性高等特点,逐渐成为大规模三维场景数据采集的重要方式^[11]。自 21 世纪以来,随着激光雷达扫描设备和处理技术的快速发展,ALS 在地理、地质、林业、考古、自然资源管理和城市规划等领域得到了广泛应用。文献^[12]详细总结分析了现有的利用 ALS 数据进行建筑物提取和三维重建的研究成果。

为了应对日益增长的对高质量地形数据及数字三维城市模型的需求,美国地质调查局(USGS)启动了一项 3D 高程计划(3D elevation program, 3DEP),其主要技术手段就是激光雷达测量。美国哈里斯公司的 Geiger-mode Lidar (GML) 和西格玛航天公司的 Single Photon Lidar (SPL) 两种新型激光雷达传感器能够进行大面积地图绘制,在 3DEP 中发挥了作用^[13]。

需要说明的是,航空影像可以和机载激光扫描数据同时获得。例如,徕卡的 CityMapper-2 将倾斜成像和机载 LiDAR 传感器混合,专为机载城市制图而设计,并具有双倍数据收集性能,可满

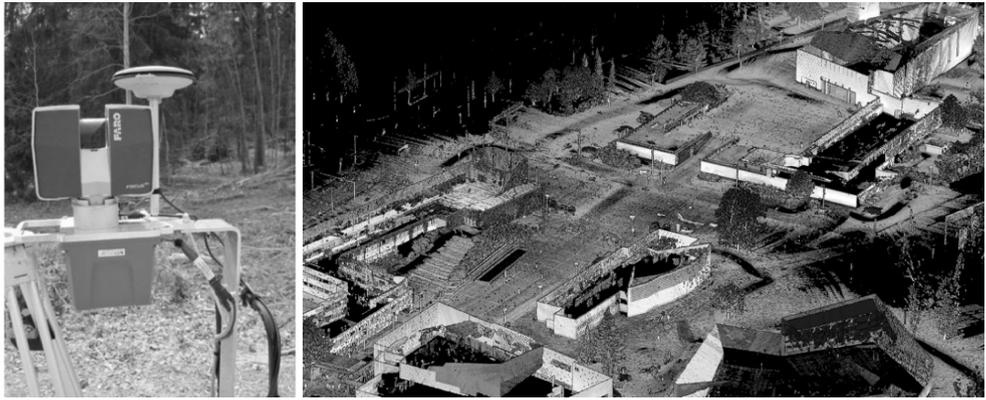
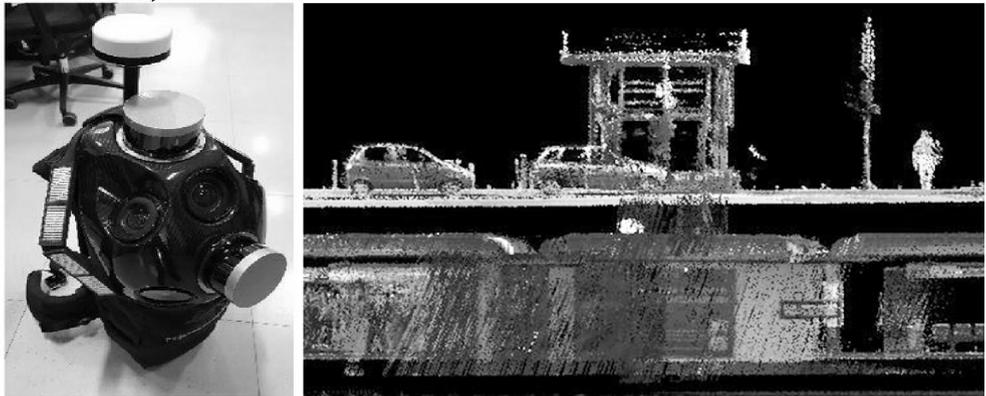
足对 3D 数据与日俱增的需求。利用这种混合技术,CityMapper-2 打破了城市制图的所有传统障碍,使城市三维制图效率提升了 40% 以上。这种新型的测绘技术可在各种飞行条件下对快速变化的城市环境进行快速有效的数字化处理。作为徕卡 RealCity 的一部分,这项独特的传感器技术有望改变大规模城市数字化的方式。

2.3 地面数据

除了空间摄影进行大范围数据采集之外,以移动测量车、地面激光雷达、智能手机为代表的地面场景感知和采集设备也是城市三维数据采集的重要传感器。尤其是针对隧道和地下管线空间设施、建筑物内部等区域,便携式数据采集设备能够发挥巨大作用。此外,地面传感器也是获取建筑物表面高质量纹理信息的重要工具。

地面激光扫描仪(terrestrial laser scanners, TLS)和移动激光扫描仪(mobile laser scanners, MLS)能够产生毫米级高密度三维点云数据,是三维城市建模的重要数据源。例如,近年来出现的可搭载在汽车、手推车和背包等设备上的移动激光扫描系统,在建筑物、交通和管线设施等城市要素的精细模型构建方面发挥了巨大作用^[14]。以搭载在背包上的个人激光扫描仪(personal laser scanners, PLS)为例,它能够用于一些特殊位置、崎岖地形和复杂城市结构的快速测绘,可弥补 TLS 和 MLS 在这些方面的不足。Akhka R2 就是个人激光扫描仪的一个代表,具有非常轻巧的扫描仪单元,可将多星座全球导航卫星系统(GNSS)耦合到光纤陀螺仪(FOG)制作的惯性测量单元(IMU),不仅可以确定轨迹,还能快速捕获扫描物体结构的精确细节,因而可用于城市三维重建,如图 2(a)。

此外,Leica Pegasus 是一款屡获殊荣的可穿戴式场景捕获传感器,它不仅装备了 5 个相机,可进行完全校准的 360° 立体拍摄,而且还有两个 LiDAR 轮廓仪。这种独特的移动制图方案可以在室内、室外和地下任何地方进行高精度三维制图(图 2(b))。Pegasus 背包使专业建筑物建模(building information modeling, BIM)成为现实,它可以同步图像和点云数据,确保对建筑物的完整记录,从而实现建筑物全生命周期管理。Pegasus 使用了同步定位和制图(simultaneous location and mapping, SLAM)技术和高精度 IMU,确保 GNSS 即使停机时也能精确定位。

(a) Akhka R2^[15](b) Leica Pegasus^[16]

<https://www.gim-international.com/content/article/laser-scanner-in-a-backpack>; <https://leica-geosystems.com/en-us/products/mobile-sensor-platforms/stories-insights/public-safety-transformation>

图 2 个人激光扫描仪 Akhka R2 和 Leica Pegasus 及其点云

Fig.2 Laser scanners and point clouds; Akhka R2 & Leica Pegasus

2.4 众源数据

近年来,以 OpenStreetMap(OSM)为代表的众源地理数据(crowdsourced geodata)或自发式地理信息(volunteered geographic information, VGI)发展迅速^[17],已经成为了许多 GIS 系统的一种替代性数据源。这些开源数据使用标签和属性值提供了结构化的地图描述,可以利用相关属性将这些已经存在的二维数据批量转换为三维模型。因此,这类众源数据也是三维城市建模的重要数据来源。OSM 作为一种结构灵活的数据,除了路径规划、地图导航和各种二维应用外,还可以进一步用于建筑物三维建模。文献[18—19]分析了 OSM 数据用于自动创建大规模三维城市模型的可行性。例如,采用 OSM 数据不仅可以自动批量创建 CityGML LOD1 和 LOD2 模型,还可以利用 IndoorOSM 这种数据模式来自动构建具有内部结构的 CityGML LOD4 建筑物模型^[19]。除了建筑物建模外,文献[20]还介绍了如何利用

OSM 数据来提取建筑物、道路和绿化带等相关要素,并结合一些重要属性来快速重建三维城市环境。在数据采集、数据处理和数据使用都趋向于大众化的时代,文献[21]介绍了大量的开源数据,如全球数字地面模型、美国 USGS 土地覆盖数据、中国国家基础地理信息中心发布的 30 m 分辨率全球土地覆盖数据集、世界城市数据库等,这些数据和一些开源建模软件都为大规模城市建模提供了新途径。

总体来说,以上几类城市建模数据源各有优缺点和应用范围,其性能比较见表 1。在实际应用中,往往需要综合至少两类或以上数据源的优势来实现大范围、多细节层次三维城市模型的高效构建。

3 城市建模方法

城市建模可以通过手工、半自动人机交互及自动化方式实现。早期主要依靠传统的人工交互

建模,这种方式虽然模型精度较高,但是建模成本高、耗时长、覆盖范围小。摄影测量与激光扫描技术的发展与应用,为城市建模的半自动化、自动化开辟了新途径,并已经取得了很大的进展。例如,基于多视航空影像或机载激光点云的半自动建模方法具有数据采集效率高、范围广、成本低、纹理信息丰富等特点,适合大规模城市级三维模型快速构建。基于规则的程序化建模也能利用 GIS 矢量数据和相关规则半自动构建大范围三维场景,但是其几何和纹理模型质量不够好,真实性不强。自动化三维建模涉及根据细节层次要求准备

各种数据、在统一数据库中存储数据、模型创建及优化、利用各种应用平台进行可视化展示等一系列环节,技术难度较大,局部细节难以精细化,其模型质量也存在不确定性。因此,目前的大范围三维城市建模仍然以半自动化为主,局部细节人工交互为辅。针对大规模城市建模方法,由于不同领域的专业和知识结构带来认知的不同,从而形成了各种各样的技术路线方案。下面主要梳理三维城市自动化建模几项关键技术的研究进展,如点云生成、表面重建、纹理映射、多源数据融合的建模等。

表 1 城市三维建模数据源比较

Tab.1 Comparison of different data sources for 3D city modeling

数据源	优点	缺点	应用
遥感影像	成像范围广、重访时间短,光谱波段多,数据可获取性强,成本低	需要多视角立体观测;容易受天气影响;存在遮挡问题;建筑立面纹理获取成本高;数据处理复杂	大范围实景三维建模,三维地图生产
机载航空影像	空间分辨率高,覆盖范围广,数据获取周期短	要求影像有多视重叠;易受天气和空域管制影响;数据获取成本高	城市级实景三维建模
无人机倾斜影像	数据成本低,影像分辨率高,纹理信息丰富,数据量较小,机动性好	对天气要求高、平台稳定性差、受遮挡影响、模型精度较低	小范围三维模型快速构建、地物侧面纹理获取、工程规划、应急响应、灾害评估
机载激光点云	主动式、测量精度高、快速获取 DEM、覆盖范围广,具有一定的穿透能力	设备昂贵、采集成本高、数据量大、数据处理复杂、无纹理信息	DEM 数据生产、植被覆盖地形测量、城市 LOD2 模型构建
地面激光点云	采集速度快,点云密度高,数据精度高,采集信息完整	数据量大、噪声多、数据不均匀、处理和可视化效率低及遮挡问题	隧道、桥梁、室内等特殊区域、植被、文物和古建筑等小范围 LOD3 及 LOD4 模型构建
众源数据	数据范围广,采集成本低,更新速度快	高度和屋顶等信息不完整、质量不确定,缺乏纹理信息	适合大范围 LOD1 模型快速构建及更新,可提取简单语义信息

3.1 点云生成

基于多视图的点云生成方法的核心技术是通过对立体像对进行匹配和重建来获取城市三维信息,其载体通常为密集点云。其基本重建过程可以概括为:特征匹配,稀疏点云重建及密集重建。

(1) 特征匹配。特征匹配是三维重建中的重要步骤,特征匹配算法通过提取影像的特征点并进行匹配,从而获取内外方位元素。传统的特征匹配算法包括 Harris 角点检测算法,尺度不变特征转换(SIFT)算法,加速稳健特征算法(SURF),加速分割测试特征算法(FAST)及 ORB 算法。由于卷积神经网络强大的图像特征提取能力,近年来有学者开始着力于利用深度神经网络进行特征匹配。通过学习鉴别式的子图像块表示,特别是训练具有相关子图像块的 Siamese 网络,文献

[22]提出了一种基于卷积神经网络的 128 维描述子用以替代 SIFT 算法。基于学习的多特征变换是一种深度神经网络架构,实现了完整的特征点检测、方向估计和特征描述^[23]。文献[24]提出了一种从粗到细的密集像素匹配图的神经网络框架。该方法利用光流法的特征并在亚像素精度估计方面取得良好结果。基于以上特征匹配算法,可以完成相机的标定并获取相机外方位元素,并通过外方位元素将提取到的二维特征点反推至三维空间,形成稀疏点云,这一步所利用到的方法在计算机视觉领域称为 SFM,在摄影测量领域称为空中三角测量。

(2) 密集重建。从标定像对和稀疏点云到密集点云一直以来都是三维重建方面的研究热点。在计算机视觉领域,人们通常基于影像内外方位

元素(又称相机矩阵)产生深度图,并利用共线性或投影模型来获取影像像素的三维坐标信息。而在摄影测量领域,人们通常利用立体像对内方位元素和共线方程组求取三维坐标,该方法称为前方交会^[25]。当今的密集匹配算法通常是基于计算机双目视觉的半全局匹配算法,通过优化一个基于视差图的全局能量函数,来达到求解每个像素深度的目的。由于密集匹配是一个计算密集型过程,利用并行运算,GPU/FPGA 等技术可以有效减少所需时间并使实时密集重建成为可能。

3.2 表面重建

从大规模点云中重建几何精确、拓扑正确和语义丰富的建筑物三维模型是当前点云建模的难点和重点。点云数据量大、密度不均质、存在不同程度的遮挡和自遮挡。从这些不完善的点云中恢复三维模型是当前算法面临的一大挑战。文献[26]详细比较了边界表达建模、先验假设建模、降维建模、分治策略建模和非线性建模等 5 类点云数据建模方法的优缺点,并提出了这些建模方法面临的共性问题。

从点云中进行 3D 表面重建在计算机视觉和摄影测量中是一项具有挑战性且重要的任务,科研人员已经开发了多种方法来适应不同场景。基于 Delaunay 三角剖分或 Voronoi 图的重建是一种广为人知的重建方法,该方法最早由文献[27]提出,其变种及改良算法在数字表面模型的生成中起到了重要作用。基于点云的泊松表面重建的提出将三维表面重建带入全新领域,文献[28]通过合并插值点的权重扩展了泊松重建算法。同上述方法不同,城市三维建模中的表面重建方法通常可以分为以下 3 类:基于区域增长、基于特征聚类和基于模型拟合。经过多年研究和试验证明,基于模型拟合的随机抽样一致性(RANSAC)算法更适用于城市三维点云的分割重建,但由于三维点云在重建过程中会产生阴影、空洞区域及大量噪声点等,越来越多的 RANSAC 变种算法被开发出来以确保其稳定性。文献[29]提出基于权重的 RANSAC 算法处理 RANSAC 产生的虚假平面问题。随着神经网络在三维数据方面的研究,近年来研究人员开始利用神经网络对点云进行分类和处理。通常神经网络在点云的应用可以分为 3 类:基于多视角的,基于体素(Voxel)的和基于几何关系的,而在近些年的研究中,基于几何关系的网络结构被证实是最适合

进行点云处理的,其中以 PointNet 及其改良版 PointNet++ 为代表^[30]。受到该类网络的启发,研究人员利用深度神经网络来分类激光点云^[31],以获取简单住宅区模型^[32]。文献[33]利用 PointNet 和卫星影像生成的点云进行分类,并对复杂建筑物(如体育馆和图书馆)进行建模,形成了一套城市区域低成本大范围全自动建模方案。

3.3 纹理映射

对建筑物等三维几何模型进行纹理映射是构建真三维城市实景模型的一个重要环节,能促进人们对城市空间的认识和理解,从而更好地辅助规划和决策^[34]。自动或半自动的建筑物模型三维重建已成为广大学者的研究热点。多视角倾斜摄影测量的出现为大面积城市建筑物真三维模型的自动化构建提供了新途径。然而,因拍摄天气和光照导致的影像色彩差异、建筑物遮挡以及多视影像纹理融合导致的纹理不完备等问题,也成为了建筑物精细化纹理重建的难点。

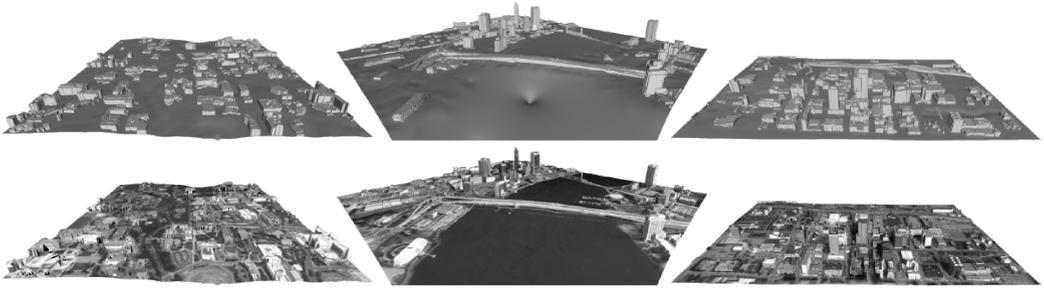
文献[35]基于倾斜摄影测量计算机视觉原理提出了一种三维城市模型纹理快速重建方法,可以自动提取建筑物侧墙纹理、匀色,并进行稠密建筑物纹理的遮挡处理。文献[36]提出了一种半自动的城市建筑物纹理贴图方法,该算法能够从一系列航空影像中自动匹配建筑物每个立面的纹理图像,并由终端用户来确定最佳的纹理照片。作者将自动计算得到的纹理坐标与虚拟参考站点提供的位置信息进行对比,证实了这种算法能够大幅提高纹理映射的位置精度。图 3 给出了一个利用开源立体卫星影像数据全自动构建的城市三维模型实例^[33]。

3.4 多源数据城市建模

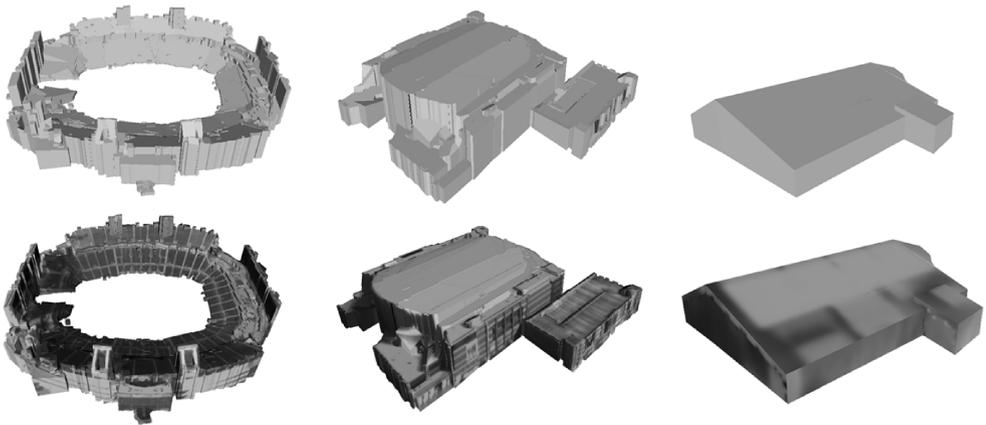
在进行城市建模的实际操作中,面对名目繁多的地物类型和大量的地表建筑,单纯使用以上的某一种技术方法很难做到快速而有效,所以往往是将不同的技术方法综合使用,即多源数据融合的三维建模。随着异源数据的多样化,各种影像、矢量数据、DEM、InSAR 数据、倾斜摄影点云、多视影像点云、视频点云、地面点云和 BIM 模型等获取的成本也越来越廉价,部分数据甚至完全免费开放,因此将两种或多种不同类型的数据进行精确配准,实现优势互补,挖掘这些数据的潜力,从而丰富三维模型的几何和语义信息,弥补单纯利用某一种数据三维建模的缺陷。此外,不同的应用需求可综合采用多种数据获取和建模手

段,如航空影像与 DEM 叠加用于构建城市的地形或建筑群景观模型、基于 InSAR 数据的高精度 DEM 构建以及基于近景摄影测量数据的地物精

细建模、基于立体航空/航天摄影测量的三维城市建模^[37]、基于 LiDAR 数据与航空影像数据融合的三维城市建模^[38]等。



(a) 大范围自动建模实例(从左至右: UCSD校园, Jacksonville城区及Omaha城区)



(b) 单个建筑物实例(所属区域: Primordial Genetics, TIAA Bank Field及Watco Omaha)

图3 基于立体卫星影像的三维城市自动建模实例(宏观及微观)

Fig.3 Samples of automated 3D city modeling based on stereo satellite imagery (overview and detail view)

考虑到倾斜摄影和机载激光 LiDAR 这两种测量技术在三维建模方面各自的优缺点,近年来出现了一种将二者相结合的建模方式。该建模方式能利用 LiDAR 快速获取大范围城市地物的高精度三维点位坐标,然后利用这些点云初步建立城市三维模型的白模;与此同时,利用倾斜摄影测量来获得同一地物的不同影像,即可获得城市地物的丰富纹理,然后通过映射技术将纹理映射到城市三维模型上,最终形成高精度三维实景城市模型,能直观真实地展现城市现状^[10,39]。倾斜摄影技术在高楼林立的中心城区存在倾斜角度大和遮挡等问题,通过倾斜航空影像生成的 3D 模型可能会出现几何缺陷和建筑物立面纹理模糊。因此,将倾斜航空影像与地面移动传感器获得的高分辨率影像集成也是一种优化城市三维建模的手段,可以有效改善传统基于倾斜摄影建模的几何和纹理质量缺陷问题^[40]。

3.5 城市建模平台

随着三维城市模型应用的深入,三维建模的需求越来越大。近年来,出现了许多不同形式的 3D 建模软件和工具。包括:

- (1) 摄影三维建模软件: Context Capture (原 Smart3D)、Esri、PhotoScan (MetaShape)、PhotoMesh、Altizure 等。
 - (2) 基于草图的 3D 建模软件,如 Trimble SketchUp。
 - (3) 城市建模软件,如 CityEngine。
 - (4) 开源 3D 建模软件,如 Blender、Autodesk 123D、COLMAP 等。
 - (5) 开源 3D 网格处理库,如 MeshLab、PCL (Point Cloud Library)、OpenMesh 等。
 - (6) 三维设计软件,如 Autodesk 公司的 3D Studio Max、Maya、AutoCAD、Revit、SolidWorks 等。
- 下面介绍几个有代表性的软件:

(1) 通用自动建模开源软件: COLMAP。COLMAP(<https://colmap.github.io/>)是一个开源通用的基于 GPU 的运动恢复结构(structure-from-motion, SfM)和多视立体图(multi-view stereo, MVS)处理工具,具有图形和命令行界面,提供了一系列从有序和无序图像集合进行三维重建的功能。对于未定义坐标系的影像,3.6 版本的 COLMAP 支持相机空间定向以确定相机在世界坐标系中的位置,该功能将 COLMAP 从近景三维重建扩展到了航空三维重建及倾斜多视角三维重建。同时由于 COLMAP 的开源及模块化特性,研究人员可以自行定制重建过程,改变重建算法参数,查看重建的中间结果及其数据结构。

(2) 开源航空建模软件: OpenDroneMap。OpenDroneMap(ODM)是一个利用无人机影像进行三维建模的开源项目(<https://www.opendronemap.org/>),旗下包括命令行工具包 ODM, 网页客户端 WebODM, 轻量级 API NodeODM, 云端部署工具包 CloudODM, Python 调用接口 PyODM 及集群部署工具包 ClisterODM。作为一款成熟的无人机影像建模项目,ODM 提供了大量预设的参数集,用于生成点云,正射影像,DTM/DSM 和三维纹理模型。同时由于拥有完整配套的网页客户端和集群部署工具包,ODM 十分适合合作式大范围城市建模项目。

(3) 商业通用建模软件: MetaShape。Agisoft Metashape(原名 Agisoft PhotoScan)是一款功能强大的三维建模软件产品,可对数字图像进行摄影测量处理,利用多视影像提取的点云进行三维建模,从而高效快捷地生成 3D 空间数据,并用于 GIS、考古和视觉效果制作等领域。该软件具有摄影三角测量、点云编辑与分类、DSM/DTM 处理、3D 模型生成与纹理映射、全景拼接、动态场景的 4D 建模、分布式与 GPU 计算等功能,可以实现图像对齐和 3D 模型重建的完全自动化处理。

(4) 商业航空建模软件: Pix4D。Pix4D 是瑞士一家公司使用摄影测量和计算机视觉相关算法研发的一套专业的摄影测量软件产品。Pix4D 系列产品包括 Pix4Dmapper、Pix4Dfields、Pix4Dbim、Pix4Dreact、Pix4Dsurvey、Pix4Dmodel、Pix4Dcapture 和 Pix4Dengine,可在台式机,云平台 and 移动终端上运行。其中,Pix4Dmapper 不仅支持无人机数据,还支持航片、倾斜摄影测量和近景摄影测量,能够使用图像来生成高精度的点云、数字表面模

型和地形模型、带纹理的三维模型等。整个过程完全自动化,并且精度更高,真正使无人机变为新一代专业测量工具。Pix4Dmapper 利用自己独特的模型,可以同时处理多达 10 000 张影像。

(5) 交互建模软件: SketchUp。Trimble SketchUp 是一套面向建筑师、城市规划专家、制片人、游戏开发者以及普通大众的智能化 3D 建模软件。SketchUp 界面简单,易于使用,创建 3D 模型就像使用铅笔在图纸上作画一般,软件能自动识别用户所画的这些线条,加以自动捕捉。当线条构成多边形以后,可以快速拉升成立体,是建筑或室内场景建模最常用的方法。SketchUp 提供了强大的纹理映射功能,包括普通贴图、包裹贴图和投影贴图等多种选择。SketchUp 还可以将个人制作的成果发布到 Google Earth 或 3D Warehouse 上共享。SketchUp 的另一个优势是可以对模型进行地理定位(geolocation),通过导入地形、卫星影像、航空影像、2D CAD 数据等,可以快速确定模型空间坐标,便于导出到 GIS 系统。

(6) 大规模城市建模软件: CityEngine。CityEngine 是 ESRI 公司推出的一款先进的 3D 城市建模软件,可以利用二维数据快速批量创建大规模、交互式的三维城市环境。与传统的计算机辅助设计建模工具不同的是, CityEngine 通过预先定义好的一套 CGA (computer generated architecture) 规则,使用程序建模 (procedural modeling) 方法可以自动创建大规模、细节丰富的 3D 城市模型^[41]。利用 CGA 形状语法系统定义的规则可以创建复杂的参数可调整的三维模型。CityEngine 支持 Esri Shapefile、File Geodatabase、KML 和 OpenStreetMap 等数据,也支持标准行业 3D 格式,在模型复用性、模型形态动态调整、建模效率和实时渲染等方面具有巨大优势。基于这项先进的建模技术, CityEngine 已广泛用于城市规划、轨道交通、建筑、游戏开发、电影制作、考古和文化遗产等领域的虚拟环境构建。

综上所述,当今城市建模中还存在很多的困难和挑战,主要表现在以下 3 个方面:①数据获取的局限性。由于拥挤的街道环境,在大城市中获取完整和全面的数据是很困难的。除此之外,采集到的建筑物数据会包含大量的植被,车辆和行人等无用数据。镜面建筑物对主动扫描式传感器的影响极大,其建筑表面的折射和反射会极大地减少获取到的数据密度。②当前绝大多数的城市

重建方法旨在提供一种全自动建模的解决方案,但由于其庞杂的优化过程,该方案在实际生产中是很难实现的。其中,怎样平衡精细建筑模型重建和大范围城市重建是主要的问题。③在城市建模的优化过程中,建筑物模型的质量和可扩展性是随之下降的。因此在实际生产中,人们通常利用人工参与的半自动化建模来缓解这个问题。在下文会具体介绍此类问题。

4 城市模型表达与互操作

目前已经建立的大部分三维模型都是以纯图形或几何的形式被制作出来,忽略了语义和拓扑关系的表现。这些模型仅限于三维可视化,并不能满足专题查询、空间分析和空间数据挖掘等深层次应用需求。一方面,由于缺乏统一的建模和编码标准,许多三维模型数据格式互不兼容,可重用性差,导致不同领域间的信息交流和共享困难,也使得三维信息管理面临巨大挑战。另一方面,这些三维模型大都面向特定的专业领域,语义表

达和多尺度表达能力较差,导致三维 GIS 系统利用率低,难以满足动态更新以及综合分析的需要。因此,采用什么样的三维模型标准来进行城市三维空间数据组织,从而减少三维模型制作维护成本,实现三维模型数据的共享和互操作,已经成为当前亟须解决的问题。

表 2 列举了几种常见的模型表达和交换格式标准,并比较了它们在几何表达、拓扑纹理、语义表达、地理坐标、LOD、扩展性和应用潜力等方面的性能。其中,X3D、KML、COLLADA、Shape 等格式都不支持语义表达,仅限于三维可视化等初级应用。IndoorGML 在室内对象的几何、拓扑和语义表达方面性能优越,但是仅限于室内导航等应用。IFC 模型虽然具有精细的几何形状和语义表达,但是不支持多分辨表达,扩展性较差,在单个建筑等局部尺度用途广泛,但是对地理坐标的支持能力有限,不适合大范围城市尺度应用。相比而言,CityGML 的综合指标性能最好,非常适合大规模三维城市模型的表达、存储、共享和深入应用。

表 2 常用三维模型格式性能比较(依据 Kolbe TH 报告^[42]扩展)

Tab.2 Comparis on of common 3D model formats

模型格式	几何	拓扑	纹理	语义	地理坐标	LOD	扩展性	应用
X3D ^[43]	+	*	++	/	+	+	+	*
KML ^[44]	+	/	++	/	*	*	+	*
COLLADA ^[45]	*	*	*	/	/	+	++	*
Shape	*	/	/	/	+	/	/	*
CityGML ^[46]	+	+	+	++	++	++	++	++
IndoorGML ^[47]	+	+	/	++	++	*	*	++
IFC ^[48]	++	+	*	++	*	*	*	++

* 代表简单支持,+ 代表中等支持,++代表全面支持,/ 代表不支持。

4.1 CityGML

城市地理标记语言 CityGML(city geography markup language,CityGML)的出现为三维地理信息的广泛应用和共享带来了契机。CityGML 是由德国的 Special Interest Group 3D(SIG 3D)研发,致力于描述三维城市对象的通用语义信息。它是在 GML3.1 基础上实现 3D 城市模型的存储及交换,弥补了传统三维模型在数据共享和互操作等方面的不足。2008 年 CityGML 1.0 版本正式被 OGC (Open GIS Consortium)技术委员会、国际标准组织地理信息标准委员会(ISO TC211)认定为城市三维模型国际开放标准。2012 年,CityGML 在进一步扩充和完善的基础上推出了 2.0 版本^[49]。CityGML 定义了城市中大部分地理对象的分类及其之间的关

系,而且充分地考虑了区域模型的几何、拓扑、语义、外观等属性,弥补了传统三维模型在数据共享、互操作等方面的不足,使城市三维模型具有可重用性,大大降低城市三维建模的成本^[46,49]。

CityGML 具有以下特征:①多细节层次表达(level of detail,LOD):这种多层次细节表达的三维模型,能够满足不同领域的应用需求,而且为大场景可视化和空间分析提供了有利条件。②几何/语义一体化:CityGML 模型既包含几何信息,又包含语义信息,二者相互协同,给城市三维数据提供了新的存储和处理方式。③模块化:CityGML 对虚拟城市三维模型中大多重要类型进行了分类定义,包括建筑、交通、水体等 13 个专题模块。④可扩展性:提供灵活的应用领域扩展

机制(application domain extensions, ADE), 可针对能源估计、城市噪音分析、管线设施网络分析等不同应用领域进行扩展, 实现在 CityGML 框架下的统一建模和信息共享。

由于 CityGML 具有上述这些良好的特性, 能够有效解决三维模型数据表达不一致和共享困难的难题, 并且能够满足主题查询和空间分析等多方面的应用需求, 越来越多的国家和地区正在使用 CityGML 标准创建三维城市模型。目前, CityGML 在许多领域得到了广泛应用, 如建筑物光照估计、建筑物能源需求估计、建筑物遮挡阴影分析、噪声传播估计、三维地籍、辅助定位、三维导航、城市规划和设施管理等, 也因此产生了 Solar ADE、Energy ADE、Noise ADE、GeoBIM ADE 和 Utility Network ADE 等一系列 CityGML 应用扩展^[7, 50]。文献[51]对 CityGML 模型的拓扑结构进行了深入研究, 提出了高级和低级两层模型来表达三维拓扑关系, 并基于 CityGML 扩展机制提出了 TopoADE 来实现这种拓扑模型。在针对 CityGML 的研究和应用方面, 德国和荷兰等一些欧洲国家走在世界前列。其中, 文献[52]的作者 Kolbe 教授为 CityGML 标准的设计、宣传、应用和国际化进程做了大量工作。

4.2 LOD

三维城市模型需要大容量的数据存储以及超强的计算能力用于模型可视化渲染, 特别是对于那

些大规模、细节丰富的三维模型而言。由于大多数计算机的功能有限, 因此有必要以不同的 LOD 来表达三维城市模型, 以降低模型的复杂性和存储要求, 从而实现流畅、高效的可视化与分析^[53]。此外, 根据数据获取技术和应用需求的不同, 三维城市模型也需要采用不同细节层次来表达^[54]。

在当前所有常见的三维 GIS 数据标准中, CityGML 对 LOD 具有最完备的定义。在 CityGML 中, 所有的模型可以分为 5 个不同的连贯细节层次, 随着细节层次的提升可以获得关于几何及语义的更多细节信息^[49]。以建筑物对象为例, CityGML 定义了 5 级 LODs 对建筑物、建筑物部件以及建筑物附属设施进行由简到繁的几何及语义表达, 如图 4 所示^[55]。其中, ① LOD0 表达建筑物的底面平面以及屋顶平面; ② LOD1 用块状简单表示建筑物三维模型; ③ LOD2 在 LOD1 的基础上加入了对房屋的附属结构和屋顶的描述; ④ LOD3 层次描述建筑物的详细外表结构, 包括门、窗、阳台等; ⑤ LOD4 是在 LOD3 基础上增加建筑物内部结构的表达, 包括楼梯、房间和家具等对象的详细建模, 具有最详细的几何和语义信息^[54]。这种多层次细节表达的建筑物模型, 能够满足不同领域的应用需求, 而且为大场景可视化和空间分析提供了有利条件。

表 3 总结了 CityGML LOD1—LOD4 4 种模型的获取方法、语义特点及潜在应用。

表 3 CityGML LOD 特点及应用范围

Tab.3 The characteristics and applications of different CityGML LODs

LOD 层级	建模方法	语义信息	潜在应用
LOD1	二维矢量拉伸、点云处理	建筑高度	三维地图、环境噪声模拟、可视域分析、阴影分析 ^[56] 、人口估算 ^[57]
LOD2	摄影测量、机载激光点云	不同屋顶形状、墙面、地面	屋顶太阳能估计、建筑物能源需求估算 ^[58] 、城市能源规划 ^[59]
LOD3	地面激光扫描、BIM 模型转换	屋顶悬垂、门、窗、墙面细节	能耗模拟 ^[60]
LOD4	BIM 模型转换	房间、家具	室内外一体化空间分析、设施管理、室内导航 ^[61] 、应急响应 ^[62] 、文化遗产保护 ^[8] 、灾害管理、洪水淹没分析 ^[63]



图 4 CityGML 建筑物多细节层次表达

Fig.4 The five LODs of a building in CityGML

针对 CityGML 提出的 5 级 LOD 在表达建筑物三维模型的某些方面还不够精细的问题, Biljecki 等又进一步对其中部分 LOD 进行了细化定义, 例如 LOD1 模型可以细分为 LOD1.1、LOD1.2 等 4 种类型来区分不同的屋顶样式和高度^[55,64]; 文献[65]对 CityGML LOD2 模型进行扩展, 利用算法根据外部几何形状来自动产生内部几何对象, 从而形成细节更为丰富的 LOD2+ 模型, 以满足某些应用需求。

除了 LOD 的定义之外, 如何自动生成不同 LOD 的三维城市模型也是城市建模中的一个重要问题。常见的格网简化算法^[66]和形状近似方法^[67]虽然能够产生不同复杂度的三维模型, 但是这些方法无法避免几何错误, 因为它们无法顾及三维场景中的高层次特征和规则。在三维城市模型中, LOD 简化算法主要用于地形和建筑物。由于建筑物是最重要的城市对象, 针对建筑物的三维简化研究较多, 已经出现了大量针对单个建筑物的简化算法。文献[68]提出将建筑物分割成基本的 3D 图元, 并将整个简化过程分解为分割、解译和简化 3 个阶段。针对 CityGML 标准缺乏不同细节层次模型的自动转换方法, 文献[69]提出了一套从 CityGML 高细节层次建筑物模型自动简化生产低细节层次模型的算法, 也就是从 LOD4 模型产生 LOD3、从 LOD3 产生 LOD2、将 LOD2 模型简化到 LOD1, 该方法不仅考虑了几何对象的简化, 还充分考虑了 CityGML 的语义特征。文献[53]提出了一种自动转换 CityGML 中不同 LOD 的方法框架, 并根据射线追踪算法开发了一种新的区分建筑物内外表面的外壳提取算法, 可利用该算法构建每个细节层次的模型转换框架, 从而实现 CityGML 中 LOD 的自动派生。在细节层次表达方面, 除了几何对象的多尺度表达之外, 空间语义一致性尺度、纹理图像分辨率也是需要考虑的问题。

4.3 城市模型数据库

由于海量城市三维地理信息数据的复杂性, 在构建基于 CityGML 标准的空间数据存储结构以实现 3D 数据的有效存储、分析、管理、交互和可视化时, GIS 软件供应商和售后服务常常面临着诸多挑战。“3D 城市数据库”(3DCityDB)是一个面向基于 CityGML 城市模型的免费 3D 地理数据库解决方案 (<https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/>)。3DCityDB 已经发展成为一套开源

且独立于平台的软件组件, 包括一套数据库模式、一系列用于导入、管理、分析、可视化、导出虚拟 3D 城市模型的软件工具。借助 3DCityDB 配套的 Importer/Exporter 工具, 既可以导入符合 CityGML 标准的不同 LOD 层级的虚拟 3D 城市模型, 又能将 3DCityDB 存储的内容直接以 KML、COLLADA 和 glTF 格式导出, 以便在各种应用程序 (例如 Google Earth, ArcGIS 和基于 WebGL 的 Cesium Virtual Globe) 中进行可视化处理, 从而实现 CityGML 格式三维城市模型的高效存储、管理和可视化, 大大促进了 3D 城市模型应用程序的开发和部署^[70]。3DCityDB 数据库模式是从 CityGML 2.0 的面向对象数据模型到空间增强的关系数据库管理系统的映射, 支持商业关系数据库管理系统 Oracle 与开源的关系数据库 PostGIS。3DCityDB 利用了关系数据库管理系统对空间数据元素强大的展示与处理能力, 可以处理包含百万数量级不同 LOD 的 3D 模型及百万级几何关系、纹理图像的对象模型。鉴于 3DCityDB 与 CityGML 的完美兼容及强大功能, 国际上许多城市, 如德国的柏林、波茨坦、法兰克福、奥地利的维也纳和萨尔茨堡、新加坡、芬兰赫尔辛基、瑞士苏黎世、荷兰鹿特丹和海牙等都采用 3DCityDB 管理其大规模虚拟三维城市模型 (<https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/3dcitydb-in-action/>)。

4.4 城市模型互操作

以建筑物为代表的城市要素功能多样化, 使其很难定义一种虚拟城市模型来满足不同功能、领域和视角的所有需求。因此, 基于数据互操作实现三维城市模型在建筑、城市和区域规划、灾害管理、虚拟旅游、应急响应等领域的共享和交换, 也是近年来一个研究热点。

三维城市模型的互操作性, 尤其是三维 GIS 与 BIM 的集成一直是一个重要的研究问题^[71]。利用 BIM 技术构建的建筑物三维模型精细程度高, 具有面向设计和分析应用的多种几何表达方式和丰富的语义信息, 可用来实现对建筑工程全生命周期的数字化管理。BIM 模型可以成为三维城市模型中建筑物数据更新的重要数据来源。然而, 由于应用领域的不同, BIM 与 GIS 分别采用了 IFC 与 CityGML 这些不同的数据模型标准。这两种标准采用了不同的几何表达方式和语义描述方法。

近年来,许多学者和机构开展了 BIM 与 GIS 集成研究工作。为实现 IFC 与 CityGML 之间标准化的映射,文献[72—73]提出了一种统一的建筑物模型(unified building model, UBM)用于整合 IFC 和 CityGML 中的语义类型。文献[74]提出了一种基于语义映射和三维几何运算的 IFC 模型到 CityGML LOD3 的自动转换方法。为了实现 IFC 和 CityGML 模型之间的完整和高精度映射,文献[53]提出了一种 IFC 与不同 LOD CityGML 模型之间的相对完整和高精度的映射框架,包括几何形状、坐标系统和语义框架等各项内容的转换。考虑到 IFC 比 CityGML 建筑物语义信息要丰富得多,直接进行 IFC 到标准 CityGML 模型的转换容易造成语义信息丢失的问题,有部分学者尝试对 CityGML 标准进行扩展。例如,文献[75]提出了一种用于实现 BIM 和 GIS 集成的 CityGML 扩展“GeoBIM”,可更程度的将 IFC 语义信息集成到 GIS 框架中。为了有效实现 BIM 与 GIS 的信息集成,文献[76]提出了城市信息建模(City Information Modeling, CIM)的概念,讨论了 CIM 的组成要素,比较了 BIM 和 GIS 领域各自的数据模型及其相互映射。文献[77]采用三重图文法(triple graph grammar)实现 IFC 与 CityGML 模型在几何和语义方面的关联,在对 CityGML 进行扩展的基础上,最终实现 IFC 模型到 CityGML 模型的完整、高精度转换。文献[78]详细总结了现有的 BIM 与 GIS 集成的各种理论研究成果,并提出了 IFC 与 CityGML 之间进行邻域尺度空间信息集成与转换的工作流程。此外,IfcExplorer 和 Safe Software 公司的 Feature Manipulation Engine (FME)等软件产品也开发了将 IFC 模型转换为 CityGML 模型的功能模块。

尽管许多学者和商业公司在这方面做了大量工作,三维城市模型互操作仍然面临许多挑战。例如:①三维模型可能具有不同的尺度和不同的细节层次表达,转换过程中可能包含冗余或部分几何或语义不一致信息;②由于创建模型的时间不同,互操作时可能具有时态不一致问题;③由于文件格式的不同,模型表达信息的方法可能不一致,部分数据格式之间很难做到信息的等值转换^[2]。标准化是提高三维城市模型互操作性的一种有效手段,例如国际上许多城市采用 CityGML 开放标准来进行模型的创建、交换和共享。使用

国际标准可以弥补地理空间技术和设计技术之间互操作性的差距,从而促进三维城市模型在更多的应用领域发挥作用。

5 建设中的城市模型

近年来,在“开放共享”这一理念的推动下,世界上许多国家和地区纷纷建立并共享了各自具有代表性的城市模型,这些模型在城市规划、环境模拟、气候变化等领域发挥了巨大作用。下面介绍一些具有代表性的开放城市模型案例。

5.1 城市建模案例

荷兰代尔夫特理工大学(Delft University of Technology)的 3D Geoinformation 研究团队详细总结了近 10 年来世界范围内部分城市和地区的近 30 种开放三维城市模型^[79]。在建筑物 LOD1 层级,美国所有城市、澳大利亚阿德莱德、荷兰、新加坡等地均建立了城市级的三维模型;美国波士顿、纽约、费城和奥斯汀、德国柏林、比利时布鲁塞尔、加拿大弗雷德里克顿、芬兰赫尔辛基、法国里昂、荷兰海牙等构建了 LOD2 城市三维建筑物模型;而芬兰埃斯波甚至建立了细节层次更高的 LOD3 建筑物模型。这些开放模型绝大部分采用了 CityGML 标准存储,少量使用 OBJ、KML 和 Shapefile 等其他格式。下面介绍几个有代表性的三维城市建模案例:

(1) 阿姆斯特丹。荷兰 TUDelft 3D geoinformation 研究团队使用自主研发的一套开源工具 3dfier (<https://github.com/tudelft3d/3dfier>)制作了荷兰阿姆斯特丹市的 3D 城市模型,包括建筑物、道路、植被、水体、土地利用和桥梁等要素。该团队使用荷兰政府开放的 BGT GIS 矢量数据集(1:1000 large-scale topographic dataset of the Netherlands),并结合激光测高仪获取的 AHN3 LiDAR 点云数据集自动创建了符合 CityGML 标准的 LOD1 城市模型(图 5(a))。目前,该三维城市模型以 CityGML、OBJ 和 IMGeo(荷兰格式)3 种格式对外开放共享。在这两种开放数据集和开源工具 3dfier 的支持下,文献[57]快速构建了整个荷兰的三维建筑物粗模(CityGML LoD1),并利用具有语义信息的 LOD 模型数据来估算城市人口。

(2) 柏林。德国首都柏林早在 2003 年就开始启动实施官方虚拟三维城市模型的计划,包括地籍数据、数字地形模型(DTM)、数字航空影像、

建筑物三维模型等多种空间数据,有效实现柏林二三维空间数据的集成。在大规模建筑物建模方面,综合利用了激光扫描和基于摄影测量的建几何建模方法^[80]。经过 10 多年的努力,最终构建了覆盖整个城市区域(890 km²)的大约 56 万个包含纹理信息的 LOD2 建筑模型,并且还有 200 多个 LOD3/LOD4 等细节丰富的三维建筑物模型^[58],这些模型全部采用 CityGML 开放标准进

行表达,并利用开放数据库 3DCityDB 进行存储和持续更新。自 2015 年开始,柏林的语义三维城市模型以 CityGML 格式在互联网上免费开放,见图 5(b)。除了基本的三维可视化之外,这些语义信息丰富的 CityGML 模型已经广泛用于城市规划、城市能源需求估算、环境噪声模拟、三维地籍等领域。



(a) 阿姆斯特丹(<https://3d.bk.tudelft.nl/projects/geobim-benchmark/amsterdamgml.html#technical-details>)



(b) 柏林(<https://www.3dcitydb.org/3dcitydb-web-map/1.7/3dwebclient/index.html>)



(c) 香港(<https://www.scmp.com/news/hong-kong/health-environment/article/2179516/new-3d-mapping-system-one-stop-data-source-allows>)



(d) 新加坡(<https://govinsider.asia/digital-gov/meet-virtual-singapore-citys-3d-digital-twin/>)

图 5 三维城市模型示例

Fig.5 Examples of 3D city models

(3) 香港。香港地政总署(Lands Department)于 2012 年启动了三维空间数据工程,综合采用激光扫描仪、无人机、背包移动测量系统、车载移动测量系统、宽画幅数码相机等设备快速采集并构建实景三维格网模型,通过建筑物单体化处理、人工智能检测、BIM 与三维 GIS 集成、众源地理信息等手段进行模型处理与修正,并采用 OGC I3S、CityGML 和 IndoorGML 等国际三维数据标准进行数据存储与表达,最终构建了全香港大约 21 万个 LOD1 建筑物模型,约 9000 个 LOD2 和 LOD3 建筑物模型,2000 个城市基础设施和 90 条主要道路的三维模型。为了避免重复创建三维模型,2019 年香港地政总署发布了三维空间数据更新计划,鼓励三维空间数据共享。这种集成化的

三维制图技术可以方便快捷地辅助香港政府对其高密度城市环境的科学规划和管理(图 5(c))。

(4) 新加坡。“虚拟新加坡”(Virtual Singapore)是一个动态的三维(3D)城市模型和协作数据平台,包括整个新加坡的 3D 地图,由新加坡土地管理局(Singapore Land Authority)和资讯通信发展管理局负责研发。项目覆盖面积超过 700 km²,采用多种快速测绘技术,如倾斜成像、航空激光扫描、移动激光扫描和地面扫描,生成超过 5000 万兆字节多种格式的数据。虚拟新加坡包括语义 3D 建模,既有几何对象的纹理和材质的详细信息,也有水体、植被和交通设施等各类地表属性。建筑物三维模型包含编码、几何形状以及子要素语义信息,例如墙壁,地板和天花板等。三

维地图数据和 CityGML 模型可在政府机构和合作伙伴之间共享,并支持虚拟新加坡和新加坡的智能国家计划,见图 5(d)。开放标准(CityGML 和 LandXML)和服务(WFS)的使用将使利益相关方能够立即使用这些数据,而无须改造现有的计算机系统。采用 CityGML 这种通用信息模型可促进数据、计算机系统和服务的连接,从而降低数据互用性成本。由于采用了先进的三维建模技术,Virtual Singapore 平台还可以融合各类静态、动态和实时城市数据和信息,例如人口统计数据、气候信息等,用于解决城市能耗、废物处理、社区导航、交通规划、疾病传播等问题。

(5) 武汉。作为全国首批“数字城市”和“智慧城市”的试点城市,武汉早在 2006 年就启动了城市三维建模工程。经过 10 余年的持续推进,武汉已经建立了全市域 8569 km² 的框架模型,以及中心城区约 1200 km² 的精细化城市三维模型和建成区约 560 km² 的地下管线三维模型,在全国率先实现了特大城市主城区数字三维模型的全覆盖。以这些三维数字模型为基础,武汉市有关部门开发了三维数字地图管理平台、实有人口实有房屋信息共享平台等 10 多个示范系统,实现了三维模型数据与相关属性信息、规划信息等数据的关联和动态更新,并广泛应用于城市规划审批、规划设计、交通、旅游、不动产登记和地下空间管控等领域。武汉市国土资源和规划局还主导编制了行业标准《城市三维建模技术规范》,以此统一数字城市建设中三维模型数据的采集、处理、制作、

集成管理和更新维护等工作,从而促进城市三维模型的共享和跨领域应用。

除了上述几个城市(国家)外,奥地利萨尔茨堡和维也纳、芬兰赫尔辛基、瑞士苏黎世、荷兰鹿特丹和海牙等一些欧洲城市也都采用 CityGML 作为其三维城市模型标准,并使用开源的 3DCityDB 进行模型存储与管理。鉴于 CityGML 在欧洲的广泛应用,欧盟已将 CityGML 作为其空间数据基础设施计划 INSPIRE 的一部分。

5.2 开放城市模型

随着机器学习技术的深入发展,深度神经网络被越来越广泛的应用到了图像识别领域,该应用同样适用于影像建筑图斑的提取。微软于 2018 年通过训练残差神经网络(ResNet34)自动从遥感影像上识别建筑物区域,再结合一种多边形化算法来清理边缘锯齿(图 6(a)),最终全自动提取了美国 50 个州超过 1.25 亿个建筑物的图斑信息,以 GeoJSON 和 Esri Shapefile 的格式整理成 USBuildingFootprints 数据集并向公众开放(<https://github.com/microsoft/USBuildingFootprints>)。为了训练建筑图斑提取网络,微软计算机视觉的工程师构建了一个包含 500 万张标记好的卫星影像数据集,该数据集覆盖了美国 50 个州的不同区域,包括山脉、冰川、森林、沙漠、海滩和海岸等地标类型,训练集中的每一张照片为 256×256 像素,分辨率为每像素 1 英尺。微软目前仍旧对该数据库进行维护并计划将其融入进开放街景图项目(OpenStreetMap)。

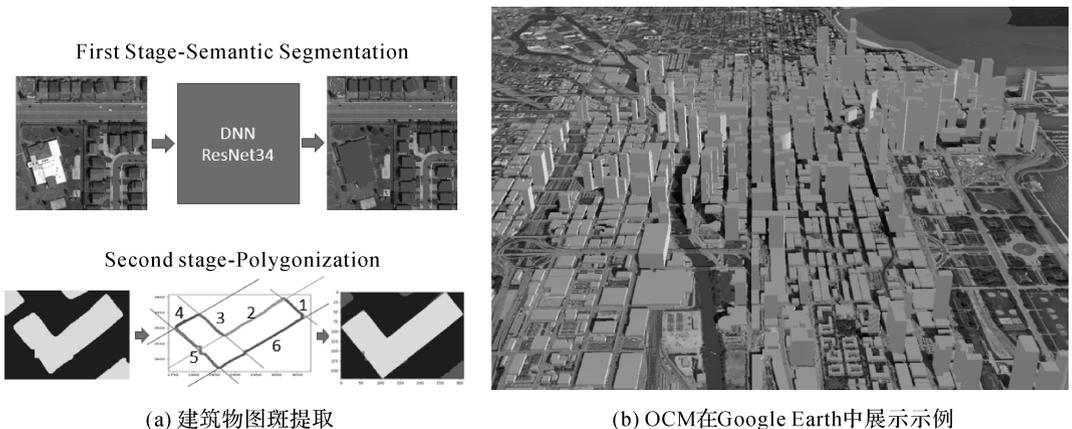


图 6 开放城市模型

Fig.6 Open City Model

在提取了美国几乎所有建筑物二维轮廓数据之后,美国又启动了一项名为“开放城市模型”

(Open City Model, OCM) 的计划 (<https://github.com/opencitymodel/opencitymodel>)。该

计划旨在将 USBuildingFootprints 和 OSM 等其他二维开放数据集与相关算法结合在一起,自动生成美国每幢建筑物的三维几何形状,并以 CityGML 模型格式对外开放。该数据集共有大约 1.25 亿个 LOD1 建筑物模型,包括 gml (CityGML)、json (CityJSON) 和 parquet 3 种不同数据格式,可满足不同应用需求。图 6(b)展示了部分 OCM 数据的可视化效果。

开放城市模型本质上是一条数据管道,其目标是将描述建筑物几何形状的许多单独的开放数据集组合在一起,并生成该数据的统一视图。OCM 目前只考虑了所有建筑物的三维几何形状,加上一些有用的属性,例如:占地面积(area),建筑物高度(height),美国州和县代码(FIPS 代码)和通用建筑物 ID(UBID)。在根据这些二维建筑物轮廓进行三维建模时,高度信息非常关键。OCM 的研发人员尽可能使用具有量测高度的数据。如果某些建筑的高度信息缺失,则使用机器学习来估计其高度。例如,研究人员使用 400 万个 OSM 建筑物数据,通过简单的回归分析算法将建筑物占地面积与高度进行比较,从而估算出建筑物的建模高度。该方法计算的高度除了对那些高楼密集的城区建筑不适用外,对于其它绝大多数建筑物都是比较合理准确的。

以上仅列举了几项与开放城市模型相关的代表性项目和工程,还有很多各具特色的项目和应用未提及。在全球气候变暖、城市灾害应急响应等一系列需求推动下,相信越来越多的城市会逐步构建并开放各自的语义信息丰富的城市模型,进一步发挥城市模型的价值,从而推动全球城市和国家的可持续发展。

6 结束语

总体来说,在空间数据获取、三维重建等信息技术和国际开放标准推动下,大规模三维城市建模正在朝自动化、精细化、语义化、集成化、标准化和开放共享等方向发展。在大规模三维城市建模成本不断降低的同时,建模效率和模型可重用性极大增强,从而导致三维城市模型在城市规划、环境模拟、灾害应急、国土安全、文物保护等诸多领域发挥着越来越重要的作用。然而,随着应用的纵深拓展,三维城市建模在快速性、自动化、精确性、复杂性和互操作性等方面也面临许多挑战。例如,三维模型的快速感知和采集、大规模点云的滤波去噪

和网格化、点云特征提取和匹配、倾斜摄影测量模型单体化、模型数据修复和补全、三维几何模型正则化、从几何建模到纹理映射的全自动化处理、不同 LOD 自动简化、城市模型快速更新、不同领域(格式)三维模型之间的高精度转换等,三维建模所面临的一系列理论和应用问题亟须解决。

此外,三维城市建模不仅仅局限于三维几何对象重建,还要考虑语义和环境等多源数据。借鉴德国、新加坡在三维城市建模技术、模型存储与表达、模型应用等方面的先进经验,构建从室外到室内、从地上到地下一体化、语义信息丰富、互操作性强的高精度城市模型是未来一段时期的主流和趋势,也是智慧城市发展的基石^[1,81]。基于三维模型构建的三维城市管理系统也需要对各种类型的数据进行交叉分析,而不仅仅是几何特征。因此,未来三维城市的发展方向需要收集更多的语义信息和相关产品,例如普查数据、地籍数据、环境监测数据等,将多源异构数据集集成到统一的三维城市管理平台来进行分析和应用。在智慧互联和共享经济时代,相信越来越多的开放城市模型、开放软件平台、开放数据库将会出现,而基于物联网、人工智能和大数据分析的三维城市建模也将极大促进城市的可持续发展。

参考文献:

- [1] BILLEN R, MÉTRAL C, FALQUET G, et al. Challenges of semantic 3D city models: a contribution of the COST Research Action TU0801[J]. *International Journal of 3-D Information Modeling*, 2015, 4(2): 68-76.
- [2] BILLEN R, CUTTING-DECELLE A F, MARINA O, et al. 3D city models and urban information: current issues and perspectives[M]. Cedex (France): EDP Sciences, 2014.
- [3] MCFADDEN C. 19 of the biggest city models in the world [EB/OL]. (2018)[2019-10-29]. <https://interestingengineering.com/19-of-the-biggest-city-models-in-the-world>.
- [4] HEO J, JEONG S, PARK H K, et al. Productive high-complexity 3D city modeling with point clouds collected from terrestrial LiDAR[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2013, 41: 26-38.
- [5] DÖLLNER J, BAUMANN K, BUCHHOLZ H. Virtual 3D city models as foundation of complex urban information spaces[C]// *Proceedings of CORP 2006 and Geomultimedia*. Vienna, Austria: [s.n.], 2006: 107-112.
- [6] JULIN A, JAALAMA K, VIRTANEN J P, et al. Characterizing 3d city modeling projects: towards a harmonized interoperable system[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(2): 55.
- [7] BILJECKI F, STOTER J, LEDOUX H, et al. Applications

- of 3D city models: state of the art review[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015, 4(4): 2842-2889.
- [8] QUATTRINI R, PIERDICCA R, MORBIDONI C. Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web[J]. *Journal of cultural heritage*, 2017, 28: 129-139.
- [9] Planet. Daily satellite imagery and insights[EB/OL]. (2019) [2019-11-05]. <https://www.planet.com/>.
- [10] 李德仁, 刘立坤, 邵振峰. 集成倾斜航空摄影测量和地面移动测量技术的城市环境监测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(4): 427-435, 443.
LI Deren, LIU Likun, SHAO Zhenfeng. An integration of aerial oblique photogrammetry and mobile mapping system for urban geographical conditions monitoring[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(4): 427-435, 443.
- [11] ZHANG Liqiang, LI Zhuqiang, LI Anjian, et al. Large-scale urban point cloud labeling and reconstruction[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 138: 86-100.
- [12] TOMLJENOVIC I, HÖFLE B, TIEDE D, et al. Building extraction from airborne laser scanning data: an analysis of the state of the art[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 3826-3862.
- [13] STOKER J M, ABDULLAH Q A, NAYEGANDHI A, et al. Evaluation of single photon and Geiger mode Lidar for the 3D elevation program[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 767.
- [14] WANG Yanjun, CHEN Qi, ZHU Qing, et al. A survey of mobile laser scanning applications and key techniques over urban areas [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1540.
- [15] LIANG Xinlian, KUKKO A, KAARTINEN H, et al. Possibilities of a personal laser scanning system for forest mapping and ecosystem services[J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 1228-1248.
- [16] NOCERINO E, MENNA F, REMONDINO F, et al. Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems[C]//*Proceedings of the SPIE 10332, Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV*. Munich, Germany; SPIE, 2017: 103320I.
- [17] GOODCHILD M F. Citizens as sensors: the world of volunteered geography[J]. *GeoJournal*, 2007, 69(4): 211-221.
- [18] OVER M, SCHILLING A, NEUBAUER S, et al. Generating web-based 3D city models from OpenStreetMap: the current situation in Germany [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2010, 34(6): 496-507.
- [19] GOETZ M. Towards generating highly detailed 3D CityGML models from OpenStreetMap[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(5): 845-865.
- [20] HADIMLIOGLU I A, KING S A. City maker: reconstruction of cities from OpenStreetMap data for environmental visualization and simulations[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(7): 298.
- [21] 单杰. 从专业遥感到大众遥感[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1434-1446. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170361.
SHAN Jie. Remote sensing: from trained professionals to general public [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1434-1446. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170361.
- [22] SIMO-SERRA E, TRULLS E, FERRAZ L, et al. Discriminative learning of deep convolutional feature point descriptors[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. Santiago, Chile; IEEE, 2015: 118-126.
- [23] YI K M, TRULLS E, LEPETIT V, et al. LIFT: learned invariant feature transform[C]//*Proceedings of the 14th European Conference on Computer Vision*. Amsterdam, The Netherlands; Springer, 2016: 467-483.
- [24] MELEKHOV I, TIULPIN A, SATTLER T, et al. DGC-Net: dense geometric correspondence network [C] // *Proceedings of 2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision*. Waikoloa Village; IEEE, 2019: 1034-1042.
- [25] 单杰. 光束法平差简史与概要[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(12): 1797-1810.
SHAN Jie. A brief history and essentials of bundle adjustment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1797-1810.
- [26] 杜建丽, 陈动, 张振鑫, 等. 建筑点云几何模型重建方法研究进展[J]. *遥感学报*, 2019, 23(3): 374-391.
DU Jianli, CHEN Dong, ZHANG Zhenxin, et al. Research progress of building reconstruction via airborne point clouds[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(3): 374-391.
- [27] AMENTA N, BERN M, KAMVYSSELIS M. A New Voronoi-based surface reconstruction algorithm[C]//*Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. Orlando, FL; ACM, 1998: 415-421.
- [28] KAZHDAN M, HOPPE H. Screened Poisson surface reconstruction[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(3): Article No.29.
- [29] XU Bo, JIANG Wanshou, SHAN Jie, et al. Investigation on the Weighted RANSAC approaches for building roof plane segmentation from LiDAR point clouds[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(1): 5.
- [30] QI CHARLES R, SU Hao, KAICHUN M, et al. Pointnet: deep learning on point sets for 3d classification and segmentation[C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Honolulu, Hawaii; IEEE, 2017: 77-85.
- [31] WANG Ruisheng, PEETHAMBARAN J, CHEN Dong. LiDAR point clouds to 3-D urban models: a review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(2): 606-627.
- [32] ZENG Huayi, WU Jiaye, FURUKAWA Y. Neural procedural

- reconstruction for residential buildings[C]//Proceedings of the 15th European Conference on Computer Vision. Munich, Germany: Springer, 2018; 759-775.
- [33] LEOTTA M J, LONG Chengjiang, JACQUET B, et al. Urban semantic 3D reconstruction from Multiview satellite imagery[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Long Beach, CA: IEEE, 2019; 1-10.
- [34] YANG B, LEE J. Improving accuracy of automated 3-D building models for smart cities[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2019, 12(2): 209-227.
- [35] 张春森, 张卫龙, 郭丙轩, 等. 倾斜影像的三维纹理快速重建[J]. *测绘学报*, 2015, 44(7): 782-790. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140341.
- ZHANG Chunsen, ZHANG Weilong, GUO Bingxuan, et al. Rapidly 3D texture reconstruction based on oblique photography[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(7): 782-790. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140341.
- [36] LEE J, YANG B. Developing an optimized texture mapping for photorealistic 3D buildings[J]. *Transactions in GIS*, 2019, 23(1): 1-21.
- [37] 李德仁. 论地球空间信息的3维可视化: 基于图形还是基于影像[J]. *测绘学报*, 2010, 39(2): 111-114.
- LI Deren. 3D visualization of geospatial information: graphics based or imagery based[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(2): 111-114.
- [38] ABAYOWA B O, YILMAZ A, HARDIE R C. Automatic registration of optical aerial imagery to a LiDAR point cloud for generation of city models[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 106: 68-81.
- [39] WEN Xuedong, XIE Hong, LIU Hua, et al. Accurate reconstruction of the LoD3 building model by integrating multi-source point clouds and oblique remote sensing imagery [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(3): 135.
- [40] WU Bo, XIE Linfu, HU Han, et al. Integration of aerial oblique imagery and terrestrial imagery for optimized 3D modeling in urban areas[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 139: 119-132.
- [41] PARISH Y I H, MÜLLER P. Procedural modeling of cities[C]//Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles: ACM, 2001; 301-308.
- [42] KOLBE T H. BIM, CityGML, and related standardization [C]//Proceedings of the 2012 Digital Landscape Architecture Conference, Bernburg/Dessau, Germany, 2012, 31.
- [43] CONSORTIUM W, OTHERS. X 3d international specification standards[R]. [S.L.]: Web 3D Consortium, 2005.
- [44] WILSON T. OGC®KML. Version 2.2. 0[R]. [S.L.]: Open Geospatial Consortium, 2008.
- [45] ARNAUD R, BARNES M C. COLLADA: sailing the gulf of 3D digital content creation[M]. [S.L.]: AK Peters/CRC Press, 2006.
- [46] GRÖGER G, KOLBE T H, NAGEL C, et al. OGC City Geography Markup Language (CityGML) encoding standard, version 2.0.0[R]. [S.L.]: Open Geospatial Consortium, 2012.
- [47] Open Geospatial Consortium. OGCIndoorGML[S]. OGC 14-005r3, 2014.
- [48] LAAKSO M, KIVINIEMI A O. The IFC standard: a review of history, development, and standardization, information technology[J]. *ITcon*, 2012, 17(9): 134-161.
- [49] GRÖGER G, PLÜMER L. CityGML-interoperable semantic 3D city models[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 71: 12-33.
- [50] VAN DEN BRINK L, STOTER J, ZLATANOVA S. UML-based approach to developing a citygml application domain extension [J]. *Transactions in GIS*, 2013, 17(6): 920-942.
- [51] LI Lin, LUO Feng, ZHU Haihong, et al. A two-level topological model for 3D features in CityGML[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2016, 59: 11-24.
- [52] KOLBE T H, BURGER B, CANTZLER B. CityGML goes to broadway [C] // Proceedings of the 55th Photogrammetric Week. Stuttgart, Germany: [s. n.], 2015; 343-356.
- [53] DENG Yichuan, CHENG J C P, ANUMBA C. Mapping between BIM and 3D GIS in different levels of detail using schema mediation and instance comparison [J]. *Automation in Construction*, 2016, 67: 1-21.
- [54] KOLBE T H. Representing and exchanging 3D city models with CityGML[C]//Proceedings of the 3rd International Workshop on 3D Geo-Information. Seoul, Korea: Springer, 2009; 15-31.
- [55] BILJECKI F, LEDOUX H, STOTER J. An improved LOD specification for 3D building models[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2016, 59: 25-37.
- [56] VAN DEN BRINK L, STOTER J, ZLATANOVA S. Establishing a national standard for 3D topographic data compliant to CityGML[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(1): 92-113.
- [57] BILJECKI F, LEDOUX H, STOTER J, et al. The variants of an LOD of a 3D building model and their influence on spatial analyses[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 116: 42-54.
- [58] KADEN R, KOLBE T. City-Wide total energy demand estimation of buildings using semantic 3D city models and statistical data[C]//Proceedings of the ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, 2013; 27-29.
- [59] KRÜGER A, KOLBE T H. Building analysis for urban energy planning using key indicators on virtual 3D city models: the energy atlas Of Berlin[C]//Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Melbourne, Australia, 2012; 145-150.
- [60] AGUGIARO G, BENNER J, CIPRIANO P. The energy

- application domain extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulations[J]. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2018, 3(2): 1-30.
- [61] ISIKDAG U, ZLATANOVA S, UNDERWOOD J. A BIM-oriented model for supporting indoor navigation requirements[J]. *Computers, environment and urban systems*, 2013, 41: 112-123.
- [62] CHEN L C, WU C H, SHEN T S, et al. The application of geometric network models and building information models in geospatial environments for fire-fighting simulations[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2014, 45: 1-12.
- [63] AMIREBRAHIMI S, RAJABIFARD A, MENDIS P, et al. A framework for a microscale flood damage assessment and visualization for a building using BIM-GIS integration [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 9(4): 363-386.
- [64] BILJECKI F, LEDOUX H, STOTER J, et al. The variants of an LOD of a 3D building model and their influence on spatial analyses[J]. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2016, 116: 42-54.
- [65] BOETERS R, OHORI K A, BILJECKI F, et al. Automatically enhancing CityGML LOD2 models with a corresponding indoor geometry[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29 (12): 2248-2268.
- [66] GARLAND M, HECKBERT P S. Surface simplification using quadric error metrics[C]//*Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. Los Angeles, CA: ACM, 1997: 209-216.
- [67] COHEN-STEINER D, ALLIEZ P, DESBRUN M. Variational shape approximation [C] // *Proceedings of SIGGRAPH '04 ACM SIGGRAPH*. Los Angeles, NY: ACM, 2004: 905-914.
- [68] THIEMANN F, SESTER M. Segmentation of buildings for 3D-generalisation[C]//*Proceedings of the ICA Workshop on generalization and multiple representation*. Leicester, UK: [s.n.], 2004: 2021.
- [69] FAN Hongchao, MENG Liqiu, JAHNKE M. Generalization of 3D buildings modelled by CityGML[M]//SESTER M, BERNARD L, PAELKE V. *Advances in GIScience*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009: 387-405.
- [70] YAO Zhihang, NAGEL C, KUNDE F, et al. 3DCityDB - a 3D geodatabase solution for the management, analysis, and visualization of semantic 3D city models based on CityGML[J]. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2018, 3(1): 5.
- [71] WANG Hao, PAN Yisha, LUO Xiaochun. Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: a review and Bibliometric analysis[J]. *Automation in Construction*, 2019, 103: 41-52.
- [72] EL-MEKAWY M, ÖSTMAN A. Semantic mapping: an ontology engineering method for integrating building models in IFC and CITYGML[C]//*Proceedings of the 3rd ISDE Digital Earth Summit*. Nessebar, Bulgaria: [s.n.], 2010: 1-11.
- [73] EL-MEKAWY M, ÖSTMAN A, HIJAZI I. A unified building model for 3D urban GIS[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2012, 1(2): 120-145.
- [74] DONKERS S, LEDOUX H, ZHAO Junqiao, et al. Automatic conversion of IFC datasets to geometrically and semantically correct CityGML LOD3 buildings[J]. *Transactions in GIS*, 2016, 20(4): 547-569.
- [75] VAN BERLO L, LAAT R D. Integration of BIM and GIS: The development of the CityGMLGeoBIM extension[J]. *Advances in 3D Geo-Information Sciences*, 2011: 211-225.
- [76] XU Xun, DING Lieyun, LUO Hanbin, et al. From building information modeling to city information modeling [J]. *Journal of Information Technology in Construction*, 2014, 19: 292-307.
- [77] STOUFFS R, TAUSCHER H, BILJECKI F. Achieving complete and near-lossless conversion from IFC to CityGML[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(9): 355.
- [78] JUSUF S K, MOUSSEAU B, GODFROID G, et al. Path to an integrated modelling between IFC and CityGML for neighborhood scale modelling[J]. *Urban Science*, 2017, 1 (3): 25.
- [79] 3D geoinformation. Cities/regions around the world with open datasets[EB/OL]. [2019-10-30]. <https://3d.bk.tudelft.nl/opendata/>.
- [80] DÖLLNER J, KOLBE T H, LIECKE F, et al. The virtual 3D city model of berlin-managing, integrating, and communicating complex urban information[C]//*Proceedings of the 25th International Symposium on Urban Data Management*. Aalborg, Denmark: [s.n.], 2006: 1-13.
- [81] 李德仁. 展望大数据时代的地球空间信息学[J]. *测绘学报*, 2016, 45(4): 379-384. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20160057. LI Deren. Towards geo-spatial information science in big data era[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(4): 379-384. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20160057.

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2019-11-11

修回日期: 2019-11-17

第一作者简介: 单杰(1961—),男,博士,教授,研究方向为摄影测量与激光扫描测量数据处理,地理空间大数据挖掘与建模。

First author: SHAN Jie(1961—), male, PhD, professor, majors in data processing techniques for photogrammetry and laser scanning, minging and modeling of geospatial big data.

E-mail: jshan@purdue.edu

通信作者: 张文元

Corresponding author: ZHANG Wenyuan

E-mail: zhangwy@mail.ccnu.edu.cn