

doi: 10.6046/zrzyyg.2021039

引用格式: 宋仁波, 朱瑜馨, 郭仁杰, 等. 基于多源数据集成的城市建筑物三维建模方法[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 93–105. (Song R B, Zhu Y X, Guo R J, et al. A method for 3D modeling of urban buildings based on multi-source data integration[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 93–105.)

基于多源数据集成的城市建筑物三维建模方法

宋仁波¹, 朱瑜馨², 郭仁杰², 赵鹏飞², 赵珂馨², 朱洁², 陈颖²

(1. 无锡学院大气与遥感学院, 无锡 214105; 2. 淮阴师范学院城市与环境学院, 淮安 223300)

摘要: 建筑物是城市的载体和形象表达, 是城市的重要组成部分, 建筑物三维模型是构建数字城市、虚拟城市和智慧城市的重要基础。针对现有的建筑物三维建模方法成本高、操作繁琐和复杂、劳动强度大的缺陷, 提出一种基于多源数据集成的城市建筑物三维建模方法, 并借助 GIS 建模技术实现了城市建筑物三维模型的自动构建。其主要原理和操作步骤为: 首先, 以高分辨率卫星遥感影像、建筑物轮廓电子地图和全景影像为数据源, 在遥感和 GIS 系统集成平台下, 通过数据集成和预处理, 提取出建筑物的几何边界、高度、楼层数和屋顶类型等空间信息和属性信息; 其次, 提出基于结构实体几何模型的建模物主体结构建模方案, 借助 GIS 建模技术, 组合数据处理、文件转换、空间分析、三维分析和脚本程序等多种 ArcToolbox 工具, 通过设计模型实现了建筑物三维模型的自动构建; 然后, 通过纹理贴图技术实现模型的可视化; 最后, 选择淮阴师范学院北校区实验区域进行建模实证。通过对建模过程和可视化效果进行分析表明, 该方法具有实现成本低、操作简单、自动化程度高的特点, 并且构建的模型能满足较高的精度要求, 具有较好的可视化效果, 可为大规模城市建筑物三维建模与可视化提供可靠的技术解决方案。

关键词: 城市建筑物; 三维建模; 多源数据集成; 遥感影像; 电子地图; 全景影像; GIS 建模

中图法分类号: P 962 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)01-0093-13

0 引言

建筑物三维建模是运用计算机图形图像处理技术, 将建筑物的二维平面图转换为三维模型并进行立体显示的一门科学技术, 在城市景观规划、建筑设计、军事仿真、旅游开发、导航开发以及古建筑保护等领域具有广泛的应用价值^[1-3]。近年来, 随着各地数字城市、虚拟城市和智慧城市建设速度的加快, 建筑物三维建模已成为测绘、GIS 和建筑等领域的研究热点^[4-7]。建筑物三维建模技术的核心是根据建筑物的几何信息构造其立体模型, 利用相关建模软件或编程语言生成其三维模型, 并赋予模型表面纹理贴图进行立体图形显示。现有的建筑物三维建模方法主要归纳为 4 类: ①利用机载激光雷达或地面三维扫描仪获取建筑物的三维点云构建其三维模型^[6,8-11], 需要购买或租赁数据采集装备, 建模成本高; ②利用卫星遥感、航空遥感、无人机遥感结合摄影测量技术获取对象的多视角影像构建其三维模型^[5,7,12-16], 需要借助专业摄影测量软件, 操作人员

需要经过专业的技术培训才能掌握; ③利用形状文法或知识规则描述建筑物的结构和部件组成^[17-18], 通过编写计算机程序自动生成建筑物的三维模型, 具有自动化程度较高的优点, 但需要复杂的算法设计和编程经验、技能; ④组合遥感、摄影测量和激光雷达点云的方法^[18], 该方法建模精度高, 但同样需要复杂的数据预处理和大量编程实践。此外, 上述建模方法都需要三维建模软件的支持才能完成模型的构建^[19-25], 综上所述, 上述方法在推广和应用时都受到成本和技术条件的限制, 实用化仍然是建模需要克服的难点和障碍, 因此, 非常有必要研究和开发实用、可操作性强的城市建筑物三维方法, 并将其推广应用于数字城市、虚拟城市和智慧城市等领域的研究和工程实践中。

近些年来, 无人机摄影测量技术飞速发展^[26-28], 为近距离地表空间测绘数据的获取、处理和分析提供了更加丰富的技术手段, 也使得提取地物对象的精度得到大幅度提升, 使得建筑物精细化三维建模成为技术趋势^[29-31]。目前, 百度、谷歌、高德、腾讯、天地图等公司及国家测绘地理部门都提供

收稿日期: 2021-02-07; 修订日期: 2021-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于时空统计方法的多源遥感产品融合方法研究”(编号: 41401405)和南京信息工程大学滨江学院人才启动经费资助项目“基于 Internet 的三维地质建模系统”(编号: 2020r015)共同资助。

第一作者: 宋仁波(1974-), 男, 博士, 讲师, 主要从事 GIS 应用与开发的教学与研究工作。Email: srb_id2000@aliyun.com。

在线的地图服务,不仅能够提供传统的电子地图和遥感影像,而且支持城市全景影像图功能,用户可以借助地图下载工具免费获得多源测绘数据,为用户多视角观察地面目标,获取建筑物三维信息提供更加丰富的数据源,集成多源测绘数据进行建筑物三维建模已成趋势。同时,计算机软硬件技术的不断进步,促使 GIS 技术不断革新,GIS 软件系统已由基本的数据处理、分析和制图工具向嵌入式 GIS 系统、分布式 GIS 系统和三维 GIS 系统 3 个方向发展,尤其是 GIS 系统提供的强大建模功能,使用户能够在短时间内设计出满足用户特定任务要求的模型,这些都使得大范围、大批量城市建筑物的三维建模与可视化分析成为现实。综上所述,针对数字城市、虚拟城市、智慧城市领域的研究和工程实践迫切需要实用、可操作性强和自动化程度高的建模方法,本文提出一种基于多源数据集成的建筑物三维建模方法,集成高分辨遥感影像、无人机航空影像、建筑物电子地图、全景影像为数据源,借助 GIS 建模功能,实现多源建模数据的自动预处理、三维模型的自动构建和模型的精细化处理。同时,借助纹理映射技

术实现模型的可视化和逼真展现。

1 基本原理与实现方法

1.1 基本原理

计算机中表示三维形体的模型,按照几何特点进行分类,主要可以归纳为 3 种:线框模型、表面模型和实体模型。同时,按照表示物体的方法进行分类,实体模型基本上可以分为分解表示、结构实体几何模型(constructive solid geometry, CSG)和边界表示模型(boundary representation, B-rep)3 大类。本文组合线框、边界表示和结构实体几何模型三维建模的思想,并将其运用于建筑物三维建模,其主要建模原理为:将建筑物的主体结构分解为一系列简单的侧墙、门窗和屋顶等基本结构部件,同时采用线框描述建筑物的边界线;进一步,采用 B-rep 模型描述建筑物各部件的边界面;最后,建筑物的主体结构模型表示为一系列简单的侧墙、门窗和屋顶等基本结构部件的布尔操作的结果,从而构建建筑物的三维建模,其原理如图 1 所示。

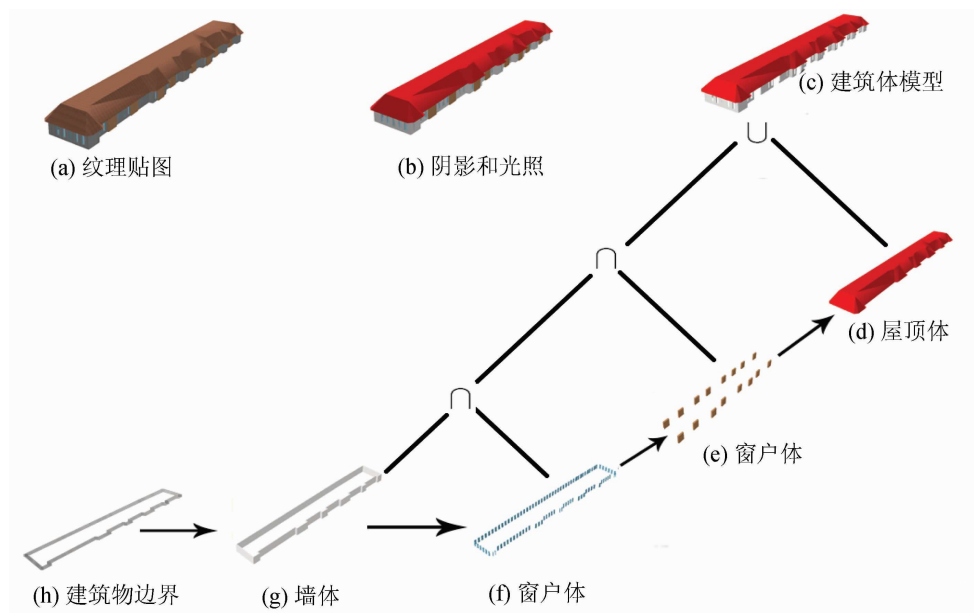


图 1 建筑物三维建模与可视化原理示意图

Fig. 1 Sketch of 3D modeling and visualizing a building

1.2 实现方法

从 GIS 建模的视角,结合 GIS 的数据处理、空间分析和三维分析功能,通过构建模型实现建筑物三维模型的自动构建。其中,GIS 空间分析(spatial analysis)指的是借助 GIS 软件从空间数据中获取有关地理对象的空间位置、分布、形态、形成和演变等信息并进行分析,其基本功能包括空间查询与量算、缓冲区分析、叠加分析、路径分析、空间插值和统计分类分析等。空间分析建模是通过作用于原始数据

和派生数据的一组顺序、交互空间分析命令,解释有关空间现象或发现空间规律的过程。空间分析建模建立在对空间地图数据操作基础之上,又称“地图建模”,其结果是得到一个“地图模型”,它是对空间分析过程及其结果的图形或符号化表示,帮助分析人员和规划所要完成的分析过程,并逐步指定完成分析过程所需建模数据^[29]。可视化建模是利用围绕现实想法组织模型的一种思考问题的方法,它以图形的方式描述所开发的系统的过程,促进了对需

求分析有更好的理解从而进行更清晰的设计。

本文采用 ArcToolbox 工具箱结合 Modelbuilder 可视建模工具,通过构建模型、创建和编写脚本工具实现建模数据的自动预处理和建筑物三维模型的自动构建。其中,ArcToolbox 工具箱是 ArcGIS 系统内嵌的地理处理工具集合,通过内置工具、模型工具、脚本工具和特殊工具不仅可以实现基本的数据处理、转换、数据统计和数据图形分析功能,而且借助其三维扩展功能模块,可实现各种复杂几何体三维模型的构建。ModelBuilder 是一种可视化建模工具,为创建满足用户要求特定工作流提供有效的途径。其主要特点是将一系列地理处理工具串联在一起,将其中一个工具的输出作为另一个工具的输入,通过构造和执行工作流,可以自动化完成复杂的建模任务从而提高建模效率。此外,通过创建模型并将其共享为工具来提供扩展 ArcGIS Pro 功能的高级方法,同时,利用 Visual Studio 结合 ArcGIS Pro SDK 二次开发还可用于将 ArcGIS Pro 与其他应用程序进行集成,能够增强构建模型的可复用和扩展性。Python 是一种面向对象、解释型、交互式和面向初学者的计算机程序设计语言,它具有语法简洁而清晰,易于编写和维护的优点,并具有丰富和强大的类库,使其已成为当前计算机领域的主流开发语言^[24],能够显著提高程序的开发效率。ArcGIS 系统提供了 Python 语言集成开发环境(integrated development and learning environment, IDLE)和 ArcPy 站点包,通过编程能够创建满足用户特定需求的脚本工具,不仅可以有效弥补 ArcToolBox 系统工具箱功能的不足,而且能够增强 ModelBuilder 的建模能力。

2 建筑物三维建模与可视化

将建筑物三维建模与可视化工作分解为数据获取和预处理、三维建模和纹理贴图等关键环节,并将其进行整合和完善,以设计工作技术流程。

2.1 技术流程

依据实用、高效和可操作的原则和目标进行建筑物三维建模的技术流程设计,同时,要求建模的可视化效果直观、形象和逼真,以达到工程应用要求,其主要设计思路是:首先,将建筑物主体结构部件的建模对象包括侧墙面、门窗、屋顶等进行分解,并将其建模过程分解为一系列数据处理、文件转换、空间分析和三维分析操作,并借助 GIS 建模功能实现整个建模过程的自动化。具体操作过程主要包括:①以高分辨遥感影像、建筑物电子地图和全景影像为数据源,利用 ENVI 影像非监督分类(Unsuper-

visedClassificationCleaned)工具,提取出建筑物墙体、窗户和屋顶的矢量多边形空间信息,同时,结合建筑物全景影像和地面拍摄影像测量定标,通过影像特征分类,分别提取出建筑物的高度、楼层数和屋顶类型等属性信息,利用概化处理工具对其进行预计处理,并将其保存至 GIS 数据库;②以建筑物墙体、窗户多边形作为模型的输入;③以建筑物屋顶多边形作为模型的输入,利用要素选择迭代器(IterateFeatureSelection)结合(Select)工具提出每一栋建筑物的矢量多边形,同时,结合数据处理、文件转换、空间分析和三维分析工具分别生成建筑物屋顶的三维实体模型;④采用 Python 面向对象编程语言结合 ArcPy 站点包,通过编程实现批量 3D 差积运算程序,并结合 ArcCatalog 在 ArcToolbox 工具箱构建自定义工具自动实现侧墙和屋顶模型的细化镂空处理。此外,利用 ModelBuilder 可视化建模工具,通过调用 ArcToolbox 工具箱中的内置工具、模型工具和脚本工具实现数据的多源数据预处理和三维模型的自动构建,通过构建模型实现整个操作过程的自动化。最后,利用 ArcGIS Pro 编辑模型的纹理贴图,从而实现模型的可视化,其技术流程如图 2 所示。

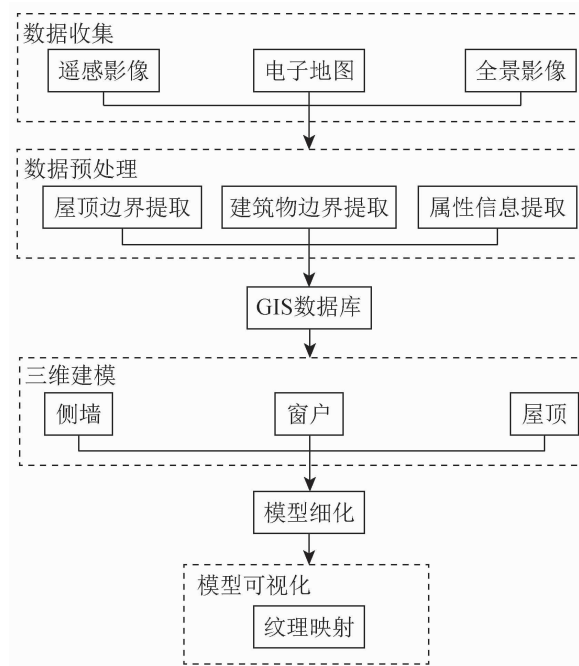


图2 城市建筑物三维建模工作流程

Fig.2 Workflow for constructing the 3D building models of a city

2.2 数据的获取、集成和预处理

2.2.1 数据的获取

以高分辨率卫星影像、建筑物轮廓电子地图和全景影像作为建模数据源。其中,由于卫星遥感相机拍摄距离远、视场角大,其获取的遥感影像具有宏观和综合的优点,并可以实现连续观测,形成时序信

息。目前,常用的高分辨率卫星遥感影像主要包括我国的高分系列影像(GF)、美国的快鸟(Quick-Bird)影像和美国的 IKONOS 影像。GF-2 影像和 QuickBird 影像可从百度、谷歌、高德、腾讯和天地图网站免费获取,谷歌地图还提供历史影像,通过卫星地图下载器可免费获得 22 级影像(图 3(a)),其空间分辨率为 0.61 m。由于卫星遥感影像易受天气条件的影响,一旦成像区域有云或雾霾覆盖,会严重影响成像质量。同时,考虑直接利用遥感影像提取建筑物边界轮廓工作量大,提取的多边形轮廓边界精度较差,采用建筑物轮廓电子地图作为数据源,以提高数据获取和处理效率。城市建筑物轮廓电子地图可从百度、高德和天地图网站免费获取,上

述站点主要提供全国大中型城市主城区建筑物轮廓的栅格数据,通过卫星地图下载器下载建筑物电子地图的 22 级影像(图 3(b)~(c)),其空间分辨率约为 0.5 m。此外,考虑卫星影像、建筑物轮廓电子地图只能提供建筑物顶视的边界轮廓和纹理结构特征,其提供建筑物侧面影像纹理信息有限,不能准确刻画建筑物侧面的几何结构特征;同时,由于卫星获取的侧面纹理影像几何畸变严重,不能作为建筑物侧面纹理贴图使用,而地面相机人工拍摄工作量太大,不适合城市大区域作业。因此,采用百度全景收集影像建筑物侧面影像数据,通过影像处理作为模型纹理贴图,以提高模型的可视化效果,如图 3(d)所示。

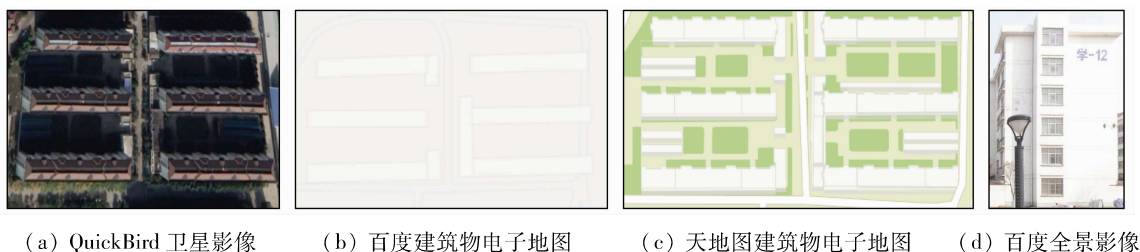


图 3 多源建模数据的获取结果

Fig. 3 Acquired results of the multi-source modeling data

2.2.2 数据的集成和预处理

利用 ArcGIS 软件导入获取的高分辨率遥感影像、建筑物电子地图和全景影像,并进行配准和几何纠正预处理,然后分别将其导入建立的 GIS 数据库进行集成。一方面,利用矢量工具结合遥感影像勾画出建筑物侧面的边界(图 4(a)),从中提取出建筑物侧面的纹理影像(图 4(b)),同时结合几何

纠正工具对其进行形变处理(图 4(c));进一步,利用符号化工具结合直方图的调整阈值功能,先提取出建筑物侧面纹理灰度影像(图 4(d)),再将其进行二值化处理(图 4(e));最后,利用 ENVI 非监督分类模型(图 4(g))提取出建筑物侧面窗户的矢量多边形(图 4(f))。

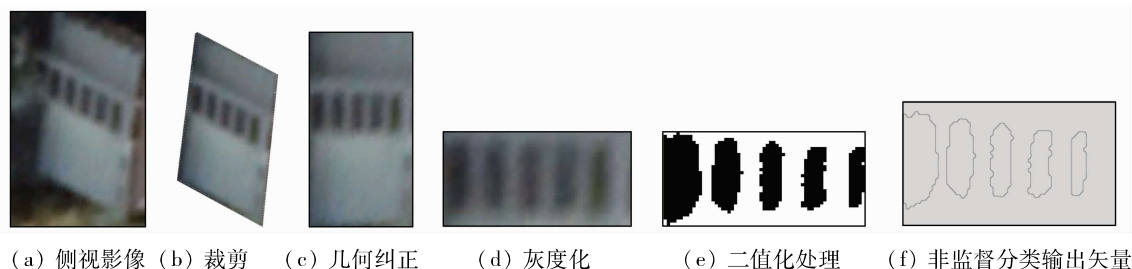


图 4 建筑物楼层数提取过程及其结果

Fig. 4 The extracting processes and its results of the floor numbers of a building

另一方面,利用 ArcToolbox 工具箱结合 ENVI 非监督分类模型,通过创建自定义模型结合建筑物轮廓电子地图,提取出建筑物轮廓的矢量多边形;

然后,利用概化工具对其边界进行概化预处理,并结合遥感影像手动调整其边界的细节结点,其处理过程和结果如图 5 所示。

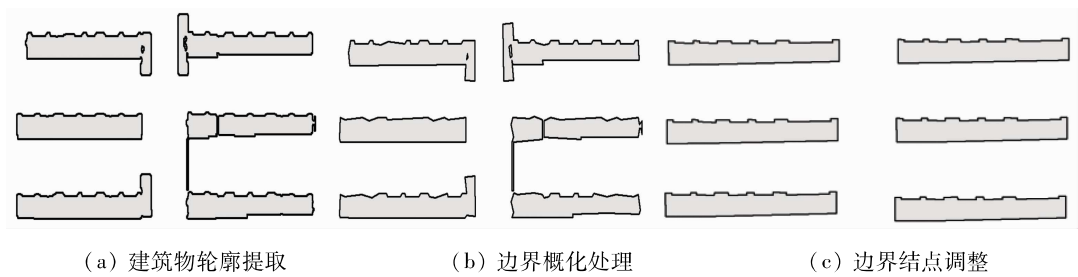


图 5 建筑物多边形轮廓提取、预处理过程及其结果

Fig. 5 Extraction, preprocessing and its results of polygon contours of multiple buildings

此外,利用手机结合长焦镜头水准尺拍摄建筑物侧面纹理影像,通过读取水准尺读数,提取出侧面楼层、层高、屋顶高度等值(表 1)。最后,通过侧视影像确定建筑物屋顶的结构类型(如平顶和斜顶)。

表 1 提取的建筑物空间和属性信息
Tab.1 Extracted spatial and attribute information of the buildings

OID *	Shape *	层数	层高/ m	屋顶高度/ m	倾斜角度/(°)	名称
1	Polygon	6	3	3	45	宿舍 1
2	Polygon	6	3	3	45	宿舍 2
3	Polygon	6	3	3	45	宿舍 3
4	Polygon	6	3	3	45	宿舍 4
5	Polygon	6	3	3	45	宿舍 5
6	Polygon	6	3	3	45	宿舍 6
...	...	...	...	...	...	...

2.3 建筑物三维建模

建筑物的主体结构部件主要包括侧墙面、门窗和屋顶等结构,建筑物的几何形状和空间一般排列较规则,非常适合程序和建模批量生成,这样做不仅可显著降低作业人员的劳动强度,而且可有效提高建模效率。利用 ModelBuider 可视化建模工具,通过调用 ArcToolbox 系统工具箱中内定的数据处理、文件转换、空间分析、三维分析和脚本工具实现建筑物主体结构三维模型的自动构建。此外,鉴于每个模型只能包含一个迭代器,通过 Python 面向对象编程语言结合 ArcPy 站点包,通过编写脚本程序并结合 ArcToolbox 工具箱创建脚本工具,以弥补模型迭代器的不足。

2.3.1 侧墙建模

鉴于建筑物侧墙和门窗的几何形状及空间排

列较规则,且分层构建,为实现模型的批量构建,提出基于建筑物分类、分层表面建模和实体拉伸建模的建筑物主体结构部件建模方案,设计了建筑物侧墙和门窗等主体结构实体模型的分层自动生成脚本程序,同时采用 Python 面向对象语言结合 ArcPy 站点包,通过调用 ArcToolbox 工具箱中的 TIN 表面建模和 TIN 拉伸的三维分析工具进行了编写实现,其算法及程序实现主要包括以下 3 个步骤:①根据输入建筑物部件的多边形点、多边形文件、输出工作区文件夹,先利用 ArcPy 查询游标(SearchCursor)的查询功能,通过读取多边形点文件,并结合全局变量保存建筑物的名称、楼层数、层高和屋顶高度等属性字段信息,同时,利用 os 库的 makedirs 函数创建建筑物结构部件名称文件夹,该文件夹用于存放生成每栋建筑物的每层侧墙的多面体要素 shpfile 文件;②利用循环程序通过调用 CopyFeatures_management() 函数和 Adjust3DZ_management() 函数分别复制并调整建筑物上下多边形点至对应的楼层高度,同时,利用 CreateTin_3d() 函数分别创建建筑物每一层的 TIN 表面,然后,利用 ExtrudeBetween() 函数生成其每一层的侧墙和门窗的实体模型;③在输入建筑物底面边界多边形后,通过缓冲区(Buffer)、擦除(Erase)生成外墙多边形,然后利用要素选择迭代器(IterateFeatureSelection)结合拷贝要素(CopyFeatures)、要素结点转点(FeatureVerticesToPoints)连接侧墙脚本程序,通过构建模型自动生成每栋建筑物的每层侧墙三维模型,其模型构建方法如图 6 所示,生成结果如图 7 所示。此外,通过模型

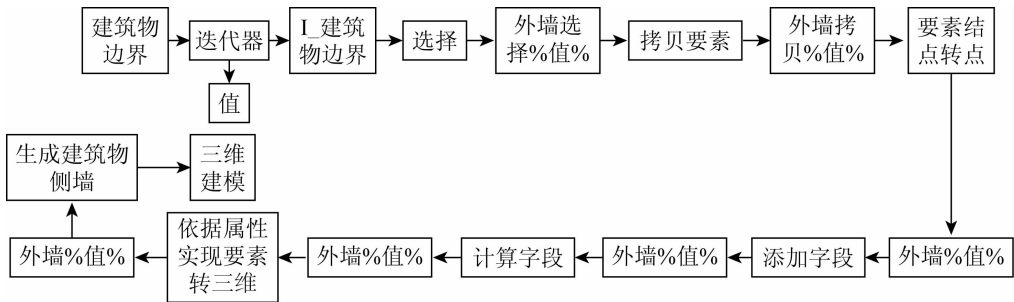


图 6 建筑物侧墙的自动创建过程

Fig. 6 The process of creating the side walls of a building

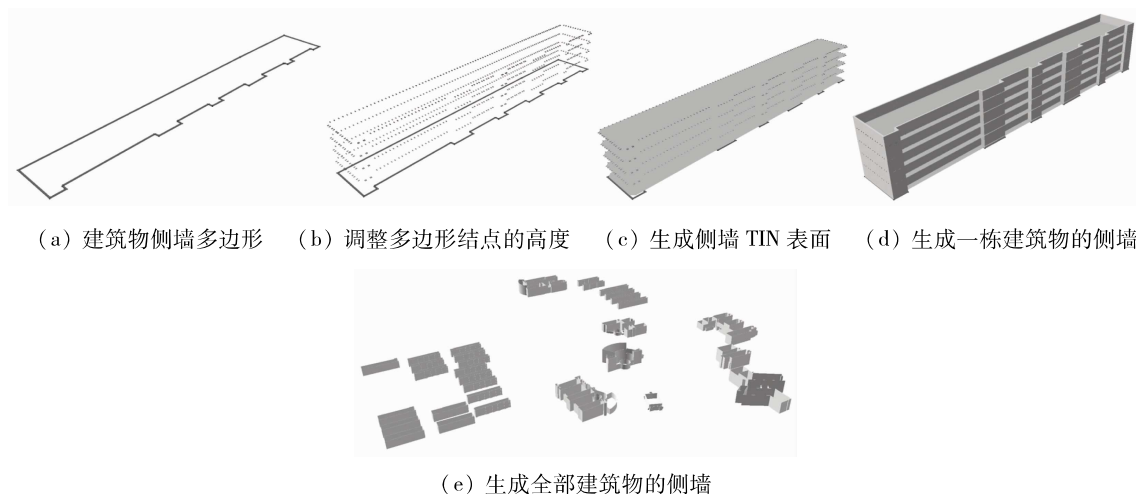


图 7 建筑物侧墙生成结果

Fig. 7 Results of creating the side walls of a building

运行报告分析侧墙模型的计算性能,通过输入建筑物多边形参量(130 个)对迭代器和各个工具的执行时间进行分类统计和汇总计算,其结果如表 2 所示。

表 2 侧墙建模实验统计

Tab. 2 Experimental modeling 3D buildings by grouping statistics

模型工具	统计项			
	数量/ 个	操作 数/次	每次耗 时/s	总耗 时/s
迭代器工具 (Iterate)	1	1	0.04	5.2
选择工具 (Select)	1	1	1.79	232.7
拷贝要素工具 (CopyFeatures)	1	1	2.65	344.5
要素结点转点工具 (FeatureVerticesToPoints)	1	1	1.69	219.7
添加字段工具 (AddFields)	1	1	0.52	67.6
依据属性要素转三维工具 (FeatureTo3DByAttribute)	1	1	1.41	183.3
侧墙脚本程序	1	1	1.00	130.0
总计				1 183

2.3.2 门窗建模

采用脚本程序结合建模生成建筑物门窗部件的三维模型,与侧墙脚本程序的算法设计和实现类似,只是更改输入参数名称、中间变量名称和输出参数名称,通过循环结合 CopyFeatures_management() 函数和 Adjust3DZ_management() 函数分别复制并调整建筑物门窗上下多边形点至对应的楼层高度和基准高度;然后,利用 CreateTin_3d() 函数分别创建建筑物每一层门窗的 TIN 表面,进一步,利用 ExtrudeBetween() 函数生成其每一层门窗的实体模型,其主要代码实现和侧墙实现类似,这里不作赘述;最后,在输入建筑物底面边界多边形后,通过缓冲区 (Buffer)、擦除 (Erase) 生成外墙多边形,利用要素选择迭代器 (IterateFeatureSelection) 结合拷贝要素 (CopyFeatures)、要素结点转点 (FeatureVerticesToPoints) 连接侧墙脚本程序,通过构建模型自动生成每栋建筑每层窗户的三维模型,其模型构建方法见图 8,生成结果如图 9 所示。模型工具执行时间统计如表 3 所示。

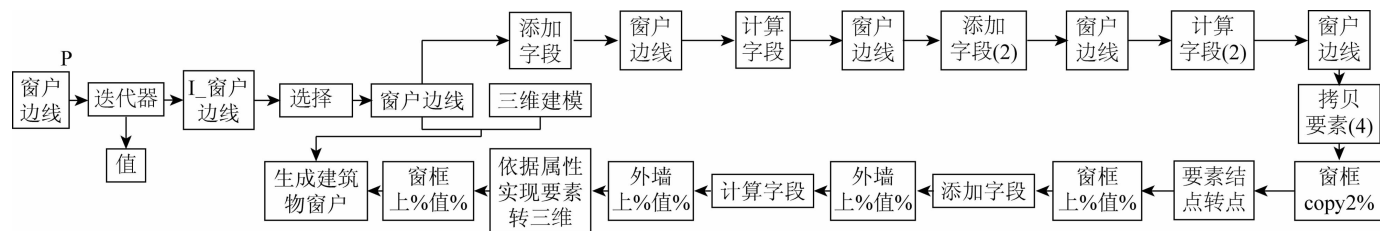


图 8 建筑物门窗自动创建过程

Fig. 8 The process of creation the side windows of a building

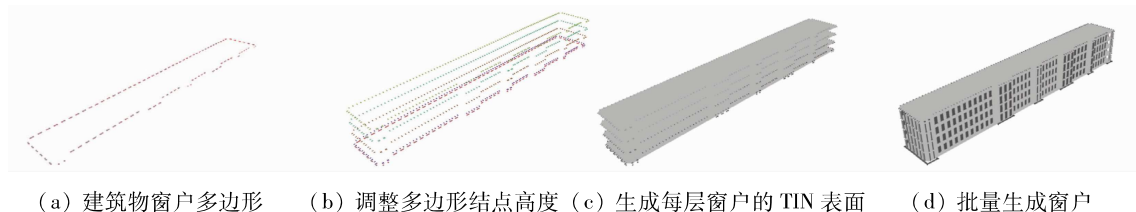


图 9 建筑物门窗自动创建生成结果

Fig. 9 Results of creating the side windows of a building

表3 窗户建模实验统计

Tab.3 Experimental modeling 3D windows

by grouping statistics

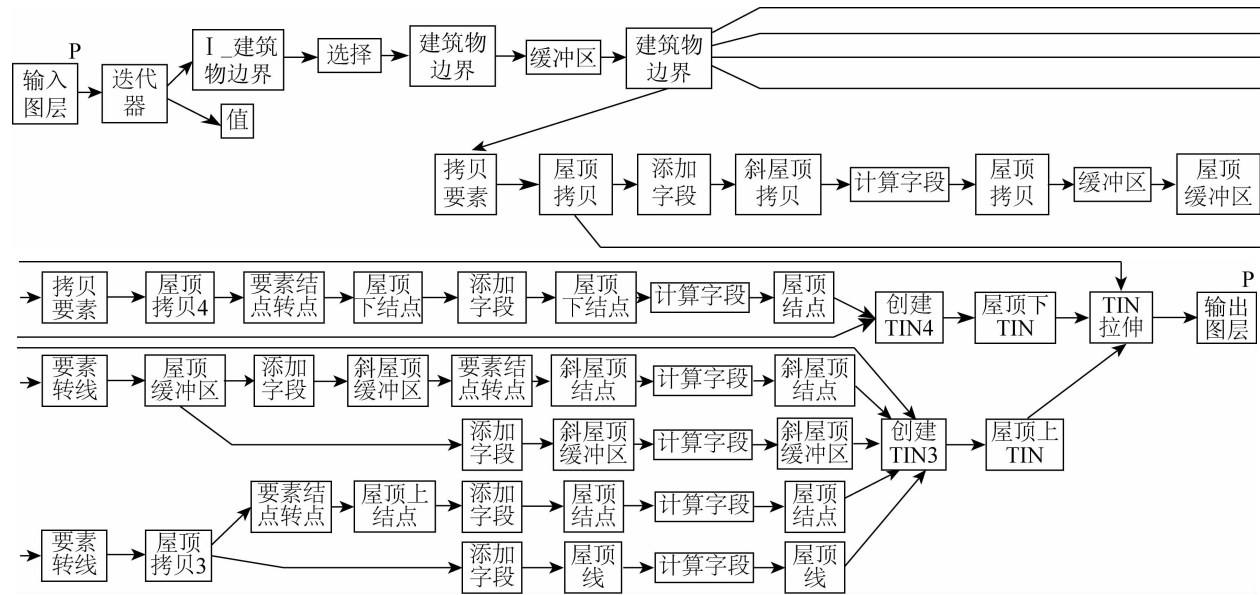
模型工具	窗户多边形			
	数量/ 个	操作 数/次	每次耗 时/s	总耗 时/s
迭代器工具 (Iterate)	1	1	1.08	140.4
选择工具 (Select)	1	1	2.44	317.2
添加字段工具 (AddFields)	2	2	0.60	78.0
计算字段工具 (CalculateField)	2	2	1.07	139.1
拷贝要素工具 (CopyFeatures)	1	1	4.10	533.0
要素结点转点工具 (FeatureVerticesToPoints)	1	1	2.20	286.0
依据要素转三维工具 (FeatureTo3DByAttribute)	1	1	2.51	326.3
窗户脚本程序	1	1	1.00	130.0
总计				2 166.9

需要说明的是,与模型中脚本程序执行时间相关的参数主要包括:创建窗户文件夹、窗户文件名文件夹和楼层数,按照每层1 s的平均值计算统计

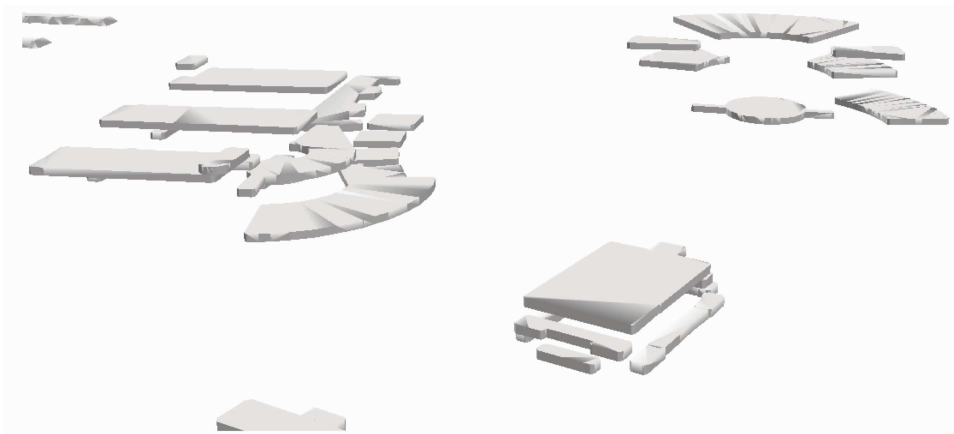
结果,通过提取和计算实验区内全部建筑物楼层数的平均值(4.64 层)、建筑物数量和表3 的总计值相乘,得出生成实验区内全部建筑物的窗户三维模型需要总的运行时间是 167.573 6 min。

2.3.3 屋顶建模

每栋建筑物的屋顶结构主要包括平顶和斜顶 2 种结构类型,其形态各异,但每栋建筑物通常只包括一层屋顶,即屋顶不是分层结构,因此,可通过创建模型生成每个建筑物的平顶或斜顶的三维模型,其模型的主要构建步骤包括:以建筑物多边形作为模型输入,通过要素迭代器 (IterateFeatureSelection) 结合拷贝要素 (CopyFeatures)、要素结点转点 (FeatureVerticesToPoints)、添加字段 (AddField)、计算字段 (CalculateField)、创建 TIN (CreateTin) 和 TIN 拉伸工具 (ExtrudeBetween) 分别生成每栋建筑物屋顶的多面体要素 (MultiPatch) 模型,其模型组成和模型生成结果如图 10 所示。



(a) 建筑物屋顶自动构建模型



(b) 生成的每栋建筑物屋顶模型

图 10 建筑物屋顶自动创建及其生成结果

Fig.10 Building roof generation model and generation results

其中,斜屋顶主要利用计算字段工具根据屋顶高度和屋顶倾斜角度字段,然后作为缓冲区工具的

输入参数,调整屋顶上边界点和线的高度,公式为:

$$A = -\tan(3.14[B]/180) \times [C] - 0.01, \quad (1)$$

式中: A 为缓冲区输入参数; B 为倾斜角度; C 为屋顶高度; $[\cdot]$ 表示取字段变量符号。

此外,通过模型运行报告分析屋顶模型的性能,通过输入窗户多边形参数(130 个和 130 组),对迭代器和各个工具的执行时间进行分类统计和汇总计算,其结果如表 4 所示。

表 4 屋顶建模实验统计

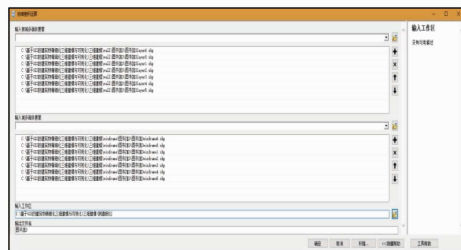
Tab.4 Experimental modeling 3D roofs by grouping statistics

模型工具	窗户多边形			
	数量/个	操作数/次	每次耗时/s	总耗时/s
迭代器工具 (Iterate)	1	1	0.06	7.8
选择工具 (Select)	1	1	0.72	93.6
缓冲区工具 (Buffer)	2	2	1.00	520.0
添加字段工具 (AddFields)	5	5	1.00	3 250.0
计算字段工具 (CalculateField)	6	6	1.00	4 680.0
拷贝要素工具 (CopyFeatures)	1	1	1.00	130.0
要素转线工具 (FeatureToLines)	3	3	1.00	1 170.0
要素结点转点工具 (FeatureVerticesToPoints)	1	1	1.00	130.0
创建 TIN(3) 工具 (CreateTIN)	1	1	1.92	249.6
创建 TIN(4) 工具 (CreateTIN)	1	1	0.91	118.3
TIN 拉伸工具 (ExtrudeBetween)	1	1	1.5	195.0
总计				10 349.3

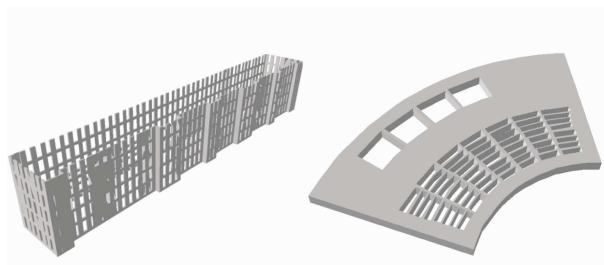
2.3.4 模型细化处理

为增强模型的立体感和可视效果的同时,使模型能够反映出光照阴影和外部光照射入室的效果进行可视化分析。通过调用三维分析工具箱的三维差积运算工具,对之前生成侧墙、窗户的 MultiPatch 模型和屋顶两两做三维差积布尔运算,分别生成侧墙和屋顶的镂空模型,同时,为提高镂空处理效率,通过脚本编程对三维差积运算工具进行扩展,其脚本程序界面如图 11(a) 所示,其脚本程序实现主要包括 2 个步骤: ① 分别输入减多面体要素、减多面体要素类 Shpfile 文件列表和输出工作区,并利用列表容器结合循环程序将其分别存放于 list1 和 list2 中; ② 通过循环程序读取 list1 和 list2 中的减多面体要素、减多面体要素类 Shpfile 文件名称,并依据循环变量 i 生成差积输出文件 Shpfile 文件名,然后,利用 Difference3D_3d() 函数分层进行侧墙三维差积运算,其生成结果如图 11(b) — (c) 所示。同时,通过模型细化输出报告分析模型运行的性能,通过

输入每个建筑物侧墙和窗户的三维模型,对脚本生成工具的执行时间进行分类统计和汇总计算,其结果如表 5 所示。



(a) 批量三维差积脚本工具



(b) 侧墙分层镂空

(c) 屋顶镂空

图 11 三维差积脚本工具界面及其生成结果

Fig. 11 Interface of script tool for 3D difference and hollowing results

表 5 侧墙模型细化实验统计

Tab.5 Experimental modeling 3D roofs by grouping statistics

模型工具	侧墙和窗户模型				
	数量/个	操作数/次	每次操作时间/s	每次运行时间/s	汇总/s
脚本	1 个	130	5	4.45	13 421.2

需要说明的是,模型中脚本程序执行时间与建筑物楼层数、门窗的数量相关,取楼层数平均值(4.64 层)、建筑物数量(130)、脚本操作时间和模型运行时间相乘,得出生成实验区内全部建筑物的窗户三维模型需要总的运行时间约为 223.69 min。

2.3.5 模型纹理贴图

利用百度全景影像图功能,从全景影像图中提取建筑物的侧面纹理。考虑建筑物的部分侧面纹理会被行道树、路灯等地面物体遮挡,需要利用图像处理软件将遮挡部分裁剪掉,选择没有遮挡的影像作为建筑物侧墙、门窗和屋顶模型部件的纹理(图 12(a) — (c))。然后,利用 ArcGIS Pro 导入上述模型生成的侧墙、门窗和屋顶部件模型,利用其 MultiPatch 纹理编辑功能为侧墙、门窗和屋顶赋予相应的纹理影像,其可视化效果如图 12(d) 所示。

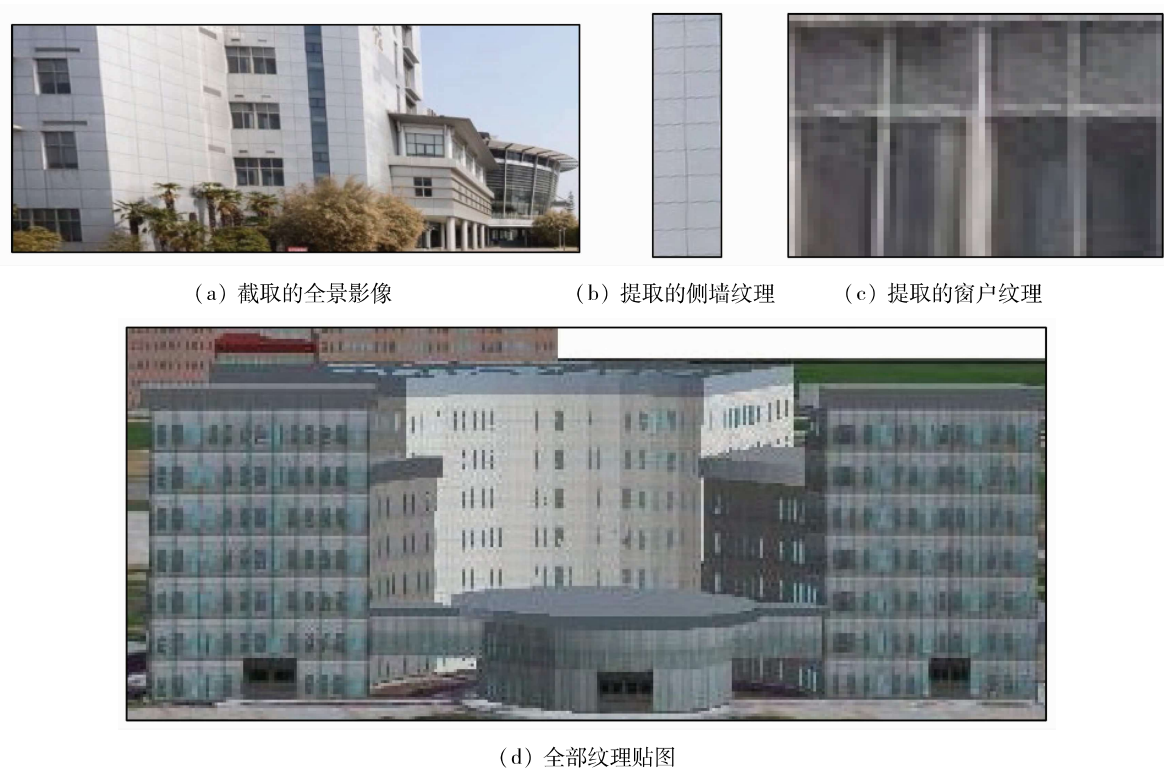


图 12 模型纹理贴图效果

Fig. 12 Effects of texture mapping on the 3D building models

3 建模工具箱的设计与建模实例分析

3.1 建模工具箱的设计

为便于用户操作、开发和功能扩展,采用 Arc-toolBox 设计建模工具箱实现建筑物三维模型的自动构建,构建的工具箱由数据预处理、三维建模、模型细化、模型导出和脚本工具 5 个工具集组成。其中,数据预处理工具集由窗户和窗框多边形提取、建筑物边界多边形概化、建筑物边界多边形提取和建筑物层数提取 4 个模型工具组成;三维建模工具集由清理中间文件、生成侧墙、生成侧墙窗户、生成侧墙窗框、生成侧墙门、生成屋顶和生成屋顶窗户 7 个模型工具集组成;模型细化工具集主要由侧墙细化和屋顶细化 2 个模型工具组成;模型导出工具集主要由模型导出一个模型工具组成,这些模型工具集依次执行实现建筑物三维模型的自动构建。

3.2 建模实例分析

为验证本文所提建模方法的有效性、可靠性可操作性和运行效能,选择淮阴师范学院北校区为建模实验区,如图 13 所示。以高分辨率卫星影像、建筑物轮廓电子地图和全景影像为建模数据源,在 ENVI 和 ArcGIS 平台下,通过数据集成和预处

理,提取出建筑物的几何边界、高度、楼层数和屋顶特征等信息;利用 ModelBuilder 可视化建模工具,通过调用数据处理、文件转换、空间分析和脚本工具,构建模型实现了建筑物三维模型的自动构建;同时,利用 ArcGIS Pro 导入构建的模型并对模型进行纹理贴图,从而实现模型的可视化,结果如图 14 所示。



图 13 建模实验区概况图

Fig. 13 Overview map of the modeling experiment area



图 14 建筑物屋顶模型自动创建及其生成结果

Fig. 14 Visualization of the constructed building models

同时,为测试本文建模方法的可操作性和性能,在联想 B590 笔记本和 WIN7 操作系统平台下,与传统 SketchUp 手工建模方法进行了拉伸建模对比实验,其结果如表 6 所示。

表 6 建筑物建模实验对比统计和分析

Tab. 6 Experimental modeling 3D buildings by comparative statistics and analysis

建模方法	建筑物多边形			建模对象
	数量/个	操作数/次	消耗时间	
ModelBuilder 建模	130	3	7.5 h	侧墙、门窗和屋顶
SketchUp 手工建模	130	36 614	14 d	侧墙、门窗和屋顶

需要说明的是,采用 ModelBuilder 建模只需要 3 次人机交互,便可批量生成整个实验区侧墙、门窗和屋顶的三维模型;而采用传统 SketchUp 手工建模方法,需要的人机交互的次数,不仅与建筑物多边形数量、楼层数和门窗的数量等因素密切相关,而且与每个工具操作的时间和用户熟练程度等因素密切相关,本文将它们进行简单的相乘可得出最小的人机交互次数,利用教学实践且在老师的指导和监督下,学生最少需要 14 d 才能完成模型的构建,无论是在时间成本和操作效率上,本文建模方法都具有明显的优势。

4 结论

近些年来,建筑物三维建模一直是国内外研究的热点,已提出多种建模方法,并进行了大量可视化实践。本文提出基于多源数据集成的建筑物三维建模方法,集成高分辨遥感影像、无人机航空影像、建

筑物电子地图和全景影像为数据源,借助 GIS 建模功能,实现多源建模数据的自动预处理和三维建模,同时借助理映射技术实现模型的可视化,与现有建模方法相比具有以下优势:

1) 以遥感影像、建筑物轮廓电子地图和网络全景影像等海量多源数据为建模数据源,不仅能够提取城市范围内建筑物的宏观边界,而且能够捕捉到建筑物的几何细节和纹理细节特征。借助 GIS 建模功能,通过构建模型实现建筑物侧墙、屋顶结构部件的空间信息和属性信息,对于提高建模的准确性和模型精度有显著提升,可显著提高建模自动预处理效率,为实现建筑物的精细化建模奠定基础。

2) 基于 CSG 的建筑物三维建模方案是切实可行的,借助 GIS 建模功能,建筑物三维模型的自动构建,能够显著降低作业人员的劳动强度并提高建模效率。模型创建过程中产生的中间文件和建模结果、模型和脚本程序代码在模型构建中十分易于修改和重复使用,可灵活地对建模参数和过程进行调整,为建模过程的监控并对建模结果进行检查和核对提供了重要的依据。

3) 除模型可视化阶段涉及的纹理贴图需要借助专业图像处理软件制作外,与建模相关的数据预处理、建模和模型细化相关操作都在同一种 GIS 平台下完成,更加符合熟悉 GIS 用户的操作习惯,显著提高了建模的可操作性、实用性和操作效率;创建的模型可输出为各种格式的三维模型文件,更便于建模成果的传播、交流和共享。

本文提出多源数据集成的城市建筑物三维建模方法,并进行建模工具箱的设计、开发和建模实例分

析,其目的在于探索城市大规模建筑物程序自动建模的原理、方法、算法和软件开发架构,是对现有典型 GIS 系统的功能、性能和稳定性的一次有效验证,为开发具有自主知识产权的建筑物三维建模与可视化软件产品奠定技术基础。借助 GIS 建模功能,通过数据预处理、三维建模和模型细化 3 个模型对校园范围内形态相对规则的建筑物进行了批量建模测试,取得了良好的建模性能与可视化效果,对城市大规模城市建筑群建模与可视化同样有借鉴意义。如何将上述模型进行整合、优化模型性能以提高其作业效率,将是未来研究工作的重点。

参考文献 (References):

- [1] 刘晓艳,林 晖,张 宏. 虚拟城市建设原理与方法[M]. 北京: 科学出版社,2003.
Liu X Y, Lin H, Zhang H. Principles and methods of virtual city construction[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [2] 万 刚,陈 刚,游 雄. 虚拟城市中地物几何建模技术的研究[J]. 测绘学报,2002,31(1):60-65.
Wan G, Chen G, You X. Research on geometry modeling of terrain features in virtual city[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(1): 60-65.
- [3] 毛 健,苏 笛. 地理场景三维可视化系统的关键问题研究[J]. 城市勘测,2012(4):9-11.
Mao J, Su D. Key issues of the geographical scene visualization system[J]. Urban Geotechnical Investigation and Surveying, 2012(4): 9-11.
- [4] 周国清,黄 煜,岳 涛,等. 基于纹理数据和 SCSC-BR 表示的城市建筑物混合建模[J]. 地球信息科学学报,2018,20(4):543-551.
Zhou G Q, Huang Y, Yue T, et al. Hybrid modeling for urban buildings based on textures and SCSC-BRs representation[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(4): 543-551.
- [5] 缪永伟,汪 逊,陈佳舟,等. 基于单幅图像成像一致性的组合式建筑交互建模[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2018,30(11):2001-2010.
Miao Y W, Wang X, Chen J Z, et al. Single image based interactive modeling for modular architectures using imaging consistency[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2018, 30(11): 2001-2010.
- [6] 朱曙光,何 宽,周建郑. 徕卡三维激光扫描系统在建筑物精细建模中的应用[J]. 测绘通报,2018(2):154-156.
Zhu S G, He K, Zhou J Z. Research on the application of Leica 3D laser scanning system in the fine modeling of buildings[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(2): 154-156.
- [7] 任 诚,高利敏,冯耀楼,等. 基于无人机倾斜摄影的建筑物三维建模尝试[J]. 测绘通报,2019(2):161-164.
Ren C, Gao L M, Feng Y L, et al. An attempt of building 3D modeling based on UAV tilt photography[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(2): 161-164.
- [8] 朱庆伟,马宇佼. 基于三维激光扫描仪的建筑物建模应用研究[J]. 地理与地理信息科学,2014,30(6):31-35.
Zhu Q W, Ma Y J. Application and research of building modeling based on 3D laser scanner[J]. Geography and Geo-Information Science, 2014, 30(6): 31-35.
- [9] 李乐林,江万寿. 基于等高线簇分析的 LiDAR 点云建筑物模型自动识别及重建[J]. 测绘通报,2013(10):23-25,29.
Li L L, Jiang W S. Automatic recognition and reconstruction of building roof models with LiDAR cloud points based on contours clustering[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(10): 23-25, 29.
- [10] 何原荣,郑渊茂,潘火平,等. 基于点云数据的复杂建筑体真三维建模与应用[J]. 遥感技术与应用,2016,31(6):1091-1099.
He Y R, Zheng Y M, Pan H P, et al. Real three-dimensional modeling and application of complex construction based on the point cloud data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(6): 1091-1099.
- [11] 王田磊,袁进军,王建锋. 三维激光扫描技术在建筑物三维建模可视化中的应用[J]. 测绘通报,2012(9):44-47.
Wang T L, Yuan J J, Wang J F. The application of TLS technology in the 3D visualization modeling[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(9): 44-47.
- [12] 史文中,曹 辉,张剑清. 基于高分辨率影像的城市三维建模[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004,29(9):783-786.
Shi W Z, Cao H, Zhang J Q. 3D urban building modeling based on high resolution satellite images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(9): 783-786.
- [13] 杨 玲,张剑清. 基于模型的航空影像矩形建筑物半自动建模[J]. 计算机工程与应用,2008,44(33):10-12.
Yang L, Zhang J Q. Model-based semi-automated building reconstruction from aerial images[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(33): 10-12.
- [14] 王建强,钟春惺,江丽钧,等. 基于多视航空影像的城市三维建模方法[J]. 测绘科学,2014,39(3):70-74.
Wang J Q, Zhong C X, Jiang L J, et al. 3D city modeling construction based on multi-view aerial images[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(3): 70-74.
- [15] 杨 玲. 基于广义点摄影测量的建筑物三维建模[J]. 测绘科学,2014,39(4):83-87.
Yang L. Buildings reconstruction based on generalized point photogrammetry[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(4): 83-87.
- [16] 隋铭明,魏雅男,程 思,等. 基于跨平面单像量测的建筑物三维建模方法[J]. 地理与地理信息科学,2013,29(6):6-9.
Sui M M, Wei Y N, Cheng S, et al. A method of establishing 3D model of buildings based on single image measurement across multiple planes[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(6): 6-9.
- [17] 薛 梅. 一种基于形状方法的建筑物三维建模新方法[J]. 地理与地理信息科学,2012,28(6):31-34.
Xue M. A shape grammar based method for 3D building modeling[J]. Geography and Geo-Information Science, 2012, 28(6): 31-34.
- [18] 艾海滨,董友强,王庆栋,等. 基于语义的倾斜影像单体建模技术研究[J]. 测绘科学,2019,44(6):151-158.
Ai H B, Dong Y Q, Wang Q D, et al. Study of semantic modeling

- framework – based method for 3D building reconstruction using oblique aerial images[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(6): 151 – 158.
- [19] 程亮, 龚健雅, 李满春, 等. 集成多视航空影像与 LiDAR 数据重建 3 维建筑物模型[J]. *测绘学报*, 2009, 38(6): 494 – 501.
Cheng L, Gong J Y, Li M C, et al. 3D building model reconstruction from multi – view aerial images and LiDAR data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(6): 494 – 501.
- [20] 张晖, 刘超, 李妍, 等. 基于 CityEngine 的建筑物三维建模技术研究[J]. *测绘通报*, 2014(11): 108 – 112.
Zhang H, Liu C, Li Y, et al. Research on 3D building modeling technology based on CityEngine[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(11): 108 – 112.
- [21] 路春燕, 卫海燕, 李吉英. IMAGIS 在城市三维建模中的应用——以滨州市会展中心为例[J]. *测绘科学*, 2011, 36(6): 270 – 272.
Lu C Y, Wei H Y, Li J Y. IMAGIS application in city three – dimensional modeling: Taking Binzhou convention and exhibition center as the example[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(6): 270 – 272.
- [22] 程朋根, 李志荣, 聂运菊. 城中村批量快速三维建模方法研究及实现[J]. *测绘科学*, 2019, 44(4): 48 – 54.
Cheng P G, Li Z R, Nie Y J. Research and implementation of batch rapid 3D modeling method for urban village[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(4): 48 – 54.
- [23] 许捍卫, 范小虎, 任家勇, 等. 基于 SketchUp 和 ArcGIS 的城市三维可视化研究[J]. *测绘通报*, 2010(3): 52 – 54.
Xu H W, Fan X H, Ren J Y, et al. Research on 3D visualization of digital city based on SketchUp and ArcGIS[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2010(3): 52 – 54.
- [24] 许捍卫, 房晓亮, 任家勇, 等. 基于 SketchUp 的城市三维建模技术[J]. *测绘科学*, 2011, 36(1): 213 – 214, 189.
Xu H W, Fang X L, Ren J Y, et al. 3D modeling technique of digital city based on SketchUp[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(1): 213 – 214, 189.
- [25] 詹总谦, 李一挥, 桂鑫源. 倾斜摄影测量与 SketchUp 二次开发技术相结合的建筑物三维重建[J]. *测绘通报*, 2017(5): 71 – 74.
Zhan Z Q, Li Y H, Gui X Y. Building reconstruction based on oblique photogrammetry and SketchUp secondary development[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(5): 71 – 74.
- [26] 任诚, 高利敏, 冯耀楼, 等. 基于无人机倾斜摄影的建筑物三维建模尝试[J]. *测绘通报*, 2019(2): 161 – 164.
Ren C, Gao L M, Feng Y L, et al. An attempt of building 3D modeling based on UAV tilt photography[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(2): 161 – 164.
- [27] 余忠迪, 李辉, 巴芳, 等. 基于消费者级无人机的城市三维建模[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(2): 67 – 72. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2008. 02. 09.
Yu Z D, Li H, Ba F, et al. 3D city model construction based on a consumer – grade UAV[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, 30(2): 67 – 72. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2008. 02. 09.
- [28] 汪雅, 曾志. 一种近景倾斜摄影的三维建模盲区自动修复技术[J]. *国土资源遥感*, 2021, 33(1): 72 – 77. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2020172.
Wang Y, Zeng Z. An automatic repairing technology of 3D model for blind area in oblique photography based on close range image[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2021, 33(1): 72 – 77. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2020172.
- [29] 张军海, 李仁杰, 傅学庆, 等. 地理信息系统原理与实践(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Zhang J H, Li R J, Fu X Q, et al. Principles and practices of geographic information system(2nd edition)[M]. Beijing: Sciences Press, 2015.
- [30] 王树臻, 郑国强, 王光生, 等. 多源点云数据融合的建筑物精细化建模[J]. *测绘通报*, 2020(8): 28 – 32, 38.
Wang S Z, Zheng G Q, Wang G S, et al. Building fine modeling based on multi – source point cloud data fusion[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(8): 28 – 32, 38.
- [31] 孙松梅, 黄天进, 孙颖. 城市高精度实景三维单体模型建设及应用[J]. *测绘通报*, 2021(1): 108 – 111.
Sun S M, Huang T J, Sun Y. Construction and application of high – precision three – dimensional monomerization model for urban scenes[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(1): 108 – 111.

A method for 3D modeling of urban buildings based on multi – source data integration

SONG Renbo¹, ZHU Yuxin², GUO Renjie², ZHAO Pengfei², ZHAO Kexin², ZHU Jie², CHEN Ying²

(1. School of Atmospheric and Remote Sensing, Wuxi University, Wuxi 214105, China; 2. School of Urban and Environmental Science, Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China)

Abstract: Buildings are important urban components because they serve as the carrier and represent the image of a city. Establishing the 3D models of buildings is a critical base for constructing digital, virtual, and smart cities. However, existing 3D modeling methods of buildings suffer the shortcomings such as high cost, tedious and complex operations, and high labor intensity. Given this, this study proposed a method for 3D modeling of urban buildings based on multi – source data integration. Meanwhile, this study achieved the automatic construction of the 3D models of buildings using the GIS modeling technology. The main principles and operations of the modeling method

are as follows. First, high – resolution satellite remote sensing images, electronic maps of building contours, and panoramic images were integrated and preprocessed on a remote sensing and GIS integration platform to extract buildings' spatial and attribute information such as geometric boundaries, height, floor number, and roof type. Next, this study proposed a scheme for modeling the main structures of buildings based on the constructive solid geometry (CSG) method. Then, the automatic construction of the 3D models of buildings was achieved using the GIS modeling technology, as well as multiple tools in the ArcToolBox window, such as combined data processing, file conversion, spatial analysis, 3D analysis, and scripts and programs. Afterward, the 3D models of buildings were visualized using the texture mapping technology. Finally, the north campus of Huaiyin Normal University was selected to verify the modeling method proposed in this study. As indicated by the analysis of modeling process and visualization effects, the modeling method proposed in this study is characterized by low cost, simple operations, and high automatic degree and can meet the high requirements of accuracy. Meanwhile, this method has great visualization effects and can provide reliable technical solutions for the 3D modeling and visualization of large – scale urban buildings.

Keywords: urban buildings; 3D modeling; multi – source data integration; remote sensing image; electronic map; panoramic image; GIS modeling

(责任编辑: 李 瑜)