

谢江涛¹ 孙政^{1,2*} 华鑫¹ 苏子悦¹ 戎圣修¹

1. 南京工业大学建筑学院, 15195818667@163.com

2. 城市与建筑遗产保护教育部重点实验室(东南大学)

Xie Jiangtao¹ Sun Zheng^{1,2} Hua Xin¹ Su Ziyue¹ Rong Shengxiu¹

1. School of Architecture, Nanjing Tech University

2. Key laboratory of Urban and Architectural Heritage Conservation (Southeast University)

受城市与建筑遗产保护教育部重点实验室(东南大学)开放课题(KUAL1608)资助

本文为江苏省大学生创新创业训练计划指导项目成果(201710291129X)

参数化工具在建筑遗产低空摄影测量成果分析中的应用

The applications of parametric tools in analysis of low-altitude photogrammetry for architectural heritage

摘要:近年来,在建筑遗产测绘中,消费级无人机与摄影测量软件的结合提供了一种低成本、低空域的遥感方法,成果为三维模型(点云模型和网格面模型)和二维栅格图像(彩色正射图、数字高程模型等)等。这些成果在几何准确性和色彩丰富性上超过了传统的手工测量,而且提供了地面激光扫描无法获得的空中视角。然而,如何处理上述成果,使其满足建筑遗产测绘的需求是一个亟待解决的问题,难点在于格式和海量数据的筛选。本文结合南京明孝陵、江孜白居寺等测绘实例,对 Grasshopper 在点云模型区分、视线分析、雨水流向模拟等方面的应用进行了尝试。结论是参数化工具在建筑遗产低空摄影测量成果的分析中提供了一种有效结合二维与三维、精度与变量、测绘与设计的方法,非常适合建筑学背景的研究者。

关键词: 参数化工具; 无人机; 摄影测量; 建筑遗产; 点云

Abstract:

In recent years, the combination of consumer-level UAV and photogrammetry has provided a low cost and low altitude remote sensing method. The forms of its achievement include 3D model (point clouds and mesh) and 2D raster imagery (RGB ortho-image and digital elevation model), which surpasses traditional manual measurements in geometric accuracy and chromatic richness, as well as provides an aerial view beyond the range of terrestrial laser scanning. However, data processing of the above-mentioned achievements for architectural heritage surveying is still a difficult issue. The main technological challenge is segmentation of unstructured raw data. The paper studies the applications of Grasshopper in segmenting point clouds, view shed analysis and rainwater flow simulation based on the case studies of Ming Xiaoling, Baijusi, etc.. The conclusion is that the parametric tools provide a method that effectively combines 2D-3D, accuracy-parametric relationships, and surveying-designing. It is a suitable tool for researchers with architecture background.

Keywords: Parametric tools; Unmanned aerial Vehicle (UAV); Photogrammetry; Architectural Heritage; Point clouds

1 背景

近年来,随着消费级无人机的普及和自动化摄影测量算法的出现,低空摄影测量的技术门槛越来越低,为

建筑遗产——特别是大尺度建筑遗产——测绘带来了新的契机。

亟待解决的问题是,如何将低空摄影测量的成果用于建筑遗产测绘。问题的症结在于,虽然点云模型可以达到极高的精度和分辨率,但是目前常用的绘图和建模软件(如 AutoCAD, SketchUp)并不具备处理海量数据的能力,导致很多情况下三维点云模型的降维使用(描图和切片);而逆向建模软件(如 Geomagic)一方面价格昂贵,另一方面对点云模型的精细程度有较高的要求,因此用于建筑遗产测绘的可行性较低。

本文采用参数化工具 Grasshopper 作为低空摄影测量成果转化的平台,旨在通过简便易行的编程创建处理与分析点云模型的工作流程,如语义区分、视域分析、雨水流向模拟等。通过西藏、南京等地的实际案例,说明低空摄影测量与参数化工具的结合可以提供一种低成本、高精度、高灵活性的建筑遗产从数据采集到数据模拟的工作流程。

1.1 建筑遗产低空摄影测量

目前,利用消费级无人机采集的图像和摄影测量软件(如 PhotoScan, Pix4D)生成建筑遗产三维点云模型的技术流程已经能比较成熟^[1]与地面控制点结合,其精度可以达到 1/2500,足以满足大多数建筑遗产测绘的需求^[2]。地面激光扫描,低空摄影测量的优点是成本低、覆盖范围广、便携性好、颜色记录能力强。从建筑遗产测绘的角度,低空摄影测量提供了一种介于地面测量和天空遥感之间的中等尺度的测量方法,对于村镇、建筑群,以及可达性较差的建筑遗产具有广阔的应用前景。

1.2 低空摄影测量成果的转化

与激光测距仪、全站仪、GPS 等测量设备直接得到数据不同,摄影测量属于间接测量技术——对测量对象及其周边环境做无差别记录。低空摄影测量的成果包括二维图像(正摄图、数字高程模型)和三维模型(点云模型、网格面模型),其中点云模型是获取建筑三维几何数据的关键。点云模型由海量的点构成,每个点由空间坐标(X,Y,Z)和颜色(R,G,B)6个数值定义。

目前,点云模型在我国建筑遗产测绘中常见的使用方法是导出图片和截面用于在 AutoCAD 中进行描图。这一方法的缺点是把测量环节得到的三维数据在绘图中仅做二维表达。近年来国际上建筑遗产数字化记录与分析领域的研究热点是把点云模型转化为 BIM 模型,特别是从包含建筑遗产残损、病害等非理想状态的高精度点云模型生成基于现状的 BIM 模型(As-built BIM)^{[3][4]}。但是,由于 BIM 并不是针对建筑遗产的软件,逆向建模的能力非常有限,这一技术流程目前存在很多困难,其中之一是高度依赖商业软件,使用者自定义的可能性很低。

1.3 参数化工具对于摄影测量成果的拓展应用

参数化工具开辟了一个新的处理低空摄影测量成果的途径。以 Grasshopper 为例,作为 Rhino 的插件,建筑学背景的使用者可以快速掌握可视化编程的方法,较低的拓展门槛和层出不穷的插件可以不断带来新的可能。比如,最近 Volvox^[5], Tarsier 等插件的问世提供了衔接 Grasshopper 强大的运算能力和点云模型的精确性之间的桥梁,而 Ladybug, Honeybee 等插件可以进而对点云模型、网格面模型进行太阳辐射分析、雨洪分析、视域分析等模拟^[6]。

2 方法

采用参数化工具处理和分析点云模型和网格面模型的方法可以分为两种:

1) 语义区分。原始的点云模型不包含任何语义信息,即使用者无法根据实际逻辑(如构件、楼层、建造顺序)对其进行筛选;对于动辄包含几百万个点的点云模型,语义区分不仅可以节省计算机存储空间和运算时间,还是对接后续应用(如 BIM 建模)的前提。目前,手工区分的方法费时费力,而商业软件(如 Scan to BIM, Kubit VirtuSurv)和新出现的算法^{[7][8]}大都针对较为简单的建筑形体,还没有适用于建筑遗产不规则、复杂形状并兼顾自动化和精度的算法。基于参数化工具的语义区分把对象分解为几何元素的集合,在此层面根据自定义的条件进行筛选。比如,一个点云模型可以分解为三个集合:坐标、法线、颜色,可以根据颜色区分植被和建筑,也可以通过迭代的寻找特定距离内的相邻点(region growing)筛选出墙面、地面等。

2) 分析与模拟。相比手工建立的体块模型,低空摄影测量的成果更加精确,更能准确反映建筑遗产的现状。通过编写脚本,可以将点云模型和网格面模型纳入运算关系中,进行坡度、坡向、视域等一系列分析。随着新算法(以 Grasshopper 插件的形式)的不断涌现,许多算法以模块的形式嵌入,使用者只需要将其与自己的模型连接就可以展开许多更为复杂的分析,比如通过 Ladybug 与地理信息和气候数据对接等。虽然 GIS 等软件也可以进行类似的分析与模拟,但采用参数化软件的好处是灵活性强、三维可视化程度好、算法更新迅速,在低空摄影测量成果的分析中非常适合建筑学背景的研究者。

3 应用案例

笔者尝试了从两方面探究摄影测量成果的运用。一、探究点云模型的语义区分以期与 BIM 技术结合，提供数字遗产的数据样本；二、探究摄影测量的成果分析与模拟，为古建筑遗产保护提供依据。

下文将对区分建筑主体，区分建筑构件，以及摄影测量网格模型分析模拟的应用方法结合测绘实例进行介绍。

3.1 语义区分

3.1.1 区分建筑主体：以颜色为区分依据

以颜色为甄别标准的算法适用于区分大尺度点云模型中的色彩反差强烈的要素，如建筑物与植被、屋面与墙体等。计算机图学中采用 RGB (red,blue,green) 颜色空间表达色彩，并用 0 到 255 的区间定义亮度，如 (0, 0, 0) 代表黑色，(255, 255, 255) 代表白色。我们的区分方法是将点云模型中的色彩参数抽离，通过设定阈值选取需要的点：

1) 将点云模型 P_s 分解为仅含颜色信息的集合 C_{RGB} 。

如果点云模型过大，则应首先通过设定点密度进行稀释：

2) 将 C_{RGB} 再分解为三个分别表达红色、绿色、蓝色的集合 C_R, C_G, C_B ：

3) 根据点云模型的情况及筛选目的，设定 C_R, C_G, C_B 各自的阈值：

4) 根据 C_R, C_G, C_B 的交集 $C_{R \cap G \cap B}$ ，从 P_s 过滤出需要的点集 P_{sn} 。

值得注意的是，由于 Grasshopper 是单线程的插件，在上述过程中，可以通过 Ghpython 直接调用 Grasshopper 的函数运算器实现多线程提升运算速度。

2016 年，在南京明孝陵的测绘中，我们用低空摄影测量生成点云模型，作为绘制 CAD 总平面图的参照。但是由于场地较大、植被繁茂，手动把建筑物与道路区分出来费时费力。利用上述算法和植被的绿色特征，我们可以便利的过滤掉点云模型中的植被

($180 < R < 255, 180 < G < 255, 112 < B < 255$) (图 1)，得到建筑物与道路，方便 CAD 绘图。利用同样的方法，还可以自动区分出西藏江孜老城中居民对天井的改建（蓝色彩钢瓦屋面）、南京中山陵建筑群的屋顶（蓝色琉璃瓦）等。

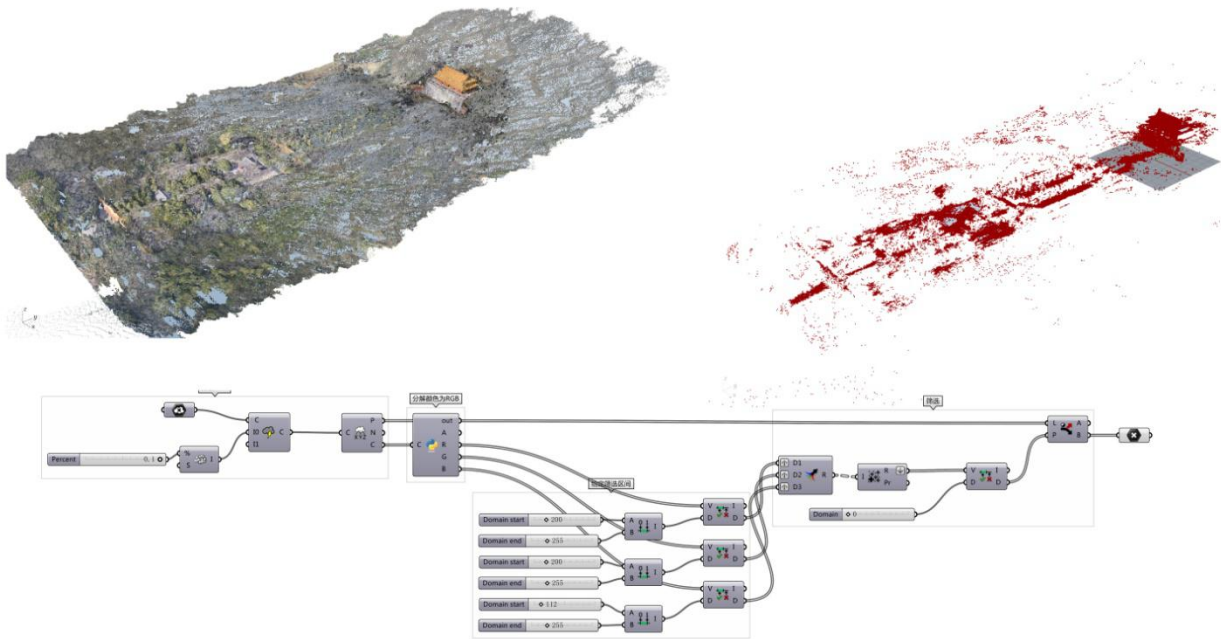


图 1 根据颜色对明孝陵点云模型进行自动区分（上左：原始点云模型；上右：区分出的建筑物和地面；下：Grasshopper 脚本）

3.1.2 区分建筑构件：以楼层为区分依据

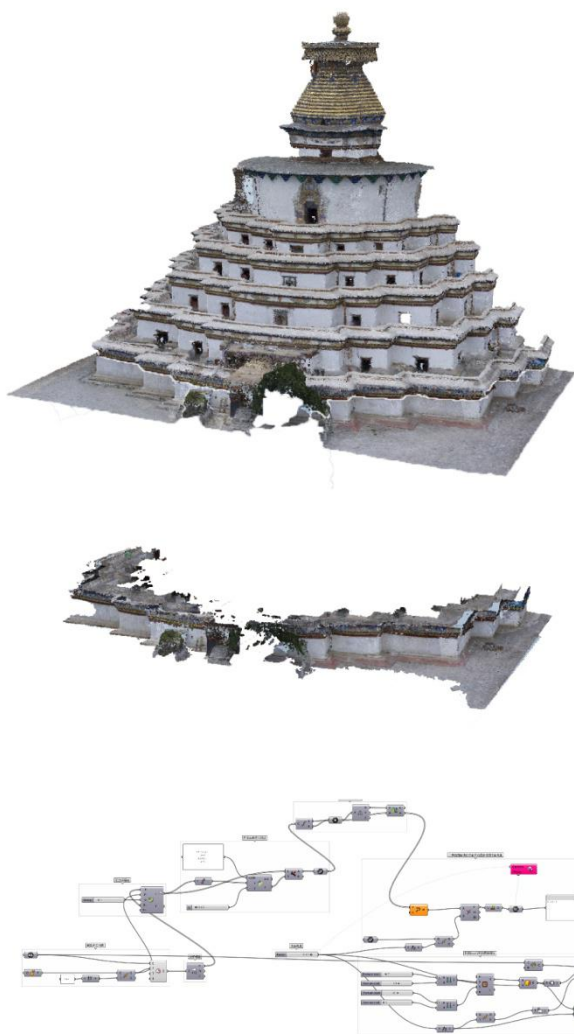


图2 根据楼层对吉祥多门塔点云进行区分（上：原始点云模型；中：区分出的第一层点云模型；下：Grasshopper脚本）

根据楼层区分点云模型的目的是方便下一步CAD绘图和BIM建模，以及基于各个楼层的分析与模拟（如楼板沉降、墙体倾斜等）。我们尝试将二维剖面与三维模型结合使用，利用剖面划分好区域筛选点云（图2）。具体方法如下：

- 1) 在点云中心位置获取xz平面的点云剖面 P_{xz} ；
- 2) 求出点云剖面 P_{xz} 中每个点各自在剖面点云中的最近点，筛除距离小于0.1m的点，避免影响后续操作；
- 3) 将得到的剖面点云 P_{xz} 再次分解，得到含有位置信息的点的集合 P_{sn} ，将点沿着x轴方向重新排序并连成线段S；
- 4) 将xy平面向上移动至与剖面点连线S有交点，最终计算得到的移动距离即为楼层高度H；
- 5) 给移动距离定一个合适的阈值T，且阈值T的

范围应小于两层楼的高度，大于一层楼的高度；

6) 计算出xy平面与剖面线交点最多的情况，即为有女儿墙处；

7) 根据计算得到的楼层高度H创建一个平面足够大的立方体C，分出第一层点云 P_{s1} ；

8) 其余楼层同上。

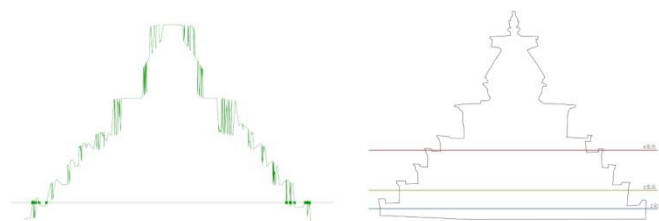


图3 左：点云模型剖面线与水平面交点；右：自绘剖面示意图

吉祥多门塔位于西藏江孜白居寺，每层自下而上收缩，共有108道门，每层间数各不相同，每间的四壁都保存着壁画。在笔者绘制的剖面图（图3）中可以看到在有女儿墙处建筑剖面与直线有6个交点，在塔身处建筑剖面与直线则只有两个交点。利用不同高度处的水平线与建筑剖面线相交后交点数量的不同，可以实现层与层之间的划分。回到点云模型中，对比多层塔身笔者得出同样结论，即女儿墙处点云模型剖面和平面的交点数目多于塔身处。利用这点便可以很好地分开每层建筑。

在得到分层的点云模型之后，笔者发现由于地基不均匀沉降或地形原因，塔身略微倾斜，获得的楼层点云模型存在一定误差，但正是因为这个原因，使用者也可以从点云模型上测算出塔身的倾斜范围，以此为将来的修复工作提供数据支持。

3.2 分析与模拟

3.2.1 视域分析

考古遗址的视域分析（viewshed analysis）历来受到研究者关注，这是因为不同遗址的空间位置很大程度上受到可视性因素的制约，是区分不同社群领地的重要标志^[9]。对于原始风貌尚存、较少受到现代城市环境影响的建筑遗产，视域分析同样适用。此外，它还可以用于评估历史风貌区中新建建筑对既有视线的影响。目前，视域分析主要采用遥感数据结合GIS的方法，这一方法以二维分析为主，适用于大尺度的考古遗址，但三维可视性较差。我们采用基于Grasshopper的脚本，改善其三维可视化，使之适用于建筑尺度的视域分析：

- 1) 在网格面模型M中定义出道路L；
- 2) 提取出在道路L上视点的所在位置V；
- 3) 将V提高到人视高度；
- 4) 在视点V处向外放射视线S；
- 5) 计算出视线S与场地模型M的交点，即为可视点，可视点点集即为可见视域，并以色谱区分视距远近。

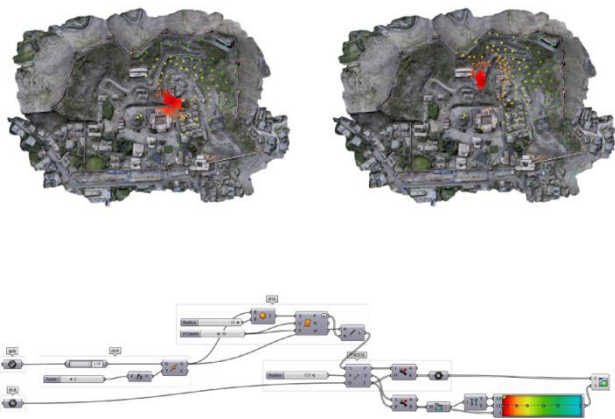


图4 白居寺周边道路视线分析（上：视域分析展示；下：Grasshopper 脚本）

以西藏江孜白居寺为例，可以分析的视域包括：从宗山城堡经加日郊老街沿途观看白居寺的视域（朝圣路线）、白居寺四周围墙及碉楼向外的视域（防卫范围）、沿白居寺内盘山路上山途中俯瞰白居寺的视域（新建道路对既有视线关系的影响）（图4）等。

3.2.2 雨水流向模拟

水文分析（流向、流量、分水岭、汇水点等）对植被生长（风景园林学）和遗址线索（考古学）具有重要意义。目前，水文分析最常用的方法是结合 GIS 方法与数字高程模型（Digital Elevation Model）。由于目前可以免费获取的数字高程模型的分辨率在几十米，这一方法并不适用于建筑尺度。低空摄影测量不仅可以得到分辨率在厘米级别的数字高程模型，还可以直接生成三维模型，这为小尺度、高分辨率的水文分析提供了便利。我们的方式如下：

- 1) 在场地模型 M 上布满随机点 P_n ，可以视为雨水降落点 P_n ；
- 2) 求出各雨水降落点 P_n 处的场地模型 M 的切线方向 F ，即为雨水的流动方向；
- 3) 借助 HoopSnake 插件进行循环，使雨水从降落点 P_n 处开始沿着切线方向 F 移动至最终停止点 P_s ；
- 4) 将雨水经过的位置点，即降落点 P_n 至最终点 P_s 所有点连成线段，即为雨水路径 L 。

通过这一方法，我们不仅可以获得准确而动态的雨水流向模拟（图5），还可以通过改变参数（地形、降雨量等）分析其它变量的影响。比如，新建道路导致的雨水流向的改变是否会对建筑遗产造成危害等等。

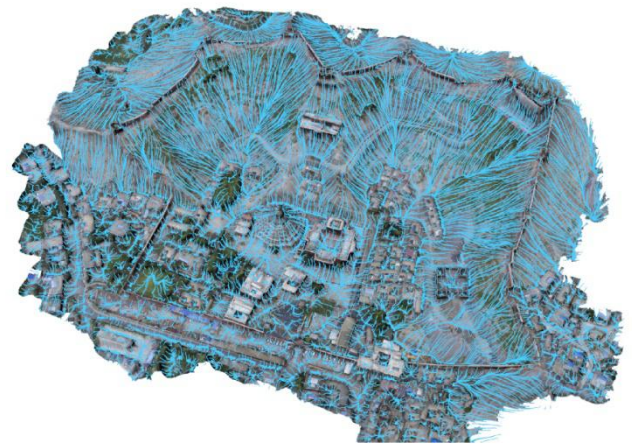


图5 白居寺地区雨水流向分析（上：雨水分析展示；下：Grasshopper 脚本）

4 结论与讨论

本文介绍了采用参数化工具 Grasshopper 对无人机摄影测量的成果——点云模型和网格面模型——进行语义区分、视域分析、雨水流向模拟等的应用案例。可以看出，参数化工具是一种弥合新兴测量技术与传统绘图软件之间的桥梁，它不仅可以通过编程语言对原始测量成果进行灵活的筛选，还可以直接对其展开分析与模拟。

下一步的发展将来自 3 个方面：1) 我们将完善现有的算法，比如把语义区分的算法应用于江孜老城中密集的住宅，用于区分每一栋建筑，从而得到简化的多边形模型（如 SketchUp 模型），用于精度要求不高的三维可视化、虚拟现实、增强现实等用途；2) 结合 Grasshopper 的插件（Ladybug, Honeybee 等）进一步拓展分析与模拟的广度，如太阳辐射模拟等；3) 尝试对低空摄影测量的另一部分成果——栅格图像——进行自动高效的数据处理。

致谢：感谢 Ignacio Lopez Buson 提供视域分析的 Grasshopper 脚本。

参考文献

- [1] Sun Z, Cao Y K. Data processing workflows from low-cost digital survey to various applications: three case studies of Chinese historic architecture[C]. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, 40(5): 409.
- [2] Sun Z, Cao Y K. Applications of Integrated Digital Technologies for Surveying Tibetan Architectural Heritage: Three Years of Experiences[C]. Proceedings of the 22nd CAADRIA Conference (CAADRIA), Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou, China, 2017, pp. 663-672
- [3] Hichri N, Stefani C, De Luca L, et al. Review of the “as-built BIM” approaches[C]. Proceedings of the 3D-ARCH International Conference, 2013.
- [4] Barazzetti L. Parametric as-built model generation of complex shapes from point clouds[J]. Advanced Engineering Informatics, 2016, 30(3): 298-311.
- [5] Zwierzycki M, Evers H L, Tamke M. Parametric Architectural Design with Point-clouds: Volvox[C]. Complexity & Simplicity: Proceedings of the 34th Ecaade Conference - Volume 2, 2016, p. 673-682
- [6] Mary Polites, Ignacio Lopez Buson, Miguel Vidal Calvet, et al. A methodology for defining urban ecoregions using unmanned aerial vehicle(UAV) mapping and computational tools[C]. Proceedings of the 22nd CAADRIA Conference (CAADRIA), Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou, China, 2017, pp. 663-672
- [7] Wang C, Cho Y K, Kim C. Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications[J]. Automation in Construction, 2015. 56(8): 1-13.
- [8] Ochmann S, Vock R, Wessel R, et al. Automatic reconstruction of parametric building models from indoor point clouds[J]. Computers & Graphics, 2016, 54: 94-103.
- [9] 张海. GIS 与考古学空间分析[M]. 北京大学出版社, 2014