

# 一种用于简化测绘调查成果的空间计算方法

## ——原理及 ModelBuilder 实现

刘永康<sup>1</sup>, 王毅<sup>2</sup>✉

**摘要:** 本文介绍了用于将建筑尺度的、且含有建筑属性信息（如层数、建筑质量等）的测绘成果简化处理为建筑群/园区尺度的面区域、以便于中观尺度的特定分析研究的空间计算方法。该方法综合运用了无人机影像三维重建、点云分类、ArcGIS Pro “聚合面”、“要素转点”等工具，在合并相同类型的若干单个建筑元素以形成面域的同时，将新形成的面域内的建筑元素的属性求取中位数赋值给该面域，使得新形成的多边形面域近似保留其空间范围内的原有多个建筑元素的某项属性的信息，从而使得在中观尺度进行空间分析和研究时更加便利。同时，作者使用 ArcGIS Pro 中的 ModelBuilder 实现了这一过程的工具化和自动计算。

**关键词:** 测绘调查成果简化；聚合面；ModelBuilder；城乡调查

**Keywords:** Simplification of Surveying and Mapping Materials; Aggregate Polygons; ModelBuilder; Spatial Survey

## 引言

中观尺度是建成环境研究中的一类重要尺度，它可以被定义为一个建筑群、一个园区，或者一个居住区。然而，常规地籍调查测绘往往是建筑尺度的空间要素，尽管这些类似成果对于基于单体建筑尺度的分析研究很适合，但当从村域或更大的区域进行观察研究时，建筑单体会显得很“零碎”，无法直接用于分析中观城市尺度的问题，这便是本文写作和思考的起点——即能否设计一种空间计算方法，将一定区域内的建筑单体转化为较大的面区域，并将新生成的面域内原有建筑元素的属性赋值转移给这些较大的面区域？下面本文将详细展开讨论。

## 1 研究背景及相关研究

### 1.1 基本介绍

本研究的最终目的是将若干已经分类好的、标有建筑类型属性信息的建筑单体轮廓测绘图转化为面域（建筑群大小的面）以取代原有的建筑单体轮廓，并使得这些新生成的面域近似的包含原有建筑的属性信息，比如，原有的多个相邻的单体建筑为回迁楼，那么新生成的面域便是“回迁居住区”，原有建筑单体为豪宅，新生成的面域便是“高档住区”，同时在新生成的面域元素中记录一个数值来大致反映原有的多个建筑某项特征的整体情况（如建筑质量或高度等），这便是笔者希

---

<sup>1</sup> 刘永康，清华大学建筑学院，博士生，liuyk19@mails.tsinghua.edu.cn。

<sup>2</sup> 王毅(✉)，清华大学建筑学院，教授、博士生导师，wangyi@tsinghua.edu.cn。

望要得到的结果：用一个区域来代替若干单个元素并用新的属性值近似反映原有多个建筑元素的整体属性。在城市尺度上，一个建筑单体的重要性变得微乎其微，而建筑群、庄园，或办公园区能更直观的表达一定区域的建成环境构成。

为了探索空间计算方法，本文以泰山南麓、东麓一带的地理区域作为研究样本，包含 11 个村级行政单元的 5000 多个测绘元素，这些测绘元素被分为豪华房屋、平房、商业楼、一般住宅……等若干类型（后文将详细介绍），这片地理的范围如图 1 所示，它是泰安城和泰山之间的城乡交错带，其建成环境类型丰富多样，因此是理想的研究样本。本文技术路线如图 2 所示，包括空间数据库构建、空间计算等内容，后文第 2 节、第 3 节将展开介绍。

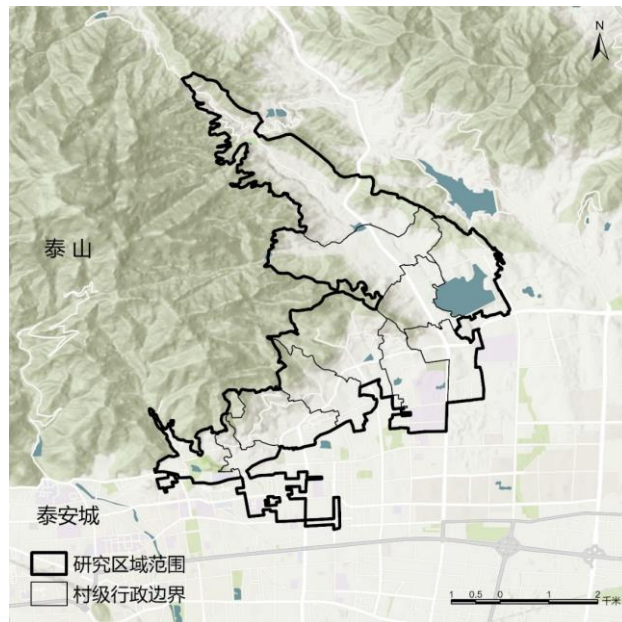


图 1 研究样本的空间范围——泰山南麓及东麓的部分区域

（图片来源：村级行政边界参考泰安市自然资源和规划局、山东省统计局的村级行政边界资料，后文将简述为“政府相关部门的数据资料”或不再赘述；底图使用由 ArcGIS Online 提供关联的多源数据地图，其潜在数据来源包括 Esri、NASA、METI、USGS、OpenStreetMap、NGA、Intermap、TomTom、Garmin、Foursquare 等多个企业或机构，作者在 ArcGIS Online 中对地图的显示格式进行自定义修改后使用 ArcGIS Pro 加载）

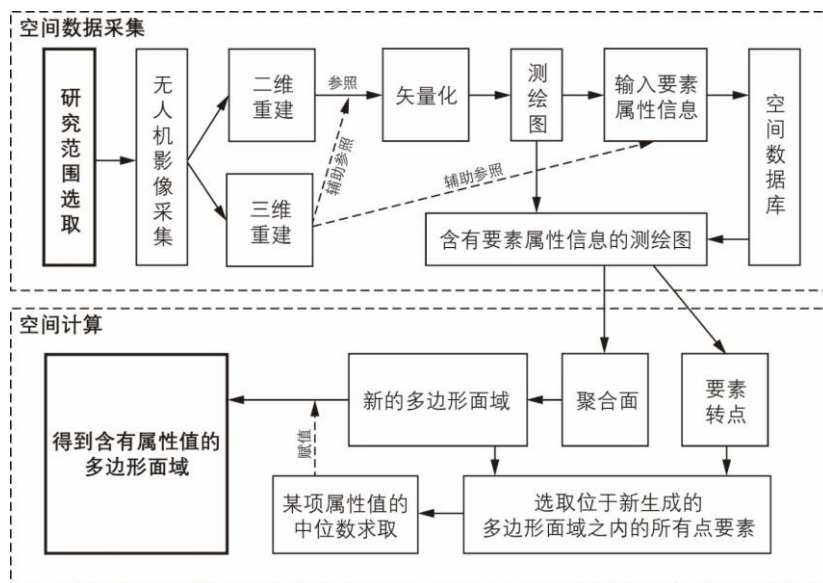


图 2 本文技术路线（作者自绘）

## 1.2 相关研究

在与单体要素的聚合和使用多边形面域进行空间要素统计相关方法的研究中，已具有一定的研究成果，如 Zhou Xiaofang 等学者对多边形合并的不同算法的性能进行了比较[1]。斯特凡·芬克 (Stefan Funke) 和萨宾·斯托兰特 (Sabine Storandt) 提出的计算方法可以有效地为每个缩放级别生成简洁的多边形来表达建成区[2]。克诺尔 (E.M. Knorr) 和雷蒙德·吴 (R.T. Ng) 通过开发特定的算法，使得能够根据点集群找到最接近集群中大多数点的多边形要素[3]。Shen Yilang 提出一种基于“超像素分割”的多边形聚合方法，生成比 ArcGIS 更加平滑的边界[4]。有的学者注重技术方法与特定研究的结合，比如纳尔逊 (T. Nelson) 等人[5]通过将单棵树聚合到多边形中用于森林的统计管理，将森林按区域进行年轻森林、成熟森林和年老森林的划分。Chiaki Mizutani 基于对“面事件”和“面状态”的思考，以筑波科学城为例分析土地利用转型过程[6]。其他研究包括 Zhai Renjian、袁策、史佳顺、郭庆胜等学者[7, 8, 9, 10]提出的对于建筑物轮廓简化问题的处理方法，以及巴里·克罗嫩菲尔德 (B. J. Kronenfeld) 等学者提出的用于简化区域多边形折线的方法[11]和伊萨姆·贾瓦内 (Isam Mashhour Al Jawarneh) 等学者开发的对地理空间大数据进行高效查询的方法[12]。

从文献综述看出，对于测绘要素合并简化已有较多研究，但对于将原有测绘要素属性信息向简化后的多边形要素的转移和赋值的实现，相关研究还较少，同时，考虑到不同研究涉及的数据资源基础、地理空间特征、应用领域等诸多方面的差异性，相关研究探索仍有待进一步推进和丰富。

## 2 基础测绘成果准备

### 2.1 无人机影像采集及二维、三维重建

在基础测绘成果准备环节中，首先需要使用无人机外业作业进行影像采集<sup>1)</sup>，然后使用“大疆智图”软件进行二维和三维重建得到 11 个村庄的二维影像和三维模型 (图 3)，其中三维重建成果包含三维模型 (OSGB 格式) 和点云 (LAS 格式)。通过放大模型观察可以看出 (图 4)，研究区域含有至少 17 种建成环境类型，包括“豪华房屋”、“公园”、“回迁楼/经济适用房” (描述单体时采用“回迁楼/经济适用房”，描述整体区域时采用“回迁居住区/经济型居住区”，后文类似情形不再赘述)、“较高品质的商品房或公寓”<sup>2)</sup>、“长屋”<sup>3)</sup>、“一般公共建筑”、“景观建筑”、“庄园”、“商业楼”、“平房”、“遗产”、“办公园区/校园”、“乡村简易别墅”<sup>4)</sup>、“院落 (疏松型排布)”<sup>5)</sup>、“院落 (紧凑型排布)”<sup>6)</sup>、“休闲帐篷”<sup>7)</sup>、“一般住宅”<sup>8)</sup>等。



图 3 作为研究样本的 11 个村级单元三维模型 (图片来源: 作者使用无人机采集影像并使用“大疆智图”进行三维重建; 11 个模型为各自独立的透视图, 不能代表村与村之间精确的比例大小关系)



图 4 研究区域所包含的典型建成环境类型

(图片来源: 作者使用无人机进行影像采集并使用“大疆智图”进行三维重建得到的成果模型的局部放大图)

## 2.2 无人机测绘成果的矢量化及空间数据库构建

无人机测绘成果的矢量化过程大部分基于人工绘制——参照三维模型的同时, 在经过二维重建的影像图上进行建筑(或其他建成环境要素)轮廓绘制<sup>9)</sup>, 少部分(多层住宅楼<sup>10)</sup>)使用 RandLA-NET 深度学习架构[13]训练自定义的点云分类模型识别诸如多层住宅楼的形体较为单纯的建筑物(图 5)[14], 并使用 ArcGIS Pro 中的“从点云中提取对象”转化为 2D 建筑轮廓。在得到的建筑轮廓测绘图的基础上, 进而在 ArcGIS Pro 属性表中为每个空间测绘要素输入属性信息(包含四类属性: 建筑类型<sup>11)</sup>、建筑质量<sup>12)</sup>、建筑层数<sup>13)</sup>, 以及是否由点云分类自动识别获得), 最终得到含有属性信息的平面测绘图(图 6)。可以看出, 在这个超过 20 平方公里的区域范围内, 单个建筑元素由于太微观, 无法清晰辨别, 对于这类显示尺度上的建成环境空间构成的研究, 建筑单体尺度显然不是合适的尺度, 因此, 作者希望合并同类建筑元素, 代之以更大的面域, 以使得这一区域建成环境的可视化表达更加清晰明确。

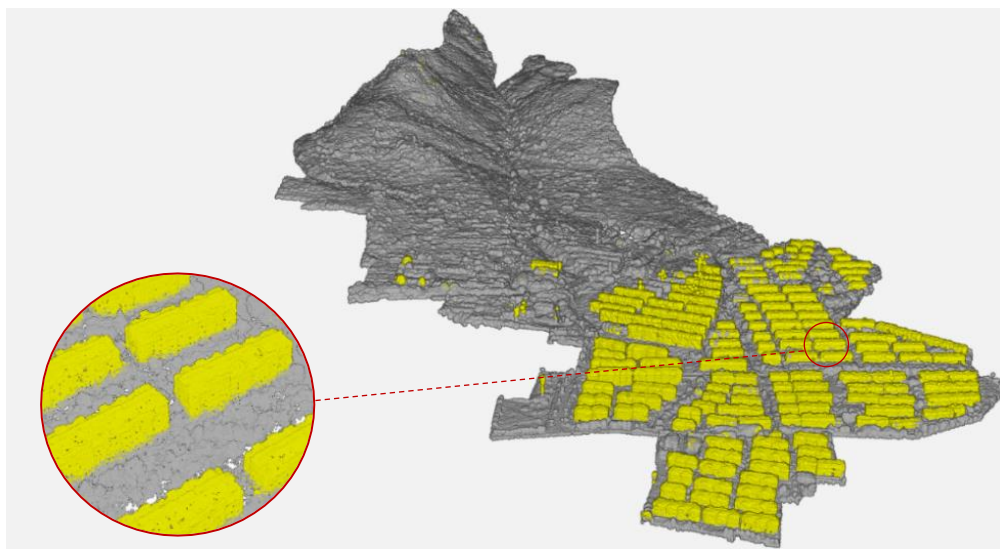


图 5 使用 RandLA-NET 深度学习架构进行自定义的点云分类模型训练以识别多层住宅楼(黄色部分)[14]

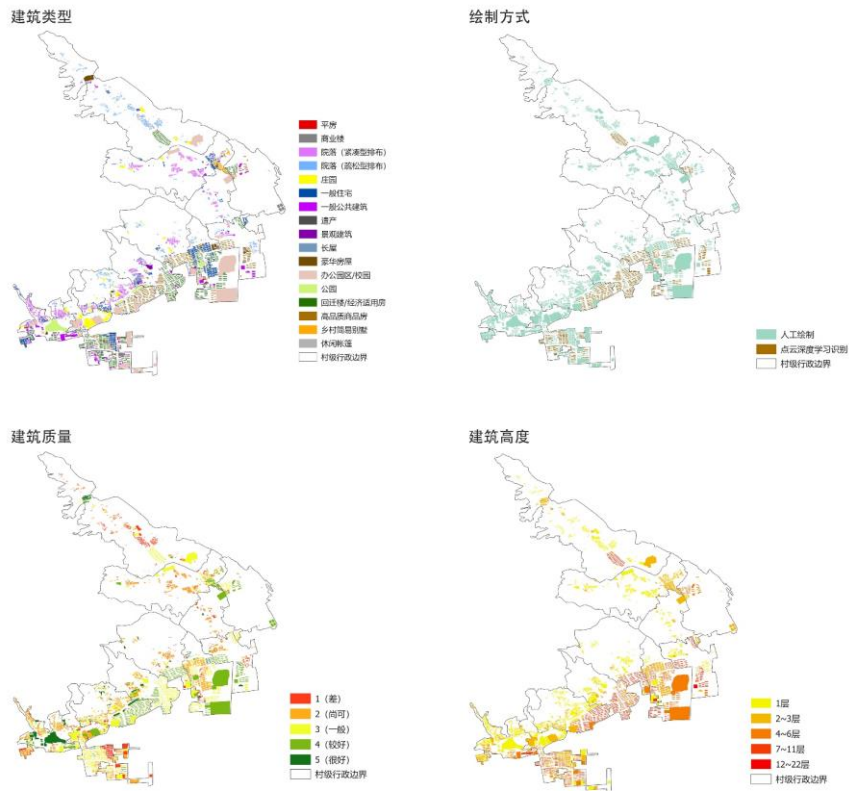


图6 基础测绘成果的可视化，左上、右上、左下、右下分别为建成环境要素类型统计、绘制方式（手动绘制或基于点云深度学习分类的自动绘制）、建筑质量统计、建筑高度统计  
（图片来源：测绘成果为作者自绘，村级行政边界来源于政府相关部门的数据资料）

### 3 空间计算方法

#### 3.1 技术步骤

为实现从建筑单体要素（图7左图）向较大的面区域要素转化的过程，需要使用 ArcGIS Pro “聚合面” [15]（图7中图），该功能能将数千个统计调查元素转为一个个建筑群尺度的多边形区域，与此同时需要使用 ArcGIS Pro “要素转点” [16]功能将原有的建筑单体测绘要素转化为一个个点要素（图7右图）。

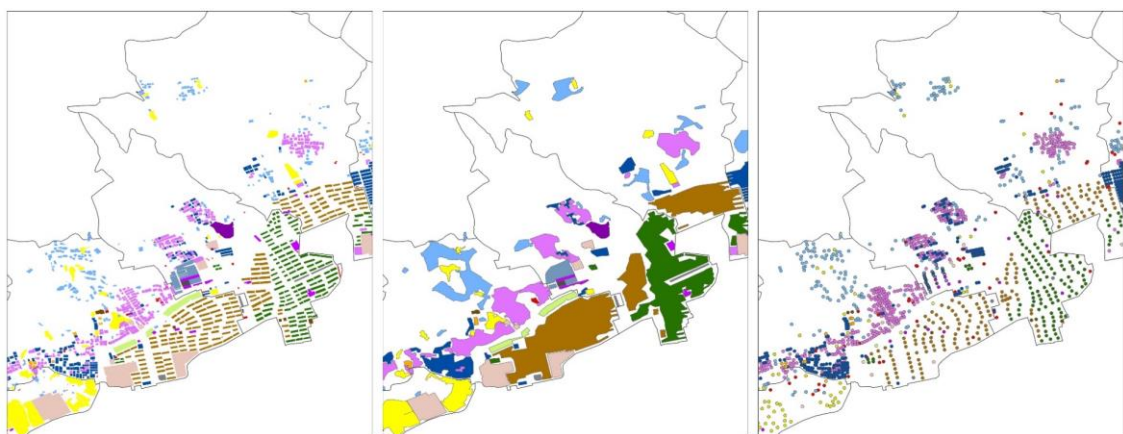


图7 将原始测绘图（左图）进行“聚合面”（中图）和“要素转点”（右图）  
（图片来源：作者自绘）

在将“聚合面”和“要素转点”分别得到的成果叠加之后放大显示（图8）时（图中的点代表单个建筑要素，点的不同颜色代表不同建筑类别），我们可以注意到两个特点。其一，同一个面区域一般由一种建筑点要素类型主导，但可能包含个别其他类型的建筑点要素（以图8左图红圈突出标注表示）；其二，一部分建筑点要素（图8右图红圈突出标注表示）在聚合后生成的面区域之外。关于第一点，这恰恰实现了作者的意图：由一个较为完整的多边形面域来代替大体上具有共性特征的一片区域，而忽略其中零星的不一致元素，从而达到更为简洁的显示效果；关于第二点，这亦达到了笔者期望的效果，即可以忽略零星的、其缺失与否不足以决定一定区域的整体建成环境特征的少数建筑元素。

笔者随后将包含在各个新生成的多边形面域之内的各个建筑点要素的“建筑质量”属性求取中位数赋值给各个新生成的多边形面域，得到新的属性值并将其可视化（图9）。

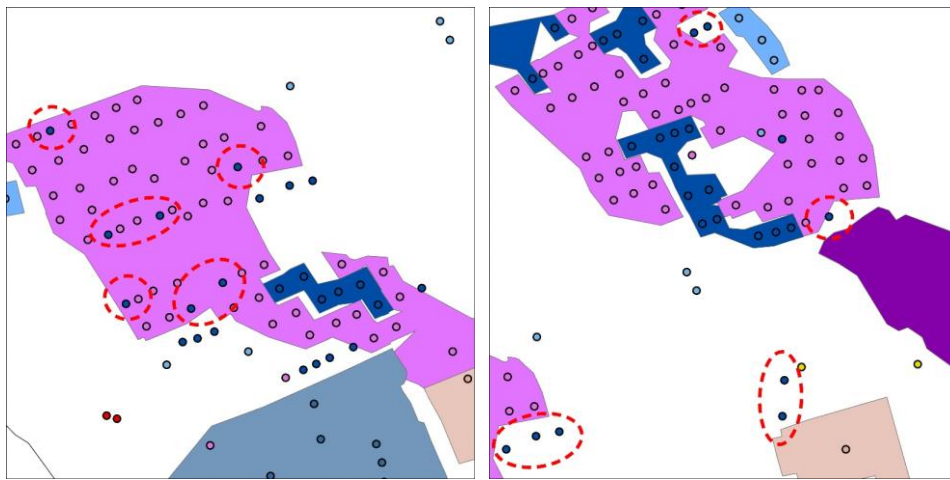


图8 将“聚合面”和“要素转点”结果叠加后的局部放大显示（图片来源：作者自绘）

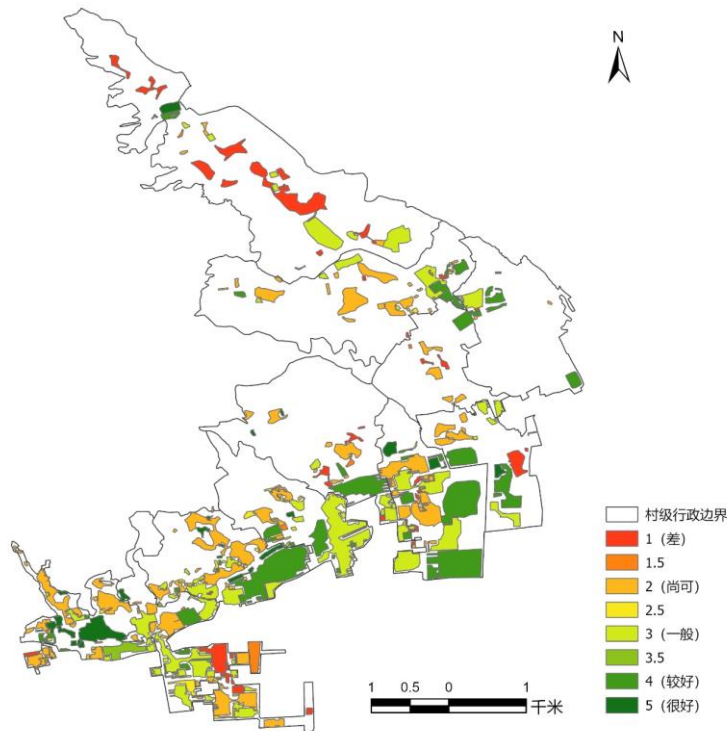


图9 对各个聚合的面要素分别赋值以其范围内的原有多多个建筑的建筑质量的中位数后的显示结果（图片来源：作者自绘）

### 3.2 使用 ModelBuilder 实现自动计算

笔者基于 ArcGIS Pro ModelBuilder 构建了实现了本文所探究的空间计算方法的自动计算，包括以下步骤。

- (1) 使用“聚合面”、“要素转点”将基础测绘文件进行转化。
- (2) 使用“空间连接”和“汇总统计数据”将包含在使用聚合面生成的新面域中的点要素的属性求取中位数。
- (3) 通过“添加连接”将该中位数赋值给聚合面生成的新的面域（新生成的多边形面域的属性值近似代替了原测绘成果中的各个建筑单体属性值，这可以看作是对原有建筑属性信息的近似保留）。

ModelBuilder 程序如图 10 所示。

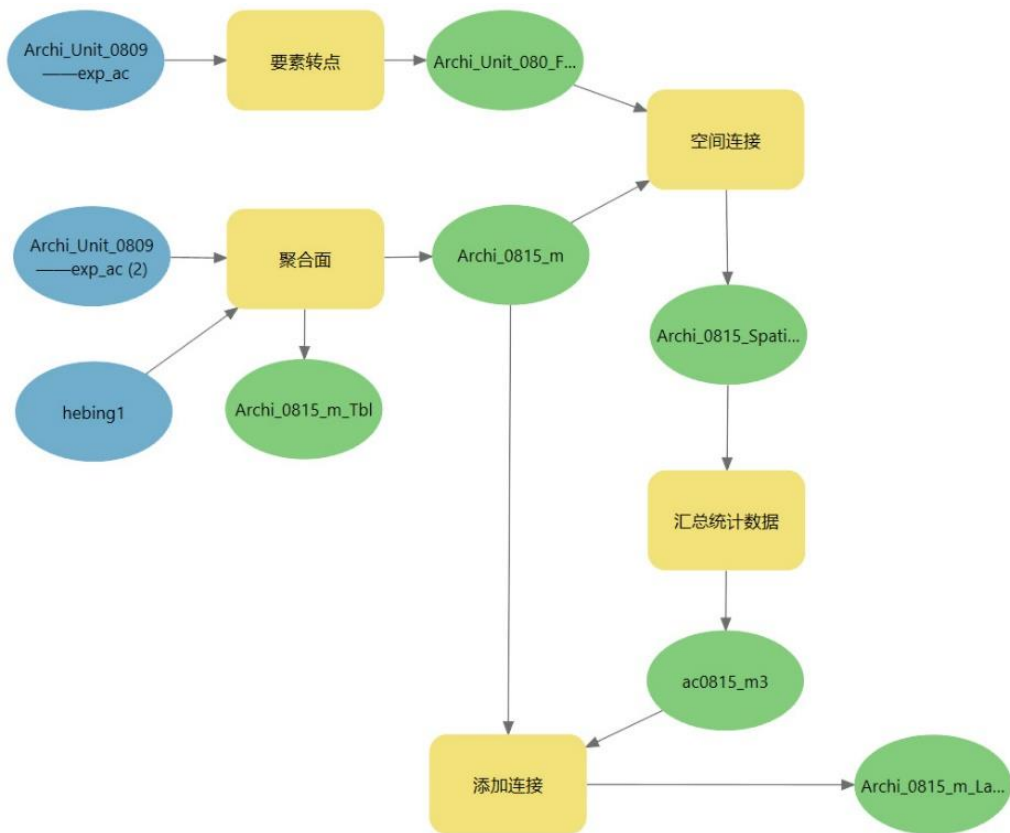


图 10 使用 ModelBuilder 实现自动计算<sup>14)</sup>

(图片来源：作者基于 ArcGIS Pro ModelBuilder 构建)

## 4 潜在应用价值

本文所探究的空间计算方法一项潜在应用是城市研究中的空间诊断，特别是城乡接合部的研究。城乡接合部环境的复杂性需要一种能够根据调查测绘成果和空间处理计算来快速进行空间诊断的方法。以本文所选取的泰安研究区域为例，在得到以建筑群尺度作为最小统计单元的建筑层数（用于大致反映建筑高度情况）的分级色彩显示（图 11 左），并从其局部放大图中建筑高度局部的突变暗示了在城市一村庄一风景区之间的空间过渡方面（图 11 右上）潜在的不协调问题；单从高度控制上来说，部分泰山环山路以北的区域高度控制较好（图 11 右下）。

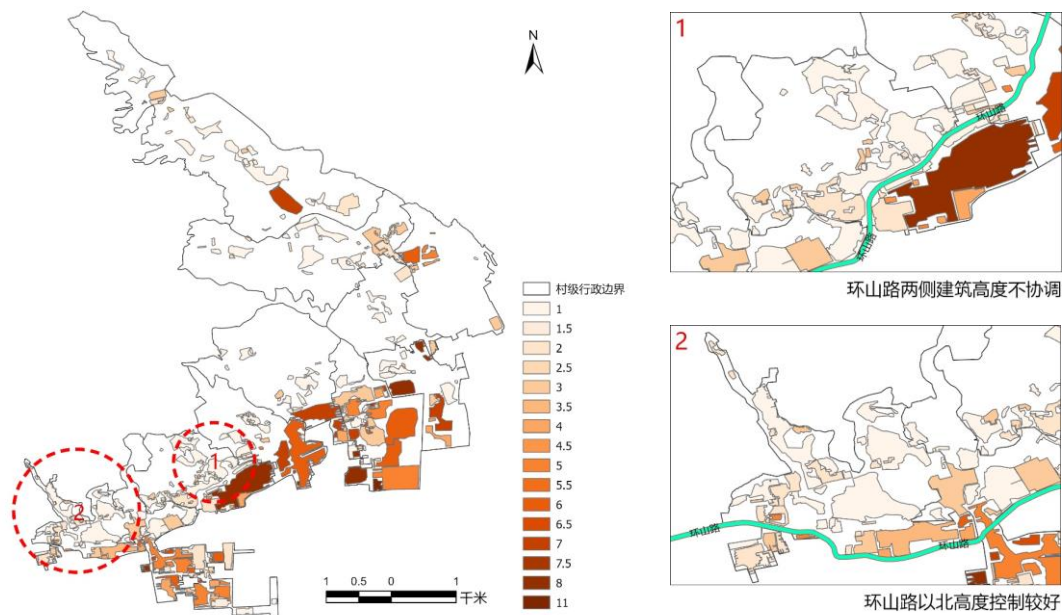


图 11 对各个聚合的面要素分别赋值原有多个建筑要素的层数中位数的显示结果  
 (图片来源: 作者自绘, 环山路走向参考 ArcGIS Pro 软件自带的底图绘制)

## 结语

本文探索了用于将建筑尺度的测绘成果简化为建筑群/园区尺度的面域, 并在一定程度上保留原始测绘成果属性信息, 以用于中观尺度的特定分析研究的空间计算方法, 并以邻近泰山风景区的泰安城市边缘区域为例进行数据采集和计算方法试验。该方法综合运用了无人机影像三维重建、点云分类, 以及 ArcGIS Pro 中的“聚合面”、“要素转点”、“空间连接”、“汇总统计数据”等工具, 并通过 ArcGIS Pro ModelBuilder 实现了自动计算, 在将相同属性的若干建筑合并形成面域的同时, 又将新形成的面域内的若干建筑单体的属性求取中位数赋值给该面域, 使得新生成的多边形面区域含有近似的、其边界范围内包括的建筑点要素的属性。最后同样以泰安为例, 简要说明了这一空间分析方法的潜在应用。

## 注释

- 1) 影像采集时间为 2023 年 7 月至 9 月。
- 2) “较高品质商品房或公寓”是指的建造时间较为晚近、立面设计和施工较为考究的板式住宅(至少为多层, 也可能有小高层), 可能还包含一些的单位职工宿舍或学生的公寓。
- 3) “长屋”是指以往由特殊单位部门办公使用的、层数通常在 1 至 2 层的长条形房屋, 现今多为办公或商业用途。
- 4) “乡村简易别墅”是指村民自建或村集体开发的改良型住宅, 层数以 2 至 3 层居多, 其建筑设计和装修品质低于商品性质的豪华别墅, 高于城中村式的村民自建房。
- 5) “院落(疏松型排布)”是指院落与院落间距大、整体分布较为稀疏的情形, 在山地地形经常出现。
- 6) “院落(紧凑型排布)”是指院落与院落间距小、总体排布紧凑的情形, 多见于 20 世纪后期建设的“新村”, 或地形变化较小的区域。
- 7) “休闲帐篷”是指带有休闲度假功能的临时建筑, 有的可能是民宿, 有的作为休息或交流的场所。
- 8) “一般住宅”是以 2 层至 3 层为主的住宅, 建筑品质较低或较为老旧。
- 9) 严格来说, 在对单个要素进行轮廓绘制的环节, 这个“要素”不只是指建筑, 准确的说应当是“用以识别某种建成环境类型的最小单元”, 由此, 一个居住院落只绘制了其外轮廓而忽略其内部的空间划分, “园区”只绘制其外轮廓而不再区分内部的房屋建筑。



10) 这里的“多层住宅楼”是指“回迁居住区/经济型居住区”和“较高品质的商品房或公寓”，点云深度学习分类无法区分其建筑品质，只能区分其外在形状，因此根据建筑品质的类型划分仍需手动进一步区分。

11) 结合注释 9 的解释，这里的“建筑类型”不只是指单体建筑，应是“区分一种建成环境类型的最小单元”，包含“豪华房屋”、“公园”、“回迁楼/经济适用房”、“较高品质的商品房或公寓”、“长屋”、“一般公共建筑”、“景观建筑”、“庄园”、“商业楼”、“平房”、“遗产”、“办公园区/校园”、“乡村简易别墅”、“院落（疏松型排布）”、“院落（紧凑型排布）”、“休闲帐篷”、“一般住宅”。

12) 建筑质量分为 5 个等级，其中 1 级（差）为带有破败和棚户特征的房屋，如屋顶出现明显的破损、院落杂乱缺乏日常整饬，或以临时性建筑常使用的材料作为主体建筑材料的房屋等；2 级（尚可）是没有明显的破败感，但品质依然较低的房屋，常见于采用一般水泥墙面或廉价瓷砖墙面的村宅或城中村建筑；3 级（一般）是一般质量房屋，比如经过一定改造修缮的老旧小区住宅，或者以经济性为首要考虑和回迁为主要目的的一般住宅，立面设计较为简单；4 级（较好）为外观设计、选材、空间排布设计上较为上乘的房屋、院落、庄园等；5 级（很好）为高档建筑或庄园，体现为选材、建筑设计或景观设计的精雕细琢，如别墅等。

13) 在建筑层数计算方式中，若地面层具有车库功能（或达到车库高度）则被算作独立一层；阁楼若在外观上可见且有窗（不含天窗）则被算作独立一层，建筑外观上不可见的黑房间阁楼不算做独立一层；在具有多个建筑的园区中，若建筑部分中最高层数（假定为  $k$ ）覆盖的投影面积大于 25%，则最高层数算作园区的“层数”，否则察看其低一层（ $k-1$  层）及其以上建筑层的投影面积之和是否大于 25%，若是，则  $k-1$  层为园区的层数，否则依次类推；对于庄园、公园，若建筑投影面积低于场地总面积的 10%，无论建筑层数如何，该区域视为仅有“1 层”，若大于 10%，则建筑层数看作该区域的“层数”。

14) 图中的“Archi\_Unit\_0809—exp.ac”、“Archi\_Unit\_0809—exp.ac(2)”是同一个文件（基础测绘成果）。“hebing1”是村级行政边界，用作在“聚合面”工具中输入的“障碍要素”（使得聚合形成的面域不会跨越村级行政边界）。

## 图表来源

在图 1 至图 11 中，图 5 引自作者 2024 年新加坡亚洲计算机辅助建筑设计年会 (CAADRIA) 的会议论文《Survey of Built Environment in the Era of UAV: From Aerial Photogrammetry to Point Cloud Classification》中自绘的图片，图 1 至图 4、图 6 至图 11 均为作者自绘，其中涉及到村级行政边界的部分参考来源于泰安市自然资源和规划局、山东省统计局的村级行政边界资料，涉及到地图的部分使用由 ArcGIS Online 提供关联的多源数据地图，涉及到二维/三维重建、ModelBuilder 运用的部分为作者本人操作相关软件生成。

## 参考文献

- [1] ZHOU X. Efficient polygon amalgamation methods for spatial OLAP and spatial data mining[M]. Advances in spatial databases: 6th International Symposium, SSD' 99: Hong Kong, China, July 20-23, 1999: proceedings (卷 1651). New York: Springer, 1999: 167-187.
- [2] FUNKE, S., STORANDT, S. Smooth Building Footprint Aggregation with Alpha Shapes[M/OL]. Web and Wireless Geographical Information Systems: 21st International Symposium, W2GIS 2024, Proceedings. Lecture Notes in Computer Science (14673). Springer Nature Switzerland, 2024: 117-129. DOI:10.1007/978-3-031-60796-7\_9.
- [3] KNORR, EM, NG, RT. Finding aggregate proximity relationships and commonalities in spatial data mining[J/OL]. IEEE transactions on knowledge and data engineering., 1996, 8(6): 884-897. DOI:10.1109/69.553156.
- [4] SHEN, YILANG, AI, TINGHUA, LI, WENDE, 等. A polygon aggregation method with global feature preservation using superpixel segmentation[J/OL]. Computers, environment and urban systems, 2019, 75: 117-131. DOI:10.1016/j.compenurbsys.2019.01.009.
- [5] T. NELSON, K. O. NIEMANN 和 M. WULDER, Spatial statistical techniques for aggregating point objects extracted from high spatial resolution imagery[C]. IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217), Sydney, NSW, Australia, 2001, pp. 1663-1665 vol. 4.
- [6] C. MIZUTANI. Land use transition process analysis using polygon events and polygon status: A case study of Tsukuba Science City[C]. 2009 17th International Conference on Geoinformatics, Fairfax, VA, USA, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/GEOINFORMATICS.2009.5293432.
- [7] ZHAI, RENJIAN, LI, ANPING, YIN, JICHONG, 等. A Progressive Simplification Method for Buildings Based on Structural Subdivision[J/OL]. ISPRS international journal of geo-information., 2022, 11(7). DOI:10.3390/ijgi11070393.
- [8] 袁策. 建筑物多边形化简及优化的自动方案研究[J]. 测绘科学, 2007, (06): 84-85+32+206-207.
- [9] 史佳顺, 朱赞, 黄继风. 一种建筑物多边形合并、化简与优化的自动方案[J]. 计算机工程, 2003, (01): 204-205.
- [10] 郭庆胜, 黎佳宜, 曹元晖, 等. 建筑物白模多边形的自动合并[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(01): 12-18. DOI:10.13203/j.whugis20190345.
- [11] KRONENFELD, BARRY J., STANISLAWSKI, LAWRENCE, V, BUTTENFIELD, BARBARA P., 等. Simplification of polylines by segment collapse: minimizing areal displacement while

preserving area[J/OL]. International journal of cartography. 2020, 6(1): 22-46.  
DOI:10.1080/23729333.2019.1631535.

[12] I. M. A. JAWARNEH, R. MONTANARI and A. CORRADI. Cost-Effective Approximate Aggregation Queries on Geospatial Big Data[C]. 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Kuala Lumpur, Malaysia, 2023, pp. 1313-1318, doi: 10.1109/GCWkshps58843.2023.10465045.

[13] HU Q, YANG B, XIE L, 等. RandLA-Net: Efficient Semantic Segmentation of Large-Scale Point Clouds[C/OL]. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway, New Jersey : IEEE, 2020: 11105-11114. DOI:10.1109/CVPR42600.2020.01112.

[14] LIU YONGKANG, WANG YI. Survey of Built Environment in the Era of UAV: From Aerial Photogrammetry to Point Cloud Classification[C]. International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), 2024: 149-158.

[15] ESRI. Automation of Map Generalization: The Cutting-Edge Technology[R]. Esri, 1996.

[16] [EB/OL] <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/data-management/feature-to-point.htm>. (引用时间: 2024年10月)