引文格式：钟炜,郭丽. 城市级实景三维单体化模型质检方法研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 133-136. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.07.027

城市级实景三维单体化模型质检方法研究

钟　炜[1]，郭　丽[1]
（1. 上海市测绘产品质量监督检验站，上海 200063）

摘　要：具有地理语义的单体化模型是实景三维建设的最终成果，能作为数字底座在多个行业进行分析和应用。在单体化过程自动化程度不高的情况下，单体化模型质检是保证成果质量的重要工作。首先结合单体化的技术特点，在既有质量元素模型的基础上，优化提出实景三维单体化模型质量元素和检查项；再针对实际项目中质检工作的技术难点，提出利用Hausdorff距离度量线状图元提取精度，以控制相对位置精度和基于Cesium引擎的浏览质检，以提高大场景质检效率两种方案。研究内容在上海市智慧城市测绘地理信息基础建设项目单体化部分进行了质检实践，结果表明这些方法行之有效，能够提升质检工作的效能。

关键词：实景三维；单体化；质量元素模型；Hausdorff距离度量；浏览质检
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）07-0133-04

Research on Quality Inspection Method for Urban 3D Real Scene Monolithic Model

ZHONG Wei[1], GUO Li[1]
(1. Shanghai Quality Inspection and Testing Center for Surveying and Mapping, Shanghai 200063, China)

Abstract: The monolithic models with geographical semantics are the ultimate results of 3D real scene construction, which can serve as a digital base for analysis and application in multi-industry fields. When the degree of automation in the monolithic process is not high, the quality inspection of monolithic models is an important task to ensure the quality of results. Combined with the technical characteristics of monolithication, based on the existing quality element model, we optimized the quality elements and inspection items of 3D real scene monolithic models at first. Then, in view of the technical difficulties in the quality inspection work of actual projects, we proposed to use the Hausdorff distance to measure the extraction accuracy of linear graphic elements to control the relative position accuracy, and proposed the browsing quality inspection based on the Cesium engine to improve the efficiency of large scene quality inspection. The research content of this paper was practiced in the monolithic part of smart city surveying and mapping geographical information infrastructure construction project in Shanghai City. The result shows that these methods are feasible and can improve the efficiency of quality inspection work.

Key words: 3D real scene, monolithication, quality element model, Hausdorff distance measure, browsing quality inspection

自然资源部《实景三维中国建设总体实施方案（2023—2025 年）》明确提出，建设地形级、城市级、部件级实景三维成果。在城市级实景三维建设中，应选取适当工作模式开展城市三维模型（LOD1.3级）的快速构建，还应建设包含城市三维模型的城市级基础地理实体数据库[1]，而依靠单一的倾斜摄影建模手段无法实现建设目标。倾斜摄影测量虽能高效快速采集数据，但其建模成果具有“一张皮”特点[2]，无法完成单个目标物的编辑与管理[3]以及地理实体的语义化表达。近年来，单体化技术成为建设拥有丰富地理语义的城市级实景三维数据底座的热门研究方向。目前主流的单体化方法为逻辑式单体化和重建式单体化[4]，其中重建式单体化能得到满足城市级甚至部件级标准的实景三维模型成果，是城市三维模型和城市级基础地理实体数据库建设的主要手段。

实景三维重建式单体化（以下简称单体化）的基本流程见图 1，整个流程自动化程度不高，涉及大量的人工提取环节，误差不可避免；技术设计上也有类似地图制图综合取舍的指标性要求，作业过程中因理解程度不同将导致质量的不稳定。因此，单体化质量检验成为关键能力，质检方法研究成为重要课题。

1　研究思路

单体化是实景三维模型成果的最终生产环节，本文主要解决“查什么”和“怎么查”两个问题；并结合在上海市智慧城市测绘地理信息基础建设项目的质检实践，验证研究成果的可行性。

1）“查什么”的研究思路是根据单体化工艺流程

第一作者简介：钟炜（1982—），硕士，高级工程师，研究方向为实景三维质量检验、自动驾驶高精地图审图、测绘地理信息安全，E-mail：zhongwei1128@126.com。

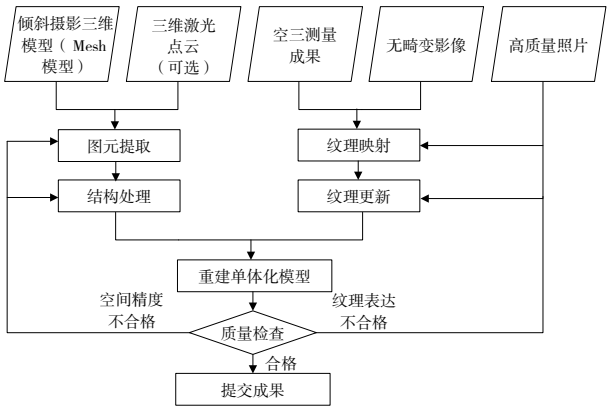


图1 单体化流程图

对已有质量元素模型进行优化。质量元素是成果满足规定要求和使用目的的基本特性[5]。目前，实景三维模型成果的质量元素通常参考GB/T 24356-2023《测绘成果质量检查与验收》中的三维地理信息模型。针对单体化的技术和工艺特点，结合城市尺度数据集的质检需求，可进一步优化质量元素，调整相应的权和检查项。本文通过分析、比较和优化，提出适合的质量元素模型。

2）“怎么查”的研究思路。目前的质检方法中多强调绝对精度，即检测野外实测点和模型成果同名点的中误差，该方法实施成本高且不符合单体化的生产过程特点。单体化的位置精度主要是在图元提取环节确定的，而在前道工序精度保证的前提下，度量和控制单体化成果和倾斜摄影模型的相对位置精度，能够反映质量过程并有效控制质量。高崇民等[6]将三维模型成果视为一个凸多面体，结合投影切片和碰撞算法，提出了一种相对位置精度计算方法。三维体是由线状图元组成的，提升位置精度的关键是控制线状图元提取的精度，因此本文引入Hausdorff距离进行研究。单体化的浏览质检需要展现多源二三维资料、同时加载浏览大体量数据，而加载慢、浏览卡顿使得质检工作难以顺畅进行，该问题在城市级实景三维质检中尤为突出。本文基于Cesium引擎开展相关研究，探索解决方案。

2 质量元素模型

2.1 面向单体化技术特点的质量元素

单体化技术路线对测绘地理信息技术具有很强的依赖性。一般而言，必须具备全要素地形数据、倾斜空三成果、倾斜摄影模型、三维模型制作、三维场景重建、模型后处理[7]的技术体系才能执行单体化任务。倾斜摄影模型、空三成果、高质量照片、激光点云等都是单体化的前道工序成果。目前对前道工序成果质检方法的研究较多，但对单体化模型质检的讨论较少。高山等[8]分析了CityGML对城市三维模型分级LOD的平面、高程精度以及表现尺度规定，并结合城市景观三维表达实践，提出了参考测绘地形图的模型精度列表；孙松梅等[9]总结了建筑、建筑楼梯、道路、市政设施单体化时图元采集的质量要点；上述研究说明单体化是对现实地理实体的综合取舍与数字表达，因此实景三维单体化和现实地理现象的吻合程度是检验成果质量的关键。基于此，本文参照大比例尺地形图的质量元素，提出单体化成果还应考虑地理精度。

单体化的关键步骤是基于多源数据的地理实体语义识别、图元提取、体块构建、纹理贴图，各步骤均涉及多个质量元素，因此质检工作应更多地关注系列步骤带来的质量影响，并进行质量控制，实施PDCA循环。质量元素的检查项应尽可能详细，相应的质检方法也应尽可能明确。

2.2 城市尺度质检视角分析

城市三维模型数据量庞大，生产任务是分要素、分块执行的，因此生产视角是微观的，有时难以顾及整体。质检视角与生产视角不同，需要从不同的空间尺度进行检查，才能为最终用户把好质量关。成果的尺度问题应纳入质量元素的考量中。检查对象应从大的城市场景开始，逐级缩小尺度，最后甚至可以聚焦到部件级成果质量。结合实践经验，本文提出单体化质检抽样单元为1∶2 000比例尺图幅范围。该尺度既利用了现有基本比例尺图框，体现了城市的区域特性，又可以规避1∶500、1∶1 000比例尺图幅下常见的大型建筑物分割导致质检问题归属和样本评分难以及更小比例尺单位图幅范围内模型成果过多无法加载的问题。

2.3 质检元素模型优化

综上所述，本文基于GB/T 24356-2023《测绘成果质量检查与验收》中的三维地理信息模型，对城市三维模型单体化质量元素与检查项进行优化，主要内容包括：①为体现城市空间特性，采用中等比例尺作为成果尺度，设置抽样单位为1∶2 000图幅；②空间参考系要求与已验收的倾斜摄影模型保持一致，检查空三文件的规范性，确保智能贴图的正确性；③进一步细化位置精度的检查项，分为绝对位置精度检测、相对位置精度检测，相对位置精度是单体化线状图元提取质量的度量方法，可有效控制内业工作质量；④增加地理精度，表达与现实地物的吻合程度，包括客观地理实体的符合性（模型结构与实地不一致、贴图张冠李戴等）和数据逻辑要求的符合性（不合理曲面、破洞、穿插、裂缝等），数据拓扑错误必然降低地理精度，与实际情况不符；⑤进一步明确表达精细度

表1　城市级实景三维单体化模型质量元素与检查项

质量元素	权重	质量子元素	权重	检查项
空间参考系	–	–	–	符合性检查、空三文件正确性、规范性
逻辑一致性	–	概念一致性 格式一致性 属性项一致性	–	符合性检查
位置精度	0.20	平面精度	0.50	绝对位置精度检测
		高程精度	0.50	图元提取精度检测
地理精度	0.20	符合地理实体	0.50	对真实地物表达的正确性和完整性
		符合数据拓扑	0.50	模型数据自身结构合理性
表达精细度	0.20	模型精细度	0.50	模型的协调性、取舍正确性
		纹理精细度	0.50	纹理的正确性、协调性
场景效果	0.30			场景的完整性、协调性
资料质量	0.10	技术文件完整性、正确性	0.50	技术设计、技术总结、检查报告的合规性、完整性
		资料完整性、正确性	0.50	外业手簿、质量检查记录等的合规性、完整性，以及补测数据的正确性、完整性、规范性等

的检查意义；⑥进一步强调资料质量。

3　关键质检技术研究

3.1　利用Hausdorff距离控制图元提取精度

单体化过程中，图元提取的基本单位是线而非点。由于倾斜摄影模型存在不可避免、尺度不同的“蜡融”现象，即三角面网的每一条边都存在随机抖动，造成图元提取的不确定性（图2），因此需要度量线状图元提取精度来控制其质量。本文采用经典的Hausdorff距离[10]来度量线状图元提取精度。

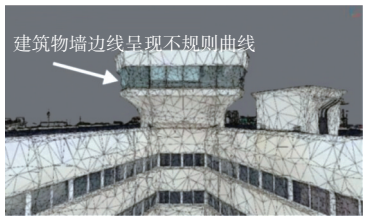


图2　倾斜摄影模型的“蜡融”现象

Hausdorff距离是描述两组集合之间相似程度的指标（图3），被广泛应用于形状匹配和图形识别等领域[11]。彭海驹等[12]采用Hausdorff距离和K-means聚类算法精简点云数据集，在保证精度的前提下降低了数据量；谭超等[13]提出基于Hausdorff距离的神经网络算法，以简化三角网格数据；上述研究对实景三维相关研究具有较强的参考意义。Hausdorff距离的计算公式为：

$$\delta_h\left(T_{pa},T_{pb}\right)=\max_{p_a\in T_{pa}}\left\{\min_{p_b\in T_{pb}}\left\{\mathrm{dist}\left(p_a,p_b\right)\right\}\right\}$$

式中，T_{pa} 为倾斜摄影模型的边，点 p_a 的集合；T_{pb} 为图元提取成果的边，点 p_b 的集合；$\mathrm{dist}\left(p_a,p_b\right)$ 为同一空间参考系下的欧氏距离；$\delta_h\left(T_{pa},T_{pb}\right)$ 的值越大，表示图元提取的质量越好。

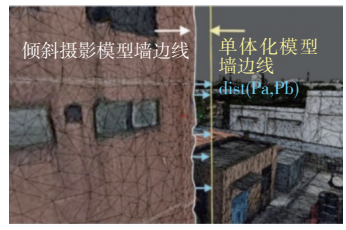


图3　单体化模型Hausdorff距离示意图

3.2　基于Cesium引擎的浏览质检

在质量元素中，地理精度、表达精细度、场景效果均需以人机交互、漫游缩放的方式进行浏览质检，约占60%~70%的工作量。多源资料套合、大体量数据同时加载都是浏览质检的关键问题。为提高浏览质检的工作效率，可基于Cesium引擎进行浏览质检[14]。Cesium是基于Javascript的开源三维地图框架，支持影像、地形、矢量、三维模型、三维瓦片等多种数据格式，并可实现高亮、渲染等多种可视化效果。其高效的数据加载和渲染能力，使用户能在Web端进行大规模的三维场景浏览和分析。在质检实践中，搭设一个Cesium服务器[15]即可使多个质检员通过网页浏览器（图4）同时进行浏览质检，大大提高了协作效率。

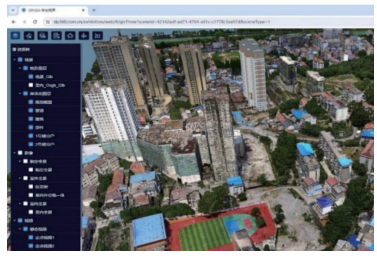


图4　浏览质检示意图

4　项目案例实践

本文所提质量元素模型和关键质检技术均在上海

市智慧城市测绘地理信息基础建设项目（以下简称智慧城市项目）得到实践应用。该项目于2021年启动，目标是为上海智慧城市建设高精度、可量测、部件化的数字底座，测区总面积约为1 362.3 km^2，基本覆盖上海城市的重点开发区域。项目中实景三维建设单体化流程十分典型，最终单体化模型成果共制作71万个单体建筑模型，成果数据量达60 T。如此庞大的成果数据量为质检工作带来很大的挑战，也为本文研究内容提供了较好的实例验证机会。

4.1 质量元素模型应用情况

在智慧城市项目的单体化质检中，根据质量元素模型细化了评分权重，形成了详细错漏分类表，明确了4档扣分规则，抽样详查了100幅1∶2 000图幅范围成果样本，形成7 314个质量问题标签，包括2 593个地理精度问题（建模表达错误、不符合真实地物，模型结构缺漏、多余，模型结构错误或出现缝隙、破洞、穿插），4 382个表达精细度问题（模型结构凹凸取舍错误、模型结构不成比例或纹理位置不协调、模型制作级别低于规定要求、纹理分辨率不符合要求），302个场景效果问题（场景中一般模型种类缺失、模型之间不接边）和37个资料质量问题（数据源资料现势性不符合要求、补测资料未按设计进行采集和整理）。各类情况基本覆盖，没有明显的牵强归类，证明质量元素模型应用情况良好，较客观地反映了成果的质量水平。

4.2 图元提取精度控制情况

在智慧城市项目的单体化质检中，设置图元提取Hausdorff精度限差为±3 cm，在质量控制过程中生成套合超限指示图（图5），以保障图元提取精度，进而确保单体化模型绝对精度符合设计需求的±15 cm。项目精度以绝对精度为统计评判，共采集1 611个野外实测点（通常为地标性建筑的特征点）；执行同精度检测，结果表明91.9%的检测点小于1倍允许中误差，成果中误差为±7.96 cm，说明图元提取工作得到了较好的精度控制，符合项目需求。

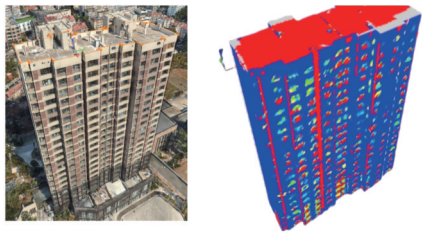


图5 套合超限指示图示意

4.3 基于Cesium浏览质检执行情况

项目搭建基于Cesium的Web 3DGIS进行浏览质检，实现了多源数据融合加载、海量数据统一管理、多个质检项目并发执行等功能。在1∶2 000图幅范围，不配备专业显卡的情况下浏览快速不卡顿。根据工天对比，对浏览质检的正向促进作用约提升15%。

5 结 语

本文结合单体化技术特点，研究了城市级实景三维单体化模型质检方法。首先从6个方面优化了质量元素模型，以指导质检工作；再研究了质检过程中的两个关键技术点，即利用Hausdorff距离控制线状图元提取精度和基于Cesium引擎的浏览质检方法；最后在智慧城市项目的单体化质检中实践验证了上述研究内容，得到技术可行的结论。本文研究结果可为城市级实景三维单体化模型质检项目提供经验，也可为相关标准制订提供参考。

参考文献

[1] 自然资源部. 实景三维中国建设技术大纲(2021版):自然资办发[2021]56号[EB/OL]. (2021-08-16)[2024-02-22]. http://gi. mnr. gov. cn/202108/t20210816_2676831. html

[2] 刘增良,陈思,陈品祥. 城市倾斜摄影实景三维模型数据质量检查方法研究与实践[J]. 测绘通报,2019(2):108-112

[3] 郭如宝,郝利娟,刘旭东,等. 基于倾斜摄影的实景三维单体化模型构建方法[J]. 测绘通报,2021(1):103-107

[4] 王凯松,刘增良,董志海. 实景三维的单体化模型重建[J]. 北京测绘,2021,35(8):1 074-1 078

[5] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 测绘成果质量检查与验收:GB/T 24356-2023[S].

[6] 高崇民,达多双,刘云波. 建筑单体化模型精度检测方法研究[J]. 地矿测绘,2023,39(3):7-11

[7] 杨常红. 联合空地多源数据的全要素实景建模方法[J]. 测绘地理信息,2021,46(6):72-77

[8] 高山,陈思. 城市三维建模技术与标准研究[J]. 测绘通报,2013(3):95-97

[9] 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

[10] 钟东. 线要素质量评价与多尺度水系匹配方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2018

[11] 潘新龙,王海鹏,何友,等. 基于多维航迹特征的异常行为检测方法[J]. 航空学报,2017,38(4):254-263

[12] 彭海驹,严科文,林松,等. 融合K-means聚类与Hausdorff距离的点云精简算法改进[J]. 地理空间信息,2022,20(8):59-63

[13] 谭超,陈仁杰. 基于神经网络的三角网格简化算法[J]. 中国科技论文,2023,18(7):714-721

[14] 王晓艳,陈宪冬. 基于Cesium的三维模型可视化[J]. 地理空间信息,2022,20(1):115-117

[15] 孙晓鹏,张芳,应国伟,等. 基于Cesium. js和天地图的三维场景构建方法[J]. 地理空间信息,2018,16(1):65-67