引文格式：张永贵. 融入先验知识的立体卫星影像 DSM 生产技术研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(10):106-109. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.10.023

融入先验知识的立体卫星影像DSM生产技术研究

张永贵[1]
（1. 福建省测绘院，福建 福州 350003）

摘　要：立体卫星影像数据具有获取便利、覆盖范围广、更新周期短等特点，在大范围DSM（数字表面模型）产品生产中，可以弥补航飞数据源获取的不足。基于立体卫星影像特点结合矢量数据的先验知识，分别从重构Mesh三维模型、结合矢量数据规则化处理等方法开展基于立体卫星影像数据生产DSM的关键技术研究，分析评价精度及模型表达效果，论证了北京三号立体卫星影像在DSM生产中的可行性，为利用立体卫星影像和矢量数据辅助开展DSM生产提供技术支撑。

关键词：立体卫星影像；数字表面模型（DSM）；实景三维；先验知识
中图分类号：P284　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）10-0106-04

Research on DSM Production Technology of Stereo Satellite Image Combined with Prior Knowledge

ZHANG Yonggui[1]
(1. Fujian Surveying and Mapping Institute, Fuzhou 350003, China)

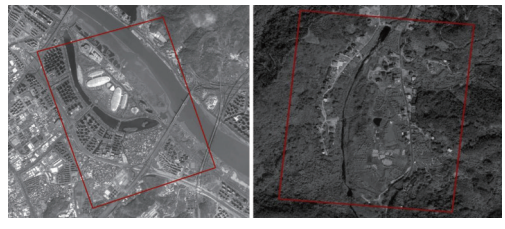
Abstract: Stereo satellite image data features convenient access, wide coverage, and short update cycle, which can compensate for the insufficiency of aerial data acquisition in the production of large-scale digital surface model (DSM) products. Based on the characteristics of stereo satellite images, combined with the prior knowledge of vector data, we carried out the key technology research on DSM production based on stereo satellite image data by using methods such as reconstructing Mesh 3D model and the regularization processing of vector data, and analyzed the accuracy and expression effect of model. The result demonstrates the feasibility of BJ-3 stereo satellite images in DSM production, providing technical support for the use of stereo satellite images and vector data to assist in DSM production.

Key words: stereo satellite image, DSM, 3D real scene, prior knowledge

近年来，随着计算机视觉、深度学习等技术的快速发展[1-3]，包括立体匹配与三维重建技术、目标检测与识别技术、场景理解与语义分割技术等为立体卫星影像数据的处理和DSM的生产提供了新的思路和方法[2-6]。本文旨在研究基于立体卫星影像数据生产DSM的关键技术，包括立体卫星影像重构Mesh三维模型、矢量数据与栅格信息结合辅助等技术方法[6-9]，结合实际应用案例，为相关领域的研究和实践提供有益的参考和借鉴[10-16]。

1　研究区域

本研究采用北京三号卫星影像作为基础实验数据，其分辨率全色可达0.3 m，多光谱可达1.2 m，幅宽可达14 km，侧摆约±45°。为了更好地探索立体卫星影像数据对于在平原和山地等不同地貌场景下的精度情况，全面验证生产技术路线在建筑、交通、水体、树林中的表现效果，本次研究选取福州市仓山区、永泰县部分区域作为研究区域。区域一为城区实验区，位于福州市仓山区某区域面积约5 km^2区域，包含独栋高层建筑、国际会展中心构建筑物、成片低矮房屋群、高架立交桥、湖泊静态水域及河流水域流动水域等研究对象。区域二为非城区实验区，位于永泰县赤壁村面积约3 km^2的区域，着重将丘陵、山地等地貌，以及耕地、园地、林地等地物作为研究对象。研究区域如图1所示。



a 城区实验区　　b 非城区实验区

图1　实验区范围示意图

项目来源：福建省测绘地理信息发展中心科技创新项目（FJCH-2023XMK-08）。
作者简介：张永贵（1980—）本科，高级工程师，主要从事摄影测量与遥感、地理信息技术及管理等工作，E-mail：31771530@qq.com。

2　技术路线与关键技术

2.1　技术路线

本次研究选取具有代表性的城市地区以及非城市地区进行实验。整体技术路线如图2所示。

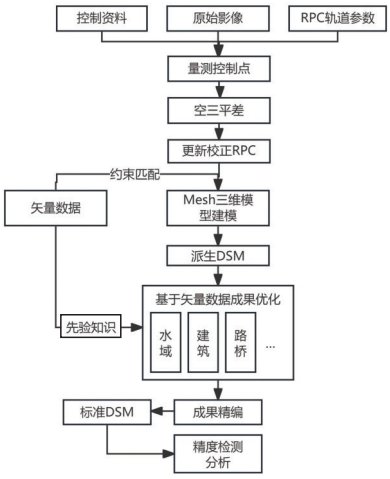


图2　技术路线图

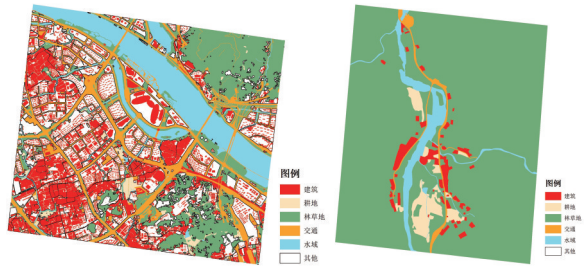
2.2　关键技术

2.2.1　卫星影像密集匹配

密集匹配是像方到物方三维重建过程中最关键的环节，由于有理函数模型（rational polynomial coefficients，RPC）较为复杂，无法直接进行核线矫正，同时卫星传感器到地面的距离过大，基线短，容易导致计算结果不稳定，卫星影像的像幅过大，单幅影像可包含数十亿像素。解决方法是对局部范围内的影像采用仿射投影模型进行近似，然后基于仿射投影模型进行核线矫正，对矫正后的立体影像进行密集匹配，通过匹配多级分辨率的影像，有效解决了匹配视差范围未知的问题，极大的增强了匹配的成功率。密集匹配采用半全局匹配算法（semi-global matching，SGM），在使用SGM匹配时需要指定视差搜索范围，视差范围取决于地表高程范围、影像分辨率以及影像对的投影方向夹角，然而实际的高程范围是未知的，无法给出合适的视差范围，但考虑到影像分辨率越低时视差分布范围越小，因而可以采用基于金字塔的SGM匹配方法，先对低分辨率影像进行全局密集匹配，根据匹配结果确定高分辨率影像的视差范围，然后再根据瓦块对高分辨率影像进行匹配，进而实现提升匹配效率。

2.2.2　融入先验知识的重构Mesh三维模型技术

由于基于立体卫星影像构建Mesh三维模型构建的技术特点，影像局部存在弱纹理区域导致特征匹配不稳定、密集匹配不连续从而导致的模型几何不完整等问题，造成建筑物边缘扭曲、桥梁边界不完整、水域信息空洞等问题。因此本文在立体卫星影像重构Mesh的过程中融入了矢量数据作为先验知识感知，在重构Mesh三维模型时，使用基于影像深度学习的识别技术对需要建模的特定地物地类进行初步的分类，分别对建筑、交通、水域等不同地物进行差异化建模，分类结果见图3所示。在粗分类的基础上，针对道路、桥梁、水域等范围构建连续平整的表面模型；结合建筑立面垂直的特点融入了投影约束匹配的方法，采用基于语义的轮廓线进行辅助匹配实现目标地物影像边缘和深度图边缘的完全统一，结合局部高程可靠性和全局一致性，保证了合并后的DSM的高程精度和连续性，并联合影像分割结果消除纹理贫乏区域的误匹配特征，提高密集匹配点云的精度水平，减少了对于阴影或投影差对于重构Mesh三维模型带来的干扰。



a 城区实验区　　b 非城区实验区

图3　实验区范围分类结果图

2.2.3　基于矢量和栅格信息结合DSM生产技术

根据实景三维建设技术文件要求以及DSM实际应用需求，挖掘矢量数据中的先验知识，对DSM成果进行分类差异化处理，分别针对静态水域、流动水域、房屋建筑、道路桥梁等地类特点，融入不同地类的带有语义内涵的范围线中心线等矢量数据，如建筑外轮廓线、道路边线等，此类数据可通过现有的数字线划图或结合卫星影像进行立体采集获取。在矢量数据约束的前提下，对DSM成果进行不同地类的规则化处理辅助生产DSM成果。①对于面积小且高差大的建筑，不论是激光点云数据还是立体卫星匹配的效果均存在“小山包”的现象，利用带有高程信息的矢量数据恢复房屋高程，实现房屋顶部信息的优化编辑；②对于楼顶是弧形或是斜面的建筑，采用的方法是在矢量约束范围内，查找异常点进行剔除，对区域范围内的每个格网点搜索特定范围内所有的相邻点，并用邻近点对其高程值进行内插赋值恢复建筑顶部信息；③针对道路桥梁，利用矢量数据对道路范围内的结果进行平滑内插处理，剔除异常点保证道路平整；④针对静态水域采用矢量范围定值的方法获取平整水面；⑤针对动态水域，利用河流中心线的矢量数据对确定河流流

向、曲率等姿态进行模拟，结合水域范围边界对河流范围内的高程信息进行平滑插值，从而还原动态水域的高程模型。需要注意的是，建模效果受矢量数据与栅格数据的一致性影响，若使用时效性差异较大的矢量数据可能会对DSM的表达效果带来干扰。

3 实验分析与评价

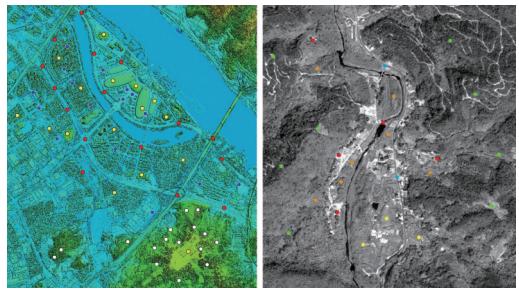
结合实景三维建设实际应用需求，使用2023年10月份航摄获取的激光点云数据进行精度验证，原始点云密度优于1点/m²，高程中误差小于25 cm，精度较高。作为本次实验成果的精度验证资料，根据地形级实景三维建设技术要求生产制作2 m格网的DSM产品。下面通过平面精度验证、高程精度验证、模型表达效果、生产效率等4个方面对本次研究的技术路线与方法进行分析。

3.1 平面精度验证

DSM是按规则格网点采样的地表高程值集合，原则上无需检测平面中误差，只有高程中误差，但通过合适的方式可以将DSM渲染出来，体现出地物的基本轮廓，从而进行平面精度的检查，理论上格网间距越小，地物的轮廓线越明显。本次实验用立体卫星影像和激光点云生成的DSM成果，在GlobalMapper软件中拉卷帘对比，查看道路、广场、大型建筑边缘等平直地物的边线套合度来检查DSM的平面精度。通过实验对比，在2 m格网表达的效果下，卷帘拼接处各类平直地物边线过渡自然，边线齐整，整体平面精度接近激光点云生成的DSM表达效果。

3.2 高程精度验证

密度越高的点云、分辨率越高的影像，地形坡度越小的地方，高程值内插损失的精度越少。但无论是优于1 m/m²的激光点云还是0.3 m分辨率的立体卫星影像制作的DSM，按照2 m格网采样时都会进行高程值内插，对于房角等地物高程突变处的真实高程值无法完整体现，因此对于DSM的高程精度检查点需选择在整体高度相对平坦的位置。同时，因影像和激光点云获取的时间不同，检查点需找在地物未发生变化的区域，另外应注意验证山体时不能选在有植被区域，植被会随着时间生长，也会随风速风向等产生明显高程变化。为了减少内插及时效性不一致等因素的影响，本次高程精度验证点选在道路、屋顶、地面、裸露山体等四类相对平坦的地方，每组选刺16个检查点。对于非城市研究区验证点选在耕地、屋顶、林地、园地等四类区域，具体分布图如图4所示。



a 城区实验区　　b 非城区实验区

图4 精度验证点分布图

从精度验证结果可知，实验成果高程基本满足2 m格网DSM的精度要求，且高程中误差随着地物类别坡度的增加而变大，符合预期判断。本次验证存在一定的局限性，由于原始卫星影像侧视角的影响，在高楼间普遍存在阴影，加之部分道路纹理较为阴暗单一，导致匹配出的DSM在此类区域出现大片明显的匹配异常，和实际高程值差异较大。这是影像匹配的特点决定的，无法解决，本次验证并未验证此类区域。另外本次验证未外业实地采集检查点，尽管激光点云制作的DSM精度较高，但仍然存在误差，当两者误差同向时，实际误差比统计出的误差大；当两者误差反向时，实际误差比统计出的误差小，精度统计误差区间大概为±25 cm。

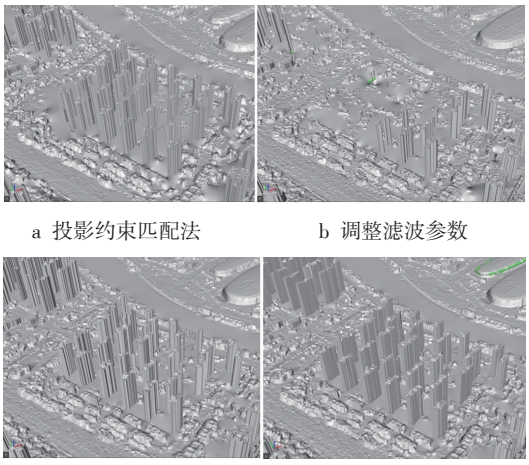
3.3 模型表达效果

3.3.1 不同生产方法表达效果

①直接使用投影约束匹配法，优化阴影区域三维模型质量以及密集建筑物之间的粘连情况，高层建筑物边缘与地面垂直，但部分低矮建筑信息缺失，如图5a所示；②调整噪点滤波参数，在道路表面抑制车辆的效果较好，水面较为完整一致，但将大多数建筑阴影作为异常值进行滤除，造成了许多房屋建筑信息损失，如图5b所示；③融入内容感知技术，弱化高程值内插而产生的模型偏差，但由于建筑以像素形态进行识别，在边缘处容易因建筑遮盖或阴影造成边界破损或不够完整，如图5c所示；④以独栋矢量数据边界为约束条件，并融入先验知识的重构Mesh三维建模方法，建筑边缘形态更为完整，同时保留了建筑顶部的细节信息，整体表现效果如图5d所示。

3.3.2 不同研究区域表达效果

1）在城市研究区三维建模表达效果的道路路面平整，对道路下穿隧道边缘表示真实，道路两侧花圃花坛等细节表示到位，路面上方拱门表示正确，但对于高层房屋由于建筑投影差造成的匹配盲区较多，建筑四周细节缺失，需要结合多视角影像进行立体恢复。



a 投影约束匹配法　　b 调整滤波参数

c 融入内容感知技术　　d 增加矢量数据约束

图5　重构Mesh三维模型方法结果对比

2）城市研究区的大型独立建筑恢复效果接近激光点云数据生产的模型效果，在矢量数据辅助下建筑边缘平滑整齐，特征点分明，异形屋顶、斜屋顶、圆顶等建筑细节恢复正确。

3）非城市研究区在没有矢量数据辅助的情况下能够较好地恢复颗粒明显的园地信息、温室大棚信息，能够准确提取加固岸、堤坝等高度信息，各种地类恢复情况。

4）对于山地林地建模效果与激光点云效果接近，整体表达更为柔和，分水线与合水线与实际情况相符，能够反映山地中的树木砍伐情况与长势情况。

3.4　生产效率对比

与传统特征点匹配的作业模式相比，本次研究采用的技术方法减少了大量的房屋、交通的特征线编辑。针对水域DEM模拟建模的方式通过采用编辑矢量数据的方式替代传统编辑栅格数据的模式，以研究区为例，针对水域范围生产效率对比情况见表1，可以看出采用本研究的生产模式能够有效提升生产效率，对于拥有高精度存量矢量数据的前提下更可以实现存量数据的“一测多用”，减少重复测绘，盘活存量数据使用价值，提升整体生产效率。

表1　水域范围生产效率对比情况表

	作业面积/km²	水域编辑面积/km²	作业方式	工作时间
城市研究区	5	1.1	传统模式	4 h
			本文方法	1 h
非城市研究区	3	0.3	传统模式	1 h
			本文方法	30 min

4　结　语

本次研究主要基于北京三号卫星影像数据作为主数据源，挖掘矢量数据中的先验知识，通过Mesh三维重构，结合矢量数据优化，并使用机载激光雷达点云数据作为验证数据集，了解立体卫星影像数据生产DSM的精度情况。本研究得出的数据精度和技术指标等相关数据，为基于立体卫星影像数据生产DSM提供了参考，可应用于标准DSM产品的补充生产更新以及大范围三维场景快速浏览、农林监测、违章搭建监测等多个领域。

参考文献

[1] 李代云,彭珍珠,陈勇,等. 高分立体卫星影像建设基础三维模型研究[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(2):91-94

[2] 王瑞幺,严荣华,肖建华,等. 国家新型基础测绘体系建设试点的进展与思考[J]. 地理空间信息,2023,21(7):1-6

[3] 岳庆兴,高小明,唐新明. 基于半全局优化的资源三号卫星影像DSM提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2016,41(10):1 279-1 285

[4] 刘翔,唐新明,祝小勇,等. 资源三号卫星DSM精度评估[J]. 北京测绘,2023,37(3):317-324

[5] 余轩博. 高分七号卫星在基础性地理国情监测中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(8):176-179

[6] 史晓明,洪亮,徐素薇,等. 基于IKONOS卫星立体像对的1∶10 000地形图测绘应用[J]. 地理空间信息,2012,10(6):115-118

[7] 马保东,吴立新,许志华. 利用资源三号测绘卫星立体像对提取DEM及精度评价:以神东矿区大柳塔矿为例[J]. 测绘通报,2013(11):68-70

[8] 赵文普,刘钰,吴晓春,等. 利用高分七号卫星开展1∶10 000立体测图精度验证[J]. 测绘科学,2022,47(1):165-171

[9] 陈庆华,陈小艺. 基于多角度卫星影像制作DSM,DEM数字产品的方法研究[J]. 测绘与空间地理信息,2015,38(8):168-169

[10] 程向. 基于GF-7卫星数据的建筑物三维建模方法研究[D]. 北京:北京建筑大学,2023

[11] 张龙其,杜帅,熊旭平,等. 多源数据城区精细DEM建模方法[J]. 测绘通报,2023(6):124-128

[12] 张谷生,王慧静. 高分七号卫星影像自动化区域网平差[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(7):103-106

[13] 张良培,何江,杨倩倩,等. 数据驱动的多源遥感信息融合研究进展[J]. 测绘学报,2022,65(7):51

[14] 陶鹏杰. 联合几何与辐射成像模型的三维表面重建与优化[D]. 武汉:武汉大学,2016

[15] 李小玲. 基于雷达点云的小比例尺DSM生产关键技术研究[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(8):197-200

[16] 陈建城. 运用LiDAR点云快速精确生成带状水域DEM的方法[J]. 山西建筑,2023,49(18):178-181