

doi: 10.6046/zrzyyg.2023118

引用格式: 王宗伟, 陆敏燕, 范仪琳. 联合激光点云与立体卫星影像的露滩地区精准测绘[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 135-141. (Wang Z W, Lu M Y, Fan Y L. Precise mapping of open beach areas by combining laser point clouds and stereo optical satellite imagery[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(4): 135-141)

联合激光点云与立体卫星影像的露滩地区精准测绘

王宗伟^{1,2}, 陆敏燕^{1,2}, 范仪琳^{1,2}

(1. 江苏省测绘工程院, 南京 210013; 2. 自然资源部国土卫星遥感应用重点实验室, 南京 210013)

摘要: 为解决露滩地区立体卫星影像精准测绘的难题, 利用立体光学卫星影像与激光雷达 (light detection and ranging, LiDAR) 点云数据在几何定位方面的互补特性, 提出了以高精度 LiDAR 点云数据作为广义控制的立体光学卫星影像高精度测绘方法。首先, 对 LiDAR 深度图与光学卫星影像进行匹配, 提取同名点对作为广义控制; 然后, 将影像和控制一起作为输入进行平差, 完成影像准确几何定位; 最后, 以 LiDAR 点云数据作为引导, 结合多基线、多基元的匹配算法和 GRM (geomorphologic refined matching) 算法, 自动提取露滩地区高精度数字表面模型 (digital surface model, DSM)。研究表明, 综合利用激光点云和立体卫星影像数据, 运用摄影测量技术, 能够快速准确地生产露滩地区高精度的地形图, 对于露滩地形精准测绘具有一定的指导意义。

关键词: 立体光学卫星; LiDAR 点云; 几何定位; DSM 自动提取

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A

文章编号: 2097-034X(2024)04-0135-07

0 引言

露滩受潮汐作用影响, 时而出露时而淹没, 其特殊的地理位置使得露滩地区测量十分困难, 不仅人工直接测量成本高, 而且比较耗时, 更新难度大。光学卫星影像作为一种丰富的影像资源, 被广泛应用于构建地形测绘, 相对于纯野外测量、激光测高技术探测露滩地形, 立体像对就成了比较好的数据资源, 但受其定位精度的影响, 无控条件下光学卫星影像立体匹配生成的数字表面模型 (digital surface model, DSM) 的高程误差高达 20 m, 难以满足实际应用的需求^[1]。综合利用多类型传感器数据在几何定位精度方面的互补性, 是实现光学卫星影像高精度几何定位非常具有潜力的解决方案, 对于促进快速准确地开展露滩地区图测绘工作大有裨益^[2-3]。

激光测距技术可以实现亚毫米级的精度, 并提供准确的距离、空间信息且不受光照和阴影的影响。因此理论上, 通过激光点云来辅助立体像对可以大幅提高定位精度, 快速准确地生产露滩地区高精度的地形图。李红帅^[4]提出一种基于激光点云和图像融合的三维重建方法, 该方法通过设置标定板以及运用角点检测算法 (Harris) 半自动化获取激光点

云和图像的对应关系, 然后基于共线方程原理实现点云和图像融合的三维重建, 实验表明, 标定结果与初值相比, 重投影误差降低了 35%, 三维重建效果明显提高; Dai 等^[5]提出一种基于图像和激光点云融合的定位算法, 通过激光雷达 (light detection and ranging, LiDAR) 点云为图像特征提供额外的深度信息, 以辅助视觉的定位, 实验结果表明, 与纯视觉定位算法相比, 移动机器人的轨迹误差降低了 52.7%, 且在不同环境下具有良好的适应性和鲁棒稳定性; Chan 等^[6]提出一种鲁棒的激光点云融合视觉图像的几何定位方法, 相比于传统的特征匹配融合算法, 该方法采用一种轨迹匹配的融合方法, 因此更具泛化性; Zhang 等^[7]提出一种基于光学影像和稀疏激光点云的三维建筑物自动重建方法, 通过光学影像确定建筑物的形状和位置信息, 其高度信息则是由激光点云确定; Zhou 等^[8]开发一种融合 LiDAR 数据和航空光学影像的三维建筑重建方法, 该方法在房屋检测以及描述的过程中都使用了融合 LiDAR 数据来提高三维重建精度; Abayowa 等^[9]提出融合光学航空影像和 LiDAR 点云以生成城市模型, 该方法是通过光学航空影像生成密集点云并配准至 LiDAR 点云来实现数据融合的目的, 从而提高其模型的结构以及光学信息; Su 等^[10]提出一种通过集成

收稿日期: 2023-05-09; 修订日期: 2023-09-18

基金项目: 江苏省自然资源发展专项资金 (海洋科技创新) 项目 “江苏自然岸线识别与浅水地形探测技术研究” (编号: JSZRHYKJ202002) 资助。

第一作者: 王宗伟 (1988-), 男, 研究生, 高级工程师, 主要从事卫星遥感应用研究。Email: wangzongwei328@163.com。

激光点云和光学图像对植被山区的数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 进行校正的方法,该方法能够显著提高植被山地 SRTM DEM 的精度,并将其与激光点云生成的 DEM 的平均差从 12.15 m 减少到-0.82 m,标准差下降了 2 m。以上研究表明,通过融合激光点云以及光学卫星图像数据能够提高其模型精度,但受两者成像机理差异的影响,导致 LiDAR 深度图与光学卫星影像间存在严重的非线性辐射畸变和几何畸变,建立激光点云和光学影像的对应关系是非常困难的,因此以上方法均采用间接手段(手工或者依靠数据的位置先验信息)确定激光点云和光学影像的对应关系。这也造成以上方法仅适用于简单的三维重建,而且对精度提升也有限。近些年,针对多模态图像匹配进行广泛研究,并提出了一些鲁棒的匹配算法,例如: RIFT^[11] (rotational invariant feature transform), HOPC^[12] (histogram of orientated phase congruency), CFOG^[13] (channel features of orientated gradients), AWOG^[14] (angu-

lar weighted orientated gradients)等算法。

基于此,本文提出一种基于激光点云辅助的立体像对露滩地形测绘方法。该方法首先利用多模态图像匹配算法自动获取激光点云与光学影像的连接点,并基于激光点云的 DEM 信息生成控制点信息来进行卫星影像准确的几何定位;其次,以 LiDAR 稀疏点作为引导,利用多基线、多匹配基元的影像密集匹配,并利用最小二乘匹配方法进行优化,生成高精度的 DSM,完成露滩地区地形图测绘。

1 研究方法

本文提出一种联合 LiDAR 深度图与立体光学卫星影像数据的露滩地形精准测绘方法,主要包括 LiDAR 深度图与立体光学卫星影像前后视影像的精准匹配、准确的几何定位,以及 LiDAR 深度数据辅助的 DSM 自动提取等步骤,其实现流程如图 1 所示。

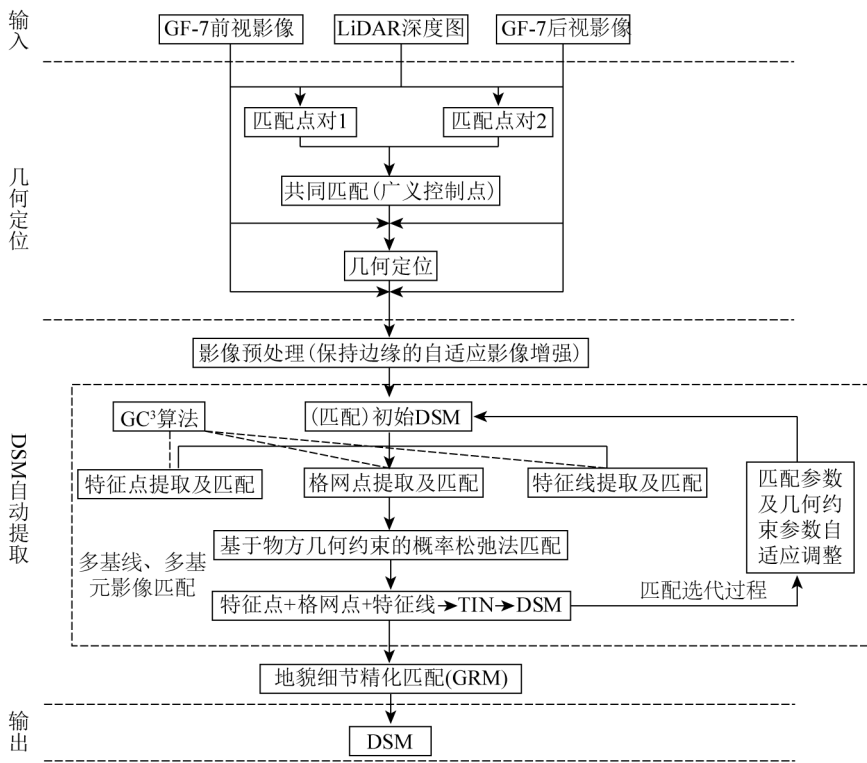


图 1 本文技术流程

Fig.1 Technical flowchart of this study

具体流程如下: ①利用对多源遥感影像鲁棒的 AWOG 算法对 LiDAR 深度图分别与立体光学卫星前视影像、后视影像进行匹配,得到对应的正确匹配点对。为了处理大影像对计算机配置要求高的问题,将影像进行分块处理; ②以 LiDAR 深度图上在 2 组匹配中的共同点作为桥梁,找到 3 幅影像上的同名点,将得到的同名点作为广义控制点,输入成熟

的摄影测量软件 PixelGrid,进行平差处理,得到卫星影像的几何定位结果,输出定位参数; ③对影像进行自适应预处理,生成多级金字塔影像结构,并提取 3 类不同的匹配基元,即特征点、特征线和格网点; ④在原始分辨率影像上的匹配结果从多级金字塔影像结构的低分辨率影像开始进行由粗到细的逐级提取和匹配,匹配过程中利用经典的 GC³算法^[15],并

辅以 LiDAR 深度数据作为引导,控制匹配点的搜索范围,提高匹配精度;⑤在各级金字塔影像配准结束后,所有的匹配特征形成不规则三角网(triangulated irregular network,TIN)结构的 DSM 数据,该 DSM 又作为高一级金字塔影像匹配的匹配初值和进行匹配参数自适应调整的条件进入到较高分辨率影像中进行配准,以此不断进行迭代得到更优的结果;⑥采用基于几何约束的多影像最小二乘匹配算法^[16]对多基线、多基元影像匹配获得的初步匹配结果进行精化匹配(geomorphologic refined matching, GRM),提高匹配结果的精度,并定位和剔除较小的匹配粗差。GRM 对保持微细地貌,如小的冲沟和线状特征等,具有重要的意义。最终的 DSM 则在融合所有匹配特征基元的基础上内插形成。

2 研究区概况及数据源

本文选择江苏省南通市如东县腰沙地区作为研究区,具体位置如图 2 所示,目标区地物覆盖多样,包括海域、浅滩区域、建筑物和山地区域等,地貌类型比较丰富。为验证本文方法的有效性,选择了立体测绘卫星 GF-7 影像以及同一区域的 LiDAR 点

云作为数据源,分别进行了激光点云辅助的卫星影像几何定位以及激光点云辅助的卫星影像 DSM 自动提取 2 组实验。通过对比分析,充分挖掘激光点云数据在几何定位和 DSM 自动提取中的有利作用。

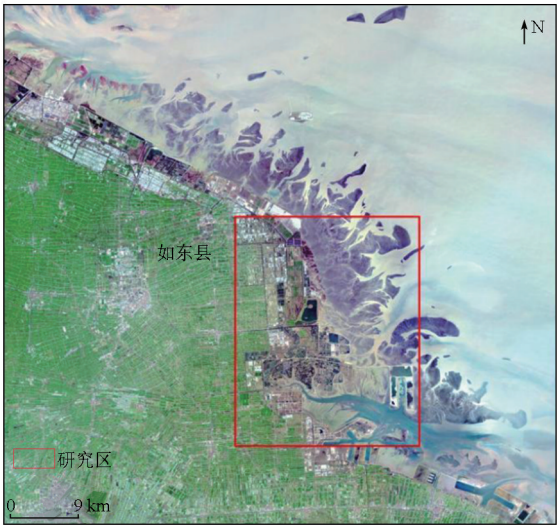


图 2 研究区位置
Fig.2 Location of the research area

立体卫星影像数据选用 2022 年 4 月 21 日 11:00:36 获取的一景 GF-7 立体卫星影像像对,其缩略图如图 3 所示。

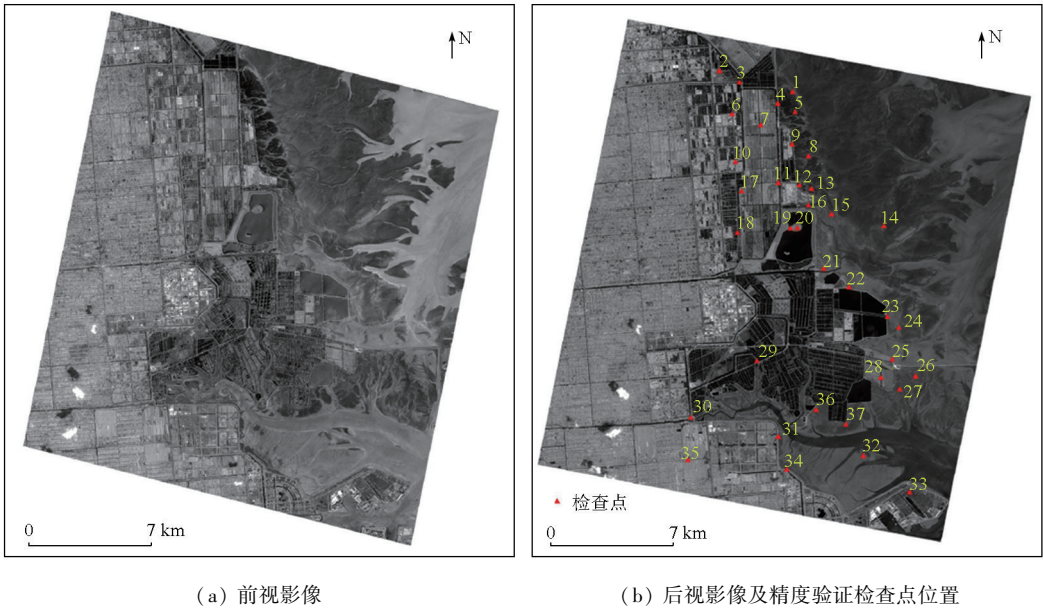


图 3 立体卫星影像对
Fig.3 Stereoscopic satellite image pairs

激光点云数据选择的是江苏省“十三五”期间的沿海滩涂基础测绘航飞数据。用于本次实验的成果数据有 2 组:一组是用于控制以及精度验证的密集激光点云,平均点云间隔为 0.1 个/m²,其成果为

1:10 000 标准分幅 LAS 点云数据;另一组用于辅助立体像对匹配的稀疏激光点云,为基础测绘成果数据,点云间隔约为 300 m。2 组点云数据如图 4 所示。

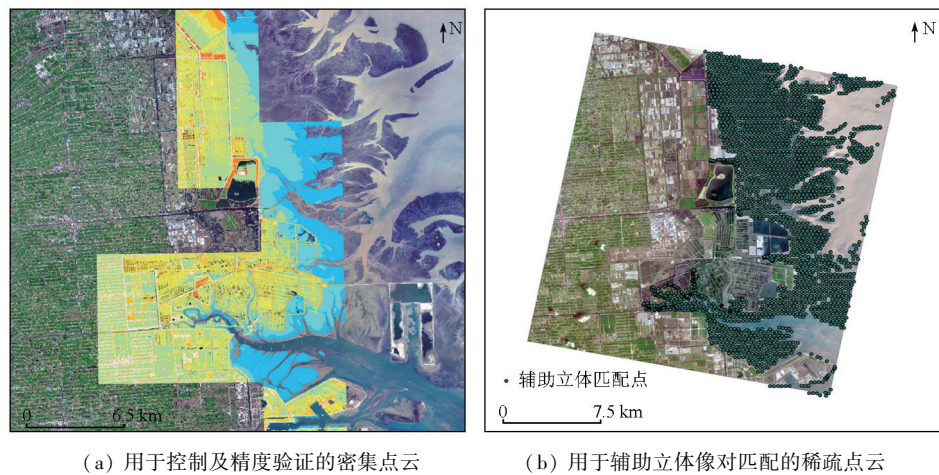


图 4 三维激光点云数据

Fig.4 3D laser point cloud data

3 结果与分析

3.1 激光点云辅助的卫星影像几何定位

将 LiDAR 深度图分别与 GF-7 前视影像和后

视影像进行匹配,将得到的共同匹配点作为广义控制点进行平差,得到卫星影像的几何定位结果。图 5 给出了在本文实验数据上获得的 90 个同名点,这些同名点对分布相对均匀。

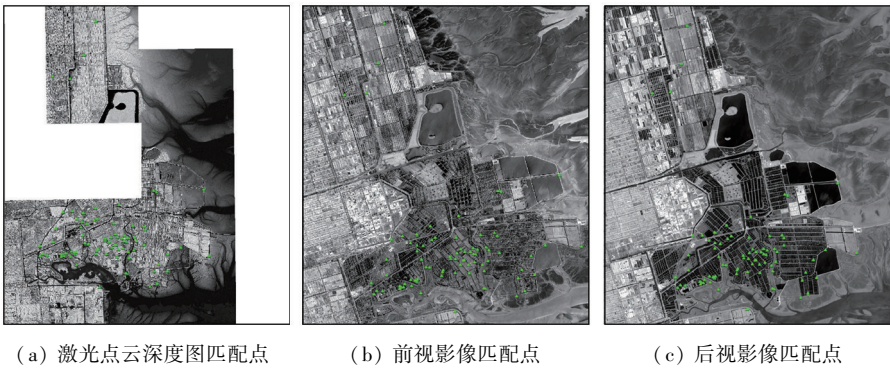


图 5 LiDAR 与 GF-7 立体卫星影像自动提取像控点点位分布

Fig.5 Automatic extraction of image control point distribution maps from LiDAR and GF-7 stereo satellite images

将得到的同名点对作为几何定位的广义控制点输入现有的卫星影像区域网平差软件 PixelGrid 进行卫星影像连接点提取,并进行控制点信息的区域网平差处理。平差结果显示,控制点均方根误差 X 方向为 0.939 m, Y 方向为 1.253 m, 高程 Z 方向误差为 0.598 m。表明几何定位精度较高,实现了 LiDAR

点云的辅助卫星影像高精度定位。

为了进一步验证几何定位结果,在几何定位的基础上进行密集匹配生成 DSM(有控),并将其与直接对影像进行自由网平差、进行密集匹配生成的 DSM(无控)的高程精度进行对比。检查点位置分布如图 3(b)所示,具体精度对比结果如图 6 所示。

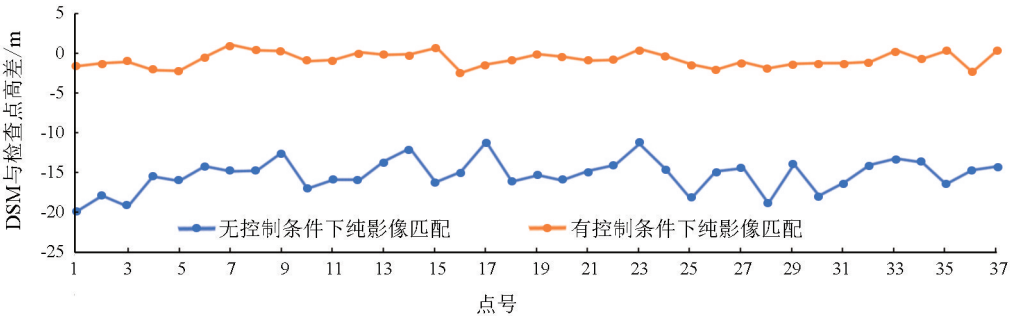


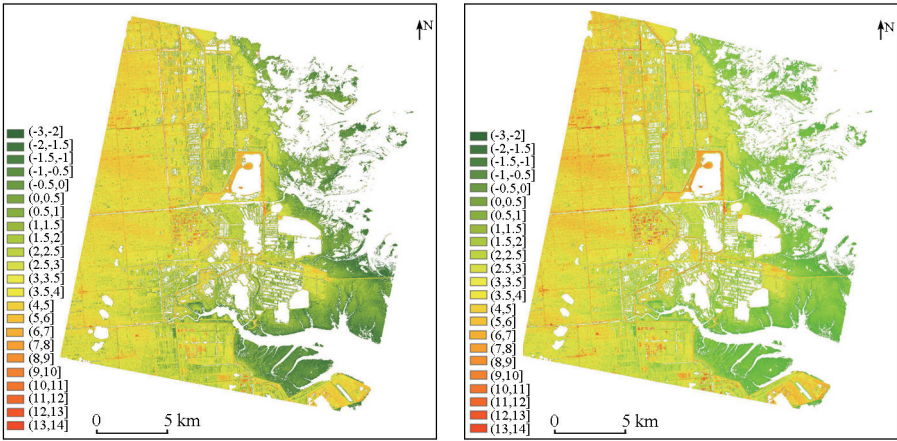
图 6 无控制与有控制条件下纯影像匹配精度对比

Fig.6 Comparison of pure image matching accuracy under uncontrolled and controlled conditions

在无控制的纯自由网影像匹配 DSM 与检查点的高程差比较中,经统计,所有点的高程的中误差为 15.405 m,平均误差为-15.270 m。在有 LiDAR 深度图控制条件下纯影像匹配 DSM 与检查点高程差比较中,37 个点的高程中误差为 0.914 m。通过对比发现,可以在无野外实测控制点条件下,通过激光点云深度图作为控制源对卫星影像进行控制定位,其他条件相同的情况下,可以显著提高卫星影像立体匹配生成 DSM 的高程精度。

3.2 激光点云辅助的卫星影像 DSM 提取

利用卫星影像在 LiDAR 深度图控制条件下完成空中三角测量后,为评估激光点云辅助对浅滩区域 DSM 提取的精度,采用滩涂区域稀疏激光点云数据引导 GF-7 立体像对的密集匹配过程,生成 1 m 空间分辨率的 DSM,与没有辅助数据生成的 DSM 结果进行了定性和定量的精度对比分析,结果如图 7 所示。



(a) GF-7 立体像对直接匹配的 DSM 效果 (b) 激光点云辅助的 GF-7 立体像对匹配的 DSM 效果

图 7 卫星影像几何定位后激光点云辅助匹配与直接匹配生成的 DSM 效果对比

Fig.7 Comparison of DSM effect generated by laser point cloud aided matching and direct matching after geometric positioning of satellite imagery

从图 7 中可以看出,利用滩涂区域激光点云辅助的 DSM 匹配可以较好地解决水域或附近大的误匹配,但对于无纹理区域的细节匹配帮助较小,主要还是因为光学影像匹配 DSM 需要依赖卫星影像本身丰富的纹理信息才能正确匹配同名点。

以看出无激光点云辅助的纯影像匹配的 DSM 的高程中误差为 0.914 m,激光点云辅助影像匹配 DSM 的高程中误差为 0.120 m,平均误差为-0.082 m。从以上 2 组对比实验中可以看出,利用激光点云辅助影像密集匹配的 DSM 高程精度有明显提升。

图 8 进一步给出了检查点的定量对比结果,可

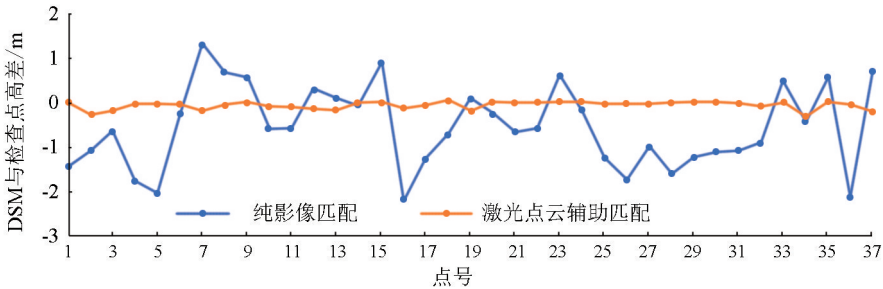


图 8 有控条件下纯影像匹配与激光点云辅助匹配精度对比

Fig.8 Comparison of accuracy between pure image matching and laser point cloud assisted matching under controlled conditions

4 结论

本文提出的一种联合 LiDAR 点云和光学立体影像的露滩地区精准测绘方法,使用基于多模态匹配算法在光学立体卫星影像和 LiDAR 深度图间获

得的匹配点对作为广义控制点,完成影像自动几何定位,并以 LiDAR 深度点引导密集匹配过程,提取露滩地区高精度 DSM。实验结果表明,本文方法可以显著提高立体卫星几何定位精度,平面精度达到米级,高程精度达到亚米级,利用激光点云辅助影像密集匹配的 DSM 高程精度也有大幅度提高,能够实

现露滩地形的精准测绘,同时,对于其他陆地区域的测绘生产更新工作也具有较高的指导意义。

该研究还存在需要改进和继续研究的方面,用于辅助立体像对匹配的稀疏点云对附近滩涂区域的影像匹配有较好的效果,但对距离较远的区域不能明显提高影像匹配的可靠性,在今后还需要继续加以研究。

参考文献 (References) :

[1] Zhu Q, Jiang W, Zhu Y, et al. Geometric accuracy improvement method for high-resolution optical satellite remote sensing imagery combining multi-temporal SAR imagery and GLAS data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3):568.

[2] 付琨,孙显,仇晓兰,等.遥感大数据条件下多星一体化处理与分析[J].遥感学报,2021,25(3):691-707.

Fu K, Sun X, Qiu X L, et al. Multi-satellite integrated processing and analysis method under remote sensing big data[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(3):691-707.

[3] Tang S, Wu B, Zhu Q. Combined adjustment of multi-resolution satellite imagery for improved geo-positioning accuracy[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 114:125-136.

[4] 李红帅.基于激光点云图像融合的三维重建方法与应用[D].桂林:桂林电子科技大学,2021.

Li H S. Three-dimensional reconstruction method and application based on laser point cloud image fusion[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2021.

[5] Dai J, Li D F, Li Y Q, et al. Mobile robot localization and mapping algorithm based on the fusion of image and laser point cloud[J]. Sensors, 2022, 22(11):4114.

[6] Chan S H, Wu P T, Fu L C. Robust 2D indoor localization through laser SLAM and visual SLAM fusion[C]//2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Miyazaki, Japan. IEEE, 2018:1263-1268.

[7] Zhang L, Wang G, Sun W. Automatic extraction of building geometries based on centroid clustering and contour analysis on oblique images taken by unmanned aerial vehicles[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2022, 36(3):453-475.

[8] Zhou G, Zhou X. Seamless fusion of LiDAR and aerial imagery for

building extraction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(11):7393-7407.

[9] Abayowa B O, Yilmaz A, Hardie R C. Automatic registration of optical aerial imagery to a LiDAR point cloud for generation of city models[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 106:68-81.

[10] Su Y J, Guo Q H, Ma Q, et al. SRTM DEM correction in vegetated mountain areas through the integration of spaceborne LiDAR, airborne LiDAR, and optical imagery[J]. Remote Sensing, 2015, 7(9):11202-11225.

[11] Li J Y, Hu Q W, Ai M Y. RIFT: Multi-modal image matching based on radiation-variation insensitive feature transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2019:3296-3310.

[12] Ye Y, Shan J, Bruzzone L, et al. Robust registration of multimodal remote sensing images based on structural similarity[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(5):2941-2958.

[13] Ye Y X, Bruzzone L, Shan J, et al. Fast and robust matching for multimodal remote sensing image registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(11):9059-9070.

[14] 樊仲黎,张力,王庆栋,等. SAR影像和光学影像梯度方向加权的快速匹配方法[J]. 测绘学报, 2021, 50(10):1390-1403.

Fan Z L, Zhang L, Wang Q D, et al. A fast matching method of SAR and optical images using angular weighted orientated gradients[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(10):1390-1403.

[15] 张力,刘玉轩,孙洋杰,等. 数字航空摄影三维重建理论与技术发展综述[J]. 测绘学报, 2022, 51(7):1437-1457.

Zhang L, Liu Y X, Sun Y J, et al. A review of developments in the theory and technology of three-dimensional reconstruction in digital aerial photogrammetry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7):1437-1457.

[16] 张力,艾海滨,许彪,等. 基于多视影像匹配模型的倾斜航空影像自动连接点提取及区域网平差方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(5):554-564.

Zhang L, Ai H B, Xu B, et al. Automatic tie-point extraction based on multiple-image matching and bundle adjustment of large block of oblique aerial images[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(5):554-564.

Precise mapping of open beach areas by combining laser point clouds and stereo optical satellite imagery

WANG Zongwei^{1,2}, LU Minyan^{1,2}, FAN Yilin^{1,2}

(1. Jiangsu Province Surveying and Mapping Engineering Institute, Nanjing 210013, China; 2. Key Laboratory of Land Satellite Remote Sensing Application, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210013, China)

Abstract: This study aims to overcome the challenges of precise mapping of open beach areas using stereo satellite imagery. Based on the complementary characteristics of stereo optical satellite imagery and light detection and ranging (LiDAR) point cloud data in geometric positioning, this study developed a high-precision mapping method

that employed high-precision LiDAR point cloud data for generalized control. First, the LiDAR depth map was matched with the optical satellite images to extract corresponding point pairs for generalized control. Then, the images and control points were used as inputs for adjustment to achieve an accurate geometric positioning of the images. Finally, guided by LiDAR point cloud data and in combination with multi-baseline and multi-primitive matching algorithms and the geomorphologic refined matching (GRM) algorithm, a high-precision digital surface model (DSM) for open beach areas was automatically extracted. The results of this study indicate that the combined use of laser point clouds and stereo satellite imagery, along with photogrammetric technology, allows for the quick and accurate preparation of high-precision topographic maps of open beach areas. This study provides valuable guidance for the precise mapping of open beach areas.

Keywords: stereo optical satellite; LiDAR point cloud; geometric positioning; DSM automatic extraction

(责任编辑: 陈 庆)