

学号：	25820182009
论文密级：	公开
中图分类号：	P237
学科分类号：	420.20
学校代码：	91037

战略支援部队信息工程大学

专业学位论文

基于 LiDAR 的海岸线提取及性质识别技术

论文作者：	姜怀刚
指导教师：	董广军 副教授
申请学位：	工学硕士
专业领域：	测绘工程
研究方向：	战场环境遥感监测
论文提交日期：	2020年10月16日
论文答辩日期：	2020年12月22日

战略支援部队信息工程大学

二〇二〇年十月

**A Dissertation Submitted to
PLA Strategic Support Force Information Engineering University
for the Degree of Master of Engineering**

Lidar - Based Coastline Extraction and Nature Recognition

Candidate: Jiang Huaigang

Supervisor: A.P. Dong Guangjun

Oct. 2020

摘 要

海岸线作为陆部和海域的分界线，是地形图和海图上最重要的地形基础要素之一。因此，全面、高效、准确地测定海岸线位置、性质及其动态变化，对进行经济建设和国防建设具有十分重大的现实意义。激光雷达测量（Light Detection and Ranging, LiDAR）技术是继 GPS 技术以来在测绘领域内的又一场技术革命，它的出现为海岸线测量带来了新的研究热点，其与人工实地测量和摄影测量等技术优势互补。本文在总结当前海岸线提取的各种方法和技术的基础上，重点围绕基于 LiDAR 点云数据开展海岸线提取及性质识别技术方法研究。主要工作和创新点如下：

1. 对 LiDAR 技术与其他遥感技术用于海岸线测量进行系统对比分析，并从平台、探测机制、波段等方面对 LiDAR 技术用于我国海岸线测量进行了优势对比分析，论述了在我国开展 LiDAR 技术测量海岸线的可行性与必要性。

2. 针对点云数据海岸线提取中存在的精度损失较大、平缓岸滩处较为抖动等问题，提出了一种粗细格网多约束条件下的海岸线提取方法。该方法以平均大潮高潮面（Mean High Water Springs, MHWS）的高程作为分割阈值，将点云数据进行海陆划分，对陆地部分点云进行粗细格网划分，并运用边缘提取、膨胀腐蚀、孔洞填充及连通区域检测组合处理，实现海岸线提取。通过三个不同地区的海岸线提取实验，验证了粗细格网多约束下海岸线提取方法的可靠性与有效性。

3. 针对当前国内外海岸线提取研究过于单纯聚焦于位置线的提取，并未对其性质信息进行确认的问题，本文提出了一种海岸线属性性质自动识别的方法，即利用随机森林算法先对构成海岸带地形的点云进行定性分类，在此基础上利用文中提出的粗细格网多约束下海岸线提取方法获得带类型标签的海岸线碎部点数据，并结合《中国航海图编绘规范》进行类型属性整合。通过与人工标记性质的海岸线进行对比分析，该方法能够准确识别不同性质的海岸线，验证了该思路的可行性。

关键词：海岸线；LiDAR；粗细格网；海岸线提取；性质识别；随机森林

Abstract

The coastline, as the dividing line between land and sea, is one of the most important topographical basic elements on topographic and sea charts. Therefore, a comprehensive, efficient and accurate determination of the location, nature and dynamic changes of the coastline is of great practical significance for economic and national defense construction. LiDAR (Light Detection and Ranging, LiDAR) technology is another technological revolution in the field of surveying and mapping since GPS technology. Its emergence has brought new research hotspots to coastline surveying. It is compatible with artificial field surveys and photogrammetry. Complementary technical advantages. Based on summarizing the various methods and technologies of current coastline extraction, this paper focuses on the research of coastline extraction and property recognition technology based on LiDAR point cloud data. The main work and innovation are as follows:

1. A systematic comparative analysis of LiDAR technology and other remote sensing technologies for coastline surveying, and a comparative analysis of the advantages of LiDAR technology for coastline surveying in my country in terms of platform, detection mechanism, waveband, etc., and discussing the development of LiDAR technology for coastline surveying in my country Feasibility and necessity.

2. Aiming at the problems of large loss of accuracy and jitter in flat beaches in coastline extraction from point cloud data, a coastline extraction method with multiple constraints of coarse and fine grids is proposed. This method uses the Mean High Water Springs (MHWS) as the segmentation threshold, divides the point cloud data into sea and land, and divides the part of the land into a coarse and fine grid, and uses edge extraction, expansion and corrosion, and hole filling And connected area detection combined processing to achieve coastline extraction. Through three coastline extraction experiments in different regions, the reliability and effectiveness of the coastline extraction method under multiple constraints of coarse and fine grids are verified.

3. In view of the problem that the current researches on coastline extraction at home and abroad are too purely focused on the extraction of location lines and have not confirmed their nature information, this paper proposes a method for automatically identifying the nature of coastlines, that is, the random forest algorithm is used to first determine the coastal zone. The topographic point cloud is qualitatively classified. On this basis, the coastline extraction method under multiple constraints of the coarse and fine grids proposed in the article is used to obtain the point data of the coastline fragments with attributes, and the attribute integration is carried out in

combination with the "Chinese Navigational Chart Compilation Specification". Through comparative analysis with artificially marked coastlines, this method can accurately identify coastlines of different natures, verifying the feasibility of this idea.

Key words: Coastline, lidar, Coarse and fine grid, Coastline Extraction, nature recognition, Random forest

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 海岸线的定义及性质.....	1
1.2.1 我国海岸线的定义.....	1
1.2.2 海岸线性质.....	2
1.3 海岸线测量的研究进展.....	3
1.3.1 人工实地测量法.....	4
1.3.2 遥感影像提取海岸线研究现状.....	5
1.3.3 LiDAR 技术提取海岸线研究现状.....	6
1.3.4 海岸线性质识别的研究进展.....	9
1.4 本文的研究内容及组织结构.....	10
1.4.1 研究内容.....	10
1.4.2 论文组织结构.....	11
第二章 LiDAR 技术面向海岸线测量的适用性分析.....	13
2.1 LiDAR 技术与其他遥感技术用于海岸线测量的技术对比分析.....	13
2.1.1 LiDAR 技术与 SAR/InSAR 技术对比.....	13
2.1.2 LiDAR 技术与可见光影像摄影测量技术对比.....	13
2.1.3 对比结论.....	14
2.2 不同类型 LiDAR 系统应用于海岸线测量的技术特性分析.....	15
2.2.1 不同平台 LiDAR 系统特点对比.....	15
2.2.2 不同波段的 LiDAR 系统.....	16
2.2.3 不同探测体制的 LiDAR 系统.....	17
2.2.4 对比结论.....	19
2.3 本章小结.....	20
第三章 粗细格网多约束下海岸线提取方法.....	21
3.1 海岸线特性分析.....	21
3.2 粗细格网多约束下海岸线碎部点提取方法.....	21
3.2.1 数据预处理.....	22
3.2.2 粗格网下的海岸线粗提取.....	23
3.2.3 细格网下的海岸线碎部点提取.....	26

3.3	碎部点坐标数据平滑并生成海岸线.....	28
3.4	实验与分析.....	29
3.4.1	沙质海岸实验.....	29
3.4.2	复合海岸实验.....	34
3.4.3	光子计数体制 LiDAR 点云数据实验.....	39
3.5	本章小结.....	42
第四章	基于随机森林算法的海岸线性质识别方法.....	44
4.1	基于随机森林算法的点云类型识别.....	45
4.1.1	特征提取.....	45
4.1.2	随机森林算法.....	48
4.1.3	性质精度评价.....	48
4.2	海岸线碎部点类型属性整合.....	49
4.2.1	海岸线碎部点类型属性整合原理.....	49
4.2.2	海岸线性质精度评价方法.....	50
4.3	实验与分析.....	50
4.3.1	人工加固及沙质海岸实验.....	50
4.3.2	复合海岸实验.....	58
4.4	本章小结.....	64
第五章	总结与展望.....	65
5.1	总结.....	65
5.2	后续的工作及展望.....	65
致 谢	67
参考文献	68
作者简介	73

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

21 世纪被人们称为海洋的世纪,我国管辖的海域面积约 300 万平方公里,海洋是我国国土资源的重要组成部分。连接海洋和陆地的是蜿蜒曲折、日新月异的海岸线,我国海岸线总长约 35 800 多公里(含港澳台),其中,大陆海岸线约 19 000 多公里,岛屿海岸线约 16 700 多公里^{[1][2]}。海岸线是海图和地形图上最重要地形基础要素之一^[3],但海岸线受海陆相互作用、地质运动、气候变化、生物作用等自然因素及围海造陆、海水养殖等人为因素的影响,时刻处于复杂变化过程中,具有时空高度动态的特性,因此,全面、高效、准确地测定海岸线位置、性质及其动态变化意义重大。

传统人工实地测量法曾为我国全面、准确测量海岸线发挥了重要作用,但存在时限性差、分布散、人工量大等问题。航天航空遥感技术作为经典的测量手段,具有多时相、高分辨率、高光谱、多平台等特征^[4],可实现大范围的对海岸带进行宏观观测,为海洋环境研究提供重要数据源^[5]。国内外利用遥感光学成像提取海岸线的研究大多基于卫星成像的瞬时水边线提取,这条瞬时水边线受自然环境的影响往往不具有水平性,并非真正意义上的海岸线,且该方法所提取出的海岸线严重受限于影像数据的分辨率,目前主要应用于海洋调查。

激光雷达测量(Light Detection and Ranging, LiDAR)技术自出现以来便飞速发展,其速度快、抗干扰能力强、精度高的特点能为海岸线的精准测量带来新突破。LiDAR 技术能够全天候在目标范围内直接采集海量的三维坐标数据点,形成点云,其不受阴影、天气影响,且能够实现无控测量,尤其是对戈壁荒漠、无人海岛、悬崖峭壁、核污染区以及其他人类无法到达的危险地区的数据采集, LiDAR 系统搭载不同的平台之后都可以完成^[4]。

综上所述,本次研究以海岸线为对象,开展了 LiDAR 技术用于我国海岸线测量的可行性与必要性分析,针对当前利用 LiDAR 技术提取海岸线方面存在方法较多,但多局限于位置线的提取而对海岸线性质的自动识别的研究较少等诸多问题,有必要对海岸线的提取方法及性质识别技术进行深入研究,以为我国全面、高效、准确地测定海岸线的位置、性质及其动态变化提供技术支撑。

1.2 海岸线的定义及性质

1.2.1 我国海岸线的定义

由于海岸线的位置存在动态性及易受人为因素和行政管理因素的影响,长期以来,国内外对海岸线的定义及测量方法存在着不同的描述,存在着潮汐基准面、痕迹线及海滨植物生长线等定义,该现状轻则会导致相关测绘产品的差错或不协调,重则造成国家领土的

管理混乱，因此有必要对海岸线定义及测量方法进行科学的定位及描述^[6]。

我国对海岸线的定义及测量方法有明确的规定，国家标准《海洋学术语—海洋地质学》（GB/T 18190-2000）^[7]将海岸线定义为“在我国系指多年大潮平均高潮位时海陆分界线”；国家标准《海道测量规范》（GB 12327-1998）^[8]中明确规定“海岸线以平均大潮高潮时所形成的实际痕迹进行测绘”。许家琨等^[9]认为，任何部门都必须按照国家标准测量海岸线，该观点有利于统一海岸线定义及测量方法，但对于新技术的应用及提高海岸线测量效率是不利的。赵明才等^[10]指出，国家标准规定的方法有利于人工实地快速勘测，但其也指出此方法适用于较小比例的测图需求，当应用于大比例尺测图时应注意痕迹线与平均大潮高潮面的差异。王长海等^[11]认为，平均大潮高潮面在实际中不易观测，因此采用近似测量法，即痕迹线测量法，测得的并非真正海岸线。滕惠忠等^[12]认为相关规范颁布多年，部分测量方法和测量设备已经不能满足如今的测量需求。暴景阳等^[13]分析了海岸线定义的局限性，并对平均大潮高潮面定义进行了补充完善，以扩大平均大潮高潮位概念在我国的适应范围。

综上所述，当前很多学者也认识到了痕迹线作为海岸线存在的诸多问题，因此海岸线的测量方法渐从由人为主观判断向客观的科学推算转变，即由人为可视的痕迹线转向采用平均大潮高潮面来测量海岸线，同时对海岸线定义及测量方法认知的变化也为引进新设备新技术及提高海岸线的测量效率创造了有利条件。

1.2.2 海岸线性质

我国海岸线漫长，在实际工作中可将海岸线性质进行三级分类：一级分类为大陆海岸线、海岛海岸线；根据海岸线的自然属性可将其二级分类为自然海岸线、人工海岸线和河口岸线；将自然岸线进行三级分类为基岩海岸线、沙质海岸线、淤泥质海岸线^{[14][15]}。

（1）人工海岸线

主要为人类从事生产建设而修建的拦海堤岸，如图 1-1（a）所示，人工海岸线外形规整，质地坚硬，其作用是为了防止海水入侵，因此人工海岸线的位置相对固定，一般不会因为自然因素而产生变化。

（2）自然海岸线

（a）基岩海岸线

由轮廓分明、质地坚硬岩石构成，如图 1-1（b）所示，是自然岸线中最主要的海岸线性质，坡度较大常与陆地上的山地丘陵相连接，地形破碎陡峭，因此基岩海岸线十分曲折。基岩海岸难以开发利用，被工农业利用的机率较小，同时具有较好的自然风光，故基岩海岸很难被人工改造或被海水侵蚀，其位置相对比较固定，一般不会发生变化。基岩海岸线沿海各省份均有分布，其中福建的基岩海岸线长度最长^[16]。

（b）沙质海岸线

沙质海岸线位于沙质海岸上，主要由沙、砾石和贝壳沙构成，如图 1-1（c）所示。沙质海岸往往坡度相对较小，因其具有很高的观光旅游价值，被围垦开发的机率相对也比较

小。沙质海岸线因海陆的相互作用及河流泥沙冲积而成，因此，主要分布于黄河、珠江等河流入海口周边以及海湾区域。

(c) 淤泥质海岸线

淤泥质海岸由淤泥和粉沙构成，主要由河流泥沙冲积和潮汐作用形成，如图 1-1 (d) 所示。主要分布于山东、福建、广东和广西等省份。由于淤泥质海岸多被大面积淤泥质滩涂覆盖，且其坡度极为平缓不易进入，目前来说对淤泥质海岸线的测量是一个难点^[17]。

(3) 河口岸线

河口岸线主要分布在河流入海口，如图 1-1 (e) 所示，其变化主要受河流和潮汐的影响，经常发生发生淤进、蚀退等现象，主要分布于辽宁、山东和广东等省份^[1]。



(a) 人工海岸线^[18]



(b) 基岩海岸线



(c) 沙质海岸线



(d) 淤泥质海岸线^[18]



(e) 河口岸线^[18]



(f) 我国海岸线基本情况^{[1][2]}

1.3 海岸线测量的研究进展

目前海岸线测量方法分为传统人工实地测量法、可见光影像测量法、SAR/InSAR 测量法和 LiDAR 测量法，其中后三种方法应用于海岸线测量时其核心技术是海岸线提取。

1.3.1 人工实地测量法

长期以来,海岸线测量主要采用光学仪器(经纬仪、全站仪等)、卫星定位测量(Global Navigation Satellite System, GNSS)等人工实地测量的传统模式,即按照规范要求在地采集海岸线碎部点,并依次连接即为海岸线。因此,海岸线的精确程度与采集碎部点的疏密程度有关。

卫星定位测量(GNSS)具有高精度、全天候、实时性强、操作简单等特点,使得在碎部点采集的过程变得方便高效,一般采用基于GPS的RTK、多基站网络RTK方法,国内部分学者针对人工采集碎部点效率低的缺点,研制出了基于GPS技术的海岸线快速测量方法,如孙伟富等^[19]人分析了传统测量法的特点,设计了一种集成CORS接收机和手簿的机动式装置对海岸线进行测量。近年来,动态后处理技术(Post Processed Kinematic, PPK)在外业测量中得到了广泛应用,与RTK技术相比,PPK有着相似的定位精度,但PPK技术无需通讯电台支持,其作业半径可达到60km,且信号稳定不易失锁^[20],具体流程如图1-2所示。

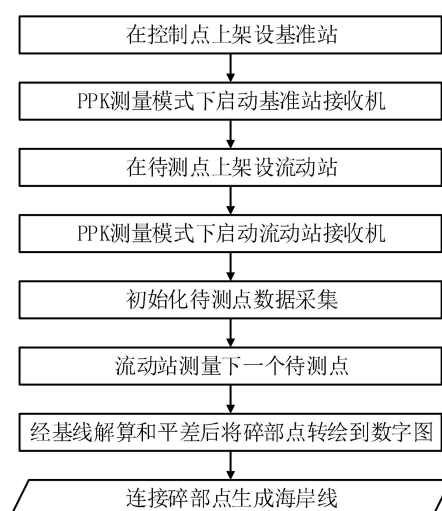


图 1-2 PPK 技术测量海岸线流程^[20]

结合我国海岸性质、技术装备特点,将海岸线传统测量的现状总结如下:

(1) 痕迹线在很多海岸带并不是连续可见,容易观测的,而且痕迹线位置与实际平均大潮高潮面的关系可能受波浪高度、风暴潮等因素的影响。痕迹线所表现出来的特征随海岸带的性质、走向、坡度变化而变化。因此,在测量时对于痕迹线的观测受人的主观因素影响较大,不同测量人员所具有的判别经验不同导致对痕迹线位置的判断有一定差异。即使是相同人员对同一岸线进行反复测量时,由于身体晃动,体力透支等原因,引起接收机天线在水平方向上摆动和垂直方向上起伏,导致获取的数据也不同,因此,测量结果会受到人为因素影响,其引起的误差程度甚至达到米级以上^[19]。同时测量人员责任心的强弱也会对测量结果产生较大影响。因此,量测痕迹线的误差可能很大,且难以被量化。

(2) 我国基岩海岸线占海岸线总数的 38.75%,基岩海岸往往具有垂直地质构造,受

此特性影响测量人员很难到达海岸现场, 即使到达现场, 在测量时也具有极大的危险性; 我国淤泥质海岸线占海岸线总数的 5.61%^{[1][2]}, 淤泥质海岸在通常情况下坡度平缓, 极易受到滩涂环境的影响, 且其质地松软, 车辆和人员很难在此环境下行进, 因此测量人员也很难到达现场进行测量^[19]。虽然传统测量法所用设备性能稳定, 操作简单, 但在采集大信息量数据时费时费力, 其时限性差^[21]。

1.3.2 遥感影像提取海岸线研究现状

遥感影像是海洋环境研究中的重要数据来源^[5], 利用目标电磁波辐射特性在高光谱卫星影像上解译提取海岸带地物信息并对其分类的研究已经进行多年^[22]。国内外利用影像数据提取海岸线的研究大多基于卫星成像时的瞬时水边线的提取, 这条瞬时水边线受自然环境的影响往往不具有水平性, 并不是真正意义上的海岸线, 还需要结合潮汐数据和海岸坡度数据等资料对瞬时水边线加以改正, 才能生成海岸线, 故水边线提取是生成海岸线的关键环节, 国内外许多学者对提取海岸线方法做了大量研究, 并取得了一定的成果, 目前主要有目视判读和计算机自动提取两种方式。

1.3.2.1 目视判读法

美国的国家海洋与大气管理局 (The National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 下属的国家大地测量局 (National Geodetic Survey, NGS) 测绘海岸线的主要方式是在数字摄影测量系统立体模式下利用潮汐数据进行编辑, 该方法适用于大部分性质的海岸线, 但对验潮数据要求较高, 工作量大^[23]。Ruggiero 等^[24]利用航空摄影相片采用目视判读法采集海岸线, 发现不同判读人员从同一组相片上判读的平均高潮线在平均水平位置上相差 19.4m, 同一人员对同一相片在不同时刻判读的海岸线位置也不相同, 平均水平位置相差 2m。

1.3.2.2 计算机自动提取法

20 世纪 90 年代以来大量学者利用 SAR/InSAR 影像对海岸线的提取方法进行了研究, 如, Lee 等提出的边界追踪算法, Malladi 等提出的水平截集法, Tony 等提出的平均密度法等^[26]分别实现了对瞬时水边线的提取; 王志勇等^[27]、Mitchell 等^[28]利用 InSAR 影像构建了海岛 DEM 及瞬时水边线。

申家双等^{[29][30]}利用多时相的遥感影像内插出海岸带 DEM, 再根据平均大潮高潮面高程, 用等值线追踪法提取了海岸线; Maglione 等^[31]利用归一化差值水体指数 (NDWI) 法对高分辨率 WorldView-2 影像进行了瞬时水边线的提取, 结果显示在珊瑚质海岸线和沙质海岸线的海域效果较好, 与人工目视判读所得岸线相比位置偏差小于 1m; 郭忠磊等^[32]利用、密集匹配技术在影响上提取得到高密度的海岛 DSM 点云进而生成高精度 DEM, 再结合平均大潮高潮面高程数据提取到了海岸线。

1.3.2.3 存在的问题

根据以上国内外研究可知, 现阶段利用遥感影像提取海岸线存在以下几方面问题:

(1) 本质上分析, 人工目视判读法是实地测量法在遥感影像上的另一种实现; 要想获得高精度影像产品, 需要布控、定向等复杂处理过程; 由影像数据生成的点云数据噪点分布广泛、团状聚集, 需要大量人工去噪作业。因此通过可见光影像提取的海岸线位置易受人为主观因素影响, 工作量大^[3], 且可见光影像不具备穿透植被的能力, 故在植被茂密的海岸处该方法无法获得准确的海岸线。

(2) 当前利用 SAR/InSAR 技术提取的皆为瞬时水边线, 其只能在精度要求不高的情况下作为海岸线的替代产品, 且相对于其他技术手段而言, SAR/InSAR 的定位精度不高。

(3) 采用瞬时水边线或在其基础上内插生成 DEM 后再内插提取海岸线存在位置不确定性, 高分辨率影像存在过高数据成本和图幅尺寸较小问题^[33]。

(4) 各种提取方法所适用的海岸线性质单一, 很难找到一种通用的方法适用于复杂的海岸线性质。如, 普遍对淤泥质海岸线的提取效果较差; 基岩海岸线、人工海岸线在影像上能够比较容易的建立解译标志, 对其提取的精度较高; 由于受多种自然因素的影响, 使得在某些海岸区域(白色沙滩区反光率较高)很难根据纹理、色调等判读特征识别出海岸线^[34]。

因此, 探索一种效率更高、适应性更广泛的新方法来实现海岸线的自动提取或者能与基于遥感影像提取海岸线优势互补的方法是十分必要的, 以求提取海岸线的方法能在效率上、精度上、成本上等方面得到新的突破。

1.3.3 LiDAR 技术提取海岸线研究现状

典型的 LiADR 系统由全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、惯性测量系统(Inertial Measurement Unit, IMU)、激光测距单元、扫描单元、控制存储单元等构成, 将其安装在移动平台上, 对目标进行探测扫描, 获取目标表面的三维坐标信息及回波强度、回波次数等信息, 部分系统还集成了相机等传感器, 可为点云数据赋上颜色信息。其结构及相互关系如图 1-3 所示。

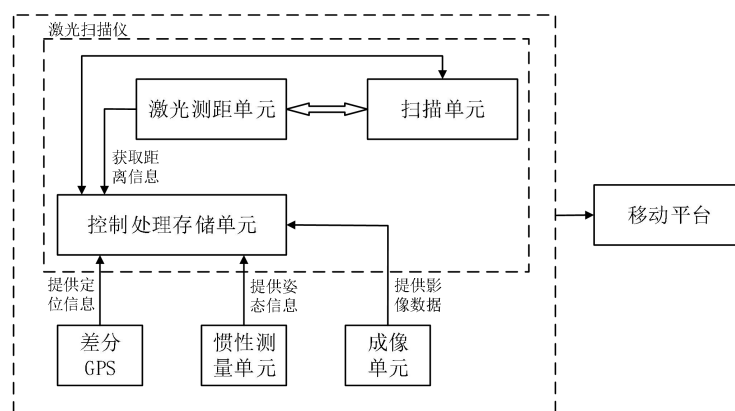


图 1-3 典型的 LiDAR 系统的组成单元^[35]

LiDAR 系统各组成单元工作原理如下:

(1) 移动平台: 作为载荷平台, 搭载传感器以实现在运动方向上的数据快速采集。

(2) 激光扫描仪: 整个系统的核心单元, 用于获取目标表面的三维点云数据。由光电扫描单元、激光脉冲测距单元及控制处理存储单元构成。

(3) 差分 GPS: 观测接收定位卫星信号, 实现接收机实时位置解算, 用于确定移动平台的瞬时位置。

(4) 惯性测量单元 IMU: 实时测量并记录移动平台运动过程中的加速度, 用于确定移动平台的相对位置、速度和姿态。

(5) 成像单元: 通常为 CCD 相机, 在点云数据后处理过程中提供同步影像数据, 以为点云数据赋颜色信息, 便于特征提取和点云分类^[36]。

自从 1985 年 Guenther 在美国国家海洋与大气管理局 (NOAA) 关于机载海洋激光雷达 (AOL) 系统的技术报告中描述了一种“新的”机载光探测和测距 (LiDAR) 传感器以来, 已经过去了 34 年。今天, 机载 LiDAR 测深和地形 LiDAR 被用作海岸测绘的标准工具, 并在世界各地不同的测绘项目中得到应用^[37]。从本世纪初开始, 美国利用了约十年时间开发、测试和完善了基于 LiDAR 技术海岸带测绘程序, 海岸线提取结果符合海洋测绘国际标准 S-44 要求^{[38][39]}。美国国家大地测量局 (NGS) 每年更新大约 16 000 公里海岸线^[40], 并将机载 LiDAR 系统作为应急响应处理的重要手段^[23]。早在 2005 年, 法国开启了一项叫做“Litto3D - EuroSDR”的国家项目, 旨在创建海岸带的三维模型, 即融合测深和地形点云数据, 生成海岸带 DTM, 并提取海岸线, 用于现有海图更新^[41]。

由于对高精度激光扫描测距系统 (Laser Range Finder) 和惯性测量系统 (IMU) 的研究相对滞后, 导致我国针对 LiDAR 技术用于测绘方面的研究比国外约晚 10 年^[42], 直到 2010 年之后才发布相关技术规范^[42], 因此相应的软硬件设备研制成果较少, 而且国内研究多集中于室内物体三维建模和陆地目标的提取测量, 直到近年来才有学者开始了利用 LiDAR 技术进行海岸线提取的研究。

通过大量文献阅读, 可将目前 LiDAR 技术提取海岸线的方法归为两种: 交叉海岸剖面法和等值线追踪法。

1.3.3.1 交叉海岸剖面法

Stockdon 等^[44]提出交叉海岸剖面法 CSP (Cross-Shore Profile Method) 提取海岸线。先利用机载 LiDAR 点云数据沿海岸等间隔提取出 N 个海岸剖面, 然后利用线性回归模型拟合每个剖面, 再结合潮汐数据计算出海岸线高程, 并利用此高程平面与 N 个海岸剖面进行交叉处理得到一系列交点, 最后依次连接这些交点即为海岸线。通过与地面 GPS 系统测量的海岸线位置进行比较分析得知, 交叉海岸剖面法提取的海岸线平均水平误差在 $\pm 1.4\text{m}$ 之内, 均方根差值为 2.9m (不含 GPS 漂移 1.49m), 之后又对风暴过后某海岛沿岸变化进行了快速精确地量化, 显示了交叉海岸剖面法具有一定的实用性。美国地质调查局 (United States Geological Survey, USGS) 采用了交叉海岸剖面法提取海岸线, 其流程如图 1-4 所示。

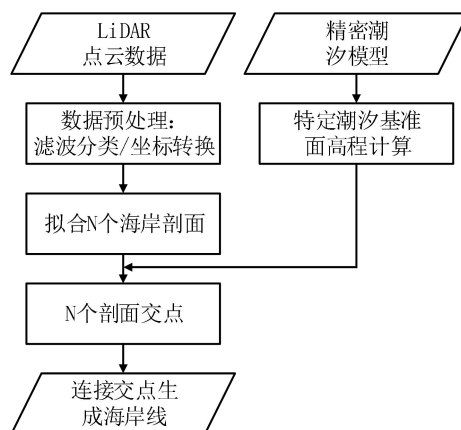


图 1-4 交叉海岸剖面法流程图^[43]

1.3.3.2 等值线追踪法

Robertson 等^[34]结合潮汐数据利用等值线追踪法在海岸带 DEM 上提取了高潮线 (High Water Line, HWL)、平均大潮高潮线 (Mean High Water Line, MHWL)、平均高高潮面线 (Mean Higher High Water, MHHW), 并分别与高分辨率正射影像提取的高潮线 (High Water Line, HWL) 作了对比分析, 得出机载 LiDAR 点云测量技术比航空摄影测量技术得到了更稳定海岸线的结论。White 等^[23]对等值线追踪法提取的海岸线做了精度评估分析, 观察到在 95%置信区间内提取的海岸线水平位置偏差在 1~6m 之间, 验证了该方法提取海岸线的有效性。董保根等^[45]根据机载 LiDAR 点云数据在地形条件约束下构建三角网, 降低了内插环节的精度损失, 利用等值线追踪法成功提取了海岸线。Liu 等^[46]提出的基于图像分割的处理方法, 从本质上讲也属于等值线追踪法。美国国家大地测量局 (NGS) 采用该方法提取海岸线, 其核心流程如图 1-4 所示。

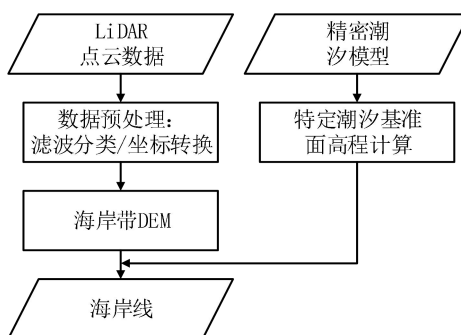


图 1-5 等值线追踪法流程图^[23]

1.3.3.3 存在的问题

当前这两种提取方法各有特点, 都可以得到相关的海岸线产品, 但也存在各自的缺点:

(1) 交叉海岸剖面法提取的海岸线对细节的反应程度取决于海岸剖面数 N , N 越大则海岸线越精细, 与实际海岸线更吻合, 因此该方法计算量较大, 而剖面的选择往往需要人工参与。

(2) 等值线追踪法是当前利用点云数据自动提取海岸线的主流方法, 但需对海岸带构建 DEM, 该构建过程相对复杂且易损失精度, 由于 DEM 的精度极易受噪点影响, 因此

首先应对点云去噪；其次进行滤波，分离出地面点，当前对点云滤波的研究较多，但尚未出现一种能够适用所有海岸性质的点云数据滤波方法^[47]，最后构建 DEM 及生成海岸线，而内插贯穿了该过程的各个环节，易造成精度损失^{[48][49]}。同时，该方法由于受地形条件影响，所提取的海岸线存在过于破碎和曲折的问题，这增加了后期数据处理的工作量。

1.3.4 海岸线性质的研究进展

国家标准《中国航海图编绘规范》规定“比例尺大于 1:20 万图上，表示长于 5mm 的陡岸（坡度在 50° 以上）、长于 10mm 的其他海岸和海堤^[50]”。当前对海岸线的分类多基于实地勘测，也有部分学者利用遥感影像来对海岸线性质的划分及监测其性质的变化。如，刘善伟等^[51]、孙伟富等^[52]、许宁^[53]通过野外踏勘及结合影像资料的方式给出了不同性质海岸线在遥感影像上的目视解译标志，并以此实现了对遥感影像提取海岸线的人工划分性质。马小峰等^[54]先根据不同的海岸性质对影像数据进行人工裁剪，然后选择不同方法实现了对瞬时水边线的自动提取。由以上研究可知，当前通过遥感影像来划分不同性质的海岸线离不开野外踏勘及人工目视判读，现实中对表示不同性质海岸线的测绘产品的巨大应用需求使得实现海岸线性质的自动划分的研究日益重要。

以一幅 1:5 万比例尺海图为例，长度大于 250m 的陡岸和长度大于 500m 的其他海岸，需要表示海岸性质，规范所规定的长度对于利用点云数据识别海岸线性质的无疑是有利的。文献^[55]指出海岸线露出时间是其被淹没时间的几百倍，因此只要把握好数据采集时间，在海岸线不被海水淹没的时间里采集数据，可以保证海水对 LiDAR 点云数据的影响十分有限，从而利用点云数据识别海岸线性质的难度极大降低，具有可行性。如何利用 LiDAR 技术实现海岸线提取的同时，对其性质进行识别是一项新的课题，目前未见到有相关学者利用 LiDAR 技术进行海岸性质识别的研究，但已有学者对地质岩性识别以及地物分类进行了深入研究。

Kaasalainen 等^[56]在对点云回波强度进行辐射定标的研究中，对构成地表的一些物质进行了 785nm 和 1064nm 波长激光反射率的测定，其结果显示构成地表的材质之间对相同波长激光的反射率差别较大，相同材质对不同波长激光的反射率差别也较大；Franceschi 等^[57]提出了一种测量和校正激光回波强度值的新方法，并得到了在给定波长和参考距离下材料反射率的估计值，通过地面 LiDAR 点云强度数据对泥灰岩和石灰岩进行鉴别，论证了利用地面 LiDAR 测量系统在有效地识别不同岩石方面的可行性；Burton 等^[58]对风化岩石进行了回波强度的测定，结果表明激光回波强度与粘土含量成反比，与石英、斜长石、钾长石的含量成正比。

Suomalainen 等^[59]指出传统被动测量式的高光谱影像数据很难提供三维坐标，此项不足会影响地物分类结果；Antonarakis 等^[60]利用地物多种几何信息并结合回波强度信息对多种地物进行分类实验，结果表明，点云数据对地物分类的精确性不低于高光谱影像数据；周唯等^[61]利用支持向量机的分类方法验证了点云纹理特征在地物分类过程中具有提高分

类精度的作用，并实现了联合利用点云三位坐标信息、回波强度信息和点云纹理特征对地物的高精度分类，准确率为 95%，但其实验存在算法运算效率较低，所选区域地形分布和地物类别简单的缺点。

机载 LiDAR 系统 Titan 性能先进，是世界上第一台成功推向商业市场的多光谱 LiDAR 系统，该系统能同时采集三个通道（1550、1064 和 532 nm）的点云数据，1064nm 波段的激光器以 0° 正对地面，532nm 和 1550nm 波段的激光器分别以 7° 和 3.5° 的角度指向最低点前方，三个激光器的方向设计考虑到了使水面产生的镜面回波最少和最大限度利用 1064nm 波段对地物分类的能力，Titan 实现了海陆测绘的无缝对接，它的出现开启了多光谱或高光谱 LiDAR 系统用于对地观测的新纪元^[62]。Bakula 等^[63]，Matikainen 等^[64]，Morsy 等^[65]利用 Titan 进行了大量实验，在点云数据未经回波强度校正和几何校正的情况下成功划分了水、沙、砾石、混凝土、沥青、植被和建筑物等多种地物类别，准确率最高达 96%。

以上研究表明，利用点云数据的三维坐标信息并结合回波强度、回波次数等信息在识别海岸线性质方面具有一定的研究价值。

1.4 本文的研究内容及组织结构

1.4.1 研究内容

本文以海岸线作为研究对象，研究利用 LiDAR 点云数据进行海岸线的提取与性质识别。围绕这一内容，本文的总体技术路线如图 1-6 所示。

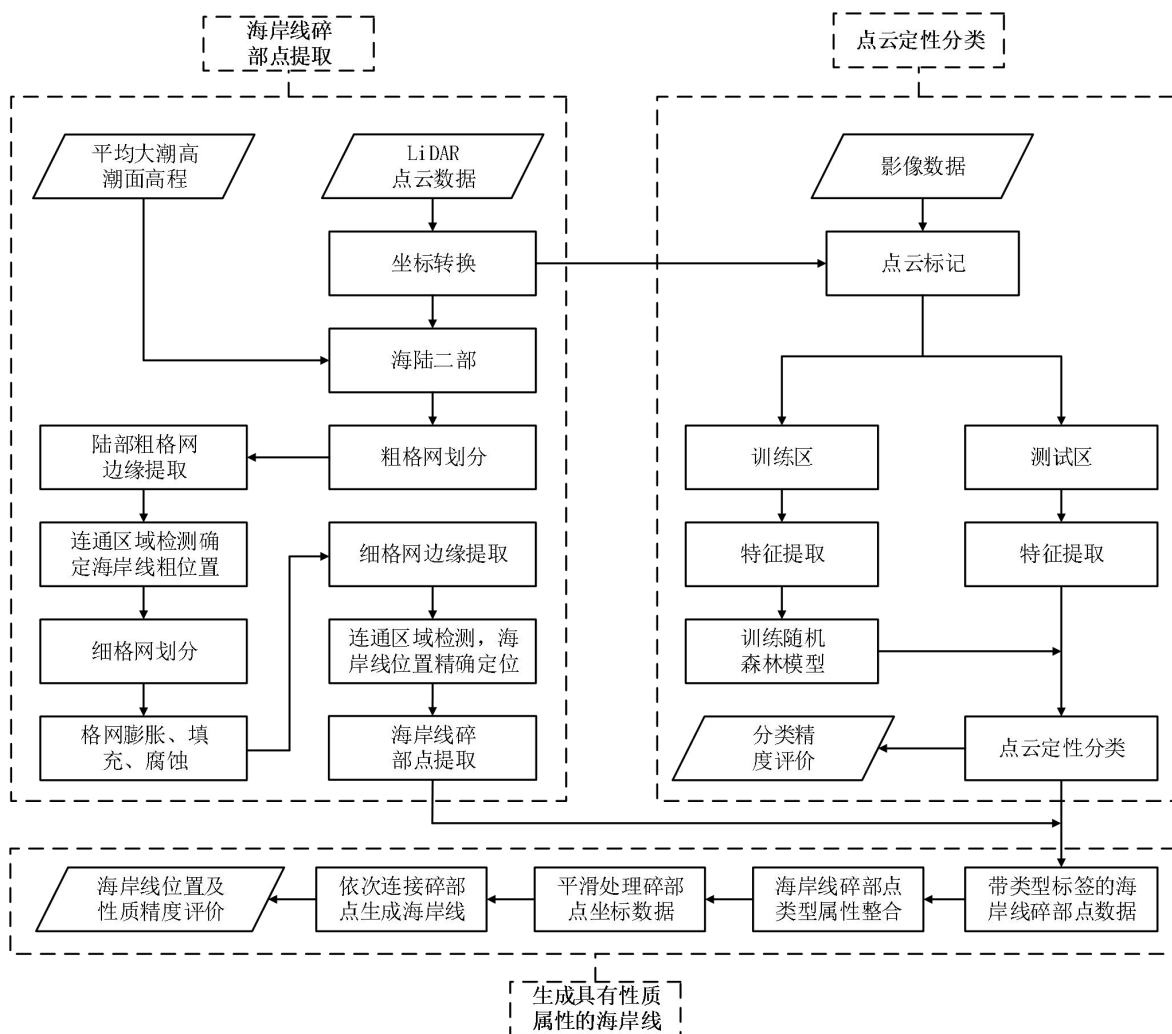


图 1-6 本文总体技术路线图

1.4.2 论文组织结构

根据研究内容将文章分为 5 个章节：

第一章，绪论。阐述利用 LiDAR 点云数据提取及识别海岸线的研究背景与研究意义，对当前国内外海岸线测量技术的研究进展进行了比较全面系统的介绍，概括了相关方法的优缺点，对 LiDAR 系统及工作原理进行了介绍，为研究利用 LiDAR 点云数据提取及识别海岸线性质的提供参考。

第二章，在第一章的基础上，对 LiDAR 技术与可见光影像摄影测量技术、SAR/InSAR 技术进行了对比，详细介绍了不同类型 LiDAR 系统应用于海岸线测量的技术特性，论证了在我国开展 LiDAR 技术用于海岸线测量的可行性与必要性。

第三章，提出一种粗细网格多约束下海岸线提取方法。针对从点云数据中提取海岸线存在精度损失较大及在平缓岸滩处较为抖动等问题，本文提出了一种海岸线提取新方法，并对涉及到的相关基础算法及原理进行阐述。该方法以平均大潮高潮面（Mean High Water Springs, MHWS）的高程作为分割阈值，将点云数据分为海和陆二部分后，对陆地部分点

云数据进行粗细格网划分，并对其运用边缘提取、膨胀腐蚀、孔洞填充及连通区域检测等组合算法，确定出构成海岸线所需的碎部点数据，最后利用局部加权回归散点平滑法（Locally Weighted Scatterplot Smoothing, LOWESS 或 LOESS）生成了较为圆滑的海岸线。通过三个不同区域海岸线提取实例（其中一处实验区域海岸线跨度达 2.1km），验证粗细格网多约束下海岸线提取方法的可靠性与通用性。

第四章，提出一种海岸线性质的方法。针对当前海岸线提取算法仅停留在位置线提取阶段，本文在提出的粗细格网多约束下海岸线提取方法的基础上，提出了一种基于随机森林算法对海岸线性质的方法进行识别的方法。通过两个不同性质海岸线识别实例，验证基于随机森林算法的海岸线性质的方法的有效性。

第五章，总结与展望。

第二章 LiDAR 技术面向海岸线测量的适用性分析

本章首先分析了 LiDAR 技术相对于其他遥感技术在海岸线测量方面的优势，并通过不同类型的 LiDAR 系统应用于海岸线测量的技术特性进行分析，系统的论述了 LiDAR 技术用于我国海岸线测量的可行性与必要性^[66]。

2.1 LiDAR 技术与其他遥感技术用于海岸线测量的技术对比分析

从美国国家大地测量局（NGS）海岸线产品数据源中（图 2-1）可以看出，可见光影像是其海岸线资料更新的主要数据来源。目前 LiDAR 技术无法完全取代摄影测量技术，但大量国内外研究表明，除极为平缓的淤泥质岸滩处，LiDAR 技术适用于所有性质海岸线的提取，本节对几种提取海岸线的技术手段进行了对比。

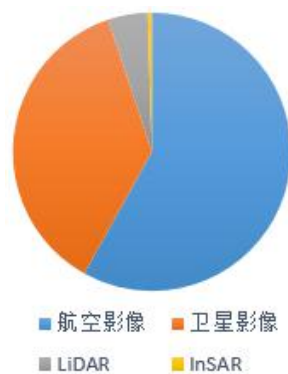


图 2-1 NGS 海岸线产品数据源构成^[40]

2.1.1 LiDAR 技术与 SAR/InSAR 技术对比

SAR/InSAR 作为主动式遥感探测技术，与 LiDAR 技术有一定相似性，主要异同表现如下：

(1) LiDAR 技术与 SAR/InSAR 技术相比具有更强的穿透力，在植被茂密地区和近海浅水区的地形测量方面具有更大优势。

(2) LiDAR 技术直接获取目标的空间位置、回波强度等信息，且自动化程度较高，而 SAR/InSAR 影像存在覆盖范围大、数据解译困难、地面布控困难以及数据后期处理成本高等问题^[26]。

(3) SAR/InSAR 影像在地形复杂区域存在阴影和层叠现象，导致地形数据缺失，而 LiDAR 技术不受阴影影响且其生成的产品具有更高精度。

(4) SAR/InSAR 技术能在偏远易受云雾遮挡地区获得高分辨率影像数据，且其获取数据效率更高，在大范围地形变化监测方面更有优势：

2.1.2 LiDAR 技术与可见光影像摄影测量技术对比

LiDAR 技术和可见光影像摄影测量技术都可用于海岸线的测量，具有相似性，如采集

数据时都会受到天气影响，都能满足大比例尺地形测量精度要求。除基本原理及工作方式外，LiDAR 技术与可见光影像摄影测量技术主要不同如表 2-1 所示：

表 2-1 可见光影像摄影测量技术与 LiDAR 技术对比^{[42][43][62][67]}

对比项目	可见光影像摄影测量技术	LiDAR 测量技术
平台	适合不同安装平台	对平台要求较高，且往往需要改装
操控性	数据采集计划相对简单 对操控人员及相关专业知识要求不高	数据采集计划相对复杂 操作相对复杂，对操控人员的要求较高
设备性能	探测距离可达数百公里以上 用于陆部地形测量 成像范围大，采集效率高 系统构成简单，可靠性好 系统寿命可达数十年且造价低 受天气、光照及阴影影响较大 采集的数据含有丰富的形状、大小、颜色、纹理等判读特征 理论上可用波段是无限的 穿透能力较弱	探测距离一般在几公里以内 可实现海陆无缝对接 视场角相对较小，采集效率较高 系统构成复杂，影响测量精度因素多 系统寿命约为 10 000h 且造价高 受天气影响较小；不受光照、阴影影响 采集的数据离散；能提供三维坐标、强度、光源波段、偏振等便于辐射与几何校正的信息 所确定的可用激光波段有限 穿透能力较强
生产能力	DSM、DEM、DOM、DLG 生产技术成熟，但过程复杂 有成熟的作业技术规程 效率和成本易估算且难以进一步降低 自动化程度较低	生成 DSM、DEM 方便高效；尚无成熟方法生成 DOM 和 DLG 移动平台作业技术规程不成熟 效率和成本视实际情况而定且降低空间大 自动化程度高
产品质量	平面精度高，比高程精度高 1/3 受人的主观因素影响大	高程精度高，比平面精度高 2~5 倍；提取的海岸线精度更高 受人的主观因素影响小

通过以上对比分析可知，LiDAR 技术能与可见光影像摄影测量技术优势互补，且无需布控、定向等复杂处理过程，其在效率、精度和成本上的优势能为海岸线的精准测量带来新突破。

2.1.3 对比结论

从上述对比分析可以说明 LiDAR 系统在海岸带测量方面具有一定优势，体现在如下几个方面：

(1) 沙质海岸带及冰雪覆盖的海岸带，影像纹理少、难以判绘，在这些区域可见光摄影测量技术将无能为力，而 SAR/InSAR 技术在精度方面不占优势；

(2) 在植被覆盖的海岸带, 可见光无法穿透植被, 故可见光摄影测量系统无法发挥效能, 而激光具有一定的穿透能力, 因此 LiDAR 系统可以取得较好的测量效果;

(3) 点云数据自带三维坐标, 可实现快速地表建模, 这对灾后快速响应是极其重要的。

2.2 不同类型 LiDAR 系统应用于海岸线测量的技术特性分析

根据测绘领域所关注的探测精度、探测距离及对目标识别分类能力的不同, 可将 LiDAR 系统按照以下三种方式划分类型: 根据平台不同, 可分为机载、船载和车载 LiDAR 系统; 根据激光器所发射激光波段的不同, 可分为不同波段的 LiDAR 系统; 根据探测体制的不同, 可分为线性探测体制 LiDAR 系统和光子计数 LiDAR 系统, 现将不同 LiDAR 系统特点分析如下:

2.2.1 不同平台 LiDAR 系统特点对比

为使 LiDAR 系统能够满足不同精度及不同目标模型的重建需求, 会将其搭载在不同平台上。车载和机载 LiDAR 系统在数据获取上具有高效、高精度的特点, 在城市三维建模, 目标提取等方面应用广泛, 国内外有大量公司进行相关设备的生产; 船载 LiDAR 系统有着特定工作环境, 能采集到地面和空中平台所不能采集到的数据, 在海岸带海岛礁测量方面具有重要的实用价值, 其与车载 LiDAR 系统在扫描角度和扫描距离上具有很大相似性, 很多搭载在车载平台上的 LiDAR 系统也可以搭载在船载平台, 如 Riegl 公司的 VZ1000 系统和国产 SSW 系统, 国内中海达公司研制的船载一体化三维测量系统 iScan 已推向市场多年^[68]。

不同平台 LiDAR 系统获取的数据具有很多相同点, 但因扫描视角、扫描距离和扫描方式不同, 造成采集的点云数据有很大差异。本文对不同平台的 LiDAR 系统之间及所采集数据的异同点进行比较分析, 其相同点总结如下^[69]:

(1) 可直接获取目标三维坐标

都能直接获取三位坐标, 且获取原理都相同。

(2) 可获取回波强度信息

基本上所有的 LiDAR 系统都能获取测量目标的激光回波强度信息, 利用激光回波强度信息可以辅助海岸带物体及海岸线性质的分类识别。

(3) 数据量大且存在噪声

由于 LiDAR 测量系统高速的扫描频率, 使其能够在短时间内获取附带强度信息的海量三维坐标点, 因此被称为点云数据。噪声来源主要有三点: 测量系统自身原因产生电子噪声; 被测目标表面材质及粗糙度等因素可能会反射全部的激光脉冲而产生噪声; 激光脉冲在空中传播的过程中可能会遇到飞鸟以及与大气粒子相互作用而产生噪声。

(4) 特征提取困难

目前尚未出现具有普适性的软件平台和算法对获取的点云数据进行有效处理,因此,提取出所需目标的关键特征具有一定难度,这也是国内外大量学者研究的重点和难点^[70]。

(5) 存在数据空洞

任何平台的 LiDAR 测量系统都存在遮挡现象,从而导致获取的被测目标点云数据不完整,会存在数据空洞,丢失部分目标细节特征。同时,由于遮挡物的存在,会干扰点云数据的后期处理以及导致工作量大量增加。

不同平台 LiDAR 系统之间及所采集数据不同点如下^[69]:

(1) 视场角不同

机载 LiDAR 系统采用圆锥形、之字形等俯视方式对目标进行扫描,获取的侧面点云数据较少,对于坡度较陡的海岸,机载 LiDAR 系统难以开展有效作业;船载和车载测量系统采用侧视双轴扫描的方式扫描,但车载 LiDAR 系统受道路限制其机动性能无法适应海岸带地形,且其在岸上对海岸带以斜下视的角度进行扫描会存在较大盲区,船载 LiDAR 系统可采集到机载 LiDAR 系统无法获取到的立面信息,通视性好、灵活性和可靠性较高。因此,从视场角方面分析,机载和船载 LiDAR 系统更适合海岸线测量。

(2) 数据在三维特性上有差异

机载 LiDAR 系统获得的是目标顶部信息,因此,平面坐标 XY 与高程坐标 Z 唯一对应,即 2.5 维特性;车载和船载 LiDAR 系统获取的是目标侧面信息,不仅平面坐标 XY 不与高程坐标 Z 唯一对应,且 YZ 坐标与 X 坐标及 XZ 坐标与 Y 坐标也不唯一对应。

(3) 数据精度及密度不同

车载和船载 LiDAR 系统扫描距离较近,数据精度能达到毫米级且点云密度大;机载 LiDAR 系统扫描距离一般在几百米以上,数据精度能达到 10cm,点云密度较小,文章^[23]表明,点云数据精度越高,所采集的海岸线精度越高,因此,根据船载 LiDAR 点云衍生出的海岸线精度较高。

(4) 作业效率及应用场景不同

机载平台机动性强,作业效率高,适用于大部分海陆目标测绘、三维建模及短时间大范围地形动态应急监测;车载和船载平台易受工作环境影响,机动性远不如机载平台,作业效率相对较低,车载 LiDAR 系统多用于道路测绘、城市建模等,船载 LiDAR 系统仅用于海岸带和海岛礁等水上目标的测绘。

2.2.2 不同波段的 LiDAR 系统

从红外波段到紫外波段都有激光的存在,除普通光所具有的特点外,激光还具有亮度高、方向性好、对地物具有一定穿透性等优点。在对地观测领域,激光发射材料和粒子能级跃迁所确定的可用激光波段是有限的^[61],常见的 LiDAR 系统采用绿色 532nm 和近红外 1064nm、1550nm 三个波段之一。

海岸带地物丰富,大致可分为植被、岩石、沙滩、粉沙淤泥、人工地物、海水六类,

这些地物对激光的反射率和点云数据回波强度不同,海岸带常见地物的激光反射率如图 2-2 所示。

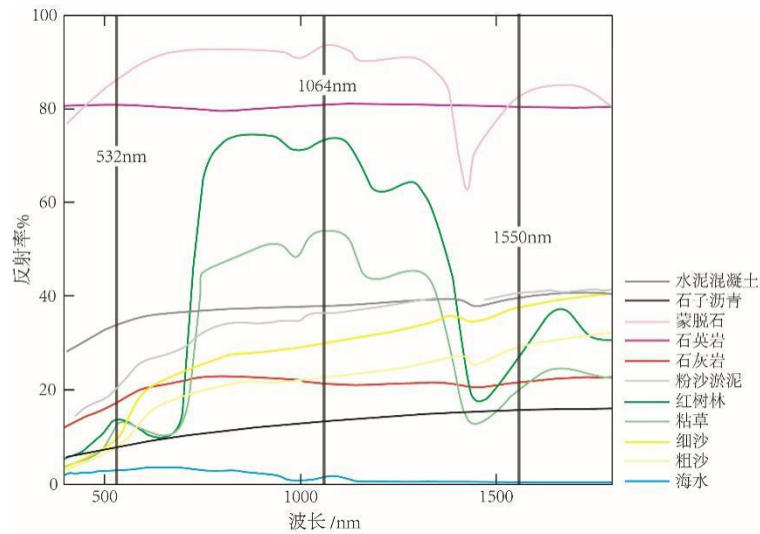


图 2-2 海岸带常见地物反射光谱曲线^[71]

由图 2-2 可知,海岸带地物反射光谱曲线总体差异较大,但在个别波段处会有所接近或重合,在 532nm 和 1550nm 波段及附近,大部分海岸带地物的光谱反射率差异较小;在 1064nm 波段及附近,只有部分地物光谱反射率较为接近。532nm 波段激光对海水具有一定穿透力,可以从水面、水中和水底产生多次回波,这是海陆无缝测量的关键,而近红外波段的 1064nm 和 1550nm 两个波段仅在水面产生少量回波或者根本没有回波。

通过以上分析可知,在地物分类方面,采用 1064nm 波段的 LiDAR 系统能提供最大可分离性的点云数据,其它波段的 LiDAR 系统可以辅助识别分类。国内外大量文献表明,在利用三维坐标信息的基础上,单个或多个波段的激光回波强度信息在地物识别与分类的过程中可以发挥重要作用。Juan 等^[62]验证了 1064nm 波段比 532nm 和 1550nm 波段的点云数据对地物的可分类程度高。

以上研究充分显示了多光谱 LiDAR 系统在地物及海岸线性质识别方面具有的应用价值,但目前大多数激光传感器制造商不提供用于回波强度校正和几何校正的标准化参数,使得点云数据较难进行误差校正,限制了点云的位置和分类精度的进一步提高^[72];点云密度也是影响分类结果的重要因素,而线性探测体制的 LiDAR 系统在较远距离的情况下很难采集高密度的数据点。

2.2.3 不同探测体制的 LiDAR 系统

主流的 LiDAR 系统探测阈值较高,对少量光子不敏感,目标的回波光子数在几百个以上才能被探测器所感应,这就造成了以下几个方面的不足^[73]:

(1) 远距离测量时点云数据密度的有限,一方面在于系统一般只能发射单束光波,通过旋转扫描装置和平台运动来实现对整个测量区域的逐点扫描覆盖;另一方面在于激光器接收和发射激光脉冲机制的限制,只有前者完成后才能进行后者步骤,因此随着测量距

离的增加，激光的飞行时间增长，因此系统发射频率降低。此种工作模式限制了远距离测量时点云数据密度的提升，造成对地物细节的丢失。

(2) 系统测量距离有限，很难满足对境外感兴趣目标的信息获取，在探测环境一定的情况下，要提高系统最大可探测距离以实现更远目标的探测，可以通过增大激光发射功率和接收光学系统望远镜口径及透射率，降低系统探测器探测阈值，减小发射光束的发散角等方式^[74]，这些措施无疑都增加了系统设计难度和重量。

(3) 系统发出的高能量激光会与光学系统中的挥发性物质发生相互作用，在光学镜片镀膜上形成吸附性沉积物，这些沉积物会吸收激光能量导致系统测量效果降低，甚至是造成激光器永久性损伤^[75]，且较高的激光出射功率进一步限制了激光重复率和系统采样率的提高。

(4) 系统为高功率的激光器，发射的激光脉冲较宽，而更宽的激光脉冲光源会影响测距精度的提升^[76]。

随着新兴探测体制的发展，基于光子计数体制的 LiDAR 系统因能实现更远距离、更高精度的探测效果逐渐引起国内外学者的重视。2018 年 9 月，NASA 成功发射了 ICESat-2 卫星，旨在测量格陵兰岛和南极冰川的厚度变化。ICESat-2 搭载的激光测距仪（Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS）十分先进，其具有多波束、单光子探测、窄脉冲及高重频等优点，能为全球气候变化提供可靠数据支撑，ICESat-2 的出现也为海岸带地形测量带来新的研究热点。图 2-3 为其测量示意图，其主要参数见表 2-2^[77]。

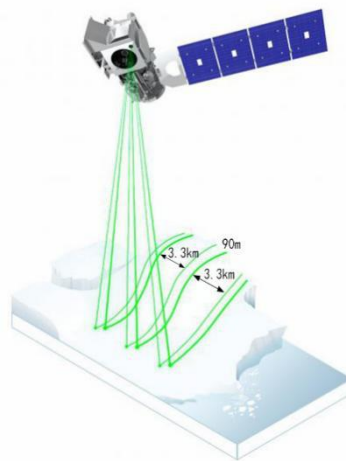


图 2-3 ICESat-2 测量示意图^{[77]-[78]}

表 2-2 ATLAS 参数指标^{[77]-[78]}

项 目	参 数	项 目	参 数
发射时间	2018 年 9 月 15 日	激光性质	连续二极管泵浦主振荡激光
周 期	91 天	激光重频	10kHz
轨道高度	499km	脉冲能量	250-900mJ 可调
轨道性质	极地轨道	脉冲宽度	1ns
轨道倾角	92°	高程精度	10cm
设计寿命	5 年	光斑间隔	10m

激光波长	532nm	光斑直径	0.7m
------	-------	------	------

李铭等^[72]利用自主搭建的机载多波束光子计数 LiDAR 测量系统在国内开展了第一例基于机载光子计数 LiDAR 测量系统在地形测绘领域内的应用实验, 该实验采集了国内某地区的点云数据, 并使用独立的控制点和地面 LiDAR 测量系统获得的点云数据对机载平台点云数据的精度进行了验证, 能够满足较大比例尺地形图的制图要求。

基于光子计数 LiDAR 系统测距原理与传统激光测距系统相同, 都是采用记录激光脉冲飞行时间 (TOF) 的方式进行距离测量, 其不同点主要在于光子计数 LiDAR 系统回波接收装置的灵敏度较高, 能实现对单光子的探测。因此, 光子计数 LiDAR 系统具有以下优势:

(1) 得益于光子探测技术的应用, 极大降低了 LiDAR 系统激光发射功率, 使激光脉冲有较窄脉宽, 而较窄激光脉冲意味着更高测量精度^[76]。

(2) 采用多次累积的方法使得 LiDAR 系统能够实现极高总体探测概率, 且激光重复频率大大提高, 并能集成更多的激光波束。因此, 光子计数 LiDAR 系统获取的点云数据密度更高^[79]。

(3) 光子探测技术调和了系统的有效测距与激光出射功率、接收回波信号望远镜口径之间的矛盾, 提高了系统的探测范围, 为 LiDAR 系统在更高的机载和星载平台的应用创造了有利条件^[75]。

(4) 激光出射功率和接收回波信号望远镜口径的降低, 使系统整体复杂度降低, 直接降低了系统的体积和重量; 在相同体积和重量的情况下, 可集成更多的激光器和其他类型传感器, 这对资源有限的机载和星载平台来说是十分重要的^[74]。

光子计数 LiDAR 测量系统在具有以上优点的同时, 目前还存在以下几点问题^[80]:

(1) 要想获得目标的回波强度信息, 需要多次累积探测才能确定信号, 增大了数据处理量, 在一定程度上影响了探测效率;

(2) 对运动目标的探测性能有待提升, 大范围动态成像效果较差;

(3) 光电探测器灵敏度极高, 使探测器极易达到饱和状态导致探测器寿命降低;

(4) 设备具有单光子灵敏度, 同样对噪声光子也极度敏感, 因此, 抗人为干扰的能力较弱^[81]。

2.2.4 对比结论

(1) 不同平台 LiDAR 系统有一定相似性, 又各具优势, 机载 LiDAR 系统当前应用广泛, 是海岸带测绘的首选, 但由于其采集数据的密度和精度难以进一步提高使得其在海岸线精细化测量上不具优势, 同时机载 LiDAR 系统应用于实际测绘任务时, 成本相对较高, 而船载 LiDAR 有着特殊的应用领域, 其机动灵活, 能够借助高潮时对海岸进行近距离扫描得到高精度高密度数据, 但其测量效率远不如机载 LiDAR, 因此, 应根据不同任务需求来选择合适的测量平台。

(2) 多光谱 LiDAR 的出现使得点云数据应用于地物分类的效果得到了极大提高, 越来越多的文献表明多波段的回波强度信息在地物分类中可起到重要作用, 为海岸线性质的精准识别带来了契机, 但目前成功推向市场的产品不多, 且价格高昂, 同时, 当前的多光谱 LiDAR 得到的不是同一点的多波段信息, 还需进一步的进行多波段点云融合, 这实际上是一个近似处理过程, 这个过程存在近似误差, 这也是限制 Titan 系统地物分类精度进一步提高的因素之一。

(3) 光子计数 LiDAR 系统性能优异, 更加注重对有限资源的高效利用, 其全新的设计思想具有极大的技术先进性, 它的出现解决了传统 LiDAR 不能有效解决的问题, 能为地形探测领域带来新的测量理念和数据处理方法, 具有广阔应用前景^[74]。

2.3 本章小结

采用 LiDAR 技术进行海岸线的测定或更新是一种很有效的方法, 其是对人工实地测量法和摄影测量法的一种有效补充。本章论证了 LiDAR 技术用于我国海岸线测量的可行性和必要性, 具体结论如下:

(1) LiDAR 技术其可靠性已经被国内外所验证。借鉴美国成功应用该技术的经验, 并考虑到我国海岸带快速应急响应需求, 将其运用于我国海岸地形测量, 将极大提升我国海洋测绘技术水平;

(2) 我国海岛总数达到 1 万多个, 大部分为不易登岛测量的无人基岩岛, 海岸性质多为适合运用 LiDAR 技术测量的人工岸线、基岩岸线和砂质岸线, 不利于测量的淤泥质岸线较少^{[1][2]}。因此, 我国非常适合运用 LiDAR 技术进行海岸线测量;

(3) 多光谱 LiDAR 系统和光子计数 LiDAR 系统的出现, 可进一步节省人力和物力, 为更精确高效的测定海岸线带来了契机。

(4) 运用 LiDAR 技术测量海岸带, 人员与装备损失的风险低, 不但能自动提取海岸线, 还可以得到大比例尺海岸带 DEM、DSM 等产品, 且文章[82]表明, 机载 LiDAR 在测图成本上不到航空摄影测量成本的三分之一, 以上因素使得利用 LiDAR 技术成本较低;

(5) 我国没有海岸线测量精确评价标准, 但从点云精度分析, 运用 LiDAR 技术测量海岸线, 消除了人为主观因素和遥感影像提取的瞬时水边线精度不确定性的影响, 得到的产品精度较高。

第三章 粗细格网多约束下海岸线提取方法

利用 LiDAR 点云提取海岸线时,交叉海岸剖面法计算量大,需要人工参与多,实践应用价值较低,等值线追踪法作为主流方法离不开生成 DEM 的过程,同时该方法虽然比较成功的提取了海岸线,但该方法未考虑到海岸线具有性质属性的特征,要想满足相关地理信息产品对海岸线位置及性质的需求,还需借助其他手段来对海岸线进行分类。

针对以上问题,本文根据 LiDAR 点云的数据特征及海岸线特性,提出了一种粗细格网多约束下海岸线提取方法,该方法深入挖掘和利用了海岸线在规则化格网数据中的空间分布特性,快速实现了海岸线粗略定位;采用膨胀、填充、腐蚀、边缘检测等组合算法将海岸线位置进一步精确锁定到细格网中,采用距离约束条件下的单个格网内局部高程值最接近平均大潮高潮面高程值 H_{MHWS} 的点作为海岸线碎部点,经过坐标平滑后,依次连接即为海岸线,避免了内插生成 DEM 和 DEM 内插出海岸线两次损失点云精度的环节,同时为接下来的海岸线性性质识别工作做好了数据准备。

3.1 海岸线特性分析

LiDAR 系统在对海岸带进行扫描时,可以在短时间内采集到高密度的海岸带点云数据,因此可认为海量点云数据覆盖了刻画海岸线的碎部点数据,即海岸线碎部点数据包含在海量的海岸带点云数据中。故可根据海岸线的特性将刻画海岸线的碎部点数据提取出来,然后依次连接即为海岸线。而海岸线的特性主要表现为:

(1) 海平面时刻受到外力的作用,海岸线处于动态变化中,但相关研究表明:在海上每百公里距离差的平均海面高度差仅为 1~2cm,因此局部海域内的平均大潮高潮面的高程差别不大^[6],可认为其高程值相等,具有等高性,这是本文研究的理论基础;

(2) 海岸线具有连续性,因此其可以绵延上百甚至数千公里不间断;

(3) 海岸线分别作为陆部和海部的边界具有边缘性。

3.2 粗细格网多约束下海岸线碎部点提取方法

根据海岸线的定义及以上三种特性,本文所设计的海岸线提取方法的技术路线如图 3-1 所示。

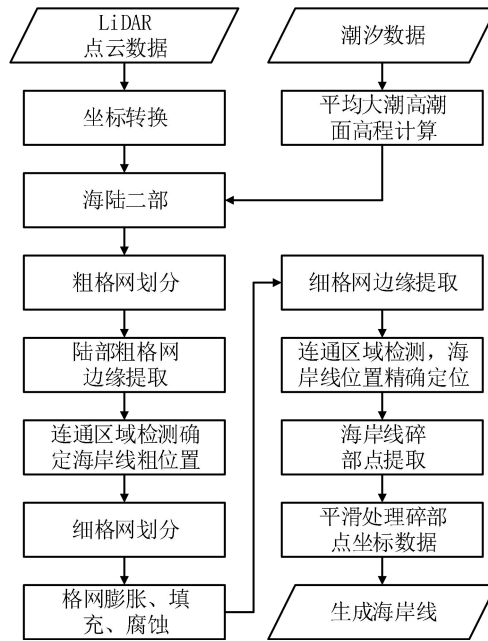


图 3-1 粗细网格多约束下海岸线提取方法技术路线

3.2.1 数据预处理

(1) 坐标转换

坐标转换主要是将点云数据转换至符合应用需求的坐标系和高程基准下，在我国一般为 2 000 国家大地坐标系和 1985 国家高程基准。

(2) 局部 MHWS 高程计算

根据我国海岸线的定义，特定潮汐基准面即为平均大潮高潮面，其与 1985 国家高程基准的关系如图 3-2 所示。

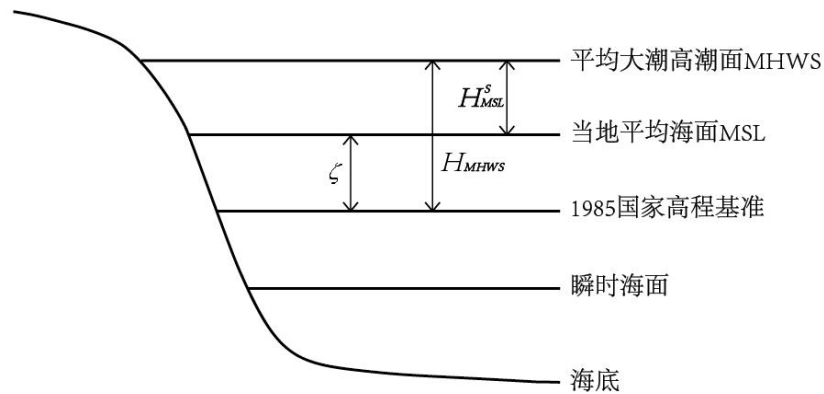


图 3-2 潮汐基准面与高程基准的相互关系示意图^{[32][82]}

由上图可知平均大潮高潮面高程值 H_{MHWS} 可由式 (3-1) 计算得出：

$$H_{MHWS} = H_{MSL}^S + \zeta \quad (3-1)$$

式中， H_{MSL}^S 为海岸线高程（平均海面起算）， ζ 为当地平均海面在 1985 国家高程基准中高度^{[32][83]}。

(3) 划分海陆两部分

点云数据坐标转换完成后, 将高程值小于高程阈值 H_{MHWs} 的点云数据舍去, 至此只剩海岸线及以上陆部点云数据。

注: 本文因缺少相关坐标转换参数及潮汐资料, 故未进行 3.2.1 中 (1)、(2) 所述工作, 同时, 在部分实验中采用了假定的 H_{MHWs} 。

3.2.2 粗格网下的海岸线粗提取

本文所提出的粗细格网多约束下海岸线提取算法实现了对无序点云数据的规则化格网管理, 每个格网相当于图像中的一个像素, 含有激光点的格网像素值为“1”, 不含激光点的格网像素值为“0”, 在对海岸线粗细格网精确定位的过程中, 相当于对一幅二值图像进行处理。

(1) 粗格网的确定及组织

虽根据高程阈值 H_{MHWs} 对点云数据进行了取舍, 但此时数据量依然较大, 不方便处理, 而海岸线仅局限在陆部点云数据边缘, 故可根据海岸线的边缘性再次对陆部数据进行取舍, 因此对陆部点云数据进行粗格网划分, 海岸线则处于格网化陆部点云数据边缘格网内, 要实现格网化陆部点云数据面临以下两个问题。

1) 粗格网大小的确定。格网大小意味着分辨率的大小, 格网越大所提取的海岸线位置越粗略, 点云数据量也越大, 这会直接影响细格网下的海岸线精确提取效率, 格网越小则需面对的是海量数据, 提取效率会极大降低, 同时本文所采用的粗细格网组合提取的方法也将无实际意义。格网大小的确定受多种因素的影响, 如应用需求、比例尺、点云精度及点云密度等, 本文根据《机载激光雷达数据获取技术规范》^[84]确定粗格网大小, 规范规定了利用点云数据内插 DEM 时格网间距及点云密度, 具体值见表 3-1 的规定。

表 3-1 DEM 格网间距及点云密度要求^[84]

图幅比例尺	DEM 格网间距/m	点云密度/(点/m ²)
1:500	0.5	≥16
1:1 000	1.0	≥4
1:2 000	2.0	≥1
1:5 000	2.5	≥1
1:10 000	5.0	≥0.25

2) 以何种格网方式组织点云数据。本文参考文献[85]中的方法: 计算点云数据的外包矩形 ($X_{max}, Y_{max}; X_{min}, Y_{min}$), 根据选定的格网边长计算得到外包矩形的行值 M , 列值 N 。根据点云数据的平面坐标 (x, y), 计算每点行值 m , 列值 n , 并将各点分配至各块格网。计算方法如下:

$$\begin{cases} M = \left\lfloor \frac{Y_{max}-Y_{min}}{a} \right\rfloor + 1 \\ N = \left\lfloor \frac{X_{max}-X_{min}}{a} \right\rfloor + 1 \\ m = \left\lfloor \frac{y-Y_{min}}{a} \right\rfloor + 1 \\ n = \left\lfloor \frac{x-X_{min}}{a} \right\rfloor + 1 \end{cases} \quad (3-2)$$

式中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整； a 为格网边长。

(2) 陆部边缘粗格网提取

实现数据的格网化组织后，为避免非外侧边缘被提取到，需对陆部存在的低海拔区域造成的格网孔洞进行填充处理，再对填充后的数据进行边缘检测，提取得到边缘格网数据，然后利用局部范围内海岸线的连续性特性对边缘格网进行最大连通区域检测确定海岸线粗格网位置。

1) 孔洞填充算法

本文在对二值图像进行腐蚀及边缘检测操作之前，需对二值图像进行孔洞填充，否则会影响腐蚀及边缘检测环节实验效果，该算法的公式为：

$$T_k = (T_{k-1} \oplus B) \cap A^C \quad (3-3)$$

其中 $k = 1, 2, 3, \dots$ ， B 为结构元素， T_0 为起始种子图像， A 为要填充的图像， A^C 为 A 的补集。

具体原理如图 3-3 所示。

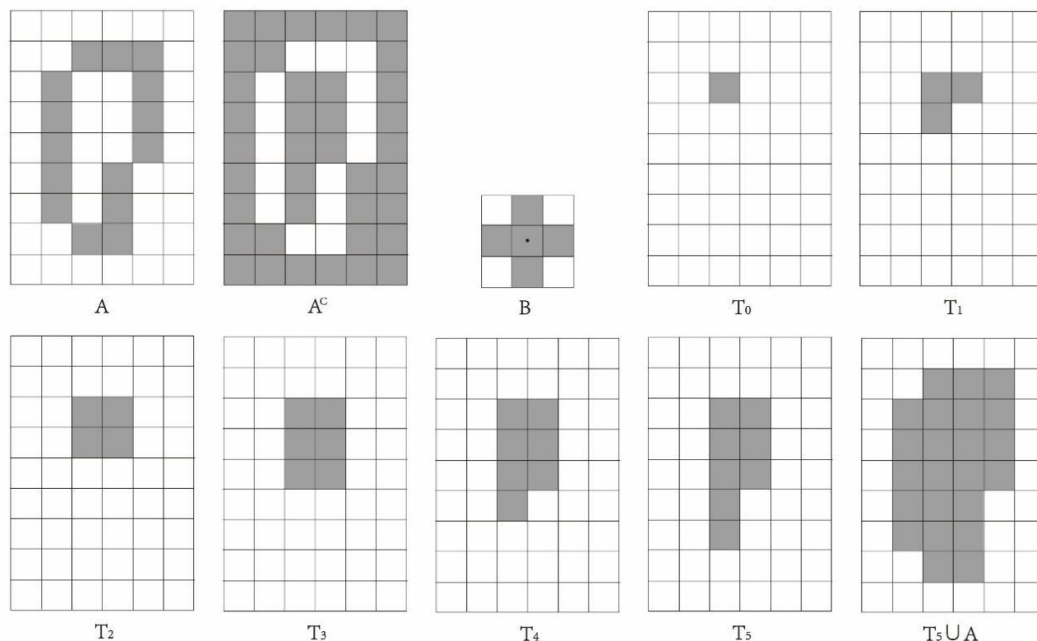


图 3-3 孔洞填充示意图

首先构造 T_0 为一幅全黑图像（相当于不含有激光点，像素值为0）加要填充图像孔洞中的一点为起始种子图像（为便于观察理解，视觉化的 T_0 为全白加一黑点），用结构元素 B

对 T_0 进行第 $k = 1$ 次膨胀，膨胀的结果会超出原始孔洞的大小，之后再与 A^c 求交集，可将超出部分舍去，得到 T_1 。迭代计算，直到求得的交集不再变化，再将最后一次迭代结果 T_5 与 A 求并集，得到孔洞填充后的图像 $T_5 \cup A$ 。

2) 边缘检测算法

本文将无序点云数据利用格网实现了规则化的组织，并将之转化为一较为简单的二值实心图像，根据海岸线的边缘性可知，海岸线处于二值图像的边缘位置。对图像进行边缘检测的基本原理如图 3-4 所示。

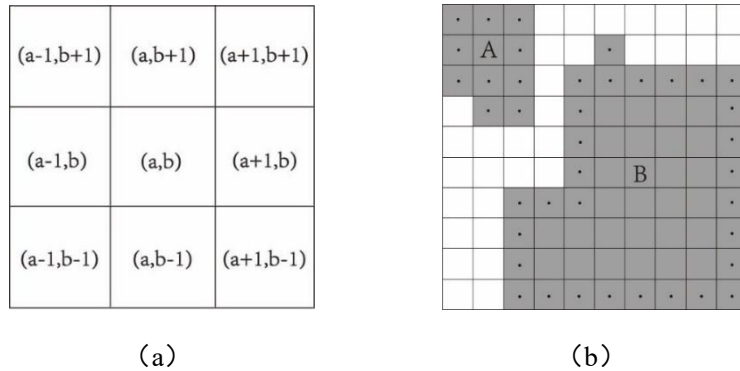


图 3-4 边缘检测原理图

边缘检测时对二值图像的每一个像素点 (a,b) 周围的 8 邻域像素 $(a-1,b+1)$, $(a,b+1)$, $(a+1,b+1)$, $(a-1,b)$, $(a+1,b)$, $(a-1,b-1)$, $(a,b-1)$, $(a+1,b-1)$ 进行检测，如图 3-4 (a) 所示，若至少一个邻域的像素值为 0，则该像素点为二值图像的边缘像素点；若其 8 邻域像素值都为 1，则该像素点不是二值图像的边缘像素点。检测完毕后将非边缘像素点的像素值赋为 0，检测结果如图 3-4 (b) 所示，阴影区域代表含有激光点的格网，带有黑点的格网表示边缘检测环节检测出的二值图像边缘格网像素点。至此，边缘检测完毕。

3) 最大连通区域检测算法

海岸线附近会存在一些高出 MHWS 的礁石及浅滩，边缘检测环节会检测出大量闭合区域，其中包括含有海岸线的区域 B 和礁石、浅滩等“伪岸线”区域 A，根据海岸线的连续性特点，局部区域内海岸线形成的连通区域内像素值为 1 的像素点最多。其基本原理如图 3-5 所示。

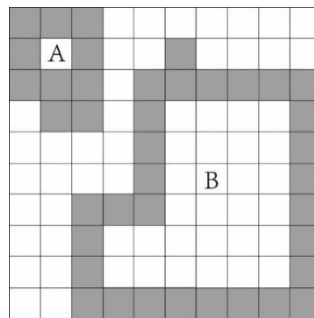


图 3-5 最大连通区域检测原理图

最终，伪岸线 A 被舍去，保留海岸线 B。

对实现粗格网数据组织形式的陆部点云运用孔洞填充、边缘检测及最大连通区域检测等一系列组合算法后效果如 3-6 所示。图中黑色阴影区域为检测的有效粗格网边缘，海岸线碎部点存在于此区域；条状阴影区域代表陆地内部低海拔区域造成的孔洞。

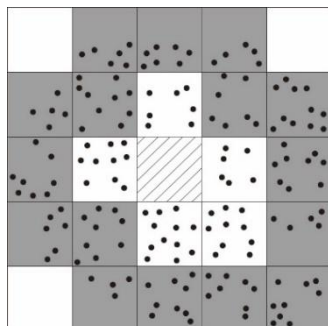


图 3-6 粗格网下的海岸线粗提取示意图

3.2.3 细格网下的海岸线碎部点提取

(1) 细格网的确定及组织

经过粗提取环节，点云数据量为降低，可对数据进行细格网处理，而此时再次面临格网大小确定的问题。本文从以下三个方面来考虑确定细格网大小：

1) 若点云密度允许，可采用图上最小分辨率 $0.1\text{mm}^{[86]}$ ，在 $1:10\ 000$ 比例尺的图上即为 1m ，理论上可使岸线偏差控制在图上 0.1mm 。

2) 若点云密度相对稀疏，则可采用海图上普通岸线的宽度为 0.2mm 的方法来作为细格网大小，在 $1:10\ 000$ 比例尺的图上即为 2m ，且理论上可使岸线偏差控制在图上 0.2mm 。

3) 随着制图比例尺的增大，对点云密度分布有着更高的要求，但由于点云存在着过密或过稀疏的区域，以上两种确定细格网大小的方式可能不再适用，此时细格网的大小的确定需以能形成连续的海岸线细格网为准。

点云数据的细格网组织方式与粗格网的组织方式类似，不作赘述。

(2) 细格网边缘提取

激光点采集具有一定的随机性，且密度受多种因素影响，存在密度不均问题，大部分区域点间隔大小分布均匀，可形成连续细格网，但少部分区域点云密度稀疏，点间距较大，导致部分格网内无点云数据，直接对其进行边缘检测会使连续海岸线细格网出现“断点”，进而无法进行连通区域检测去除“伪岸线”。因此必须对“断点”进行处理，使海岸线细格网连续不断，本文采取膨胀算法对“断点”进行填充，再对细格网内部孔洞进行填充，以避免内陆低海拔区域的边缘被提取出来，然后再对数据进行腐蚀处理，以“恢复”膨胀后的数据，最后进行边缘提取。膨胀腐蚀算法原理如下：

膨胀和腐蚀被称为形态学操作，在二值形态学操作中，可以把一幅图像看作为一个由 0 或 1 像素构成的二值图像（矩阵或集合），组成图像的点称为集合（矩阵）的元素。在二

值图像中习惯将目标物体集合 A 的像素值取值为 1 (本文中有激光点的网格), 而像素值为 0 (本文中无激光点网格) 的集合构成背景 A^C , 其数学表示方法为以下形式^[87]:

$$A = \{t: f(t) = 1, t = (x, y) \in Z^2\} \quad (3-4)$$

$$A^C = \{t: f(t) = 0, t = (x, y) \in Z^2\} \quad (3-5)$$

对于一幅二值图像来说, 若点 t 在目标物体 A 中, 则记为 $t \in A$, 否则记为 $t \in A^C$ 或 $t \notin A^C$ 。

腐蚀和膨胀是以集合的 Minkowski 和与差为基础建立的, 其定义为: 设 A 为一幅二值图像, B 为结构元素 (本质上也为一幅二值图像), 则 A 关于 B 的膨胀和腐蚀操作分别定义为:

$$A \oplus B = \{x | (A \cap (\hat{B})_x \neq \Phi)\} \quad (3-6)$$

$$A \ominus B = \{x | (A^C \cap (\hat{B})_x = \Phi)\} \quad (3-7)$$

其中 \hat{B} 是 B 的映像, 即 B 关于原点对称的集合; $(B)_x$ 表示 B 被 x 平移为 $(B)_x = \{a + b | a \in A\}$ 。

腐蚀和膨胀的几何效果可用图 3-7 来表示说明。

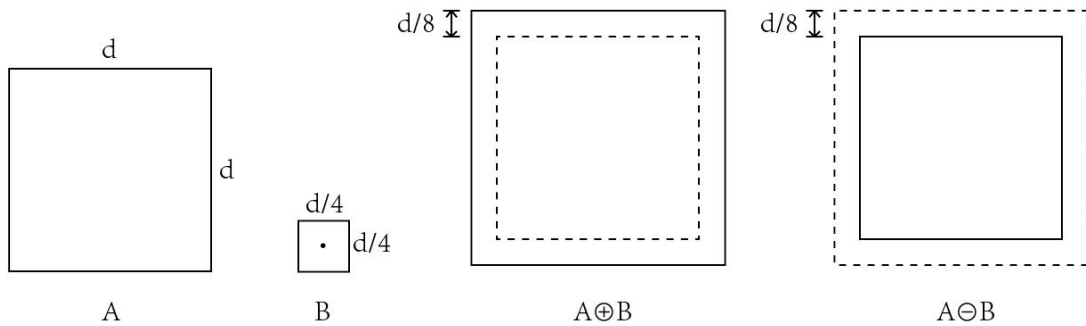


图 3-7 形态学操作膨胀和腐蚀原理示意图^[87]

经过膨胀、孔洞填充、腐蚀及边缘检测等处理后, 细格网下的海岸线精确提取效果如 3-8 所示。图中黑色阴影区域为检测的有效细格网边缘; 网格状阴影区域为点云密度不均而出现的无效格网即“断点”, 造成海岸线的不连续; 条状阴影区域代表陆地内部低海拔区域和粗格网提取环节形成的孔洞。

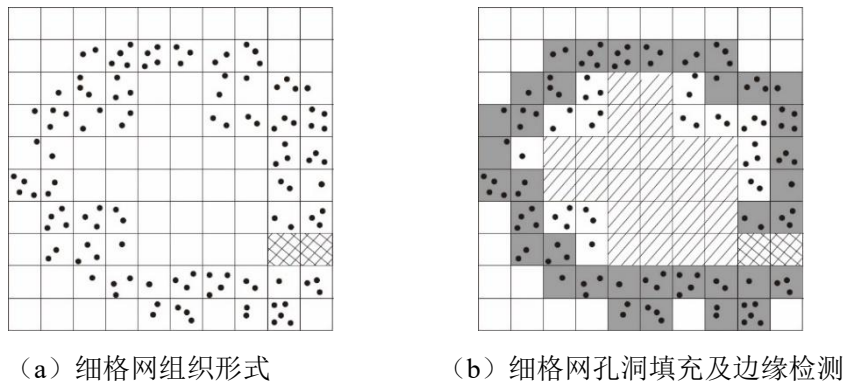


图 3-8 细格网下的海岸线精确提取示意图

(3) 海岸线碎部点提取

此时提取出来的大部分边缘格网存在点云数据，舍去无点云数据的格网后，每个海岸线边缘格网至少含有一个数据点，取高程值最接近 H_{MHWS} 的点作为海岸线碎部点，并通过设定与 H_{MHWS} 的差值阈值来舍去不合理点，阈值可取点云数据的高程误差（在具有垂直空间分布特性的陡岸及人工岸处阈值可适当增大），该环节具体效果如图 3-9 所示。图中 × 点为每个格网中最接近 H_{MHWS} 且与其差值未超过设定的阈值的有效点；空心点为每个格网中高程值最接近 H_{MHWS} 但与其差值超过设定的阈值的无效点。

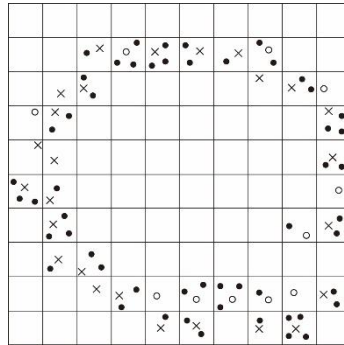


图 3-9 海岸线碎部点及海岸线提取示意图

3.3 碎部点坐标数据平滑并生成海岸线

若对提取出来的海岸线碎部点直接依次连接，则岸线较为曲折，存在大量毛刺，因此需对碎部点坐标数据进行平滑。散点坐标数据平滑常采用移动平均法（Moving Average, MA）和局部加权回归散点平滑法（LOWESS 或 LOESS），都是采用临近的一组数据（窗口内数据），采用一定的规则并按照指定的顺序依次对坐标数据进行平滑，其中若是依次将局部窗口内点的坐标值做平均是最简单的移动平均法。前者是一种低通滤波器，滤波系数为窗宽倒数，易受随机波动的影响，平滑后数据抖动较大；后者又分为 LOWESS 和 LOESS 方法，LOWESS 采用加权线性最小二乘和一阶多项式模型，LOESS 法采用加权线性最小二乘和二阶多项式模型，后者能够更好的降低异常点对整体平滑结果的影响，故 LOESS 法比 LOWESS 法更健壮也更加灵活有用，因此本文采用 LOESS 法对海岸线碎部点进行平滑^{[88][89]}。LOESS 方法原理如下所示^[90]：

给定全部的离散数据集 A 和局部离散数据点集 $T = (x_i, y_i) (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 及一组权系数 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ ($\omega_i > 0, i = 1, 2, \dots, m$)，要求二阶多项式 $P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$ ，使得

$$S = \sum_{i=1}^n \omega_i [P(x_i) - y_i]^2 \tag{3-8}$$

最小。其中 $T \in A$ ，这时， $P(x)$ 称为函数 $y(x)$ 在点集 T 上关于权系数 $\{\omega_i\}$ 的最小二乘拟合二阶多项式。 $(x_j, y_j) \in T$ ，表示 A 中第 j 个采样点，处于局部数据集 T 的中心位置， (x, y) 为预测点，窗口内越接近 (x_j, y_j) 的点其权值越大，高斯核函数可作为权值函数，其形式如式 (3-9) 所示。

$$\omega(i, i) = \exp \frac{-(x_i - x)^2}{2\sigma^2} \quad (3-9)$$

LOESS 主要思想是取一定数量的局部数据，也称为窗口数据，利用这部分数据集拟合二阶多项式回归曲线，进而预测 (x, y) 的取值，即实现第 j 个采样点 (x_j, y_j) 的平滑；为描述整体趋势，通常的回归分析一般是根据全体数据集 A 建模，但现实中海岸线碎部点排列规律不总是简单的一条直线或二次曲线等。故可将局部范围沿指定方向依次推进，最终实现所有离散点的平滑。显然，最终海岸线的圆滑程度与选取的窗口内碎部点数据多少有关，窗口内碎部点数据越少，海岸线越不圆滑，窗口内碎部点数据越多海岸线越光滑。

对海岸线碎部点坐标数据进行平滑时，首先指定一起始点通过最近点检测算法按照海岸线走向对碎部点进行排序，然后利用局部加权回归散点平滑法（LOWESS 或 LOESS）对排序后的碎部点坐标数据进行平滑处理，再次对平滑后的碎部点数据进行排序后依次连接各点，生成海岸线，最终结果如图 3-10 所示。

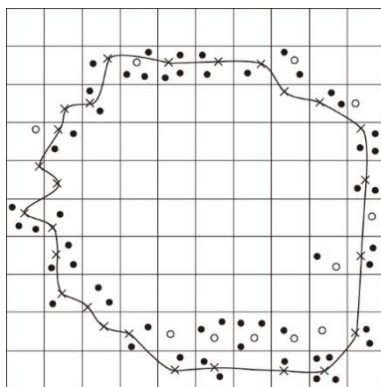


图 3-10 生成的海岸线示意图

3.4 实验与分析

为了验证本文方法的有效性，分别选取美国陆军工程兵团（United States Army Corps of Engineers, USACE）于 2018 年采集的亚拉巴马州格尔夫海岸机载 LiDAR 点云数据及美国国家海洋和大气管理局（NOAA）于 2019 年春季所采集的加利福尼亚州莫罗湾沿岸机载 LiDAR 点云数据以及中国科学院上海技术物理研究所于 2020 年 7 月采集的我国某省沿海机载光子计数 LiDAR 点云数据进行实验验证。

3.4.1 沙质海岸实验

3.4.1.1 沙质海岸实验数据

实验区域位于亚拉巴马州格尔夫海岸，该区域为常见的沙质海岸带，海岸线跨度约为 2.1km，包含约 900 万个点，点云精度未知，本文假定为 0.1m（常见的机载 LiDAR 系统所能达到的精度）。海岸线附近大部分点间隔在 0.1~1.8m 之间，部分点间隔超过 2m，点云密度约为 2 点/m²，部分区域点云密度不足 0.5 点/m²，满足内插 1:10 000 比例尺 DEM 数据的

需求, 因此本文按照该比例尺选择粗格网边长为 5m, 细格网边长 1m, 数据中包含三维坐标、扫描角度、回波强度、第几次回波、回波总次数等多种信息, 点云数据中包含多种地物目标, 如海水、植被、建筑物、电力线等。实验区影像及数据见图 3-11^[91]。

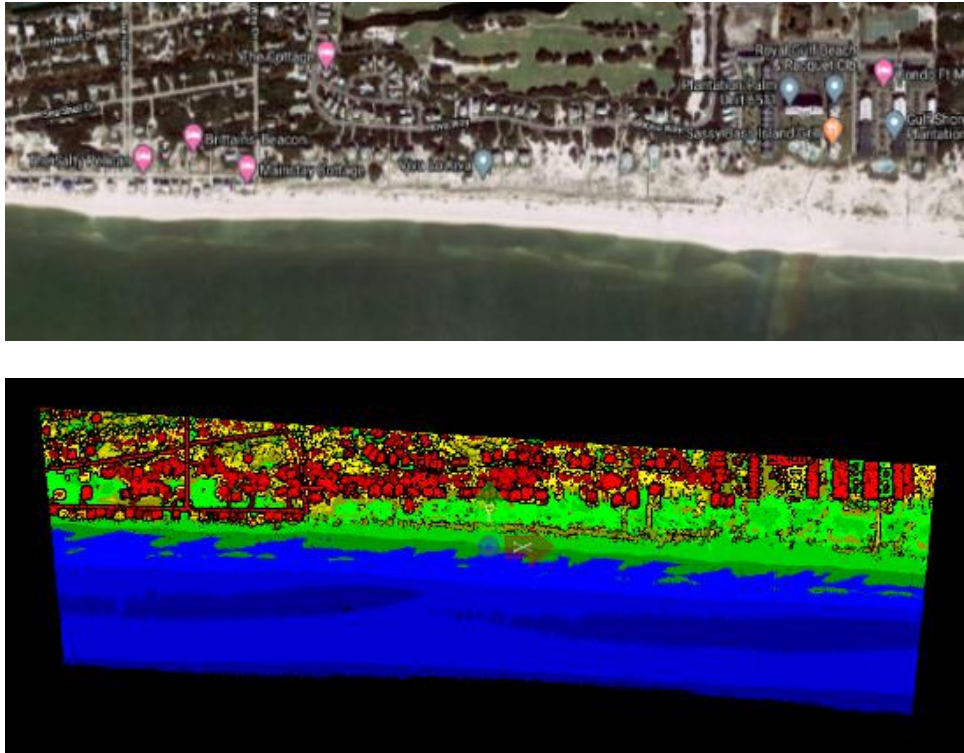


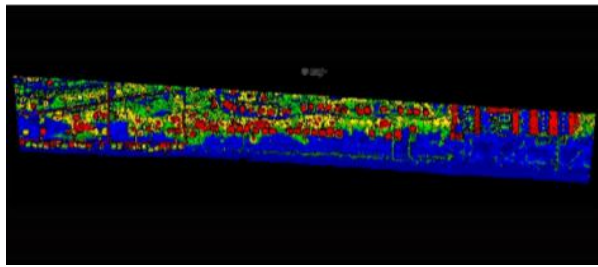
图 3-11 实验区域影像及点云依高程显示图

3.4.1.2 实验过程

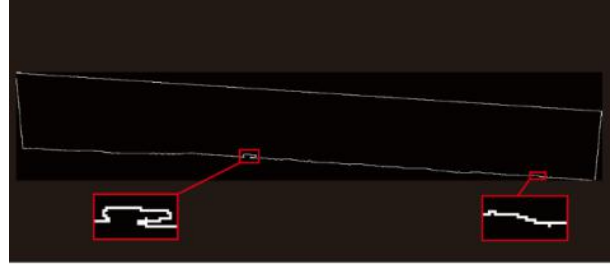
(1) 海岸线碎部点提取

按照 § 3.2 所述步骤, 提取海岸线流程如图 3-1 所示, ①根据潮汐资料计算 H_{MHWS} , 因缺乏相关海域的潮汐资料, 故实验中取任意假定值 1.70m (在缺少相关资料的情况下为证明方法的有效性, 因此取任意假定值, 对比方法也取相同假定值), 并提取陆部点云数据, 结果如图 3-12 (a) 所示; ②对陆部点云进行粗格网下的海岸线粗提取, 通过此环节将海岸线粗略定位在一条 5m 宽的点云数据带中, 极大降低了后续细格网的点云组织环节的数据处理量, 图像显示效果如图 3-12 (b) 所示; ③对海岸线粗提取结果进行细格网划分, 图像显示效果如图 3-12 (c) 所示, 图中细格网的边缘处不再连续不间断, 有少部分“断点”, 而实际的海岸线是连续不断的; ④对细格网数据采用元素全为 1 的 3 阶矩阵 A 进行膨胀处理, 图像显示效果如图 3-12 (d) 所示, 此时的格网边缘会向外侧扩充; ⑤对细格网数据内部空洞进行填充, 图像显示效果如图 3-12 (e) 所示; ⑥对细格网数据采用 A 矩阵进行腐蚀, 以恢复海岸线边缘, 图像显示效果如图 3-12 (f) 所示; ⑦对细格网数据进行边缘提取和最大连通区域检测, 得到海岸线所在的细格网边缘数据, 图像显示效果如图 3-12 (g); ⑧对细格网边缘数据进行有效格网检测, 保留含有点云数据的格网, 图像显示效果

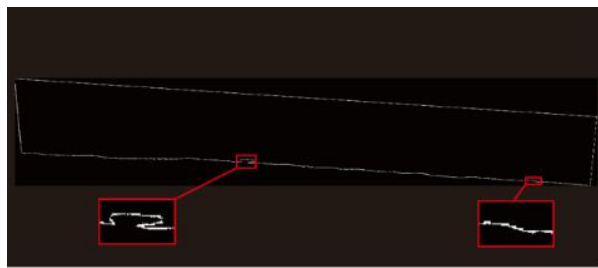
如图 3-12 (h); ⑨检测有效格网内高程值最接近 H_{MHWs} 且与其差值小于 0.1m 的点为海岸线碎部点, 并对其按照海岸线走向依次连线, 其结果如图 3-12 (i) 所示, 从图中可知此时的岸线毛刺较多, 因此需对碎部点数据进行平滑处理。



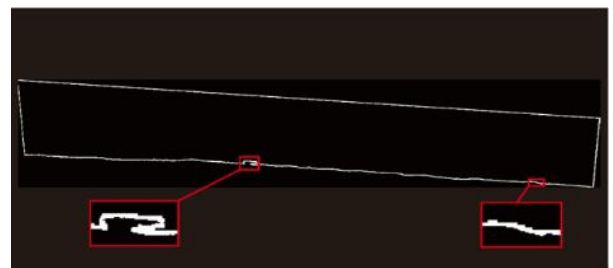
(a) 陆部点云数据



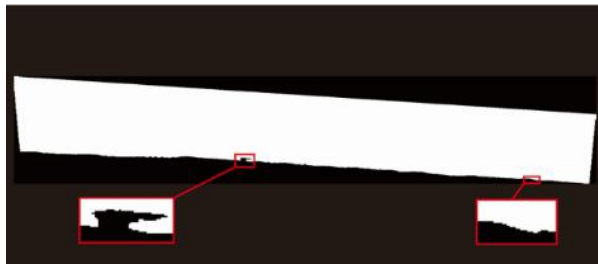
(b) 粗格网边缘提取效果图



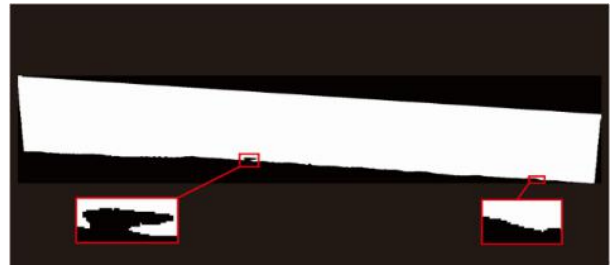
(c) 细格网划分效果图



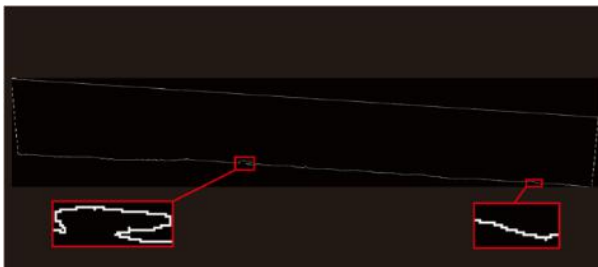
(d) 膨胀效果图



(e) 空洞填充效果图



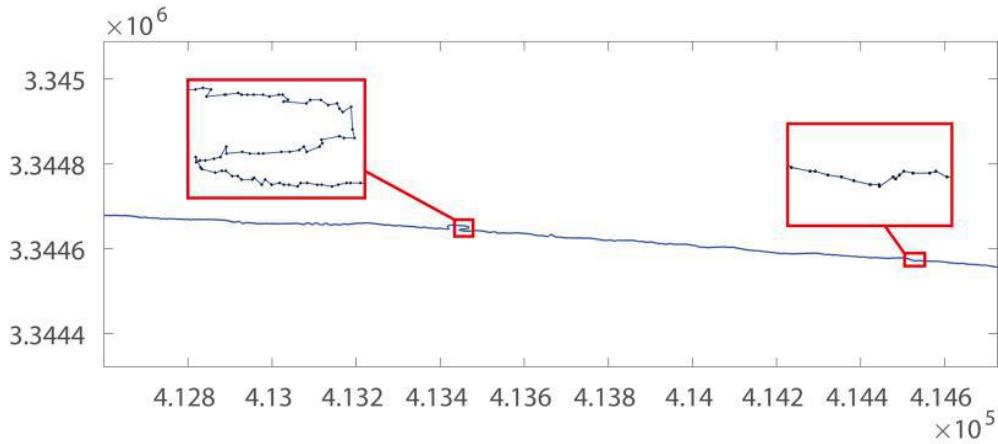
(f) 边缘腐蚀效果图



(g) 细格网边缘提取效果图



(h) 有效格网点检测效果图



(i) 海岸线碎部点连线 (单位: m)

图 3-12 海岸线碎部点提取流程

(2) 海岸线碎部点坐标平滑

利用 LOESS 法对海岸线碎部点进行平滑, 结果如图 3-13 所示, 采用三个不同大小的窗口对海岸线碎部点数据进行平滑, 窗口越大平滑效果越好, 但越偏离海岸线碎部点, 由图中可知当窗口大小为“14”时效果较好。

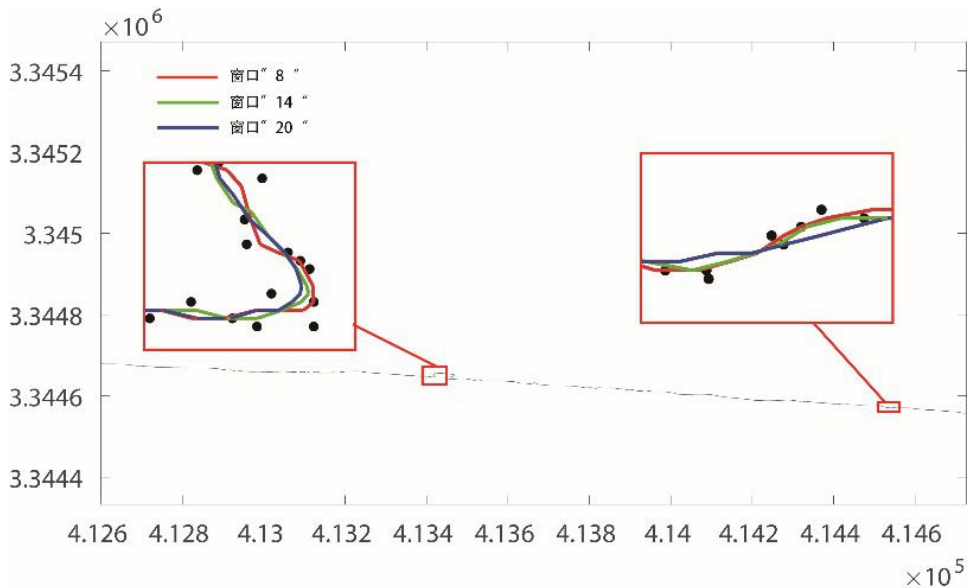


图 3-13 不同窗口大小的 LOESS 法平滑数据图 (单位: m)

3.4.1.3 实验结果分析

当前等值线追踪法是利用点云数据提取海岸线的主要方法, 因此可将其作为本文所述方法的对比, 首先提取实验区域所有高程为 1.70m 的点云数据, 再将数据与等值线追踪法提取的海岸线及本文方法提取的海岸线配准, 进行定性分析对比, 结果见图 3-14; 同时本文参考文献[85]-[86]中的方法, 使用从陆部点云数据中随机挑选出 100 个高程为 1.70m 的陆部边缘采样点与两种方法提取出的海岸线进行平面位置定量分析对比, 具体方法为: 分别量取采样点到两种方法提取的海岸线的平面距离并计算其均值、最大误差、均方根值和

标准差。均值、均方根值和标准差根据式 (3-10) 计算, 结果见表 3-2。

$$\begin{cases} V_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta V_i; \\ V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta V_i)^2}; \\ V_{std} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta V_i - V_{mean})^2}; \end{cases} \quad (3-10)$$

式中: ΔV_i 表示海岸线平面位置与第 i 个采样点的平面距离; n 表示采样点个数; V_{mean} 表示均值; V_{rms} 表示均方根值; V_{std} 表示标准差。

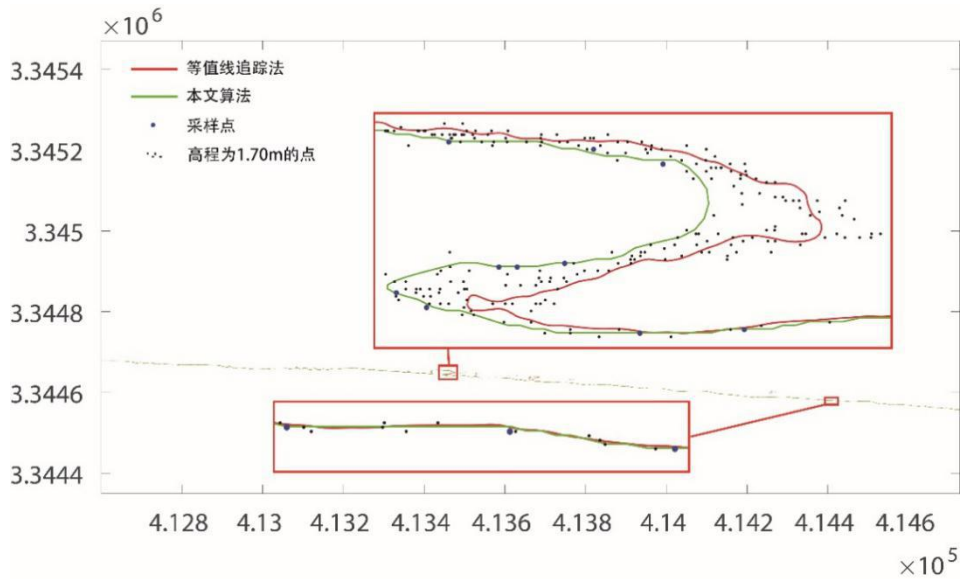


图 3-14 等值线追踪法 (红)、本文算法 (绿) 提取的海岸线、采样点及高程为 1.70m 点云数据叠加图 (单位: m)

由上图可知在岸滩坡度较大时, 本文算法与等值线追踪法提取的海岸线吻合情况较好; 由于受 LiDAR 技术高程定位精度限制, 在坡度较为平缓的岸滩处会出现大量高程值相同或相近的点, 在其基础上构建的 DEM 内插出的等值线必然会存在抖动现象, 且位置多处在所提取的高程值为 1.70m 的点云数据内部而非边缘, 与海岸线具有边缘性的特征相矛盾, 从而导致出现较大误差, 而本文算法较好的提取了边缘数据点, 但在较小的狭窄海湾处, 由于点云密度稀疏, 点间隔大于 2m, 故无法形成有效细格网, 导致在膨胀腐蚀的过程中, 较小的海岸曲折会被舍弃。

表 3-2 本文算法与等值线追踪法结果对比 (单位: m)

	平均值	最大误差	均方根值	标准差
等值线追踪法	0.431	5.093	0.812	0.692
本文算法	0.197	1.241	0.295	0.221

由表 3-2 可知, 粗细格网多约束下海岸线提取方法提取的海岸线与采样点的距离在平

均值、最大误差、均方根值和标准差等方面均优于等值线追踪法提取的海岸线，根据《海道测量规范》^[8]要求，海岸线的测绘误差不应大于图上 1mm，因此粗细格网多约束下海岸线提取方法提取的海岸线精度符合相关要求。

3.4.2 复合海岸实验

3.4.2.1 复合海岸实验数据

实验区域位于加利福尼亚州莫罗湾内部，该区域属于复合海岸性质，区域长约 612m，宽约 316m，面积约为 0.19 平方千米，海岸线长约 770m，当地平均大潮高潮面高程 H_{MHWS} 为 1.41m，点云数据中包含约 630 万个点，含三维坐标、扫描角度、回波强度、第几次回波、回波总次数等多种信息，点云精度小于 0.15m。海岸线附近大部分点间隔在 0.02m-0.5m 之间，部分点间隔超过 1m，满足内插 1:2 000 比例尺 DEM 数据的需求，因此本文按照该比例尺选择粗格网边长为 2m，由于点云密度分布较为不均，细格网的选择无法采用图上人眼最小分辨率 0.1mm 及海岸线宽度 0.2mm 的方式，经过测试，当细格网边长为 1m 时，可形成连续的海岸线细格网，因此细格网变长选为 1m。实验区影像及点云数据见图 3-15，激光雷达主要技术指标见表 3-3^[92]。

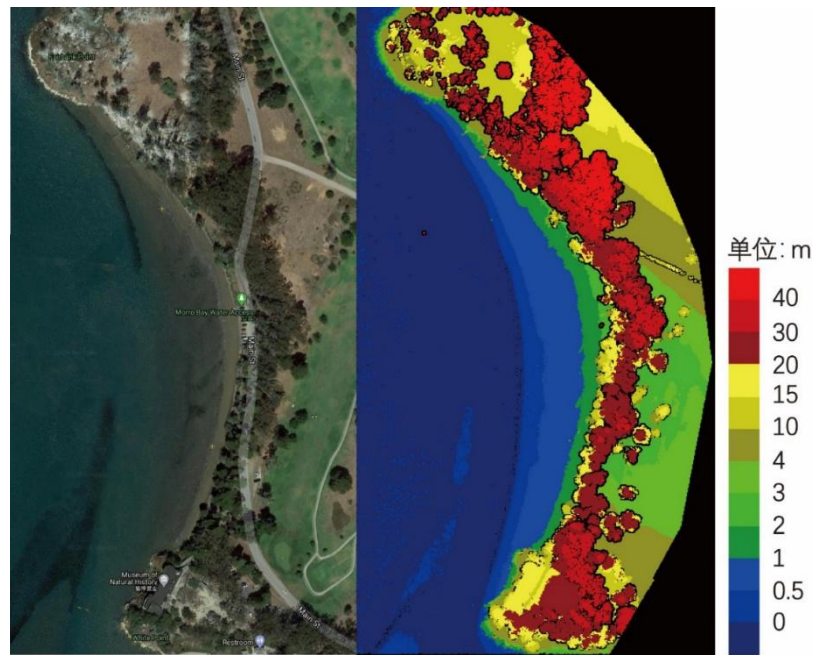


图 3-15 实验区域影像及点云显示图

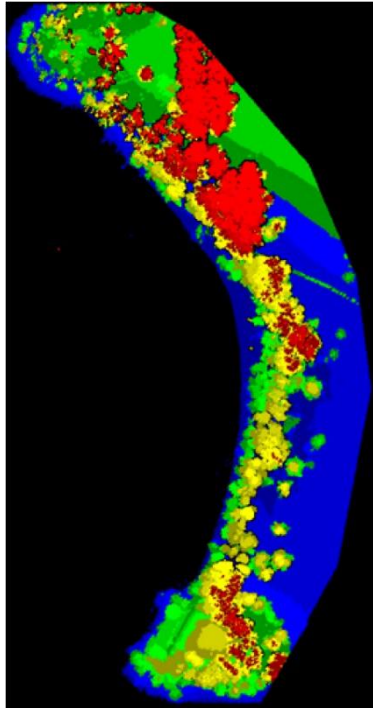
表 3-3 激光雷达主要技术指标^[92]

RIEGL VQ-880-GII	绿色激光通道	近红外激光通道
标称脉冲间距	0.35 m	0.35 m
分辨率/密度	平均 8 pulses/m ²	平均 8 pulses/m ²
测量高度	400 m	400 m
测量速度	140 节	140 节
视场角	40°	40°

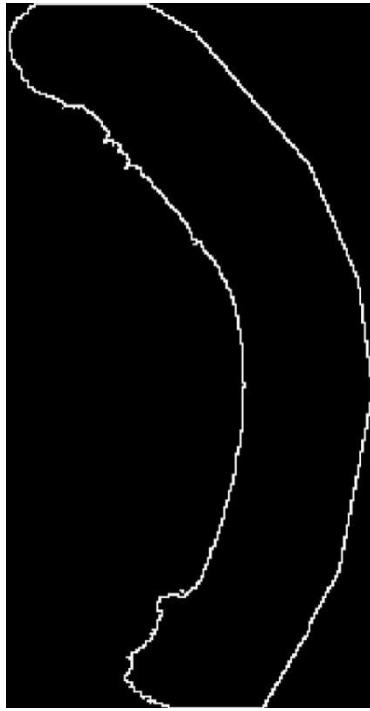
目标脉冲速率	200 kHz	200 kHz
脉冲长度	1.5 ns	3 ns
激光脉冲足迹直径	28 cm	8 cm
波长	532 nm	1064 nm
激光发散角	0.7 mrad	0.2 mrad
幅宽	291m	291m
航带重叠	30%	30%
激光强度	16-bit	16-bit
精度	$RMSE_z \leq 15\text{cm}$	$RMSE_z \leq 15\text{cm}$
回波次数	多次回波	多次回波
差分 GPS 测量频率	2 Hz	2 Hz
IMU 测量频率	200 Hz	200 Hz

3.4.2.2 实验过程

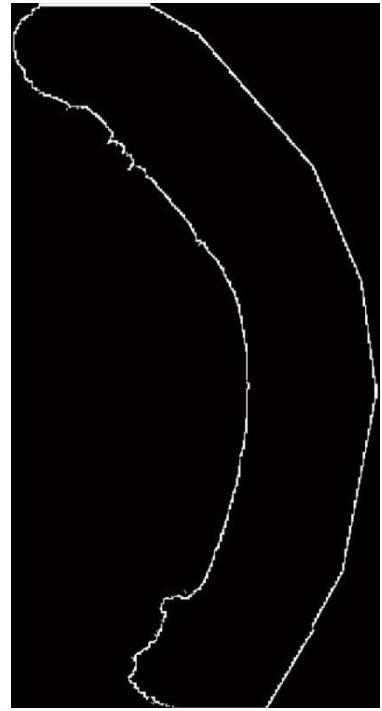
按照 § 3.2 所述步骤，提取海岸线流程如图 3-1 所示，①根据平均大潮高潮面高程 $H_{MHWS} = 1.41\text{m}$ ，提取陆部点云数据，结果如图 3-16 (a) 所示；②对陆部点云进行粗格网下的海岸线粗提取，通过此环节将海岸线粗略定位在一条 2m 宽的点云数据带中，极大降低了后续细格网的点云组织环节的数据处理量，图像显示效果如图 3-16 (b) 所示；③对海岸线粗提取结果进行细格网划分，图像显示效果如图 3-16 (c) 所示，图中细格网的边缘处不再连续不间断，有少部分“断点”，而实际的海岸线是连续不断的；④对细格网数据采用元素全为 1 的 3 阶矩阵 A 进行膨胀处理，图像显示效果如图 3-16 (d) 所示，此时的格网边缘会向外侧扩充；⑤对细格网数据内部空洞进行填充，图像显示效果如图 3-16 (e) 所示；⑥对细格网数据采用 A 矩阵进行腐蚀，以恢复海岸线边缘，图像显示效果如图 3-16 (f) 所示；⑦对细格网数据进行边缘提取和最大连通区域检测，得到海岸线所在的细格网边缘数据，图像显示效果如图 3-16 (g)；⑧对细格网边缘数据进行有效格网检测，保留含有点云数据的格网，由于此处海岸具有垂直的分布结构，导致在坡度较大海岸处，激光点稀疏，故将与 H_{MHWS} 的差值阈值设置的较大，导致检测出了部分内陆格网，需手动剔除，图像显示效果如图 3-16 (h)；⑨检测有效格网内高程值最接近 H_{MHWS} 的点为海岸线碎部点，并对其按照海岸线走向依次连线，其结果如图 3-16 (i) 所示，从图中可知此时的岸线毛刺较多，因此需对碎部点数据进行平滑处理。



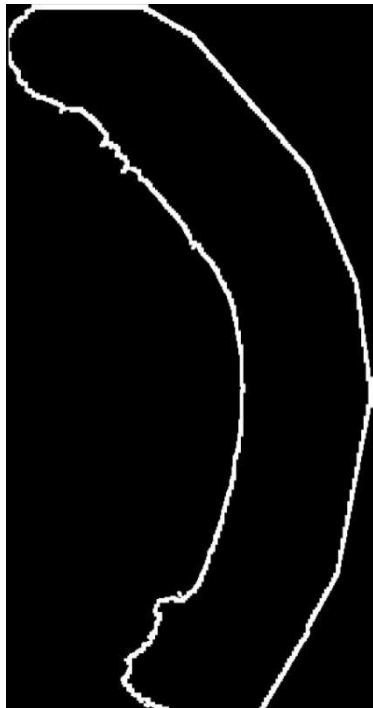
(a) 陆部点云数据



(b) 粗网格边缘提取效果图



(c) 细网格划分效果图



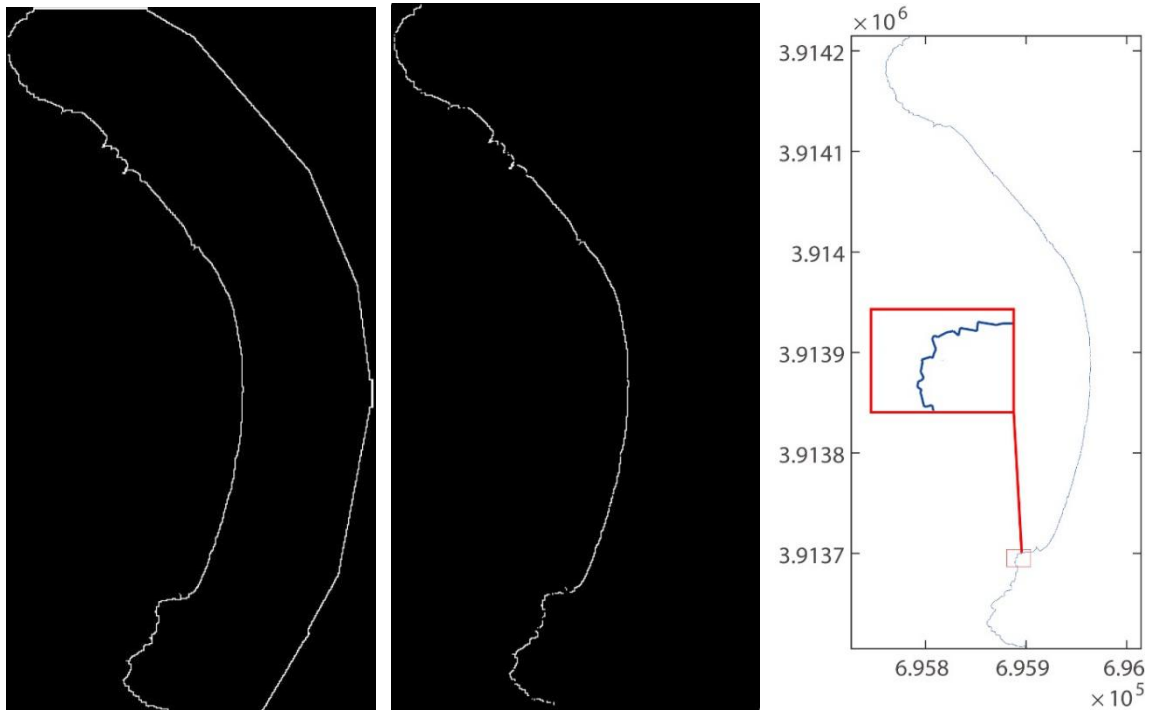
(d) 膨胀效果图



(e) 空洞填充效果图



(f) 边缘腐蚀效果图



(g) 细格网边缘提取效果图 (h) 有效格网点检测效果图 (i) 海岸线碎部点连线 (单位: m)

图 3-16 海岸线碎部点提取流程

(2) 海岸线碎部点坐标平滑

利用 LOESS 法对海岸线碎部点进行平滑, 结果如图 3-17 所示, 采用三个不同大小的窗口对海岸线碎部点数据进行平滑, 窗口越大平滑效果越好, 但越偏离海岸线碎部点, 由图中可知当窗口大小为“12”时效果较好。

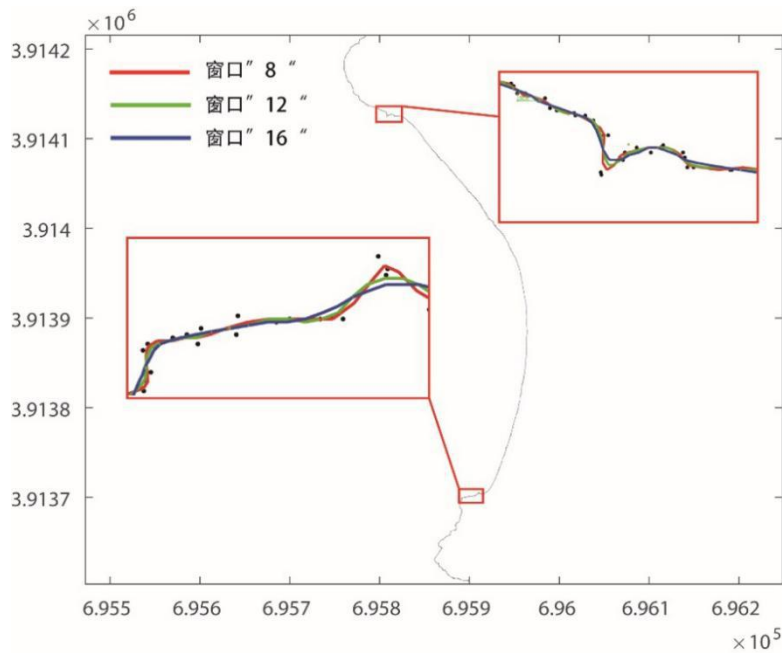


图 3-17 不同窗口大小的 LOESS 法平滑数据图 (单位: m)

3.4.2.3 实验结果分析

首先提取实验区域所有高程为 1.41m 的点云数据，再将数据与等值线追踪法提取的海岸线及本文算法提取的海岸线配准，进行定性分析对比，结果见图 3-18；同时采用 § 3.4.1.3 中的方法，使用从陆部点云数据中随机挑选出 50 个高程为 1.41m 的陆部边缘采样点与两种方法提取出的海岸线进行平面位置定量分析对比，具体方法为：分别量取采样点到两种方法提取的海岸线的平面距离并计算其均值、最大误差、均方根值和标准差。均值、均方根值和标准差根据式 (3-10) 计算，结果见表 3-4。

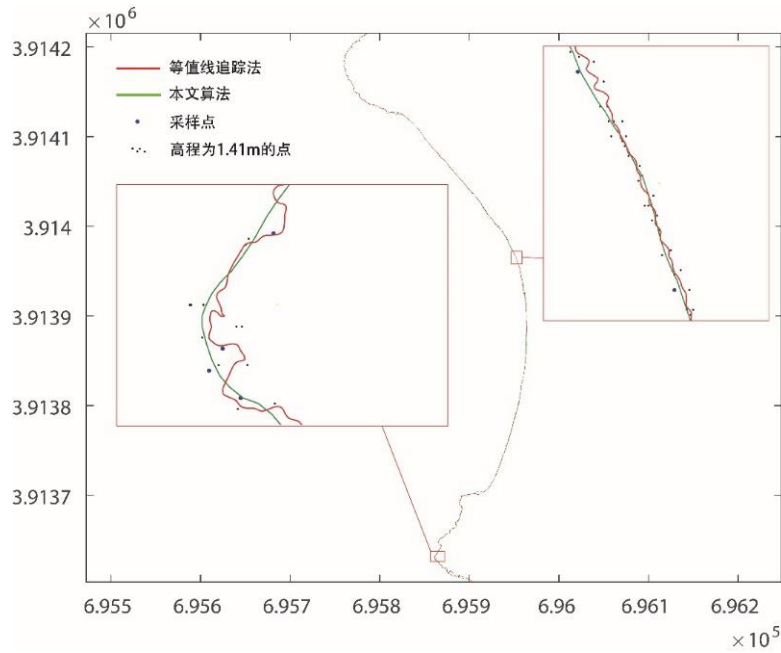


图 3-18 等值线追踪法（红）、本文算法（绿）提取的海岸线、采样点及高程为 1.41m 点云数据叠加图（单位：m）

由上图可知，随着点云密度的增大，等值线追踪法所提取出的海岸线会出现较为抖动的现象，还需后期平滑处理或人工综合才能用于海图制图，而本文提出的粗细格网多约束条件下的海岸线提取方法所提取的海岸线较为平滑美观，更加符合海图制图的要求。

表 3-4 本文算法与等值线追踪法结果对比（单位：m）

	平均值	最大误差	均方根值	标准差
等值线追踪法	0.384	1.921	0.538	0.380
本文算法	0.319	1.792	0.458	0.332

由表 3-4 可知，粗细格网多约束下海岸线提取方法提取的海岸线与采样点的距离在平均值、最大误差、均方根值和标准差等方面均优于等值线追踪法提取的海岸线，根据《海道测量规范》^[81]要求，海岸线的测绘误差不应大于图上 1mm，因此本文算法提取的海岸线精度符合相关要求。

3.4.3 光子计数体制 LiDAR 点云数据实验

3.4.3.1 光子计数体制 LiDAR 点云数据

实验区域位于我国沿海某省，该区域长约 85m，宽约 75m，为常见的沙质海岸带，海岸线长约 100m，包含 6 440 万个点，点云精度为 0.15m。点云平均密度约 10 100 点/m²，是线性探测体制机载 LiDAR 点云数据（复合海岸实验数据）密度的 300 多倍，但数据噪点较多，表现在路面、海底等处点云数据存在过“厚”现象，需对数据进行预处理，降低噪点数量，使数据在空间分布上更接近实际地表，此外本次实验所采用的数据，点云密度严重不均，航带重叠处密度较高，可达到 3 万多点/m²，而区域南部不足 1 000 点/m²，扫描线上点间隔较小为毫米级，但部分区域线间距可达 1m，满足内插 1:2 000 比例尺 DEM 数据的需求，因此本文按照该比例尺选择粗格网边长为 2m，由于点云密度分布较为不均，细格网的选择无法采用图上人眼最小分辨率 0.1mm 及海岸线宽度 0.2mm 的方式，经过测试，当细格网边长为 0.7m 时，可形成连续的海岸线细格网，因此细格网变长选为 0.7m。由于缺少该区域潮汐数据，因此可以采用实地测量痕迹线高程作为平均大潮高潮面的高程值的方式，本文假定 H_{MHWS} 为 1.5m。实验区域点云数据见图 3-19。

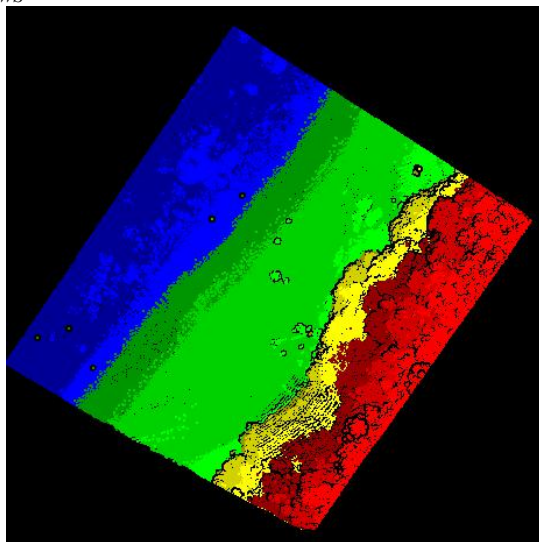


图 3-19 实验区域点云显示图

3.4.3.2 实验过程

(1) 海岸线碎部点提取

按照 § 3.2 所述步骤，提取海岸线流程如图 3-1 所示，①根据平均大潮高潮面高程 $H_{MHWS} = 1.5m$ ，提取陆部点云数据，结果如图 3-20 (a) 所示；②对陆部点云进行粗格网下的海岸线粗提取，通过此环节将海岸线粗略定位在一条 2m 宽的点云数据带中，极大降低了后续细格网的点云组织环节的数据处理量，图像显示效果如图 3-20 (b) 所示；③对海岸线粗提取结果进行细格网划分，图像显示效果如图 3-20 (c) 所示，图中细格网的边缘处不再连续不间断，有少部分“断点”，而实际的海岸线是连续不断的；④对细格网数据采用元素全为 1 的 3 阶矩阵 A 进行膨胀处理，图像显示效果如图 3-20 (d) 所示，此时的

格网边缘会向外侧扩充；⑤对细格网数据内部空洞进行填充，图像显示效果如图 3-20 (e) 所示；⑥对细格网数据采用 A 矩阵进行腐蚀，以恢复海岸线边缘，图像显示效果如图 3-20 (f) 所示；⑦对细格网数据进行边缘提取和最大连通区域检测，得到海岸线所在的细格网边缘数据，图像显示效果如图 3-20 (g)；⑧对细格网边缘数据进行有效格网检测，保留含有点云数据的格网，由于此处海岸具有垂直的分布结构，导致在坡度较大海岸处，激光点稀疏，故将与 H_{MHWs} 的差值阈值设置的较大，导致检测出了部分内陆格网，需手动剔除，图像显示效果如图 3-20 (h)；⑨检测有效格网内高程值最接近 H_{MHWs} 的点为海岸线碎部点，并对其按照海岸线走向依次连线，其结果如图 3-20 (i) 所示，从图中可知此时的岸线毛刺较多，因此需对碎部点数据进行平滑处理。

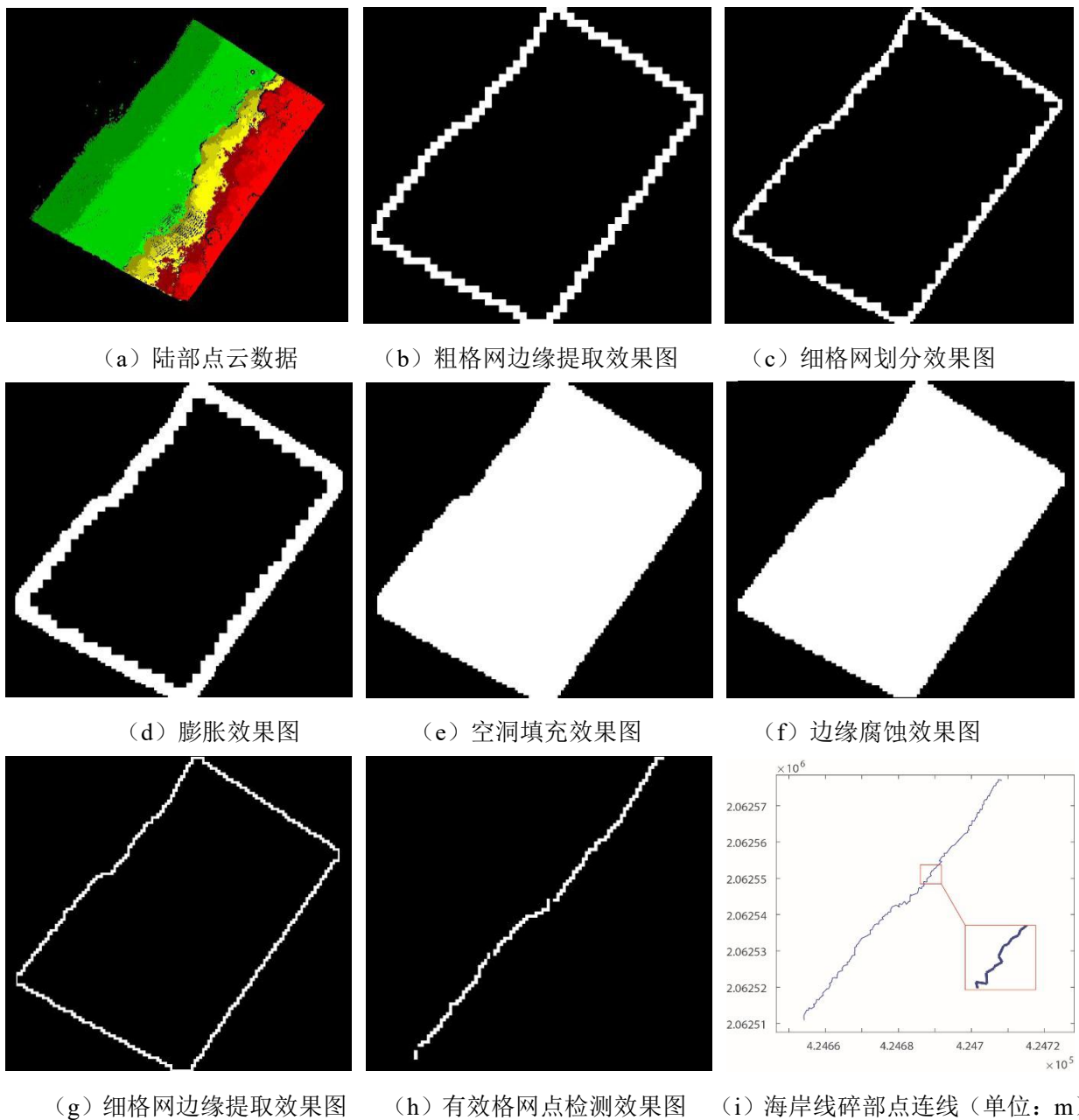


图 3-20 海岸线碎部点提取流程

(2) 海岸线碎部点坐标平滑

利用 LOESS 法对海岸线碎部点进行平滑, 结果如图 3-21 所示, 采用三个不同大小的窗口对海岸线碎部点数据进行平滑, 窗口越大平滑效果越好, 但越偏离海岸线碎部点, 由图中可知当窗口大小为“10”时效果较好。

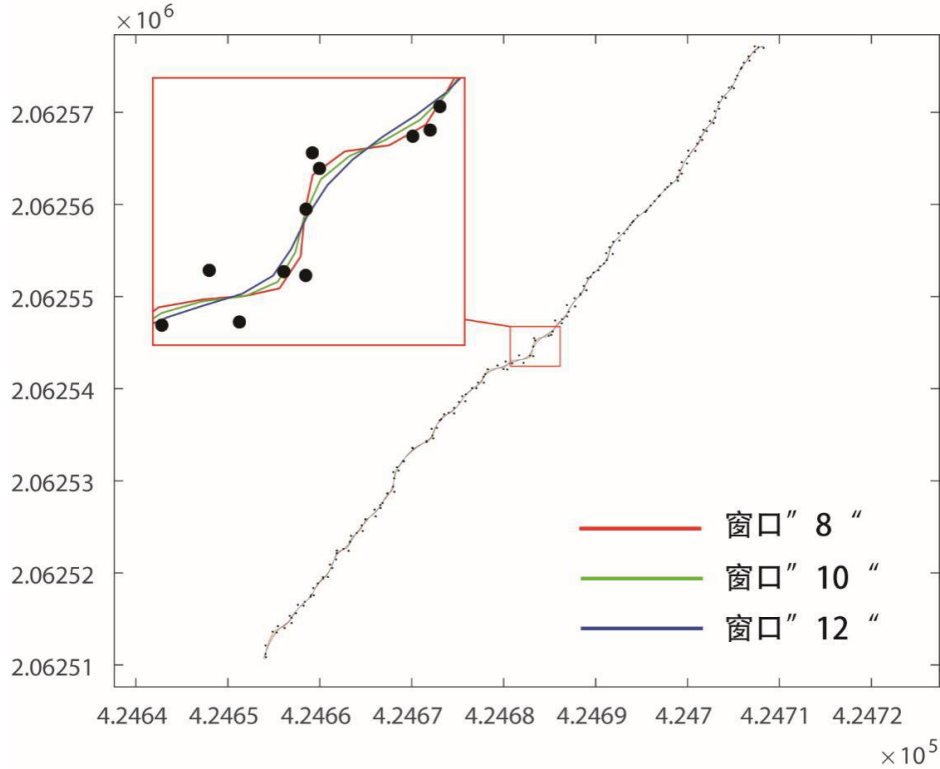


图 3-21 不同窗口大小的 LOESS 法平滑数据图 (单位: m)

3.4.3.3 实验结果分析

首先提取实验区域所有高程为 1.5m 的点云数据, 再将数据与等值线追踪法提取的海岸线及本文算法提取的海岸线配准, 进行定性分析对比, 结果见图 3-22; 同时采用 § 3.4.1.3 中的方法, 使用从陆部点云数据中随机挑选出 50 个高程为 1.5m 的陆部边缘采样点与两种方法提取出的海岸线进行平面位置定量分析对比, 具体方法为: 分别量取采样点到两种方法提取的海岸线的平面距离并计算其均值、最大误差、均方根值和标准差。均值、均方根值和标准差根据式 (3-10) 计算, 结果见表 3-5。

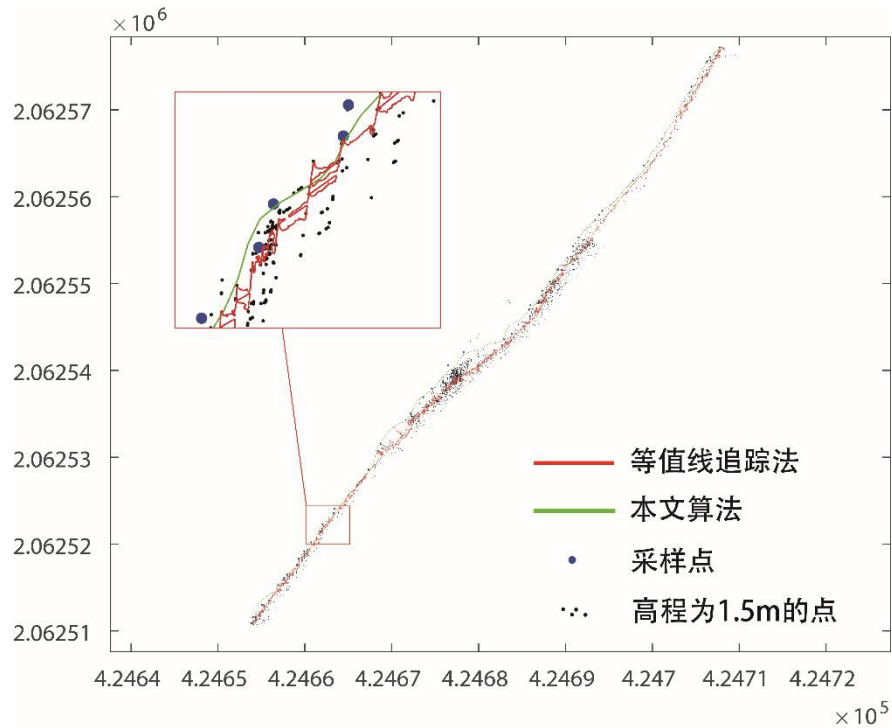


图 3-22 等值线追踪法（红）、本文算法（绿）提取的海岸线、采样点及高程为 1.5m 点云数据叠加图（单位：m）

由上图可知，随着点云密度的增大，等值线追踪法所提取出的海岸线会出现较为抖动的现象，还需后期平滑处理或人工综合才能用于海图制图，更加凸显出面对海量数据时，粗细格网多约束下海岸线提取方法的优势。在坡度较小海岸处，等值线追踪法提取的海岸线处于 1.50m 点的内部，并非边缘，与海岸线的边缘性相矛盾，而本文提出的粗细格网多约束条件下的海岸线提取方法所提取的海岸线较为平滑美观，更加符合海图制图的要求。

表 3-5 本文算法与等值线追踪法结果对比（单位：m）

	平均值	最大误差	均方根值	标准差
等值线追踪法	0.440	2.029	0.583	0.390
本文算法	0.187	0.862	0.260	0.183

由表 3-5 可知，粗细格网多约束下海岸线提取方法提取的海岸线与采样点的距离在平均值、最大误差、均方根值和标准差等方面均优于等值线追踪法提取的海岸线，其中等值线追踪法的最大误差为 2.029m，在 1:2 000 比例尺图上测绘误差大于 1mm，根据《海道测量规范》^[8]要求，海岸线的测绘误差不应大于图上 1mm，因此本文算法提取的海岸线精度符合相关要求。

3.5 本章小结

本文提出了一种粗细格网多约束下海岸线提取方法，该方法分别以粗细两层格网实现对点云数据的组织，提取到海岸线碎部点，并在其基础上对海岸线碎部点坐标数据进行了圆滑，然后依次连接生成了海岸线。该过程摒弃了传统等值线追踪法的去噪和生成 DEM

等过程，进而无需内插环节，因此降低了点云的精度损失。通过三个不同地区的实验表明，本文所提出粗细格网多约束下海岸线提取方法能够精确提取海岸线，避免了传统等值线追踪法在坡度较为平缓处所提取的海岸线较为抖动及生成 DEM 和海岸线过程中精度损失较大的缺点。但针对海量的点云数据时，算法的效率还需进一步提升，后续研究将引入 GPU 并行计算。

第四章 基于随机森林算法的海岸线性质识别方法

国家标准《中国航海图编绘规范》^[50]中规定“中国大陆地区表示陡岸、沙质岸、磊石岸、加固岸、树木岸五种海岸性质，海堤（习称堤岸）亦应表示”。除以上五种海岸外，国家标准《中国海图图式》^[93]中还给出了“陡岸、岩石陡岸、砾质岸、岩石岸等海岸”。此外，《中国航海图编绘规范》^[50]还规定“比例尺大于 1:20 万图上，表示长于 5mm 的陡岸（坡度在 50° 以上）、长于 10mm 的其他海岸和海堤”。

在实际的生产建设实践中，对岸线性质的认知准确度需求往往要大于对岸线位置的准确度需求，如对于海水养殖业来说，不同性质的海岸带地形适合养殖的海产经济动植物差别很大，因此在养殖规划时首先会考虑海岸带地形性质；又如从军事作战的角度来讲，在大规模的登陆作战时，不太可能将登陆地点选在岸高崖深的岩石陡岸处，也不太可能选择淤泥遍布，行进困难，遮蔽物稀少的平缓淤泥质海岸处。因此相关的地理信息产品需要同时满足对海岸线性质属性及位置测量的两种需求，但通过阅读国内外大量文献发现目前针对海岸线提取的研究大部分处于一个“对海岸线提取的研究多，性质识别的研究少；人工识别海岸线的研究多，自动识别海岸线的研究少；利用遥感影像识别海岸线性质的研究多，利用 LiDAR 技术识别海岸线性质的研究少”的现状。

针对当前国内外提取海岸线的研究仅停留在线提取阶段，并未对其性质信息进行确定的现状，本文提出了一种基于随机森林模型的海岸线性质自动识别方法，即利用随机森林算法先对构成海岸带地形的点云数据进行了分类，而本文提出的粗细格网多约束下海岸线提取方法提取出的海岸线碎部点数据则包含在了分类后的点云数据中，此时只需将碎部点三维坐标数据与分类标签数据做到一一对应，即可完成对海岸线碎部点类型属性划分。

利用随机森林算法先对构成海岸带地形的点云数据进行了分类，并结合本文所提出的粗细格网多约束下海岸线提取方法提取出的海岸线碎部点数据，设计了图 4-1 中海岸线性质识别的框架体系：

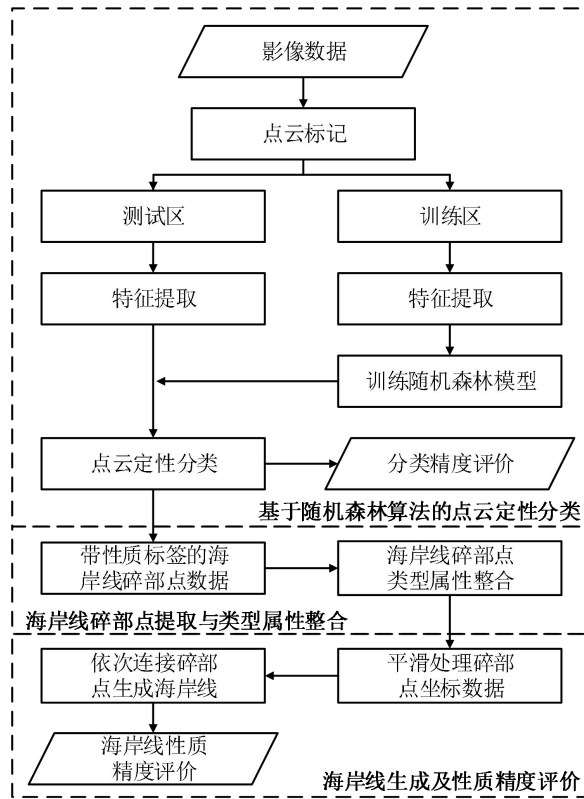


图 4-1 海岸线性质自动识别技术路线

4.1 基于随机森林算法的点云定性分类

4.1.1 特征提取

特征提取是点云分类过程中最基础的环节，在此环节中，提取到的特征将用于点云数据中地物的分类。物体的几何特征是现实中最直接可见的特征，自然条件下形成的物体（如沙滩、海水、草地等）与非自然条件下形成的物体（如人工海岸、道路、航行标志等）的特征明显不同，如物体的大小、高低、所占区域面积等几何特征；情景特征主要包含了物体在其所处环境中的位置，如水生植被一般生长在淤泥质海滩处，基岩海岸和人工海岸一般距离水域较近等；除此之外还有波形分解得到的相关参数特征，如回波强度、回波次数等。

由上述描述可知，除波形参数特征外，几何特征和情景特征无法依托单一的激光脚点存在，而是由一定数量的激光脚点组成点集后形成的特征，因此需要确定出一定范围内的点集。本文采用文献^[94]中根据香农熵计算所需要确定出一定范围内的点集中点的数量 n_{opt} 的方法。假设邻域点数为 n ，从 n 个最邻近点的三维坐标 (x,y,z) 中可计算出协方差矩阵及其特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 。香农熵以下式计算：

$$E_\lambda = -e_1 \ln(e_1) - e_2 \ln(e_2) - e_3 \ln(e_3) \quad (4-1)$$

$$e_i = \lambda_i / \Sigma_\lambda \quad (4-2)$$

$$\Sigma_\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \quad (4-3)$$

其中 e_1, e_2, e_3 为归一化特征值， Σ_λ 为特征值和。

当 E_λ 最小时的 n 值作为最佳 n_{opt} 值， n_{opt} 个点形成的点集的特征集代表点云局部几何属性。共提取到以下 26 维几何特征^{[94][95]}：

三维几何特征：在三个归一化特征值 e_1, e_2, e_3 的基础上可以计算得到局部三维几何特征：线性指数 L_λ 、平面性指数 P_λ 、零散指数 S_λ 、总方差 O_λ 、各向异性指数 A_λ 、特征熵 E_λ 、曲率变化率 C_λ 、垂直指数 V_λ ：

$$L_\lambda = (e_1 - e_2) / e_1 \quad (4-4)$$

$$P_\lambda = (e_2 - e_3) / e_1 \quad (4-5)$$

$$S_\lambda = e_3 / e_1 \quad (4-6)$$

$$O_\lambda = \sqrt[3]{e_1 e_2 e_3} \quad (4-7)$$

$$A_\lambda = (e_1 - e_3) / e_1 \quad (4-8)$$

$$E_\lambda = -\sum_{i=1}^3 e_i \ln(e_i) \quad (4-9)$$

$$C_\lambda = e_3 / (e_1 + e_2 + e_3) \quad (4-10)$$

$$V_\lambda = 1 - e_3 \quad (4-11)$$

此外，局部点密度 D 、局部点云半径 r 、高程 z 、高程变化范围 ΔH 、高程标准差 H_{std} 也属于局部三维几何特征。

二维几何特征：根据激光脚点的平面坐标可计算出二维几何特征。在海岸带场景中，因岩石、磊石和海水等地物的点云具有垂直空间上的分布特征，导致同一束激光可能具有多次回波值，因此该类物体在水平投影后的局部范围内形成的点密度更大。二维几何特征往往能够与三维特征形成互补性，故其也具有一定的表征性。计算以下 6 个二维几何特征：邻域点密度 D_{2D} 、邻域点半径 r_{2D} 、二维特征值和 $\Sigma_{\lambda 2D}$ 、特征值比率 μ 、两个归一化特征值 e_{1-2D} 、 e_{2-2D} 。

同时，文献[95]中还提出了立方体邻域的定义，如图 4-2 所示，以 (x,y) 为中心构造高度不限，长宽均为 d 的立方体。计算该立方体内的所有激光脚点的特征：高程中值 H 、高程标准差 $H_{cube-std}$ 、点个数 $n_{cube-std}$ 、高程范围 ΔH_p （此特征可有效过滤噪点，避免粗差点的干扰）。

$$\Delta H_p = H_{p90} - H_{p10} \quad (4-12)$$

其中 H_{p90} 和 H_{p10} 分别是该格网内所有点高程的 90 百分位点和 10 百分位点。

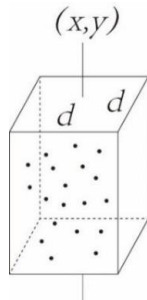


图 4-2 以 (x,y) 为中心构造的立方柱^[95]

除此之外，波形参数特征：回波强度 γ ，回波次数 k 被公认为具有很强的表征性，故也可作为特征值。

本文利用以上 28 维特征输入到随机森林分类器中完成对点云的分类，对以上 28 维特征整理结果见表 4-1：

表 4-1 28 维特征列表

序号	类型	名称
1		归一化特征值 e_1
2		归一化特征值 e_2
3		归一化特征值 e_3
4		线性指数 L_λ
5		平面性指数 P_λ
6		零散指数 S_λ
7		总方差 O_λ
8	三维几何特征	各向异性指数 A_λ
9		特征熵 E_λ
10		曲率变化率 C_λ
11		垂直指数 V_λ
12		局部点密度 D
13		局部点云半径 r
14		高程 z
15		高程变化范围 ΔH
16		高程标准差 H_{std}
17	二维几何特征	归一化特征值 e_{1-2D}
18		归一化特征值 e_{2-2D}
19		邻域点密度 D_{2D}
20		邻域点半径 r_{2D}
21		二维特征值和 $\Sigma_{\lambda 2D}$
22		特征值比率 μ
23	立方体邻域特征	高程中值 H
24		高程标准差 $H_{cube-std}$
25		点个数 $n_{cube-std}$
26		高程范围 ΔH_p
27	波形参数特征	回波强度 γ

4.1.2 随机森林算法

随机森林算法 (Random Forest, RF) 作为经典的分类算法具有广阔的应用前景, 是通过集成学习的思想将多个弱分类回归树 (Classification and Regression Tree, CART) 集成的一种算法^[95], 它的基本单元是 CART, 该算法通过合并多个弱分类结果, 最终实现稳健分类的目的。

随机森林算法具有以下优点: ①对于数据量较大的点云数据来说, 所提取的 28 维特征数据量巨大, 但该算法的学习过程是很快速的; ②本文所提取的 28 维特征分别是描述不同特征属性的不同模态数据, 但该算法能同时处理大量的未经归一化的多模态数据且无需人工做特征选择; ③对于多种类别多种特征维度的数据, 该算法依然能够实现高精度的分类, 稳健性强, 不易出现过拟合。

构建随机森林的过程大致如下^[95]:

(1) 从原始样本集中有放回的随机抽取 k 个样本, 共进行 n 次采样得到 n 个训练集, 分别单独训练决策树模型;

(2) 每个样本有 M 个特征, 对于单个决策树的每个节点需要分裂时, 有放回的随机抽取 m 个特征 ($m \ll M$) 作为这棵树的分枝依据, 然后从这 m 个特征中采用某种策略选出最佳特征进行分裂;

(3) 每一颗决策树生成的过程中, 每个节点都需按照 (2) 来分裂, 若下一次节点选出来的特征是其父节点分裂时采用的特征, 则表示该节点已达到叶子节点, 即该节点的所有训练样例都属于同一类;

(4) 按照步骤 (1) ~ (3) 生成大量的决策树, 此时便可构成随机森林。在分类问题中, 按多棵决策树投票决定最终的分类结果。

4.1.3 分类精度评价

通过随机森林模型预测分类的结果与现实情况往往不完全一致, 需要对预测结果的好坏进行量化评价。量化评价是一个自动的过程, 评价结果由真正、真负、假正、假负四个参数决定, 故可通过构建误差矩阵, 如表 4-2 所示, 来对模型预测结果进行精度评价。其中, 真实情况可对照影像数据采用人工目视判读并结合相关生产经验及实地勘察等知识共同得到。

表 4-2 检测误差矩阵

	实际结果	目标物体	非目标物体
预测结果			

目标物体	TP	FP
非目标物体	FN	TN

表 4-2 中, TP (True Positive) 为真正, 表示目标物体被模型正确预测为目标物体; FP (False Positive) 为假正, 表示非目标物体被模型错误预测为目标物体; FN (False Negative) 为假负, 表示目标物体被模型错误预测为非目标物体; TN (True Negative) 为真负, 表示非目标物体被模型正确预测为非目标物体。

在精度评价结果中, 常用以下三个指标用于误差分析: 完整度 (Completeness)、正确度 (Correctness) 及总精度 (Overall accuracy)。完整度用于衡量分类结果的完整程度, 正确度用于衡量结果的可靠程度, 总精度用于衡量整体分类精度, 三个指标的理想值为 1.00, 即指标越高模型预测结果越好。计算方法如下所示:

完整度:

$$Completeness = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\% \quad (4-13)$$

正确度:

$$Correctness = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\% \quad (4-14)$$

总精度:

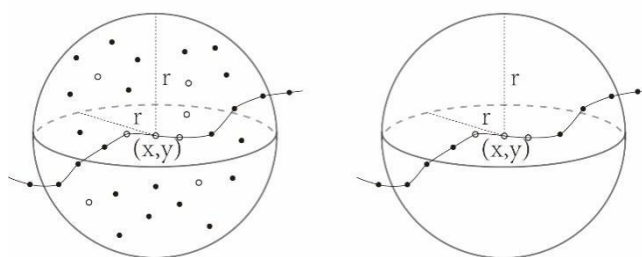
$$OA = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\% \quad (4-15)$$

4.2 海岸线碎部点类型属性整合

4.2.1 海岸线碎部点类型属性整合原理

《中国航海图编绘规范》^[50]中对图上需表示的海岸性质长度有明确的要求, 而在实际测量过程中, 很多海岸长度较短, 同时其周边存在其他性质的海岸较为连续且长度较长, 因此往往将较短的海岸性质综合为较长海岸性质的一部分。由于所提取的是海岸线碎部点数据, 较短性质的海岸线表现为相邻的一组少量点或单个点为同一类型, 同时由于分类误差的存在, 还会有个别点出现错分的情况, 为符合规范中对海岸线性质表示的要求及纠正错分类结果而设计了本环节。其具体原理如图 4-3 所示。

• A类岸线碎部点 ◦ B类岸线碎部点



(a) (b)

图 4-3 较短海岸性质综合为较长海岸性质及错分类碎部点纠正原理图

以图中坐标为 (x,y) 的海岸线碎部点为中心,进行以 r 为半径的球状区域内各类点的数量统计,将中心点处海岸线碎部点的类型属性重新赋值为球状区域内数量最多的点类型属性,该过程如图 4-3 (a) 所示,经此环节,大部分被错误分类的点将被纠正。对碎部点类型属性进行纠正后,还会存在相邻近的一组少量点或单个点为同一性质,如图 4-3 中 (b) 所示,以图中坐标为 (x,y) 的海岸线碎部点为中心,进行以 r 为半径的球状区域内各类岸线碎部点的数量统计,将中心点处海岸线碎部点的类型属性重新赋值为球状区域内数量最多的海岸线碎部点类型属性,即图中的 B 类岸线碎部点的类型属性将被整合为 A。对所有海岸线碎部点按照海岸线走向依次进行类型属性的整合。其中 r 的取值为规范^[50]中规定的图上需表示海岸线性质的长度,本文取图上距离平缓海岸处 $2r = 10mm$,即图幅比例尺为 1:2 000 时, $r = 10m$;陡岸处 $2r = 5mm$,即图幅比例尺为 1:2 000 时, $r = 5m$ 。

4.2.2 海岸线性质精度评价方法

海岸线碎部点类型属性整合过程存在一定的误差,主要误差来源于以下两点:①由于采集点云的过程具有一定的随机性,会存在点云密度不均的情况,若密度不均的区域恰好覆盖在不同海岸性质的交界处,则会存在点云稀疏区域的海岸性质由于受密度影响而被错误划分为其他性质的情况。②由于碎部点提取算法是基于海岸线的等高性提出的,而基岩海岸、碎石加固岸等海岸具有垂直空间分布特性,受机载点云数据 2.5 维特性的影响,在该性质海岸处,所提取的碎部点数据较为稀疏。因此在不同性质的海岸交界处,则会存在具有垂直空间分布特性的海岸性质被错误的划分为其他性质的情况。

目前未有相关的标准规范来确定海岸性质表示的精确程度,但根据《中国航海图编绘规范》^[50]中对图上需表示的海岸性质长度的规定,可将连续出现的同一性质的海岸且其性质表示错误的长度进行统计,并比较最大错误长度 d 是否超过规范中规定的需表示的海岸性质最短长度,即当图幅比例尺为 1:2 000 时,若平缓海岸处 $d < 20m$,陡岸处 $d < 10m$,则对海岸性质识别准确。

4.3 实验与分析

为了验证本文提出基于随机森林算法的海岸线性质自动识别方法的有效性,本节将采用两片不同区域、不同海岸性质的机载点云数据进行验证。

4.3.1 人工加固及沙质海岸实验

4.3.1.1 人工加固及沙质海岸实验数据

选取美国国家海洋和大气管理局(NOAA)于 2019 年春季所采集的加利福尼亚州莫罗湾入口沿岸机载 LiDAR 点云数据,实验区域包含多种地形性质,区域内北部为高程较高

的岩石山包，山脚处有一条道路，道路旁边为人工堆砌的碎石加固岸及沙滩，区域南部为水域，区域内岸滩坡度较为缓和且小于 50° 。实验区域长约 274m，宽约 213m，面积约为 0.058 平方千米，当地平均大潮高潮面高程 H_{MWS} 为 1.41m，点云数据中包含约 190 万个点，含每个点的三维坐标、回波强度、回波次数等多种信息。实验区影像及数据如图 4-4 所示，激光雷达主要技术指标见表 3-3。

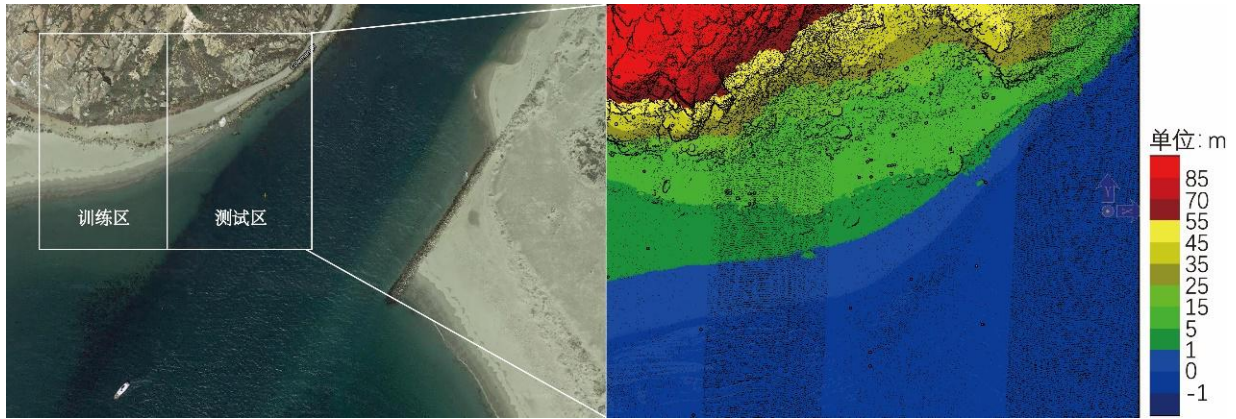


图 4-4 实验区域影像及点云依高程显示图

4.3.1.2 实验过程

(1) 海岸带点云数据分类

激光扫描仪虽能采集两个波段的点云数据，但并未对不同波段的回波强度值进行融合，且不同波段的点云数据未加区分混合在一起，故原始点云数据中每点只有一种回波强度值。因此两种回波强度信息只作为 28 维特征之一被输入到随机森林模型。按照图 4-1 所述技术框架开展实验，本文对照实验区域影像数据，利用 TerraSolid 软件采用“手动+自动”标记的方式对实验区域数据进行了标记。

将点云数据标记为以下六类：①海水，海水点云表面较为平整，在所有类中海水点高程及回波强度值最低，且水面以下点具有多次回波值，因此可按照这三点特征较为快速的将海水点自动标记；②岩石，区域内北部为高程较高的岩石山包，加之其独特的外形，故可比较容易的将其标记；③道路，不同于其他自然地表，道路点云具有水平分布的空间结构，因此可快速将其标记；④碎石，区域内道路旁边为碎石堆砌的人工加固海岸，与沙滩紧密连接且部分区域内混合出现，为保证标记精度，标记过程多为手动方式；⑤沙滩，区域内点云较为平整，但部分区域内与碎石混合出现，在自动标记的基础上需手动标记；⑥噪点，除以上五类外，剩余的点都划入此类，主要包括有空中飘浮点、低于地表及水体的低点以及不便于区分类别的其他点，该类点主要为孤立的点。点云标记结果见图 4-5，深蓝色表示海水，浅蓝色表示岩石，黄色表示道路，浅绿色表示碎石，深绿色表示沙滩，红色表示噪点。

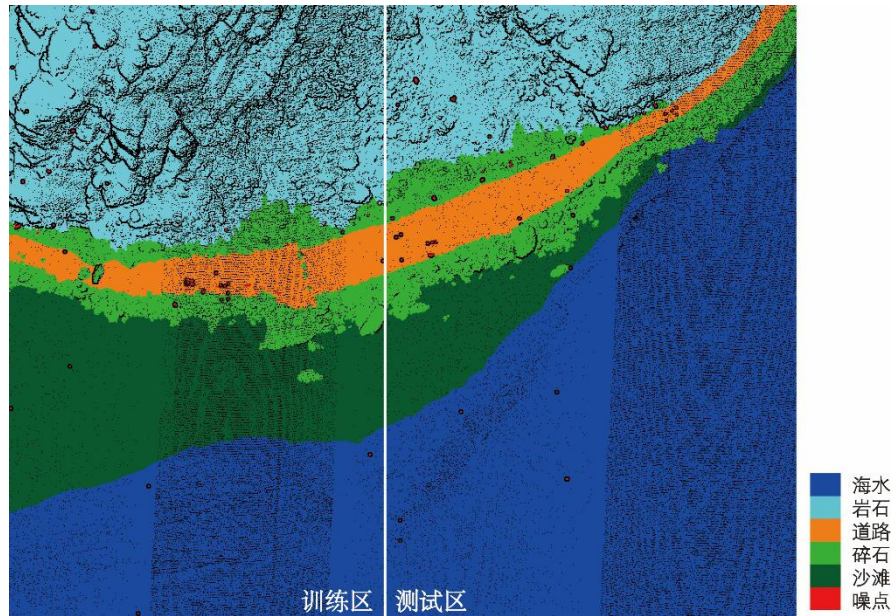


图 4-5 点云标记结果

将此区域一分为二，左侧区域用于训练随机森林模型，右侧区域用于验证模型的有效性。用训练好的随机森林模型对测试区内的数据进行自动分类，分类精度评级结果如表 4-3 所示。对于岩石的分类效果最好，完整度达到 94.55%，正确度达到 98.29%，整体分类的总精度高达 91.95%，说明本文所采用的 28 维特征对于海岸带点云性质分类的有效性。分类结果显示如图 4-6 右侧所示。

表 4-3 海岸带地表性质分类结果评定 (%)

海 水		岩 石		道 路		总精度
完整度	正确度	完整度	正确度	完整度	正确度	
92.00	99.32	94.55	98.29	91.59	93.54	91.95
碎 石		沙 滩		噪 点		
完整度	正确度	完整度	正确度	完整度	正确度	
85.60	81.76	92.34	88.41	47.01	0.11	

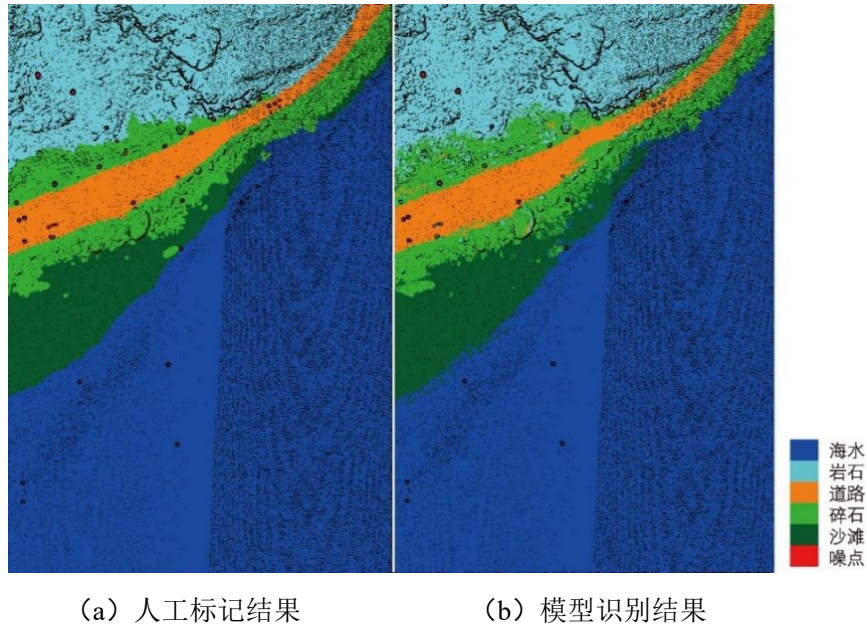


图 4-6 模型识别结果显示图

通过观察表 4-3 及图 4-6 可知，错分情况主要发生在三种区域内：①航带拼接处，该区域内一侧区域点云密度高达 $54 \text{ 点}/\text{m}^2$ ，而另一侧区域点云密度约为 $18 \text{ 点}/\text{m}^2$ ，存在点云密度过密和过疏的情况，其次由于航带之间存在匹配误差，导致在此区域内的路面点云具有更大的高程分布空间，即路面横切面变“厚”，致使模型在此区域内分类效果较差；②在不同性质地表的交界处，由于存在人工标记不准确和交界处不同地表相混杂的情况，导致训练的模型在此区域内分类效果不佳；③对于噪点的分类效果较差，且主要产生在海水类中。由于受原始实验数据影响，在进行训练区域与测试区域分区时，恰好区域内的深水航道完全处于测试区，而训练区内是浅水区，因 532nm 波段的激光对海水具有一定的穿透性，浅水区内采集到了整个水体的点云数据，在深水区只采集到了部分水体数据，导致分类模型训练不完善，且水深越深，点云密度越小，逐渐具有孤立点特征，因此深水区内的点被大量检出，但测试区内的空中漂浮点及低点被有效检出，噪点分类结果如图 4-7 所示，图中海水噪点与影像中航道所处位置基本一致。

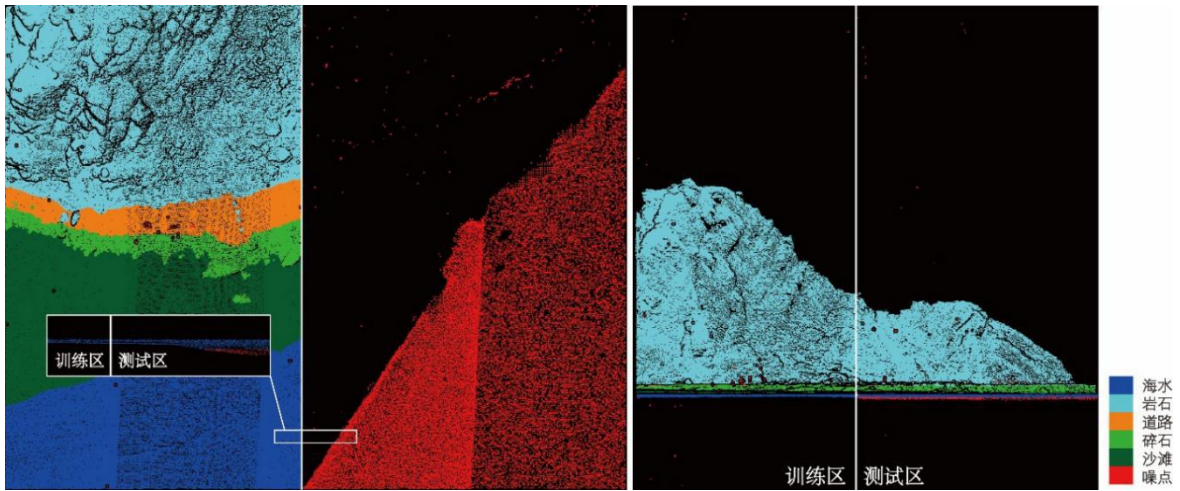
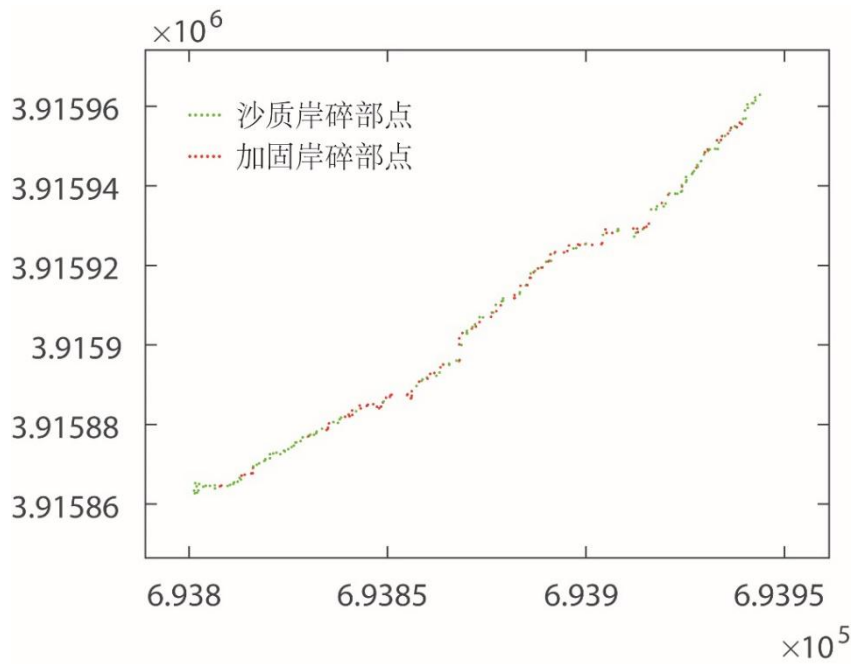


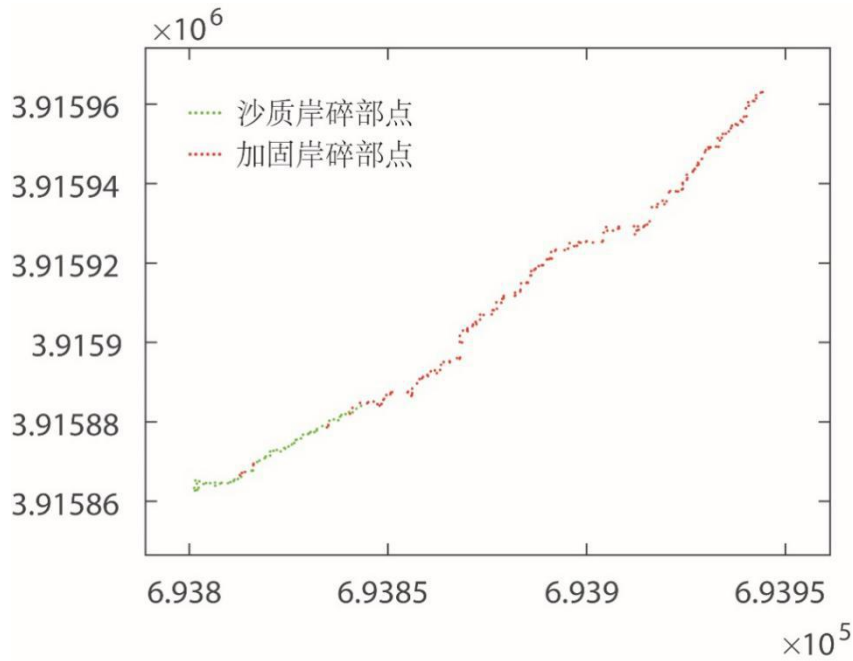
图 4-7 噪点及其侧面显示图

(2) 海岸线碎部点提取

根据本文提出的粗细格网多约束下海岸线提取方法在自动分类好的测试区内提取海岸线碎部点数据，共提取出 234 个碎部点数据，其结果如图 4-8 所示。



(a) 随机森林模型分类结果



(b) 人工标记结果

图 4-8 碎部点数据及其性质显示 (单位: m)

图中红色点代表由碎石堆砌的人工加固岸碎部点, 绿色点代表沙质岸碎部点。根据当地 H_{MHWS} 提取的海岸线碎部点多处于不同地表性质的边缘或交界处, 造成分类后的碎部点数据不同性质混杂的情况, 对分类后的碎部点数据进行性质误差的统计, 结果见表 4-4。

表 4-4 海岸线碎部点分类情况

分类正确点个数	分类错误点个数	总体精度
136	98	58.12%

与表 4-3 相比, 表 4-4 显示, 碎部点数据分类误差较大, 是由于部分碎部点数据处于不同地表性质的边缘或交界处导致, 由图 4-6 可知, 交界处的分类误差较大。因此需对海岸线碎部点类型属性进行整合。

(3) 海岸线碎部点类型属性整合

由图 4-8 可知, 模型分类后的碎部点存在误差, 以及存在相邻的一组少量点或单个点为同一性质, 按照 § 4.2.1 所述原理对海岸线碎部点类型属性进行整合, 其结果如图 4-9 所示。

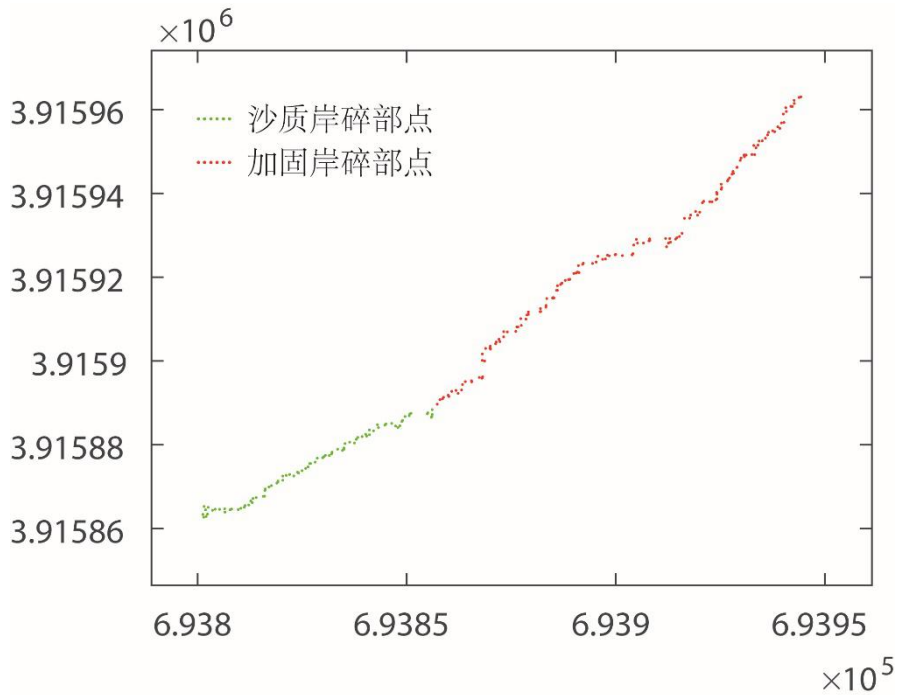
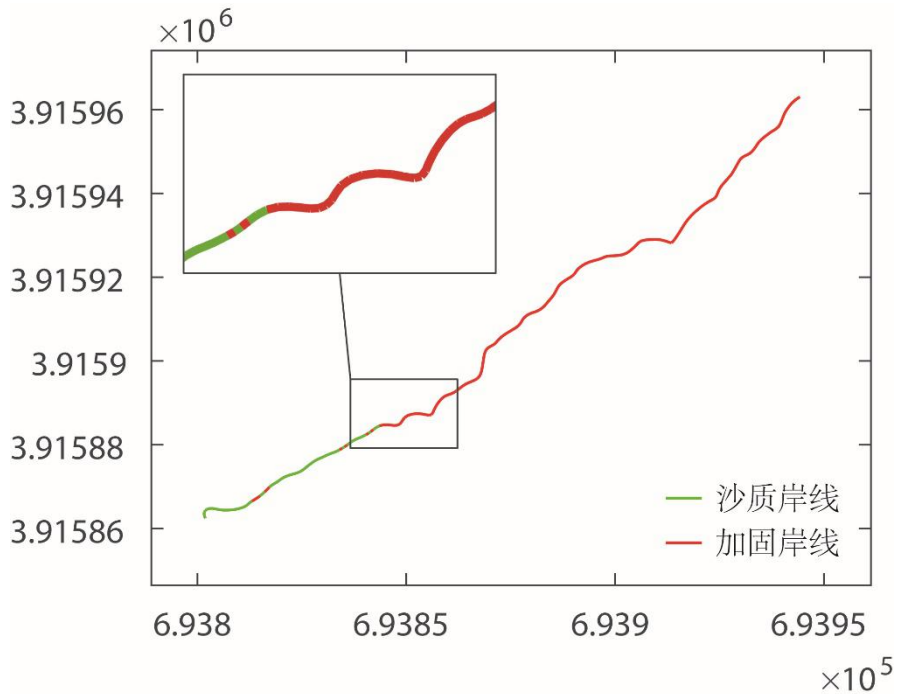


图 4-9 海岸线碎部点类型属性整合结果显示 (单位: m)

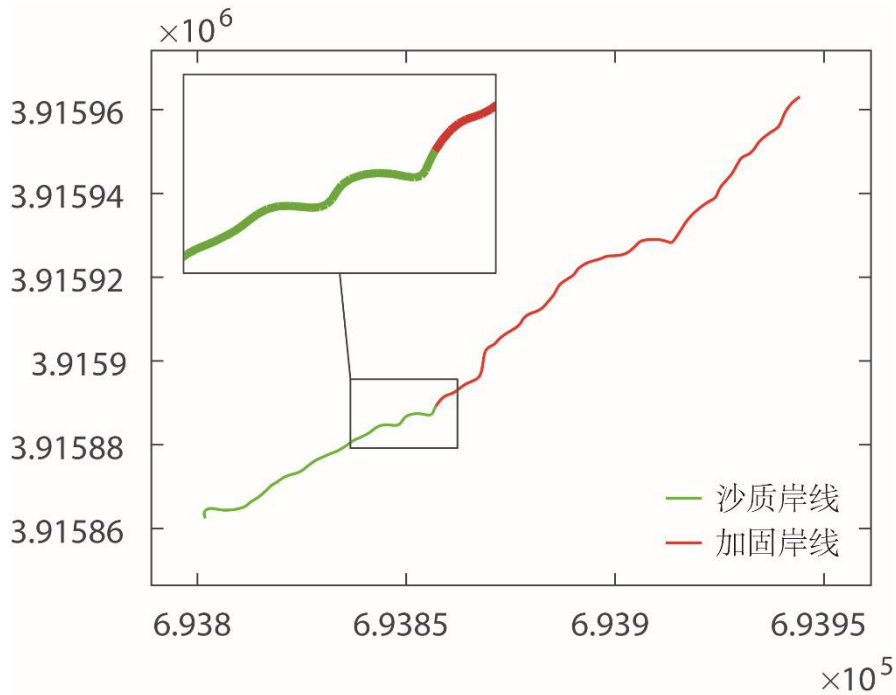
由上图可知, 经整合后, 错分及不足以表示的孤立点或少量点明显被纠正。

(4) 碎部点坐标数据平滑并生成海岸线

按照 § 3.3 所述原理分别对人工标记性质及自动标记性质的碎部点数据进行海岸线的生成, 结果如图 4-10 所示。



(a) 人工标记性质的海岸线



(b) 自动识别性质的海岸线

图 4-10 碎部点坐标数据平滑并生成海岸线结果显示 (单位: m)

(5) 海岸线性质精度评价

由图 4-10 可知, 长度较短性质的海岸线被纠正, 但也存在 “过纠正” 的情况, 有较长一段人工加固岸属性被整合为沙质岸, 故需对整合后的海岸性质进行精度评价。因本文所采用的精度评价方式是基于《中国航海图编绘规范》^[50]所提出的, 是一种用于二维海图编绘的精度评价方式, 因此碎部点的高程信息不参与精度评价。被过纠正的碎部点平面坐标数据见表 4-5。

表 4-5 类型属性 “过纠正” 的海岸线碎部点数据

X	Y	纠正后的性质	人工标记性质
693843.01	3915884.77	沙质岸	人工 (加固) 岸
693844.77	3915884.67	沙质岸	人工 (加固) 岸
693845.03	3915884.95	沙质岸	人工 (加固) 岸
693846.41	3915885.08	沙质岸	人工 (加固) 岸
693847.35	3915884.45	沙质岸	人工 (加固) 岸
693847.89	3915884.08	沙质岸	人工 (加固) 岸
693848.37	3915884.51	沙质岸	人工 (加固) 岸
693848.83	3915885.54	沙质岸	人工 (加固) 岸
693849.00	3915885.77	沙质岸	人工 (加固) 岸
693849.59	3915886.72	沙质岸	人工 (加固) 岸
693850.59	3915886.91	沙质岸	人工 (加固) 岸
693850.74	3915887.34	沙质岸	人工 (加固) 岸
693851.03	3915887.49	沙质岸	人工 (加固) 岸

693854.93	3915887.37	沙质岸	人工（加固）岸
693855.04	3915887.59	沙质岸	人工（加固）岸
693856.09	3915887.23	沙质岸	人工（加固）岸
693856.01	3915886.74	沙质岸	人工（加固）岸
693855.86	3915886.52	沙质岸	人工（加固）岸
693856.08	3915888.37	沙质岸	人工（加固）岸
长度总计		18.18m	

表 4-5 中碎部点数据依海岸线走向排列，经计算该类碎部点累积平面长度为 18.18m，小于规范规定的在 1:2 000 比例尺图中应表示的海岸性质长度 $d=20m$ ，因此对海岸线性质的识别较为准确。

4.3.2 复合海岸实验

4.3.2.1 复合海岸实验数据

实验区域包含多种地形和地物，区域内南北部两侧为高程较高的小山包，山包处所形成的的大部分岸滩坡度较陡且大于 50° ，符合《中国航海图编绘规范》^[50]关于陡岸的规定，山包之间地势平坦。陆上有林地、房屋、道路、电力线等多种地物，陆地向海一侧为坡度较为平缓的岸滩，区域南侧水域中有一处露出水面的浅滩，从影像及点云数据的横截面显示图上可知，区域内包含两种不同的海岸性质，但具体性质不易判断，实验中称之为一号海岸性质（区域中部地势平坦处海岸）和二号海岸性质（陡岸，区域南北侧小山包处海岸）。实验区影像及数据如图 4-11 所示，激光雷达主要技术指标见表 3-3。

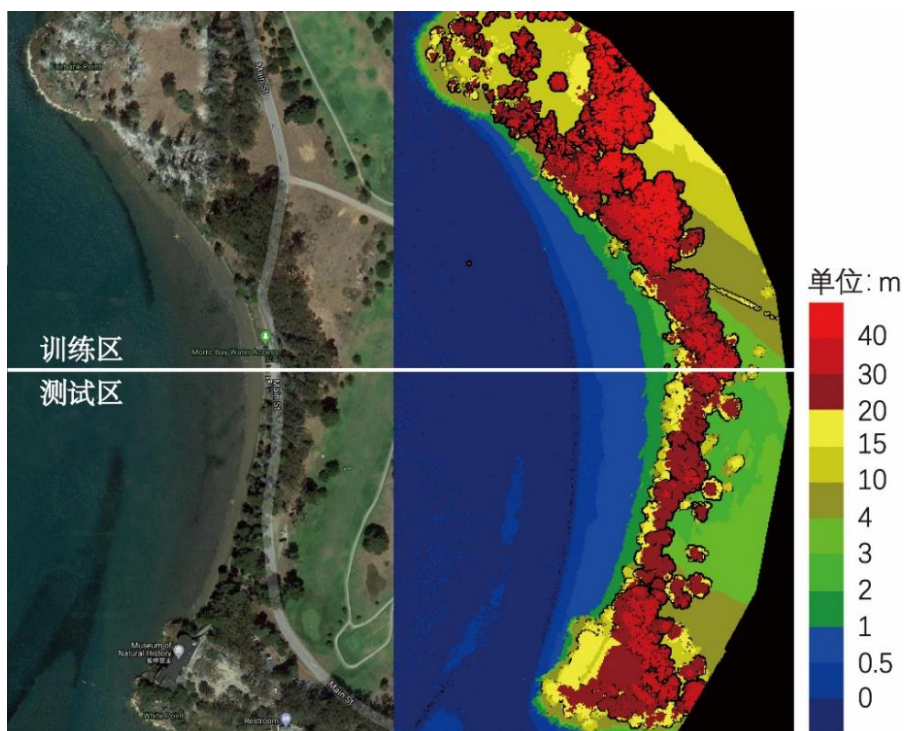


图 4-11 实验区域影像及点云依高程显示图

4.3.2.2 实验过程

(1) 海岸带点云数据分类

与实验一类似，实验二将两种回波强度信息只作为 28 维特征之一被输入到随机森林模型。按照 § 4.1 所述技术路线开展实验，对照实验区域影像数据，利用 TerraSolid 软件采用“手动+自动”标记的方式对实验区域数据进行了标记。

将点云数据标记为以下五类：①海水，海水点云表面较为平整，在所有类中海水点高程及回波强度值最低，且水面以下点具有多次回波值，因此可按照这三点特征较为快速的将海水点自动标记；②岸滩，将区域内平坦陆地向海一侧有狭长浅滩及南部水域中有一处露出水面的浅滩划分为岸滩，因其地势平坦及在影像上较深的颜色，故可比较容易的将其标记；③地面，陆地上除岸滩外的地面部分，包括南北两侧的山包及两山包之间的平坦地面，此类点云可利用 TerraSolid 软件的自动滤波功能标记，但还需手动剔除误差点及添加漏分点；④地面以上类，区域内植被、房屋、电力线等地物均划入此类，此类点云因其较高的高程，可较容易的自动标记，但在与地面的结合处需人工标记；⑤噪点，除以上四类外，剩余的点都划入此类，主要包括有空中飘浮点、低于地表及水体的低点以及不便于区分类的其他点，该类点主要为孤立的点。点云标记结果见图 4-12，深蓝色表示海水，黄色表示地面，浅绿色表示地面以上类，深绿色表示岸滩，红色表示噪点。

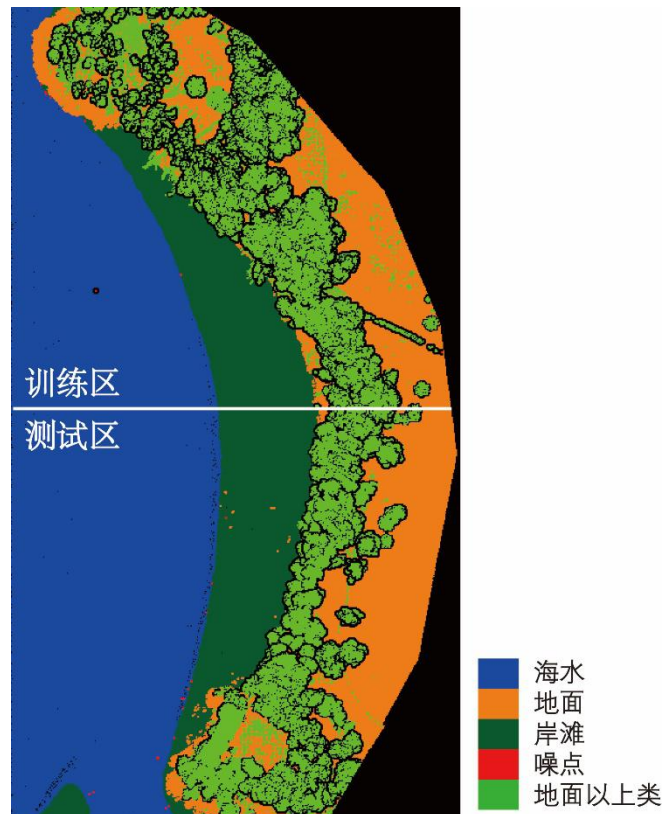


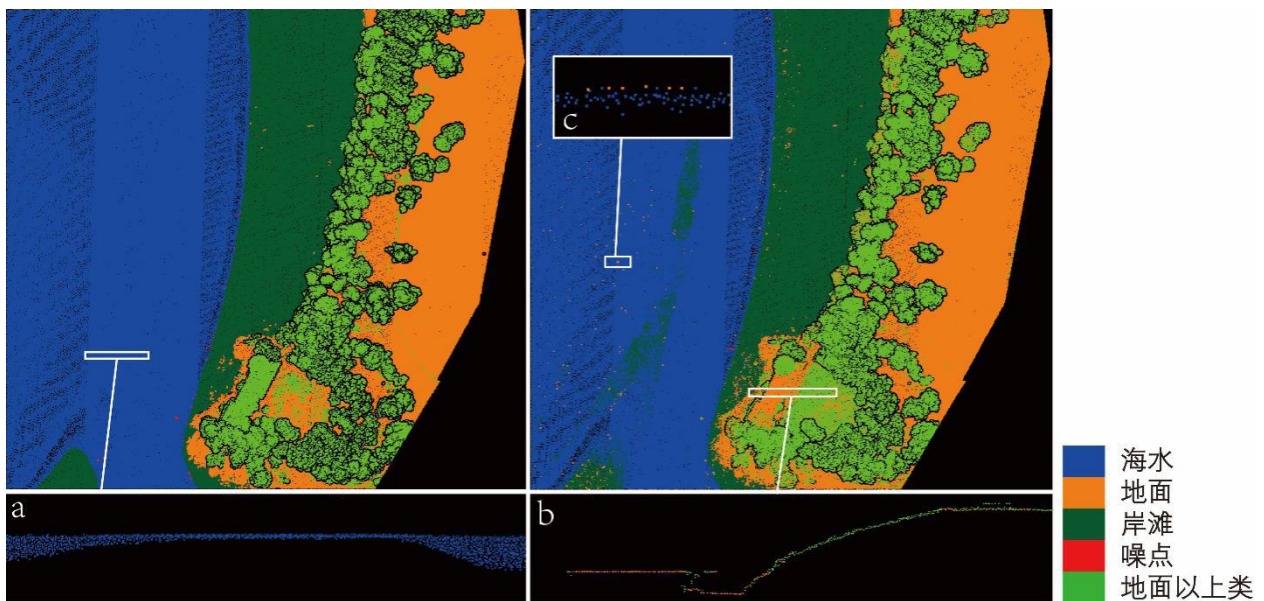
图 4-12 点云标记结果

将此区域一分为二，区域上部用于训练随机森林模型，区域下部用于验证模型的有效

性。用训练好的随机森林模型对测试区内的数据进行自动分类，分类精度评价结果如表 4-6 所示。对于海水的分类效果最好，完整度达到 98.98%，正确度达到 98.98%，整体分类的总精度高达 95.04%，说明本文所采用的 28 维特征对于地表及地物性质分类的有效性。分类结果如图 4-13 右侧所示。

表 4-6 海岸带地表性质分类结果评定 (%)

海水		地面		岸滩	
完整度	正确度	完整度	正确度	完整度	正确度
98.98	98.98	94.55	98.29	94.59	95.44
地面以上类		噪点		总精度	
完整度	正确度	完整度	正确度		
92.99	91.70	44.91	53.19	95.04	



(a) 人工标记结果

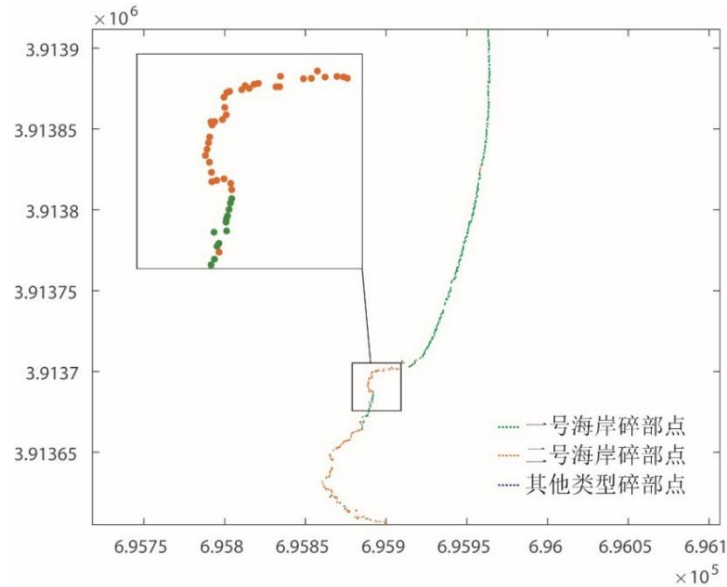
(b) 模型识别结果

图 4-13 分类结果显示图

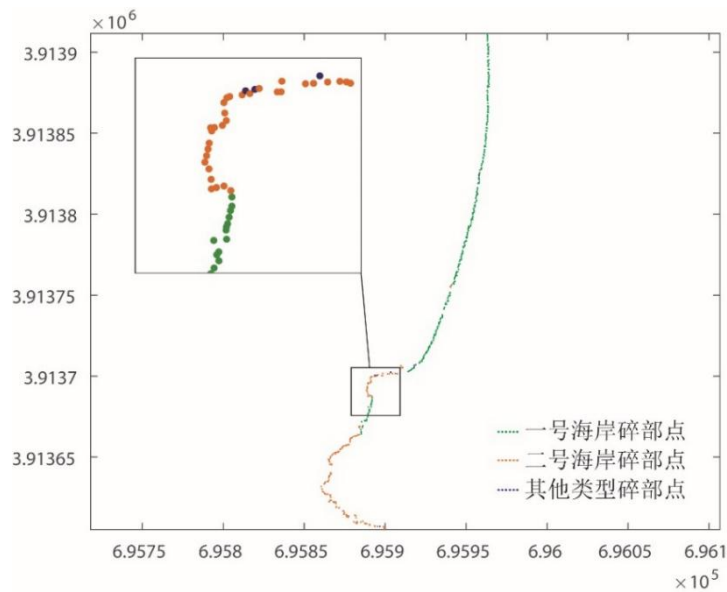
通过观察表 4-6 及图 4-13 可知，错分情况主要发生在四种区域内：①水域内狭长浅滩分类错误，如图 4-13 (a) 所示，从影像上可知，此处高潮时淹没，低潮时露出，因影像数据与点云数据采集时间不同步，并不易判断浅滩是否露出，但从点云横截面可知，此区域高程高于周围水面，且激光未能穿透该区域表面，因此可以判断此处应为露出水面的浅滩，即人工标记误差导致分类结果不准确；②区域南部房屋及部分地表分类错误，如图 4-13 (b) 所示，由于训练区内缺少房屋类及训练区内山包较测试区内山包高程低很多，导致模型训练不完善，故产生分类误差；③水域中少量点被错分为地面或岸滩类，如图 4-13 (c) 所示，主要由于该类点高出周边水面点且与平坦地面和岸滩的特征相似，导致错分；④噪点类，区域内手动标记的噪点数量较少，但大部分被有效检出，部分水下点具有孤立点特征，因此被错分。

(2) 海岸线碎部点提取

根据本文提出的确定粗细格网的原则，选定粗格网为 2m，细格网为 1m，并利用粗细格网多约束下海岸线提取方法在自动分类好的测试区内提取海岸线碎部点数据，共提取出 425 个碎部点数据，其结果如图 4-14 所示。



(a) 随机森林模型分类结果



(b) 人工标记结果

图 4-14 碎部点数据及其性质显示 (单位: m)

图中绿色点为一号海岸性质碎部点，黄色点为二号海岸性质碎部点，蓝色点为其他性质碎部点（部分点被人工标记为地面以上类），从图 4-14 可看出，随机森林模型预测的碎部点性质与人工标记结果较吻合，对分类后碎部点数据进行性质误差的统计，结果见表 4-7。

表 4-7 海岸线碎部点分类情况

分类正确点个数	分类错误点个数	总体精度
385	40	90.59%

与实验一中表 4-4 相比, 实验二中模型对碎部点预测的准确性较高, 因此无需进行 § 4.2.1 中图 4-3 (a) 所示环节, 可直接进行图 4-3 (b) 所示环节对碎部点属性进行重新赋值。

(3) 海岸线碎部点类型属性整合

由图 4-14 可知, 模型分类后的碎部点存在误差, 以及存在相邻近的一组少量点或单个点为同一性质, 按照 § 4.2.1 所述原理对海岸线碎部点类型属性进行纠正, 其结果如图 4-15 所示。

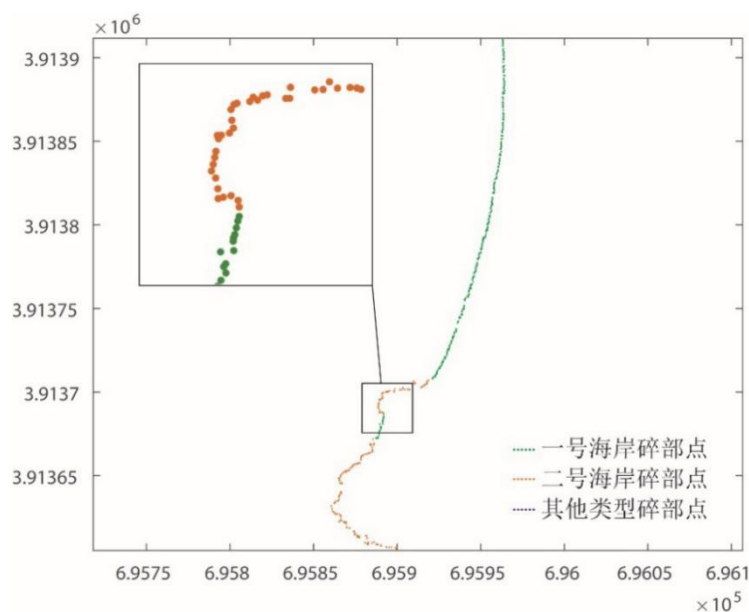
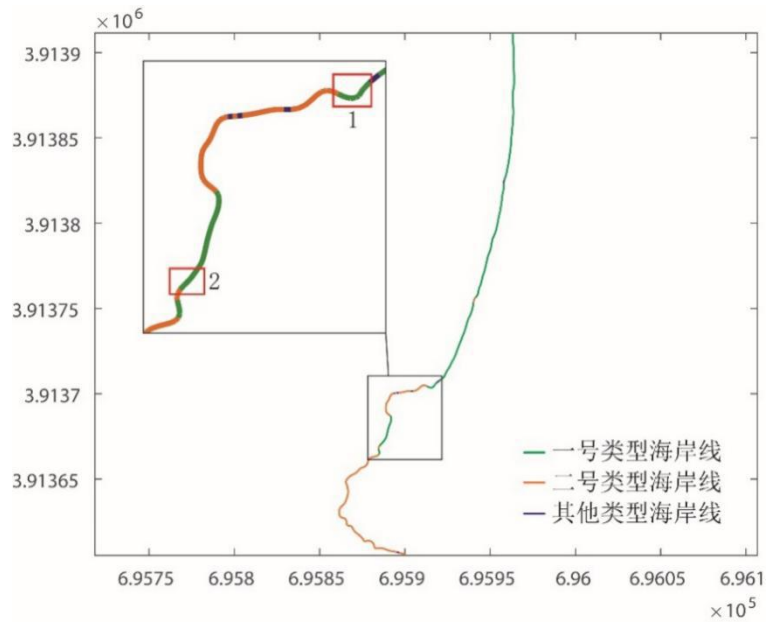


图 4-15 海岸线碎部点类型属性整合结果显示 (单位: m)

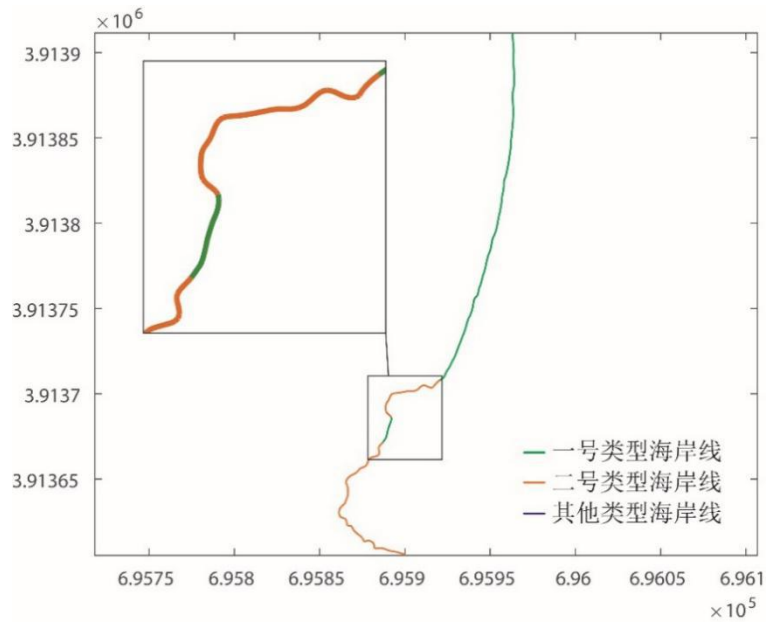
由上图可知, 经整合后, 错分及不足以表示的孤立点或少量点明显被纠正。

(4) 碎部点坐标数据平滑并生成海岸线

按照 § 3.3 所述原理分别对人工标记性质及模型预测性质的碎部点数据进行海岸线的生成, 结果如图 4-16 所示。



(a) 人工标记性质的海岸线



(b) 自动识别性质的海岸线

图 4-16 碎部点坐标数据平滑并生成海岸线结果显示 (单位: m)

(5) 精度评价

由图 4-16 可知, 长度较短性质的海岸线被纠正, 与实验一类似存在“过纠正”的情况, 如图 4-16 (a) 中附图, 有部分一号海岸性质被整合为二号海岸性质, 因此需对重新赋值后的海岸性质进行精度评价。图 4-16 (a) 附图中被过纠正的最长的两段海岸线 (见红框 1 处和 2 处) 碎部点平面坐标数据见表 4-8。

表 4-8 类型属性“过纠正”的海岸线碎部点数据

1 号区域			
X	Y	纠正后的性质	人工标记性质
695914.26	3913702.75	2 号海岸性质	1 号海岸性质
695914.55	3913703.10	2 号海岸性质	1 号海岸性质
695915.31	3913703.47	2 号海岸性质	1 号海岸性质
695916.15	3913703.89	2 号海岸性质	1 号海岸性质
695916.48	3913704.28	2 号海岸性质	1 号海岸性质
695917.21	3913704.72	2 号海岸性质	1 号海岸性质
695917.73	3913705.00	2 号海岸性质	1 号海岸性质
695917.97	3913705.43	2 号海岸性质	1 号海岸性质
长度总计			4.69m
2 号区域			
X	Y	纠正后的性质	人工标记性质
695885.94	3913668.40	2 号海岸性质	1 号海岸性质
695886.24	3913669.32	2 号海岸性质	1 号海岸性质
695885.53	3913671.82	2 号海岸性质	1 号海岸性质
长度总计			3.57m

表中碎部点数据依海岸线走向排列，经计算该类碎部点最长平面长度为 4.69m，不但小于规范规定的在 1:2 000 比例尺图中应表示的普通性质海岸长度 $d=20m$ ，也小于陡岸性质长度 $d=10m$ ，故对海岸线性质的识别较为准确。

4.4 本章小结

本章提出一种基于随机森林算法的海岸线识别方法，该方法利用训练好的随机森林模型对海岸带 LiDAR 点云进行分类，随后基于第三章提出的粗细格网多约束下海岸线提取方法提取得到了分类后的海岸线碎部点数据，并通过对海岸线碎部点类型属性整合得到了类型属性更为精确且符合相关规范^[50]要求的海岸线碎部点，随后生成了具有类型属性的海岸线，通过与人工标记性质的海岸线进行对比分析，自动识别的海岸线性质的精度符合规范^[50]的要求。通过两个不同区域的实验表明，该方法能够准确识别不同性质的海岸线，验证了该方法的可行性与通用性，且通过分类实验表明，LiDAR 技术还具有识别海岸带不同地表性质的潜力。

第五章 总结与展望

5.1 总结

LiDAR 技术因其能够快速获取海量的三维坐标点，被广泛的应用于多种领域，其独特的优势能为海岸线测量带来成本及精度上的新突破，本文在分析研究国内外海岸线测量现状的基础上，围绕 LiDAR 点云数据的特点，对 LiDAR 点云数据的组织管理、显示及应用分析等开展了研究，系统的构建了 LiDAR 技术用于海岸线精确测量的理论与技术方法体系，对本文完成的主要工作与创新点总结如下：

1. 阐述研究 LiDAR 点云数据提取及识别海岸线的研究背景与研究意义，对 LiDAR 技术与其他遥感技术用于海岸线测量进行系统对比分析，并从平台、探测机制、波段等方面对 LiDAR 技术用于我国海岸线测量进行了优势对比分析，论述了在我国开展 LiDAR 技术测量海岸线的可行性与必要性。

2. 在分析当前利用 LiDAR 技术提取海岸线常见的等值线追踪法及交叉海岸剖面法存在的问题基础上，对本文提出的粗细格网多约束下海岸线提取方法的原理进行了详细说明。通过三个不同地区海岸线提取实例（其中沙质海岸实验区的海岸线跨度长达 2.1km），证明了粗细格网多约束下海岸线提取方法的可靠性与通用性，且提取结果更加符合实际海岸线特性，避免了当前主流的海岸线提取方法等值线追踪法内插生成海岸带 DEM 及再由 DEM 内插生成海岸线等繁琐且易损失点云精度的环节，解决了等值线追踪法在平缓岸滩处提取的海岸线较为抖动的问题。

3. 指出了当前海岸线提取方法仅解决了位置线提取并未对其性质信息进行确认的问题，在提出的粗细格网多约束下海岸线提取方法的基础上提出了一种基于随机森林算法的海岸线性质的自动识别方法，两个实例表明，该方法能够准确识别出海岸线性质的，其精度符合相关国家标准及规范^[50]的要求，突破了当前国内外利用 LiDAR 技术提取海岸线过于单纯聚焦于位置线提取的现状。

5.2 后续的工作及展望

本文对 LiDAR 技术用于海岸线自动化精确提取与性质识别进行了深入探讨，取得了一定的研究成果，但针对 LiDAR 数据用于更大海岸线场景的快速提取与性质识别仍处于初步阶段，面对海量的点云数据时，相关算法的效率有待进一步优化提升，由于个人研究精力有限，本文所提出的方法仍存在一些有待改进的地方，同时，海岸线的提取与性质识别方面仍存在一些亟待解决的难题，可从以下几个方面进行深入研究：

1. 更加快速的实现点云的组织、显示及特征提取。本文采用一种粗细正方形格网搭配快速确定海岸线位置的方法，但面对海量的点云数据时，这种方法仍然比较耗时；在计算点云特征环节，往往计算机 CPU 会处于满荷运转状态，导致了整个海岸线提取与性质识别

过程非常耗时。因此需要探索一种更加高效的点云组织及显示方式，同时随着高性能计算技术的发展，并行计算技术应用广泛，将其用于海量的点云数据处理，可大幅提高整个海岸线提取过程的效率。

2. 我国尚未建立成熟的海岸带 LiDAR 作业技术标准，表现为各种平台系统的校准方法也不尽相同，因此需要建立一套先进的、统一的、符合实际需要的作业技术标准。

3. 虽然 LiDAR 硬件技术比较成熟，但对应的数据处理软件发展相对滞后。硬件生产商一般不从事相关软件开发或开发的软件与海洋测绘的要求相距甚远。因此，研发符合海洋测绘要求的通用点云数据处理软件是未来研究重点。

4. 将相关研究成果用于生产实践。到目前为止，我国海岸线的测量仍采用的是人工实地勘测模式，论文的研究成果可为我国海岸线测量模式的转型升级提供技术方法，同时利用 LiDAR 技术提取的海岸线成果可用于相关测绘产品的生产，但由于本人研究精力有限并未将全部的理论研究成果向生产实践转化，在下一步的学习工作过程中将对论文方法提取的海岸线用于海洋测绘产品的生产实践。

5. 由于激光传输过程中受到空气及其中的杂质、光照等因素的影响，导致获取的点云数据在回波强度和几何精度两方面均存在误差，因此在实现利用点云数据对地物进行精准分类之前，需对其进行回波强度校正和几何校正，相关校正模型有待进一步研究确立。

致 谢

弹指间硕士生涯接近尾声，论文进行到此，百感交集，内心充满感激。

衷心感谢恩师董广军副教授！师恩如山，铭刻在心。在科研学术上，导师学术造诣深厚，思维敏捷，目光独到，在本人论文的选题、实验、撰写及修改过程中，导师倾注了极大心血，让我少走了弯路，坚定了科研信心；在生活中，导师设身处地的为我着想，能够体谅我家庭带来的压力，为我排忧解难，让我有充足精力完成自己的学业。同时，导师豁达的人生态度及坦率豪爽的处事方式极富感染力，让我由衷地敬佩。导师不仅是我科研学术生涯的启蒙者、领路人，更是我今后人生道路中努力学习的榜样。

特别感谢戴晨光教授！因戴教授才师从董广军副教授，同时，您在日常的学习生活中给予我极大的帮助和鼓励，让我的学业生涯更加从容。

特别感谢于英教员、张振超教员！您们亦师亦友，无数次在百忙之中与我交流探讨论文写作及程序调试设计的细节，让我深受启发，获益匪浅。同时，与您们在生活中的共同见闻，为我繁重的学业生涯增添了无尽乐趣。

衷心感谢信息工程大学地理空间信息学院的教员及同学们！学院教员孜孜不倦的育人和勇攀高峰的科研精神时刻感染着我，我将时刻铭记您们的谆谆教诲；感谢姚强强师兄、邵磊师兄，没有你们我将很难完成程序的设计；感谢本科同学崔志祥硕士、赵传博士、杨乐硕士、董杨博士、赖广陵博士、熊新博士、薛志祥博士以及王岩与史文洁夫妇，每次与你们的聚会总能让我欢呼雀跃，与你们的情谊地久天长；感谢实验室弟弟妹妹吴翔宇、张磊、吕可枫、郑明阳、周建彬、闵杰、王龙辉、陈向勇、王自全、雷毅、张昆、王蕊的陪伴与帮助；感谢舍友闫科、刘宸博、李庆高在生活中的理解与包容，很荣幸与你们共同学习、共同进步、共同生活。

衷心感谢中国航海图书出版社的领导和同事们！感谢谭冀川、刘波、刘国辉、林海峰、葛智杰等领导的关怀与厚爱，以及刘涛、张宏伟、张伟强、唐羽辰、崔兴亚等同事对我工作、学习的帮助指导，有了您们我才能顺利完成学业。

衷心感谢中国科学院上海技术物理研究所孔伟老师提供光子计数 LiDAR 点云数据及技术支持！孔老师热情大方且专业素养过硬，您耐心细致为我讲解点云数据处理技术与方法，让我获益良多。

特别感谢我的家人！感谢父母，您们的养育之恩大过天深过海；感谢奶奶，您近三十年的牵挂，让孙子无以为报；感谢姐姐们对父母无微不至的照顾，让千里之外的弟弟无后顾之忧；感谢岳母不辞劳苦，常年异地他乡独自照顾外孙女；感谢妻子刘甜女士及女儿姜姜小朋友，有你们的支持让我不畏惧任何艰难苦痛，你们是我今后人生中更加努力奋斗的不竭动力！

感谢母校给予我智慧、给予我热血，我必将用一生回馈祖国、回馈社会！

姜怀刚

二〇二〇年十月 郑州

参考文献

- [1] 李家彪, 雷波. 中国近海自然环境与资源基本状况[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- [2] 张志卫, 丰爱平, 吴桑云, 等. 基于生态系统的海岛保护与利用规划理论与实践[M]. 北京: 海洋出版社, 2017.
- [3] 于彩霞. 基于 LiDAR 数据的海岸线提取技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2015.
- [4] 史建青. 机载 LiDAR 在省级基础测绘中若干关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [5] 张占睦, 芮杰. 遥感技术基础[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] 厉峰. 基于 LIDAR 技术与潮汐模型的海岛岸线提取研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2012.
- [7] GB/T 18190-2000, 海洋学术语——海洋地质学[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [8] GB 12327-1998, 海道测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [9] 许家琨, 欧阳永忠, 缪世伟, 等. 东海辖区海岛礁测量的若干问题和对策[J]. 中国测绘学会海洋测绘专业委员会第二十一届海洋测绘综合性学术研讨会论文集, 2009.
- [10] 赵明才, 章大初. 海岸线定义问题的讨论[J]. 海岸工程, 1990(Z1):91-99.
- [11] 王长海, 邱桔斐, 丁红. 海域使用中有关海岸线的问题探讨[J]. 海洋开发与管
理, 2009, 26(04):51-56.
- [12] 滕惠忠, 王克平, 缪世伟, 等. 海岸地形测量技术发展思考[J]. 海洋测绘, 2017, 37(6):25-29.
- [13] 暴景阳, 许军, 关海波. 平均大潮高潮面的计算方法与比较[J]. 海洋测绘, 2013, 33(04):1-5.
- [14] 国家海洋局 908 专项办公室. 海岸带调查技术规程[M]. 海洋出版社, 2005.
- [15] 葛锡志. 面向对象的遥感影像海岸线分类与提取[D]. 青岛: 山东科技大学, 2013.
- [16] 苏振奋等. 海岸带遥感评估[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [17] 倪绍起, 张杰, 马毅, 等. 基于机载 LiDAR 与潮汐推算的海岸带自然岸线遥感提取方法研究
[J]. 海洋学研究, 2013, 31(3):55-61.
- [18] Baidu. Coastlines[EB/OL]. (2019-10-11) [2019-10-11]. <https://image.baidu.com>.
- [19] 国家海洋局第一海洋研究所. 一种机动式高精度砂质岸线和淤泥质岸线测量装置[P]. 中
华人民共和国: CN 205263316 U.
- [20] 王智, 曹庆磊, 张洪德, 等. PPK 动态后处理测量技术及精度分析[J]. 城市勘测, 2019,
170(02):99-102.
- [21] 李广伟. 基于船载 LiDAR 的湖沿岸植被参数估测[D]. 北京: 首都师范大学, 2012.
- [22] 李盛阳, 刘志文, 刘康, 等. 航天高光谱遥感应用研究进展[J]. 红外与激光工程, 2019,
48(3):9-23.
- [23] White S A, Parrish C E, Calder B R, et al. LIDAR-Derived National Shoreline: Empirical and
Stochastic Uncertainty Analyses[J]. Journal of Coastal Research, 2011, 62: 62-74.
- [24] Peter Ruggiero, George M. Kaminsky, Guy Gelfenbaum. Linking Proxy-Based and

- Datum-Based Shorelines on a High-Energy Coastline Implications for Shoreline Change Analyses[J]. Journal of coastal research, 2003, 38:57-82.
- [25] Lee J S, Jurkevich I. Coastline Detection and Tracing in SAR Images[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1990, 28(4): 662-668.
- [26] 张志华. 海岸带测绘技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2019.
- [27] 王志勇, 张继贤, 黄国满. InSAR 技术在海岛(礁)测量中的应用[J]. 测绘通报, 2013(9): 101-104.
- [28] Mitchell A L, Ng H M, Yu J H, et al. Terrain characterisation of Heard, McDonald and Macquarie Islands using multi-frequency Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) data[C]// Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE, 2011.
- [29] 申家双, 翟京生, 郭海涛. 海岸线提取技术研究[J]. 海洋测绘, 2009, 29(6): 74-77.
- [30] 申家双. 海岸带等水位线信息提取与垂直基准转换技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011.
- [31] Maglione P, Parente C, Vallario A. Coastline extraction using high resolution World View-2 satellite imagery[J]. European Journal of Remote Sensing, 2014, 47(1):685-699.
- [32] 郭忠磊, 辛宪会, 滕惠忠, 等. 一种无人机影像点云提取海岛自然岸线的方法[J]. 海洋测绘, 2018.38(3):35-38.
- [33] 梁立, 刘庆生, 刘高焕, 等. 基于遥感影像的海岸线提取方法综述[J]. 地球信息科学学报, 2018. 20(12): 61-71.
- [34] William Robertson V, Dean Whitman, Keqi Zhang, et al. Mapping Shoreline Position Using Airborne Laser Altimetry[J]. Journal of Coastal Research, 2004. 20(3):884-892.
- [35] 张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉大学出版社, 2007.
- [36] 姚强强. 船载三维测量系统相关技术应用研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2018.
- [37] Shachak Pe'eri, Bernard Long. LIDAR Technology Applied in Coastal Studies and Management[J]. Journal of Coastal Research, 2011.(62):1-5.
- [38] 殷飞, 田林亚, 王涛, 等. 海岸线遥感解译和提取方法研究[J]. 地理空间信息, 2018.16(8):64-66.
- [39] IHO, STANDARDS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS[S]. 2008.
- [40] Brian Madore, Gretchen Imahori, Jamie Kum, et al. NOAA's use of remote sensing technology and the coastal mapping program[R]. Charleston:OCEANS 2018 MTS/IEEE, 2018.
- [41] Smeets J, Clément Mallet, David N, et al. Large-scale water classification of coastal areas using airborne topographic lidar data[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2013.

- [42] 赖旭东, 李咏旭, 陈佩奇, 等. 机载激光雷达技术现状及展望[J]. 地理空间信息, 2017.15(8):1-4.
- [43] 谢宏全, 谷风云, 李勇, 等. 基于激光点云数据的三维建模应用实践[M]. 武昌: 武汉大学出版社, 2014.
- [44] Stockdonf H F , Holman R A . Estimation of Shoreline Position and Change Using Airborne Topographic Lidar Data[J]. Journal of Coastal Research, 2002, 18(3):502-513.
- [45] 董保根, 张良, 张钢, 等. 利用 LiDAR 点云提取有地形约束的光滑海岸线[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(2):113-117.
- [46] Liu H , Gu S S . Automated Extraction of Shorelines from Airborne Light Detection and Ranging Data and Accuracy Assessment Based on Monte Carlo Simulation[J]. Journal of Coastal Research, 2007, 23(6):1359-1369.
- [47] 张小红. 机载激光扫描测高数据滤波及地物提取[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [48] 孙国愿. 利用等高线生成 DEM 方法的研究及改进[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [49] 赵洪伟. 基于规则格网 DEM 的等高线自动提取技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [50] GB 12320-1998, 中国航海图编绘规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [51] 刘善伟, 张杰, 马毅, 等. 遥感与 DEM 相结合的海岸线高精度提取方法[J]. 遥感技术与应用, 2011, 026(005):613-618.
- [52] 孙伟富, 马毅, 张杰, 等. 不同性质海岸线遥感解译标志建立和提取方法研究[J]. 测绘通报, 2011(03):41-44.
- [53] 许宁. 中国大陆海岸线及海岸工程时空变化研究[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2016.
- [54] 马小峰, 赵冬至, 邢小罡, 等. 海岸线卫星遥感提取方法研究[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(2):185- 189.
- [55] 夏东兴, 段焱, 吴桑云. 现代海岸线划定方法研究[J]. 海洋学研究, 2009, 27 (增) : 28-33.
- [56] Kaasalainen S, Hyyppa H, Kukko A, et al. Radiometric Calibration of LIDAR Intensity With Commercially Available Reference Targets[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(2):588-598.
- [57] Franceschi M., Teza G., Preto N., et al. Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(6), 522-528.
- [58] Burton D , Dunlap D B , Wood L J , et al. Lidar Intensity as a Remote Sensor of Rock Properties[J]. Journal of Sedimentary Research, 2011, 81(5):339-347.
- [59] Suomalainen J , Hakala T , Kaartinen H , et al. Demonstration of a virtual active hyperspectral LiDAR in automated point cloud classification[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote

Sensing, 2011, 66(5):637-641.

- [60] Antonarakis A S, Richards K S, Brasington J. Object-based land cover classification using airborne LiDAR[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(6):2988-2998.
- [61] 周唯, 彭认灿, 董箭. LiDAR 点云纹理特征提取方法[J]. 国防科技大学学报, 2019.41(2):124-131.
- [62] Juan F D , William C , Craig G , et al. Capability Assessment and Performance Metrics for the Titan Multispectral Mapping Lidar[J]. Remote Sensing, 2016, 8(11):936-.
- [63] K. Bakula, Kupidura P , Ł. Jełowicki. TESTING OF LAND COVER CLASSIFICATION FROM MULTISPECTRAL AIRBORNE LASER SCANNING DATA[J]. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, XLI-B7:161-169.
- [64] Matikainen L , Karila K , Hyyppä J , et al. Object-based analysis of multispectral airborne laser scanner data for land cover classification and map updating[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 128:298-313.
- [65] Morsy S , Shaker A , El-Rabbany A. Multivariate Gaussian Decomposition for Multispectral Airborne Lidar Data Classification[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018, 8741-8744.
- [66] 姜怀刚, 于英, 务宇宽, 等. LiDAR 技术用于我国海岸线测量的优势对比分析[J]. 海洋测绘, 2020, 40(02):41-46.
- [67] 史建青, 史照良, 郑斌, 等. ALiDAR 用于 1:10 000 比例尺地形图高程更新的可行性研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(06):13-15.
- [68] 余建伟, 刘守军. 中海达船载水上水下一体化三维移动测量系统[J]. 测绘通报, 2013. (7): 119-120.
- [69] 王果. 不同平台激光点云数据面状信息自动提取研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
- [70] 童礼华. 多平台 LiDAR 点云数据集成技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [71] 余旭初, 冯伍法, 杨国鹏, 等. 高光谱影像分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [72] Eitel J U H , Höfle B , Vierling L A , et al. Beyond 3-D: The new spectrum of lidar applications for earth and ecological sciences[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 186:372-392.
- [73] 李铭. 基于光纤光学的光子计数激光雷达技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [74] 周冰, 黄富瑜, 徐春梅. 现代脉冲激光测距技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [75] 郑向阳. 运动条件下光子计数激光雷达数据处理技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [76] 张庭发. 自由运转式近红外单光子探测器及其激光测距应用研究[D]. 青岛: 山东大学, 2018.

- [77] 许艺腾. 单光子激光测高数据处理技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- [78] NASA. ICE-Sat-2[EB/OL]. (2018) [2019-10-17]. <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov>.
- [79] 侯利冰, 黄庚华, 况耀武, 等. 光子计数激光测距技术研究[J]. 科学技术与工程, 2013.13(18): 5186-5190.
- [80] 卜禹铭, 杜小平, 曾朝阳, 等. 无扫描激光三维成像雷达研究进展及趋势分析[J]. 中国光学, 2018, 11(05):23-39.
- [81] 徐璐. Gm_APD 脉冲累积激光雷达探测性能提高的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [82] 王志明, 李锁乐. 机载 LiDAR 技术支持下的荒漠地区 1:10 000 地形图测绘与研究——以内蒙古阿拉善地区为例[J]. 测绘通报, 2019, 505(04): 99-103.
- [83] 于彩霞, 王家耀, 黄文骞, 等. 基于 LiDAR 点云提取海岸线的二值图像化改进方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017,42(07):897-903.
- [84] CH/T 8024-2011, 机载激光雷达数据获取技术规范[S]. 北京: 测绘出版社, 2012.
- [85] 邵磊. 船载 LiDAR 内河场景水涯线提取与地物分类应用研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2018.
- [86] 于彩霞, 王家耀, 暴景阳, 等. 一种基于 LiDAR 点云栅格化的海岸线提取方法[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(2): 187-191.
- [87] 刘晨晨. 数学形态学图象处理算法应用研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2003.
- [88] MATLAB. Smooth[EB/OL]. (2020) [2020-04-02].
<https://ww2.mathworks.cn/help/curvefit/smooth.html>.
- [89] 刘嘉蔚, 李奇, 陈维荣, 等. 基于核超限学习机和局部加权回归散点平滑法的 PEMFC 剩余使用寿命预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24):7272-7279+7500.
- [90] 姜健飞, 吴笑千, 胡良剑. 数值分析及其 MATLAB 实验[M]. 清华大学出版社, 2015.
- [91] NOAA Office. 2019 USACE NCMP topobathy lidar: gulf coast (MS) point cloud files[EB/OL]. (2020-05-08) [2020-8-11]. https://chs.coast.noaa.gov/htdata/lidar4_z/geoid18/data/8937/.
- [92] NOAA Office. 2019 NOAA Topobathy Lidar: Morro Bay, CA Point Cloud files[EB/OL]. (2020-06-07) [2020-10-02]. https://chs.coast.noaa.gov/htdata/lidar4_z/geoid18/data/8937/.
- [93] GB 12320-1998, 中国海图图式[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [94] Weinmann M, Jutzi B, Hinz S, Mallet C. Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015 Jul 1;105:286-304.
- [95] 张振超. 基于机载激光扫描与摄影测量数据的变化检测技术研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2019.

作者简介

一、个人简历

姜怀刚，男，1990年12月出生，山东潍坊人。

2014年6月，毕业于解放军信息工程大学测控工程专业，获学士学位。

2014年7月至2018年8月，中国航海图书出版社，助理工程师。

2018年9月，就读于战略支援部队信息工程大学测绘工程专业。

二、学术成果

1. 粗细格网多约束下海岸线提取方法，《测绘科学技术学报》，2020年第37卷第4期，第一作者。

2. LiDAR技术用于我国海岸线测量的优势对比分析，《海洋测绘》，2020年第40卷第2期，第一作者。

三、科研情况

1. 网天XX，国防项目，主要参与者。

2. 高分XX，国防项目，主要参与者。