

基于地面约束的滨岸湿地微地貌 LiDAR 检测研究*

乔纪纲^{1,2}, 黎 夏¹, 刘小平¹

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275

2. 广东商学院资源与环境学院, 广东 广州 501320)

摘 要: 应用激光雷达数据生产高精度的数字地面模型, 可为滨岸环境的研究提供精细的微地貌数据。提出用地面特征约束斜率分割区域, 对陆面点采用小角度多重迭代分割, 提取沟槽特征的方法; 设计了一个综合应用斜率分割、密度和反射强度分割、高度分割来提取水下地形、出露沙洲、有水沟槽等地面特征的技术方案。以佛罗里达州西海岸 Citrus County 滨岸地带作为研究区域, 根据滨岸湿地地面要素在激光雷达点云中的特征, 将其划分为滩涂、沟槽、出露沙洲、浅水水下地形, 建立了微地貌地面模型。通过对地面的拟合度检验以及光学影像目视解译对比, 证明所采用的分割方法与常规建模方法相比, 能更有效的处理地面破碎和水域环境下的点云分割工作, 提高了 DEM 建模精度。

关键词: LiDAR; 滨岸湿地; 微地貌; DEM; 分割; 多重迭代

中图分类号: P 283.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 04-0118-07

LiDAR Detection Model of Tidal Wetland Microrelief Based on Ground Constraint Conditions

QIAO Jigang^{1,2}, LI Xia¹, LIU Xiaoping¹

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Resource and Environment School, Guangdong University of Business Studies, Guangzhou 501320, China)

Abstract: High resolution digital terrain model derived up from LiDAR point clouds can provide more details of microrelief information for tidal wetland environment researches. Tidal wetland microrelief is divided into four components based on LiDAR classification models: underwater points, shoal, bank, and wet or dry ditches. Using ground features as constraint boundary, the foot points of ditches and bank are picked up from a land point cloud with multi-iteration classification tools. The reflect intension and point density of LiDAR point cloud are calculated. Using the intension and density threshold values in point cloud classification, shoal, underwater points and wet ditches can be identified. Taking Citrus County, west coast of Florida as a case study, a microrelief DEM is built. A fitting analysis and a flood submergence process are carried out to check up the DEM precision. Comparing with the result of image eyes judgment, the classification model proposed in this paper can generate microrelief DEM with more details than general slope threshold models do.

Key words: LiDAR; tidal wetland; microrelief; DEM; classification; multi-iteration

滨岸湿地是一种有价值的自然资源, 它为鱼类、野生动植物、水禽提供了良好的栖息场所, 同时它也是受人类影响较大的地区。近年来学界对滨岸湿地环境展开了大量的研究表明, 在相对平坦的

* 收稿日期: 2008-06-10

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目 (40525002), 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2006AA12Z206), 资源与环境系统国家重点实验室基金资助项目 (4106298)

作者简介: 乔纪纲 (1973 年生), 男, 在职博士研究生, 讲师; 通讯作者: 黎夏; E-mail: Lixia@mail.sysu.edu.cn

滨岸湿地环境下,相对高度是决定近岸沉积与淹没覆盖的关键要素,又进而控制了植被种群的分布以及生物物质循环;此外,滨岸湿地微地貌既是近岸水动力作用的结果,是侵蚀与沉积的平衡,地形的细微变化就能引起生境、水动力环境以及地面物质结构的巨大改变^[1-2]。利用遥感技术获得有着较高精度的地面模型成为研究滨岸环境的一项重要工作。小光斑空载激光雷达(LiDAR)对于起伏较小的微地貌反映较为灵敏。具有直接获取高度/差、精度高以及对水体一定的穿透能力的特点,可以较好的满足滨岸潮滩湿地微地貌特征提取的要求^[3-5]。

利用 LiDAR 数据在海岸环境展开的研究可以追溯到 20 世纪 90 年代中期,最初主要是为测量滨岸与浅滩地形服务。近年来,随着小光斑激光雷达技术的发展,学界开展了一系列 LiDAR 的应用研究,其中就涉及不同环境下地表、建筑、植被分割、三维重建等领域^[6-13]。其中的方法大多利用了地面环境特征来设计,但对于滨岸环境下地表覆盖的点云分割,单独使用某一个方法效果并不理想。特别是在微地貌建模方面,在考虑近岸水下地形以及保证破碎地面建模精度的情况下,还需要寻找有效的解决方法。本文对微地貌要素按照其在点

云中的特征做出划分,提出了综合应用斜率分割、密度和反射强度分割等工具提取水域点的方法,采用基于地面特征约束的多重迭代算法改进简单斜率阈值分割陆域地面的方法,以提高滨岸湿地破碎地面微地貌建模的精度。

1 滨岸湿地地貌地面特征及其 LiDAR 检测流程

1.1 滨岸湿地地面要素

为了明确地面环境的各要素在点云内分布的空间特征,首先需要对地面要素作出划分,然后利用这些特性采用的合适的提取方案和算法。

滨岸潮滩是自然环境中最接近均衡海岸剖面的一种类型,也是最容易受到环境变迁影响和人类活动影响的地区之一。滨岸湿地微地貌格局具有以下几个特点:地势平缓,起伏较小,坡度一般小于 2°;地面潮湿,有积水或流水;微地貌破碎,有分布细小的沟渠或残留沟道,一般沟槽深度不大;可能存在天然或人工的沙坝、水田坝,呈块状或细条状结构分布;植被覆盖复杂,浅水、挺水植物均有分布,它们对微地貌信息的干扰较大。

将滨岸湿地的地面环境从 LiDAR 点云可识别的地面特征划分为 5 种基本构成要素。表 1 列出了

表 1 滨岸环境地面要素及其对 LiDAR 检测的适应性

Table 1 Tidal wetland microerlif components and appropriate LiDAR classification tools

地面要素	微地貌特征	在 LiDAR 点云中的表现形式	LiDAR 的适应性
1 较平坦的裸地或浅水滩涂	平坦的冲淤平衡面,部分地区可能有微小的波状起伏,或低矮植被附着。存在有滞水区域,浅水滞水底有反射。	连续分布,邻点高差较小。通常为一次回波。浅水滞水区点密度下降,反射强度下降。	适用于斜率阈值分割类和密度分割类。
2 沟槽:分为地面沟槽和浅水水下沟槽	地面起伏较大,呈带状,有连通关系;有明显的地表水运动痕迹或有水覆盖,水深有大于浅水滩涂的部位;识别受水深影响。	表现为线状特征;枝状结构,有连通关系;边缘有较大的点间斜率;有水沟槽区内点密度下降。且与无水沟槽相连。负地形。沟坡邻点间斜率大。	适用高度分割、斜率阈值分割。
3 沙洲、人工水田坝等	狭长带状结构,多见于平坦区域,高差不大但突兀与地表。	表现为线状特征;边缘有较大的点间斜率;正地形。	适用于斜率阈值分割
4 连续水体覆盖区域	平缓或略有起伏,包含水深大于 LiDAR 探测范围的区域,与地面沟槽相连。	为水底底面反射,较少或无反射点,形成低密度点区或数据缝隙	密度与强度分割,需要较多的人工干预
5 植被覆盖	分布与滨岸或陆面,往往呈团簇分布。内部有层次结构。	小范围不规则的剧烈起伏。近地面的草本、低矮灌木通常难以与地面点被有效分割开来	适用于斜率阈值分割、高度分割类

滨岸湿地的地面环境的主要构成成分、地貌特征以及它们适用的 LiDAR 点云分割工具。划分这些要素参考了潮滩微地貌特征。植被作为点云分割中的一类要素也被列入。

1.2 分割点云的工作流程

为了提高的点云分割的精度,往往需要组合多种工具并对各个地貌要素进行单独提取,使包含地面特征的数据点能够被有效的分离出来。根据地面要素的特点以及 LiDAR 对其检测方法,设计了一套适合滨岸湿地的 LiDAR 点云的分割方案。主要思路是针对地面要素特征采用不同的过滤方法,得到某类特征点的集合,然后在人工干预下对这些点集合进行交、并、差等运算,获取准确的建模点^[14]。点云的分割流程如图 1 所示。

该流程将表 1 所列 5 种地面要素分离,并将滩涂、沟槽和近岸水下点和出露沙洲等要素合并建立微地貌模型。大体上分为 4 个步骤:① 首先利用简单的斜率分割分离高大植被和建筑;② 对剩下的待分类点使用高度、密度和反射强度等工具分离出水体、水下地形和浅水沙洲等要素;③ 剔除前两次分割后的点集为陆面点,分别陆面点中提取滩涂、沟槽以及堤坝等要素;④ 合并有关点集,生成微地貌模型。

滨岸区域地势平缓,高大植被和建筑分割较为简单。使用斜率阈值分割陆面点时,较大的斜率阈值能够较好提取沟渠边坡点,但会使得分割后的滩涂点集包含较多的低矮植被信息,也可能产生过度拟合;较小的阈值则会丢失沟槽的信息。此外,浅水区域水体表面和水底的反射混合,深水区域还有可能失去反射点,这些特征会干扰地面要素的识

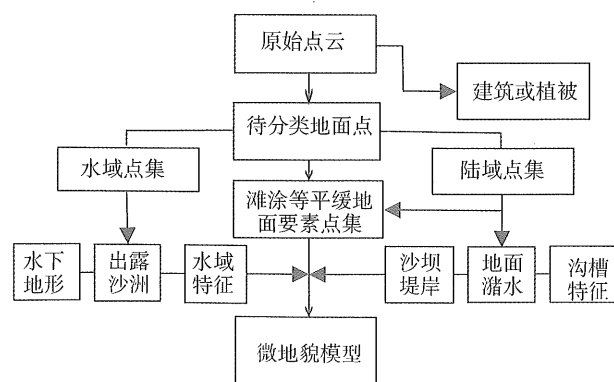


图 1 滨岸湿地环境下 LiDAR 点云分割流程

Fig. 1 Classification model of LiDAR point cloud in coastal wetland

别。采用恰当的分割工具和组合方法解决上述两个方面的问题是有效提取地面要素关键所在。

2 基于地面约束的 LiDAR 点云分割方法

从地面要素的空间分布特征构建点云的分类规则是提取地面点的关键技术。对于滨岸湿地环境,有 3 类规则是要经常使用,它们是:利用斜率阈值分类的规则;从高度分类的规则、激光反射强度和点云密度分类规则。由于地面要素的复杂组合,地面特征往往不能仅使用一种分类方法就可以获得,需要把多种规则组合起来使用^[10-13]。组合的方式和顺序对结果会产生较大的差别。本文针对破碎地表和有水覆盖区域的地面检测,分别采用了多重迭代和多工具组合分割的方法。实验中提取植被、滩涂等地面要素所使用的其他工具和方法较为简单,不再逐一讨论。

2.1 多重迭代斜率阈值的陆面点云分割方法

利用斜率阈值分类的规则是 LiDAR 点云分类的基本方法,不仅用于点云噪声过滤、预处理,也用于地面点的粗分割,并可以与其他方法组合后进行地面要素的精确提取。常见的是基于相邻点间的最大斜率过滤算法^[12,15]。

实验中使用了固定窗口斜率阈值方法。迭代斜率(r)和迭代高差(h)是决定该点是否被加入到地面点中的阈值。如图 1 所示,迭代斜率 r 是待分类点与三角网顶点连线和已有三角网表面的夹角;迭代高差 h 是待分类点距三角网表面的距离。该算法中初始地面点由固定窗口中的最低高程点确定。

迭代角的取值对微地貌的精度影响非常大。较大的迭代角能较好提取沟槽边界的形态,但在相对平缓的区域会将部分地面低矮植被误分类为地面点。我们利用滨岸环境的特点,引入约束条件,并对固定窗口高程阈值法做出改进来克服该项误差。

利用光学影像或其他地面数据对陆域按照地面

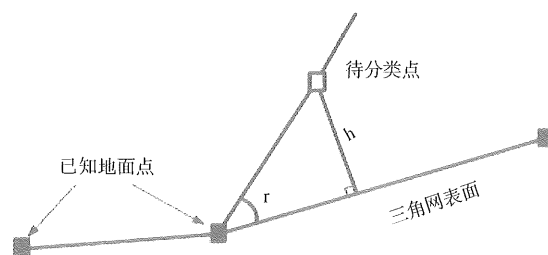


图 2 迭代分割方法

Fig. 2 Classification by iteration angle

破碎度作粗分类, 由目视解译的沟槽、地表滞水区生成的缓冲区作为搜索半径的边界^[11]。缓冲区外作小迭代角的一次分割生成地面点; 在缓冲区内采用小迭代角多次分割点云的方法^[13]。多次分割地面的方法如下:

设待分类点云集合为 M , 被划分为 i 个区域, 假定粗分类中只分出平坦滩涂和破碎区域两类, i 个区域中有 m 个平坦滩涂, n 个破碎区域; 初始迭代的地面点集合为 L_{g1} , h 为高程, 则 L_{g1} 为每个区域最小高程点的集合:

$$L_{g1} = \{p_i | h_i \in \min h\} \quad p_i \in M \quad (1)$$

由初始地面点开始, 在迭代角阈值 r_0 和距离阈值 h_0 的控制下完成迭代, 分割出的地面点集合为 L_{p1} , 则:

$$L_{p1} = \{p_1 | r_1 \leq r_0, h_1 \leq h_0\} \quad (2)$$

从划分的地面区域来看, 此时集合 L_{p1} 由两部分构成: 落入地面平缓区域的点集 $m\{p_m\}$ 和落入破碎区域的点集 $n\{p_n\}$ 。假如认为点集 $m\{p_m\}$ 已包含完整的了滩涂等平缓变化的地面要素, 此时需要对第二次迭代的初始地面点生成做出约束: 从集合 M 中除去 $n\{p_n\}$ 后, 按 (1) 式再次生成新的初始地面点集 L_{g1} 。建立 L_{g1} 的初始三角网模型对全体待分类点 (点集 M): 按照 (2) 式再次进行过滤, 得到二次迭代后的地面点集 L_{p2} 。如果有必要可以反复进行迭代。最后所得地面模型点集 DEM 表示为 3 式:

$$DEM = L_{p1} \cup L_{p2} \cup \dots \cup L_{pn} \quad (3)$$

值得注意的是, 在划分为破碎区域内每次迭代的初始地面点集都不同, 而且最低高程都高于前一次运算的初始地面点; 这样每次运算都会在前一次地面点的基础上搜寻出新的地面点。由于利用了滨岸地形的整体平坦、沟槽处破碎且地势低洼的地面特点, 而且采用小迭代角运算, 每一次迭代的初始地面点都位于沟槽内部, 完成迭代后新增的地面点往往都位于地形变化较大的沟坡及其邻域, 使地面模型向真实地形逼近。同时, 平缓区域因为没有改变初始地面点, 每次迭代中受其他区域初始地面点提高传递过来的变化较小, 不会出大量新增地面点的情况。所以平缓区域受多重迭代而产生误分非地面点的概率较小, 能在多重迭代中保证微地貌精度。图 3 显示了两三次迭代前后地面点分割的情况。当然, 多重迭代也会使地面模型的粗糙度增加, 包含过多细节, 如草丛根部的隆起等, 不利于地貌特

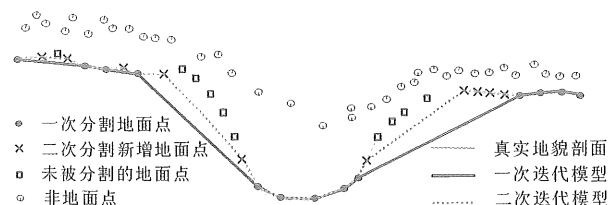


图 3 多重迭代逼近真实地形

Fig. 3 Multi-iteration approximation to true terrain

征的表现。选择合适的迭代角度和迭代次数需要根据研究区域的实际情况和操作者的经验来决定。在本文随后的实例研究中采用两次迭代就能达到较好的分割效果。

2.2 利用点云密度与反射强度分类规则识别水域环境下的地面要素

近岸湿地通常有水域的存在, 水体对红外波段的激光有强烈的吸收作用。点云密度在有水体的区域已有明显的下降, 水深较大的区域甚至形成数据缝隙。在滨岸地区从陆地到深水水域, 可以观察到激光反射强度逐渐减弱, 直到失去反射, 也偶尔会有水面镜面反射形成的强点, 同时点云密度也逐渐降低^[10]。本文采用目标点邻域范围内足点数目作为密度值。在实验中所采用的分类过程和规则描述为:

$$L_w = \{p_i | I \leq i_0, E \leq e_0\} \quad (4)$$

其中, L_w 水域范围的反射点集合, I 为反射强度, E 为高度, i_0 、 e_0 分别为反射强度和高度阈值。由于植被或地形阴影处也可能产生较低反射率的点, 引入 $E \leq e_0$ 的条件则可以保证受地面环境影响的低反射但高程大于阈值的地面点不被误分到水域中。随后进一步对余下的点集 $\{M - L_w\}$ 进行密度检测, 按照 5 式分割出点集 L_m :

$$L_m = \{p_i | \rho \leq \rho_0, E \leq e_0\} \quad p_i \in \{M - L_w\} \quad (5)$$

其中 ρ_0 为密度阈值。 L_m 的含义是 $\{M - L_w\}$ 中独立或分散的较低地面点集合, 它们可能是水体中小面积出露的陆地、沟槽中高出水面的低矮植被或水体的镜面反射点, 这些点往往分布在沟槽内的水面上方, 但反射强度为地面点性质。它们在地面建模时会引起多重迭代计算较大的误差, 失去地面滞水区域和沟槽形态的特征点, 需要通过此方法予以剔除。

实际工作中, 要先应用反射强度和密度分割水域和陆域, 才能对陆域点使用多重迭代; 此外, 对分离后的水域点, 也可以改变高度、强度和密度阈值来分离地面滞水点、近岸水下点和连续水域, 但需要增加其他地面信息辅助。

3 应用与结果

3.1 LiDAR 数据覆盖区域

选择美国佛罗里达州西海岸 Citrus County 滨岸地带作为研究区域。数据覆盖区域为典型的滨岸潮滩湿地,地面潮沟密集,地貌破碎但结构简单,有大量不连续的滞水区域,地面覆盖物主要是低矮植被,基本没有建筑物分布(如图4)。自2005年以来,已有学者应用 LiDAR 对该地区进行了相关研究,积累了包括地面控制点、景观、植被类型等地面资料;官方也已发布了该区域 12 m 的 DEM 数据^[16]。选择该地区能够较好的利用这些数据进行对实验结果进行比对检验。

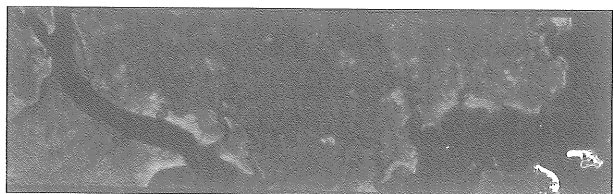


图4 研究区域影像

Fig. 4 Image of the study area

原始点云为 ALS50 激光扫描设备 2006 年 3 月 5 日在 2 400 m 航高处获得。经数据前处理后,有效激光足点 16 万个;水平分辨率 0.732 m,垂向分辨率 0.09 m。区域内最大高差为 13.16 m,其中高度低于 3 m 的点占 94%。

3.2 分类过程

按照前述的分类方案和 4 个步骤建立该地区的微地貌模型。这里主要讨论了流程中第 2、3 步骤水体分割和浅水地形提取的具体工作方法、多重迭代提取地面点的实验具体手段和结果。其他地面特征提取不再逐一论述。

3.2.1 水域区域反射足点与地面点的分离 水域区域反射足点包括出露沙洲和浅水水底反射点。研究区域水体本身有上下游或高位滞水高差的存在,不能直接使用高度分割来确定水域,且当水深深度大于探测深度的部位将产生数据缝隙。

按(4)、(5)式分割原始点群,得到剔除水域点后的陆面点集合 $\{M - L_w - L_m\}$ 和浅水水下地形点、露头沙洲点的混合点集 $\{L_m + L_w\}$ 。由于集合 $\{L_m + L_w\}$ 存在水深大于反射深度的数据缝隙,属于不完整点云,需要在人工干预下作浅水水下地形、露头沙洲的地形单独建模,不能与地面点混合,而且数据缝隙部位保留为空。建模后的 DEM

可以用作地面参考。实际上浅水水域的数据缝隙,往往是主要的流水通道,它们对于沟槽的识别是有价值的。

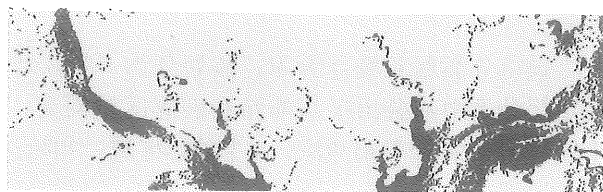


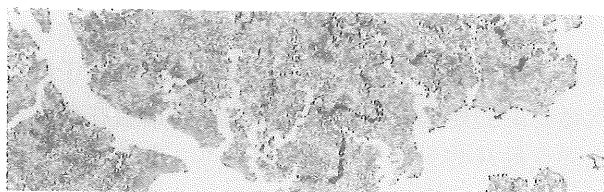
图5 分离出来的水域点

Fig. 5 Foot points in water area

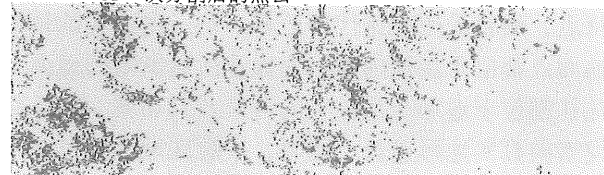
3.2.2 陆面分割 对初始陆面点集合 $\{M - L_w - L_m\}$ 设立 $18.6\text{m} \times 18.6\text{m}$ 的采样窗口,按前述方法 $r_0 = 2^\circ$ 连续两次迭代分割地面。如图 6(A、B),可以看到一次迭代结果中较好的表现了滩涂、地面无水沟槽底部,二次迭代分割出的地面点主要分布于地面破碎区域。分别对第一、二次分类的结果进行密度运算,实验表明第一次分割点云的低密度区域与水域边界有关;第二次分割点云的低密度区域与沟槽边界、细小地面隆起、低矮沙坝特征有关。将两次分割得到的地面点混合,在地面特征线的控制下建模,得到陆面微地貌 DEM,如图 6(C)所示。

3.3 微地貌 DEM 建模

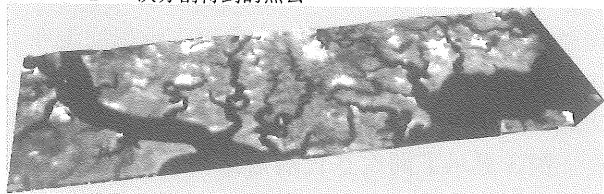
在地面特征线的控制下对水域点和陆域点独立建立 TIN 模型,水域由于存在数据空隙精度低于陆



A 一次分割后的点云



B 二次分割得到的点云



C 不含水域的地面模型的三维图(纵向放大15倍)

图6 多重迭代分割陆域地面点

Fig. 6 Classification of ground points by multi-iteration

面模型精度。最后将水下地形模型与地面模型合并生成完整的滨岸微地貌 DEM。如图 7 (A) 所示, 为了便于观察, 水下模型和地面模型采用了相反的彩色高度尺。由于光学影像的分辨率为 1.863 m, 将影像、地面特征线与完整的微地貌模型叠加并按照 1.863 m 重采样生成三维仿真地面模型如图 7 (B) 所示。

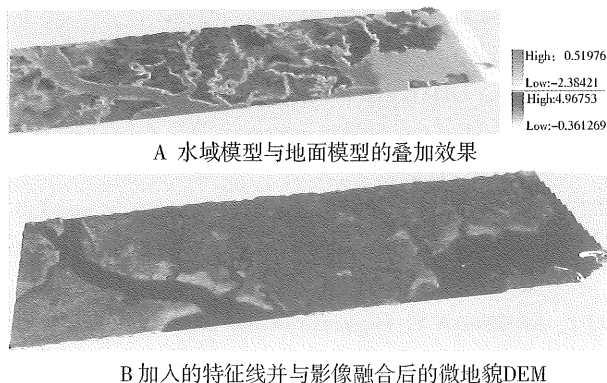


图 7 精细 DEM 与影像的融合的三维视图
(纵向放大 15 倍)

Fig. 7 3D view of microrelief DEM and fusion
with spectral image

3.4 质量控制与检验

建立滨岸湿地环境的精细 DEM 质量取决于 2 个方面: ① 参加建模的足点数量。由于 LiDAR 点云密度较大, 在标准 DEM 的生产工作时, 通常不需要将所有的点都进行分类就可以得到足够精度的地面模型。实际上, 也不可能将所有的点都分到对应的类型中去, 总是存在大量的未分类点, 这些被过滤掉的点可以用来检验精细微地貌模型的精度。② 顾及地形的地面特征参加建模。从 LiDAR 中单独提取某一类地貌要素对构建精细 DEM 有重要意义。例如, 水下沟槽低密度点区被检测出来等密度线作为槽沟边界的参考, 与实际水体边界的吻合度可以反映模型精度。

官方已经发布该地区 12 m 的 DEM (Grid) 及其数据处理参数, 生产该模型的原始 LiDAR 与本文为同源数据, 采用简单的斜率阈值分割生成, 不包含水域。为了验证本文提出的分割方法, 以官方模型作为对照组, 也从 TIN 模型中生产了步长为 12 m 的 DEM (Grid), 并对微地貌模型进行拟合度检验。此外, 还利用静态淹没模型检验水域边界与真实边界的误差。

3.4.1 拟合度检验 官方发布 12 m 的 DEM 不包括水近岸水下地形, 生产过程中没有使用反射强度参考。在两个 DEM 的陆面区域抽取 9 个 18.6 m × 18.6 m 的区域, 其中地面特征为平坦滩涂、较多沟槽区域和地面中等起伏区域各 3 个, 随后分别统计该检验区未参加分类的点云 (不包括高大乔木和建筑) 距离两个 DEM 的平均距离。这种检验方法在适度拟合条件下, 能较好的反映出平缓区域的模型精度。统计结果如表 2:

表 2 未分类点在不同微地貌部位距
DEM 的平均距离

Table 2 Everage distance between unclassified points
and DEM in different locations of microrelief

项目	不同区域点云距 DEM 的平均距离/m		
	平缓滩涂	中等起伏区域	沟槽区域
官方 DEM	0.261	0.446	0.565
微地貌 DEM	0.251	0.423	0.430

二次迭代生产的微地貌 DEM 有 16149 个数据点参加建模, 约为在原始陆面足点的 15% 左右, 不会产生过度拟合。从表 2 中可以看到三种地貌类型区域精度都有提高, 特别是沟槽区域, 微地貌模型较常规建模的统计误差距离减小了 0.13 m; 而其他类型区域分别为 0.01 m 和 0.023 m; 表明在全区域精度提高的同时, 主要在沟槽区域表达了更多的细节。

3.4.2 拟真度检验 对真实地形采用淹没模型与光学影像对比, 检验淹没边界与实际边界的误差。由于实验区域沟槽密布, 一直延伸到区域内部, 因此这一方法对全区域的拟真度都能有所反映。

对微地貌 DEM 在不同水位作淹没分析。当水位为 0.213 m 时, 淹没区与影像的目视解译的水域结果最为吻合 (如图 8), 然后用同样的水位对官方 DEM 作淹没分析, 统计连续水体面积 (不含地面滞水)。分析结果显示, 两个模型的淹没面积均略小于目视解译面积。微地貌 DEM 误差为 1.23%, 对照组 DEM 误差为 2.82%。说明微地貌 DEM 与真实地形有较高的拟真度。

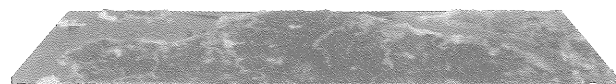


图 8 0.213 m 水位淹没分析三维视图
Fig. 8 3D view of 0.213 m water level flood

4 结 语

利用 LiDAR 点云提取滨岸湿地微地貌对滨岸环境的研究有重要意义。在复杂地面环境下, 考虑利用微地貌要素对 LiDAR 点云分割工具的适应性, 并对各项地面特征逐项过滤点云的方法是可行工作思路。

本文在地面特征约束的条件下, 改进和构造了适用于滨岸湿地微地貌提取的分类规则。实验结果表明, 采用了受地面控制的小角度多重迭代方法, 在避免陷入过度拟合的同时能有效的提高地面破碎区域特征点的分割精度; 同时引入了反射强度和密度运算工具参与辅助分类, 能较好适应浅水水域环境下的点云分割。这一方法建立的微地貌 DEM 能较好的描述浅水水下地形、出露沙洲等微地貌要素, 而且模型精度也较常规分割方法建立的模型更高。

参考文献:

- [1] 高抒. 潮滩沉积记录正演模拟初探 [J]. 第四纪研究 2007, 27(5): 750 - 755
GAO Shu. Determination of reservation potential in tidal flat sedimentary records: a forward modeling approach [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 750 - 755.
- [2] 袁兴中, 陆健健. 潮滩微地貌元素: “生物结构”与小型底栖动物的空间分布 [J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 124 - 126.
YUAN Xingzhong, LU Jianjian. Micro-topographical element: “biogenic structure” and spatial distribution of microrelief on the tidal [J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(6): 124 - 126.
- [3] BROWN K. Increasing classification accuracy of coastal habitats using integrated airborne remote sensing [J]. EARSeL, 2004, 3(1): 34 - 42.
- [4] WEHR A, LOHR U. Airborne laser scanning--an introduction and overview [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2/3): 68 - 82.
- [5] KRABILL W B, WRIGHT C W, SWIFT R N, et al. Airborne laser mapping of Assateague National Seashore Beach [J]. Photogrammetry Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(1): 65 - 71.
- [6] ELBERINK S O, MASS H G. The use of anisotropic height texture measures for the segmentation of airborne laser scanner data [J]. IAPRS, 2000, 1(33): 678 - 684
- [7] LEVENT G, BON D, SCOT S. Determination of wetland vegetation height with LiDAR [J]. Turk J Agric, 2004, 28(1): 63 - 71.
- [8] MASON D C, MARANI M, BELLUCO E et al. LiDAR mapping of tidal marshes for eco-geo-morphological modeling in the tide project [C]//Proc 8th Int Conf on Remote Sense, 2005: 17 - 19.
- [9] SUAREZ J C, ONTIVEROS C, SMITH S, et al. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry [J]. Computer Geosci, 2005, 31(2).
- [10] SONG J, HAN S, YU K, et al. Assessing the possibility of land-cover classification using LiDAR intensity data [J]. IAPRS, 2002, 34(3B): 259 - 262
- [11] LOHMANN P. Segmentation and filtering of laser scanner digital surface models [J]. IAPRS, 2002, 34: 311 - 315.
- [12] VOSELMAN G. Slope based filtering of laser altimetry data [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3): 935 - 942.
- [13] BRETAR F, CHESNIER M, PIERROT-DESSEILLIGNY M, et al. Terrain modeling and airborne laser data classification using multiple pass filtering [J]. ISPRS, 2004, 35(B): 314 - 319.
- [14] ZINGARETTI P, FRONTONI E, FORLANI G, et al. Automatic extraction of LiDAR data classification rules [J]. ICIAP, 2007, 14: 273 - 278
- [15] ZHANG K, DEAN W. Comparison of Three algorithms for filtering airborne LiDAR Data [J]. Photogrammetric Engineering And Remote Sensing, 2005, 7(3): 313 - 324.
- [16] ZHANG K, DEAN W, STEPHEN L, et al. Quantification of beach changes caused by hurricane Floyd along Florida's Atlantic coast using airborne laser surveys [J]. Journal of Coastal Research, 2005, 21(1): 123 - 134.