

## 基于线扫描数据的复杂环境下的河岸线提取

朱岑岑<sup>1</sup>, 李嘉<sup>1,2\*</sup>, 蓝秋萍<sup>1</sup>, 王旭<sup>1</sup>, 陈焱明<sup>1,3</sup><sup>1</sup> 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100;<sup>2</sup> 自然资源部超大城市自然资源时空大数据分析应用重点实验室, 上海 200063;<sup>3</sup> 自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室, 广东 深圳 518034

**摘要** 三维点云边缘提取算法已被广泛用于海岸线的提取中。相较于海岸线, 河岸线存在高程变化大、易被树木遮挡等问题, 将海岸线提取算法直接应用于河岸线提取存在较多的局限性。本文提出了一种基于线扫描激光点云的复杂环境下河岸线精确提取的方法, 实现了河流岸线高程不一致、河岸被树冠遮挡情况下河岸边缘点的精准提取。设计了一种自适应高程阈值动态调整方法, 通过对高程进行实时统计, 使得高程阈值能够自适应地变化并克服树木遮挡造成的岸线不连续的问题, 以此获取更加真实的岸线信息。同时, 将法向渐变作为约束条件, 能在实现对提取的边缘点云滤波的同时构造出完整、平滑的河岸矢量线。最后, 利用真实无人机电载激光雷达数据验证了本文所提方法的有效性和精度。本文方法获取的岸线与真实岸线的均方根误差分别为 0.2018 m 和 0.2675 m, 本文方法获取的河岸线具有较高的完整性。本研究为复杂情况下的河岸边缘提取提供了一种高效精确的方法。

**关键词** 自适应光学; 三维激光点云; 断点分析法; 动态阈值; 法向渐变约束; 河流岸线提取

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230668

## 1 引言

河岸线是指水陆交界的分界线。河岸线是动态的分界线, 在丰水期、平水期、枯水期, 水岸线的形状是不同的。关于河岸线不同时期状态的相关研究对于当地的生态环境保护具有重要意义。早期针对河岸线提取的方法多用于遥感领域, 但激光点云技术凭借其精度高、速度快、可同时获取大量的点等特性, 迅速成为该领域的重点研究对象<sup>[1]</sup>。激光点云数据量庞大, 对数据处理技术提出了更高要求, 进而推动了针对激光点云的去噪、分割、边缘提取等算法的开发与研究<sup>[2-5]</sup>。搭载在飞行器上的激光雷达可以在极高的视角下实现对地面信息的高精度、大范围获取, 在地物边缘提取任务中得到了极为广泛的应用<sup>[6]</sup>。苗松等<sup>[7]</sup>针对扫描过程中存在的建筑物遮挡问题, 提出了数据补充的方法, 并采用该方法提取了被遮挡部分的边缘信息。陈华伟等<sup>[8]</sup>在特征线提取过程中引入图像处理的思想, 提出了鲁棒性极强的基于曲率突变分析的特征线提取方法。高佳月等<sup>[9]</sup>提出一种基于局部边缘特征描述子的边缘检测算法, 该算法在很大程度上解决了当前点云边缘检测算法由邻域半径设置造成的边缘提取结果不

稳定的问题。王明军等<sup>[10]</sup>提出了一种基于自适应局部邻域特征点提取和匹配的点云配准方法, 实现了特征点的高效提取。Wang 等<sup>[11]</sup>搭建了边缘覆盖卷积神经网络(SC-CNN), 该网络在获取点云数据边缘特征的同时实现了语义层面的分割。李维刚等<sup>[12]</sup>结合道路结构特征和点云回波强度信息提出了一种道路标线提取方法。

由于水体与岸上地物对电磁波的反射特性不同, 激光点云在海岸线的提取中得到了广泛应用<sup>[13]</sup>。董保根等<sup>[14]</sup>先利用离散 LiDAR 点云数据构建约束三角网, 然后结合样条函数内插实现了平滑海岸线的提取。于彩霞等<sup>[15]</sup>提出了基于点云栅格化的海岸线提取方法, 该方法简洁高效地实现了海岸线的提取。后来, 他们又在 LiDAR 数据的基础上<sup>[16]</sup>, 将潮水面作为阈值, 实现了对海岸边点云数据的水陆分割, 得到了可靠性更高的海岸线结果。刘森波等<sup>[17]</sup>利用等值线追踪法实现了海岛岸线的高精度、高效率、低成本提取, 为海岸线提取方法的研究提供了新的思路。点云数据用于海岸线提取已经获得长足发展, 但在进行河流岸线的提取时往往会存在诸多问题: ① 河流所处的地形较为复杂, 河岸的高程往往存在较大变化, 从

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-05-27; 录用日期: 2023-06-15; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(41571325, 42071440)、自然资源部超大城市自然资源时空大数据分析应用重点实验室开放基金资助项目(KFKT-2022-09)、自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室开放基金资助课题(KF-2021-06-004)、江苏省自然科学基金(BK20201257)

通信作者: \*nsljia@126.com

而使得经典的等值线追踪法很难得到优异的结果；② 海岸周围往往地物较为简单，但河岸周围茂密的树木会遮挡激光扫描仪对河岸线的扫描；③ 河岸线曲折蜿蜒，从所提取的点云中还原真实的河岸走向存在困难，获取的河岸线点云数据在后续应用中也较为不便。笔者通过分析复杂环境下河岸点云的特征，提出了一种基于线扫描激光点云的复杂环境下河岸线提取框架。然后，从点云数据预处理、边缘提取等方面入手，提出了自适应动态阈值方法，并采用该方法将树冠与河岸区分开来，避免了其干扰河岸线的提取。之后结合法线方向渐变约束方法，实现了所提取的精确河岸点云的矢量化，为后续研究和应用提供了支持。

## 2 河岸线提取方法

河道边缘环境复杂，存在灌木、树林、水草等多种

地物，这些地物会对河岸线的精准提取带来一定干扰。尤其是高大的树木，其树冠延伸到水面，遮挡了三维激光扫描对河岸数据的获取。因此，亟须设计出一种合理完善的解决方法，用于实现树木遮挡情况下河流岸线的准确提取。本文提出了如图 1 所示的基于线扫描的复杂环境下河岸线提取框架，其总体上分为三部分。首先，对原始河道点云数据进行预处理，利用中心点邻域信息和高程信息统计一定范围内点的个数，将中心点划分为噪声点和河岸点，利用断点分析法获取河岸的粗略轮廓；然后，生成自适应阈值框，以粗轮廓为引线，以粗轮廓点为阈值框中心点，对阈值框内的地物进行高程统计，有选择性地去除高大的树木等地物；最后，考虑到真实情况下河岸边缘的平滑性特点，利用相邻边缘点之间的法向渐变约束去除“瑕疵”点，以保证河岸边缘平滑，然后将边缘点连接为矢量河岸线。

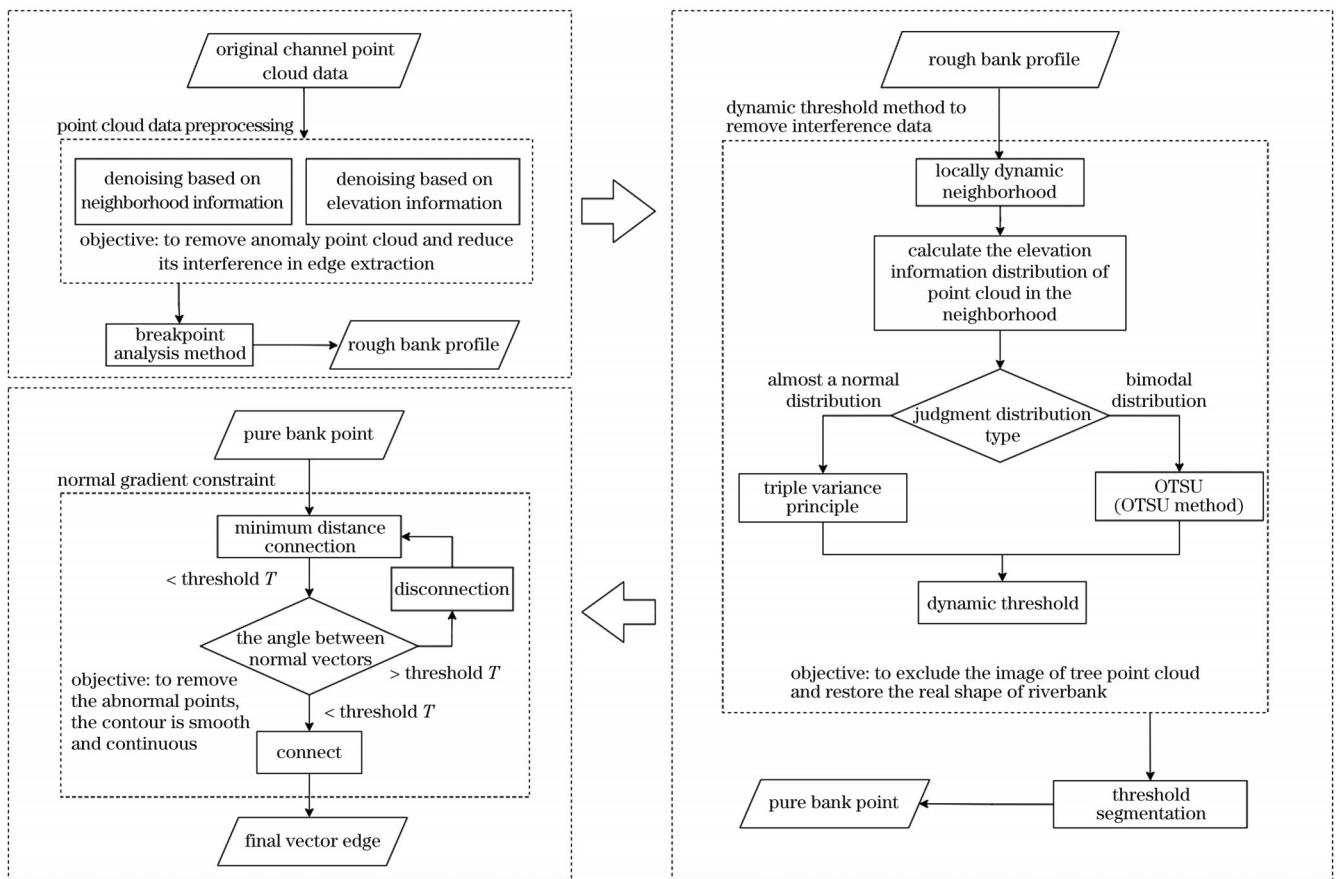


图 1 河岸线提取流程图

Fig. 1 Flow chart for riparian line extraction

### 2.1 断点分析法获取河岸粗略轮廓

由于激光雷达在水面的反射特性不同于地面，无法采集水面的点云位置信息，所以横跨河流的扫描线会出现断点。根据这一特性，可以针对每条扫描线进行单独处理：先设定一个阈值  $T$ ，在每条扫描线上，如果相邻两点之间的距离大于阈值  $T$ ，则认为相邻点之间的部分是没有采集到数据的河流部分。示意图如

图 2 所示。

### 2.2 动态阈值法去除干扰数据

为了动态地去除覆盖在河岸线上的干扰点云，笔者设计了一种基于局部邻域高程信息的自适应动态阈值修正方法。

在提取河岸线的过程中，虽然存在岸边树木的干扰，但树冠所覆盖的面积是有限的，真实的河岸边

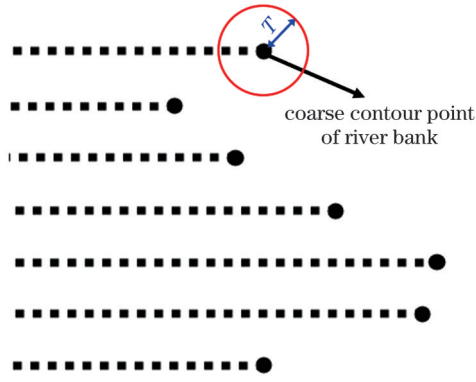


图 2 河道粗轮廓岸线提取示意图

Fig. 2 Diagram of rough river shoreline extraction

缘与所提取的河岸边缘相距不远,因此可以在所提取河岸的局部邻域内寻找真实的河岸点。该方法的核心思想是:逐个遍历所提取的河岸点,以此为中心点,以预先设定的阈值  $L$  为边长,建立方形邻域,如图 3 所示。先统计原始点云数据在局部邻域内的点的高程信息  $H = [h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_N]$ , 其中  $N$  表示邻域内点的个数,  $h_i$  表示第  $i$  个点的高程信息;然后判断邻域内点的高程信息的分布类型。若河岸没有被树木遮挡,则局部邻域内点云的高程应近似服从一维正态分布,此时可以通过点云分布进行正态函数拟合。计算点云分布的均值与方差,计算公式分别为

$$\hat{h} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i, \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - \hat{h})^2, \quad (2)$$

式中:  $\hat{h}$  表示点云高程均值。计算得到均值与方差之后,以三倍的标准差为阈值划定取值范围,即

$$h = \{h_i | \hat{h} - 3\sigma \leq h_i \leq \hat{h} + 3\sigma\}. \quad (3)$$

若河岸附近存在较高的树木,则局部邻域内点云的高程应近似服从双峰分布(河岸与树冠处点云密集)。此时可通过最大类间方差法(OTSU, 大津法)计算阈值,以实现双峰数据的分割。若存在阈值  $k$ , 并且  $\min(H) < k < \max(H)$ , 则该阈值可以将邻域

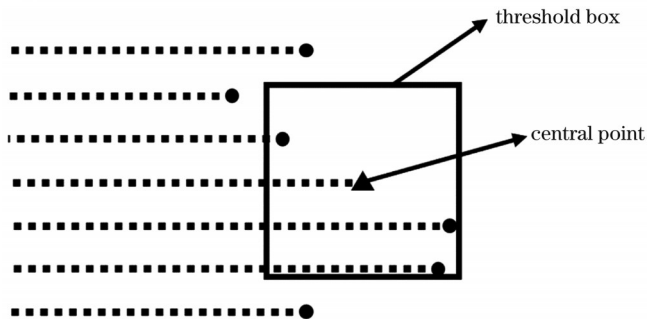


图 3 自适应动态阈值去除高点

Fig. 3 Dynamic threshold removes the high point

内的点云数据分为两类:

$$C_1 = \{h_i | \min(H) < h_i < k\}, \quad (4)$$

$$C_2 = \{h_i | k < h_i < \max(H)\}. \quad (5)$$

此时类间方差为

$$\sigma_b^2(k) = \frac{[\hat{h} P_1(k) - m(k)]^2}{P_1(k)[1 - P_1(k)]}, \quad (6)$$

其中,

$$m(k) = \frac{\sum_{h_i \in C_1} h_i}{\sum_{h_i \in H} h_i}, \quad (7)$$

式中:  $P_1(k)$  表示领域内高程小于阈值  $k$  的点所占的比例。

所得类间方差  $\sigma_b^2(k)$  是关于阈值  $k$  的函数,最大化  $\sigma_b^2(k)$  得到的对应的  $k$  值即为最佳阈值  $\hat{k}$ 。得到阈值之后,以该阈值为界限区分高树冠点云数据和低河岸点云数据,即

$$h = \{h_i | \min(H) < h_i < \hat{k}\}, \quad (8)$$

进而得到河岸点的高程范围,之后在局部邻域保留河岸点云数据,从而排除河岸边缘树木的遮挡对边缘提取产生的干扰。

### 2.3 法向渐变约束实现河岸线矢量化

边缘提取的结果为边缘的离散点云数据,所提取的结果在后续应用中的作用十分有限,目前大部分的边缘提取研究也止步于此。为了能将所提取的数据广泛应用于其他相关工作中,需要进一步将所提取的离散点云数据转换成矢量要素,这是一项意义重大的工作。

树木、灌木等具有一定高度的植被被去除后,可以再次根据线扫描特性提取断点,但是基于欧氏距离最小的连接原则提取的河岸线往往边缘不平滑,存在较多的“毛刺”现象,如图 4 所示。而且,在面对河流的某些复杂边缘时,该方法往往受限于局部最近点,忽视了全局的边缘结构。因此,笔者设计了一种基于法向渐变约束的边缘连接算法,用于将离散的点云数据转化成平滑的矢量边缘。

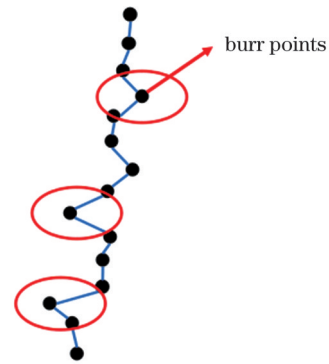


图 4 岸线“毛刺”点

Fig. 4 Shoreline “burr” points

法向夹角计算示意如图 5 所示。根据公式

$$\cos \langle \vec{a} \vec{b} \rangle = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|}, \quad (9)$$

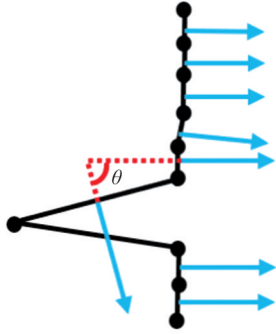


图 5 法向夹角示意图  
Fig. 5 Normal angle diagram

计算相邻两点之间的法向,采用 2.2 节中的窗口,以已连接的点为中心,以窗口范围内的边缘点为候选点,分别计算中心点与后续候选点之间的法向夹角  $\theta$ ,然后将法向夹角最小的两点相连。通过该方法可以去除瑕疵点。

法向渐变约束不仅可用于平滑点云边缘轮廓,还可用于追踪点云并连线,从而还原真实的岸线。通过计算中心点与候选点的法向夹角  $\theta$ ,连接法向夹角最小的两点,可以判断相邻点是否为可靠点。若夹角为最小角,相邻点就是可靠点,则保留并连接;若夹角不是最小角,则顺延至下一个点,直至组织完所有边缘点,如图 6 所示。

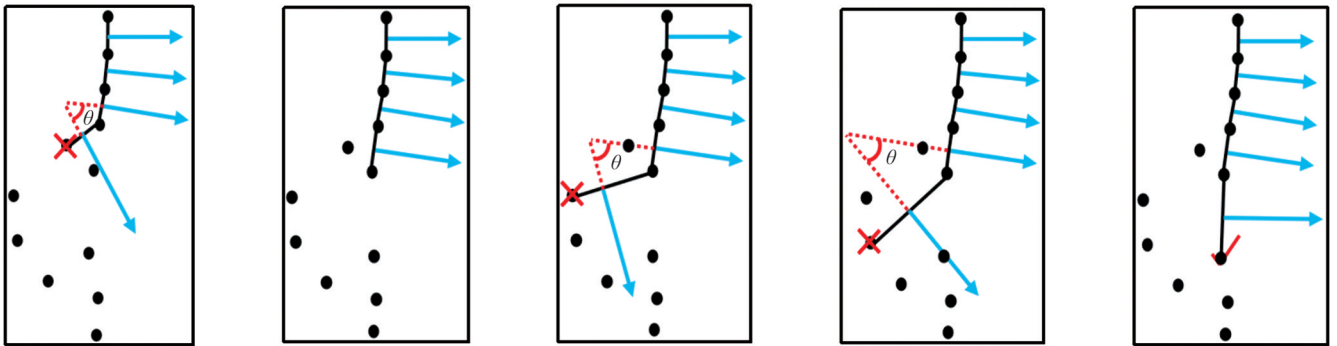


图 6 法向渐变约束连接相邻点  
Fig. 6 Normal gradient constraint joins adjacent points

### 3 实验分析

为了验证本文所提方法的有效性,采用智喙 PM-1500 机载激光测量系统进行实验。测试区域位于安徽省宣城市某河域,河岸两侧有古树、灌木以及电线,这些地物会对真实河岸的提取造成较大影响。

#### 3.1 测试区域河岸线的提取

##### 3.1.1 河岸线粗提取

自然环境下的河流附近常常有滩涂,而越靠近水的滩涂部分的点云信息越零碎。在边缘提取的过程中,零碎的点云信息将影响边缘提取的准确性。因

此,基于邻域信息进行去噪,以减小滩涂对边缘的影响。去噪时选取的点云数量的阈值为 100,即统计距某点云 1 m 以内的点云数量,如果大于 100 个,则判定该点云为有效点;如果小于 100,则认定该点云是孤立点。如图 7 所示,经过处理后的河岸边缘更加清晰。

由于树叶晃动,树叶部分的点云信息会存在大量噪声点,这部分噪声信息将对后期河岸地物的高程统计产生影响。因此可以通过分析单个点云高程范围内点的数量来判断该点是否为高处噪声点或高程异常点。图 8 所示为去除高处噪声点后的效果。

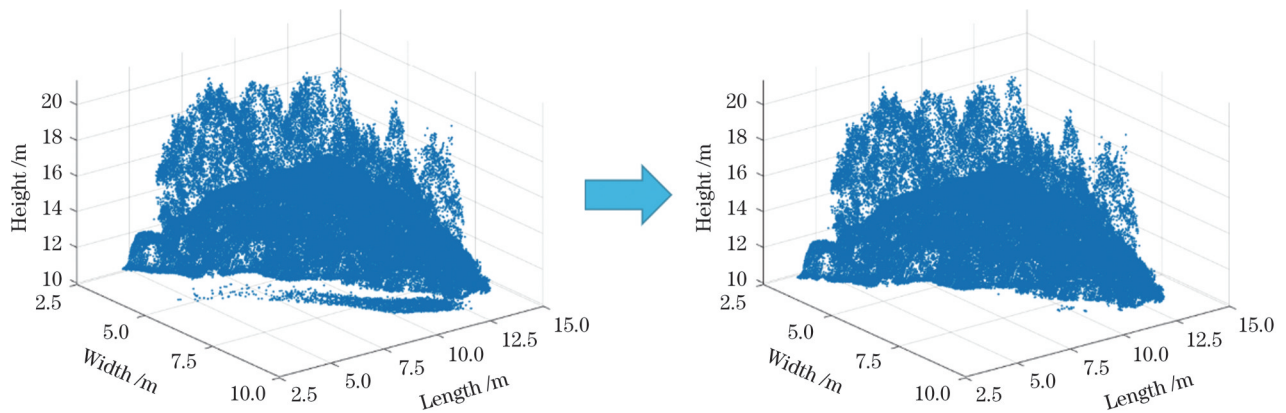


图 7 去除滩涂点  
Fig. 7 Remove tidal points

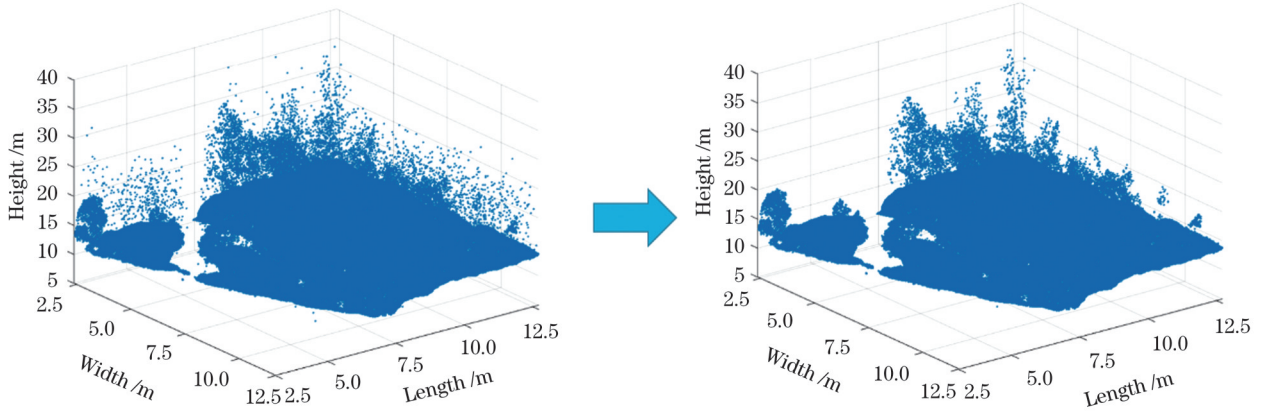


图 8 去除高处噪声点  
Fig. 8 Remove high noise points

依据线扫描的特性,提取每根扫描线中的断点,得到了河岸的大致轮廓,如图 9 所示。由于真实河岸两侧地物存在一定的复杂度,因此提取的轮廓线中包含了树木等地物的点云。为了更加直观地呈现真实的岸线,将点云信息栅格化,将高程信息赋予不同的颜色,颜色越明亮代表该点云的高程越高。如图 10 所示,放大栅格图像,可以观察到河岸树木对岸线的影响。笔者设计了自适应动态阈值修正算法,以剔除岸边树木的影响,从而达到河岸线精确提取的目的。

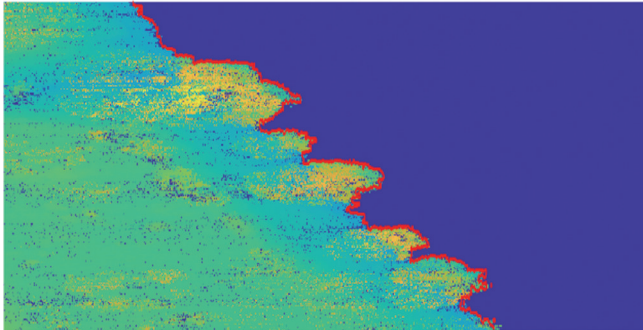


图 9 河岸粗轮廓  
Fig. 9 Riverbank rough contour

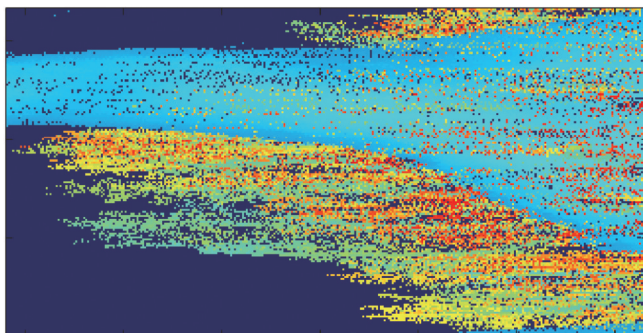


图 10 树木下的真实岸线  
Fig. 10 Real shoreline under the trees

### 3.1.2 自适应动态阈值修正

河岸周边的地势大多相对一致,如图 11 所示,对

前面初步提取的河岸粗轮廓线进行高程统计,结果显示,高程在 10.30~10.35 m 之间的点云数量最多,为 229053 个。因此,可以将岸线轮廓中的高点去除。

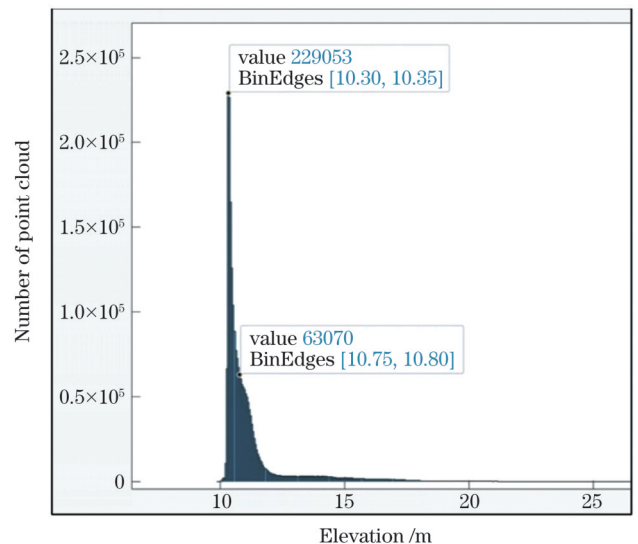


图 11 河岸粗轮廓的高程统计  
Fig. 11 Height statistics of coarse riverbank contour

但仅仅去除岸线轮廓上的高点会导致岸线点不连续,这会影响后续的连线。因此可以使用当地树木直径的统计值划定相应的缓冲区,对缓冲区内地物的高程进行统计,再去掉高点部分。然而,单纯去除高点的方法仅适用于地势相对平缓的平原地区,在某些高原地区或者上游与下游地势相差较大的河流则不适用,在进行高程统计时地势较高地方的地面点与地势较低处树木点的高程可能一样。

为了解决上述问题,笔者提出了一种自适应动态阈值修正方法。该方法的具体步骤为:先划定一个窗口,窗口大小略大于当地树冠直径的统计值,以此保证窗口内即便充满树木也能包含部分地面;然后,统计窗口内地物的高程值,根据分布采用适合的阈值范围。如图 12 所示,以 3.1.1 中提取

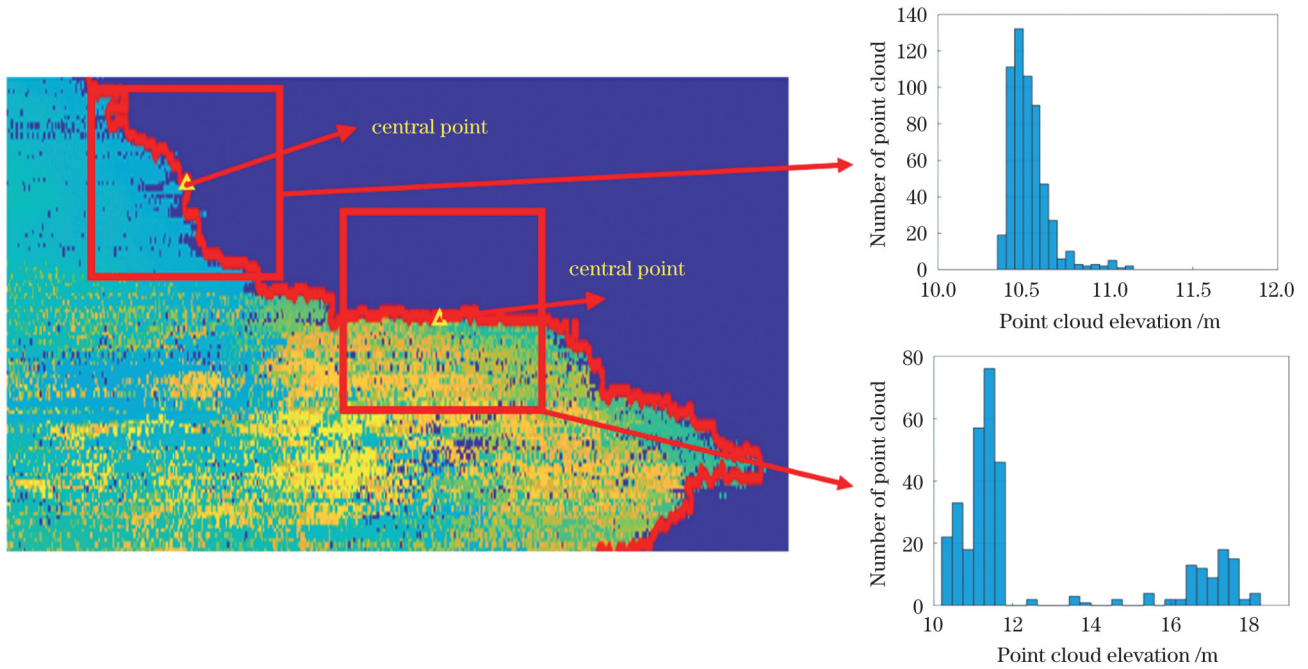


图 12 自适应动态阈值修正  
Fig. 12 Adaptive dynamic threshold correction

的轮廓点为中心点,统计窗口内所有点云的高程,绘制高程直方图。在具体实验中,划定 3 m 为窗口边长,对窗口内的点云数据进行高程统计,根据高程分布选择阈值内的河岸点,同时去除会造成干扰的树冠点。

在高程直方图中,一般会出现两种情况。

第一种情况,窗口内的点云为地面点,此时直方图如图 13(a)所示,仅有一个峰值,并且近似服从正态分布。此时通过拟合正态分布,利用式(1)和式(2)求出分布的均值  $\hat{h}$  和方差  $\sigma$ ,并且取  $3\sigma$  为置信区间来定义

地面点的阈值,即选取邻域内高程在  $[\hat{h}-3\sigma, \hat{h}+3\sigma]$  内的点云数据作为河岸点。

第二种情况,窗口内的点云既有河岸点又有高程较高的树冠。由于提前确定窗口尺寸大于树冠尺寸,因此便会出现双峰情况,如图 13(b)所示。先出现的峰值为河岸,后出现的峰值为树冠,图 13(b)中的红线与蓝线分别表示两个峰值,服从双峰分布。此时通过最大类间方差法计算出一个阈值  $\hat{k}$ ,可将两者分开,即选取邻域内高程小于  $\hat{k}$  的点云数据作为河岸点。

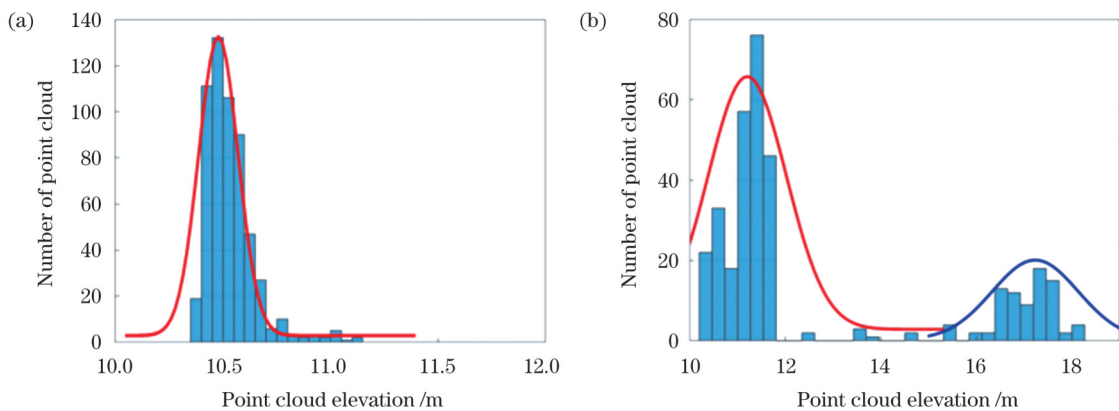


图 13 高程直方图。(a)单峰高程直方图;(b)双峰高程直方图  
Fig. 13 Elevation histogram. (a) Single-peak elevation histogram; (b) bimodal elevation histogram

### 3.1.1.3 法向渐变约束

去除高大的树木后,原本树木的位置会不可避免地出现缺口,这不利于矢量轮廓边界的组织。因此,使用法线渐变约束法来连接零星岸线,从而剔除岸上点的干扰。凹进去的点云是去除高大树木后形成的错误

岸点。为了使岸线贴合实际情况,计算相邻点之间的法向夹角,并判断其是否在合理阈值内,以此来确认其是否为可靠点,如图 14(a)所示。

将提取的岸线附红,并在栅格图中展示,如图 14(b)所示。可以清晰地看出真实的岸线,成功避免了树木

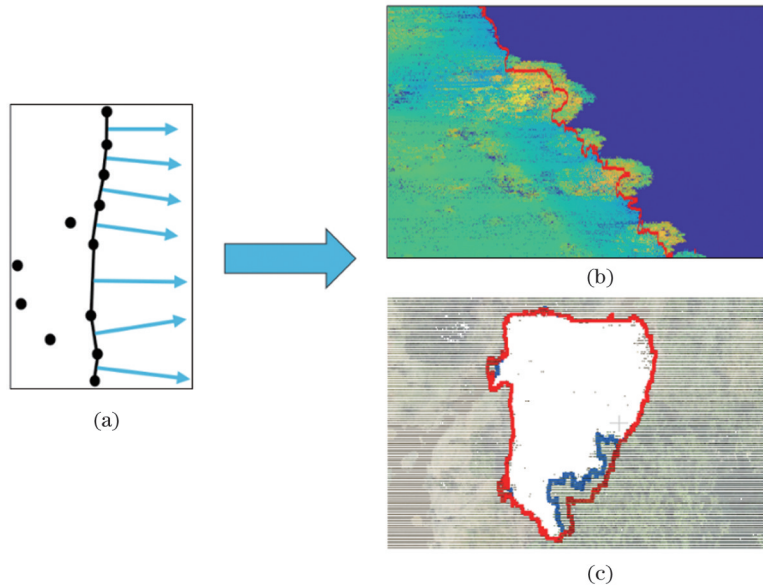


图 14 法向渐变约束结果。(a)法向渐变约束理论;(b)栅格图下的真实岸线;(c)CloudCompare 软件中的真实岸线点  
Fig. 14 Normal gradient constraint result. (a) Normal gradient constraint theory; (b) real shoreline under raster diagram; (c) real shoreline points in CloudCompare software

的影响。

本文方法除了可以提取河岸线以外,对岸上周围有树木环绕的闭合水体也有效。图 14(c)是在 CloudCompare 软件中显示的河岸上池塘的边缘提取结果,其中没有点云的区域为水体,蓝色点是粗提取的河岸点云轮廓,红色点是进行局部邻域选择和法向渐变约束后的边缘点。可以清楚地看出,本文方法去除了水体边缘高大树冠的干扰,实现了对树冠遮挡下河岸边缘的准确提取

### 3.2 本文方法与其他方法所得结果的比较与分析

#### 3.2.1 与影像法叠加分析

图 15(a)所示为本文方法提取的整条河流的岸线图,可见:整体河岸线较为完整,同时有效避免了电线、高大树木等地物的影响,其中相同颜色代表一个连续的线段或一个连续的闭合环。图 15(b)为河流中最复

杂的江心洲部分,江心洲地形复杂且存在零散小岛,但本文方法较完整地提取了闭合的江心洲岸线。为了更加直观地观察本文方法提取的岸线与实际点云岸线的契合程度,将提取的岸线在 CloudCompare 中赋红并叠加影像图,如图 15(c)所示。可见,本文方法提取的岸线与影像图中的岸线完美重合,尤其是在江心洲或岸上池塘等地形较为复杂的地方。

#### 3.2.2 方法对比与分析

当前提取岸线的主流方法是等值线追踪法<sup>[18]</sup>。为了直观地对比本文方法与等值线追踪法,分别选取河流中间的小岛和树木遮挡的岸线两种典型区域作为实验对象。首先在 ArcGIS 中手动提取 1004 个河岸边缘作为真实岸线,然后依次使用等值线追踪法和本文方法提取该河流小岛的岸线。将两种方法提取的岸线与真实岸线进行对比,计算距离的均方根误差,以此来定

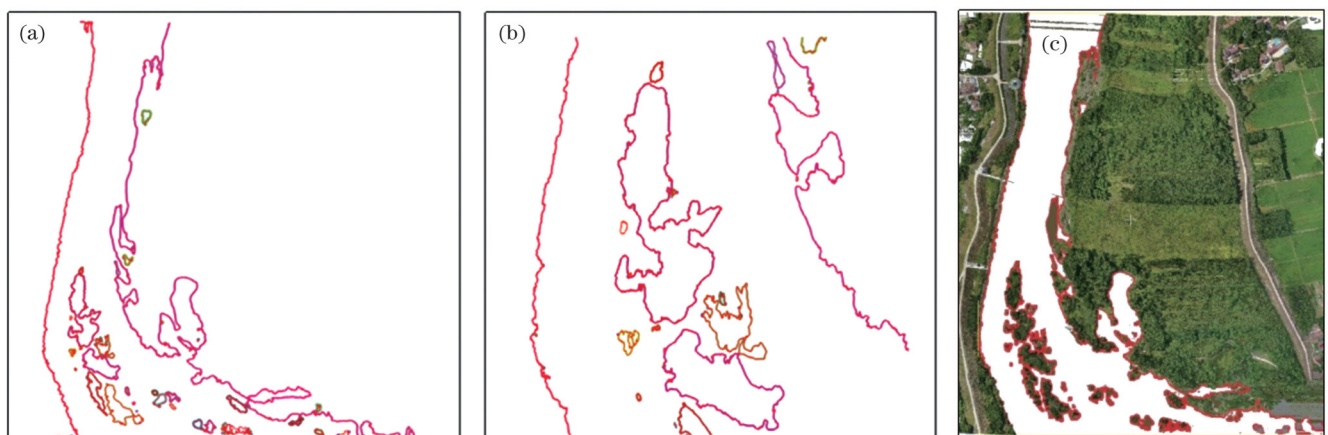


图 15 岸线与影像重叠图。(a)河流岸线图;(b)江心洲岸线图;(c)提取的岸线与实际岸线重叠图  
Fig. 15 Overlay of shoreline and imagery. (a) River shoreline map; (b) central island shoreline map; (c) overlapped map of extractive shoreline and actual shoreline

性分析两种方法的性能。如图 16 所示,笔者统计了两种方法的误差直方图,以直观地表现其误差分布。最

后,对比两种方法所提取边缘的结果图,以此来比较河岸的提取效果。

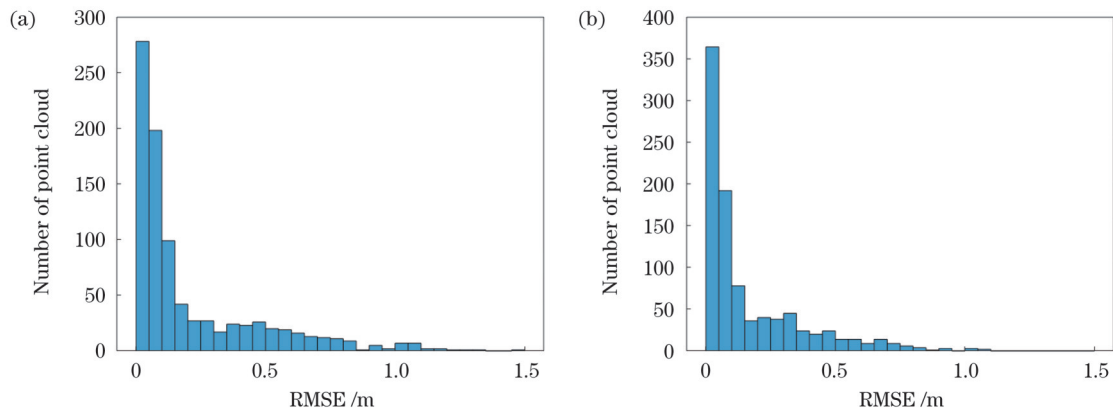


图 16 河道边缘提取误差分布统计直方图。(a)等值线追踪法;(b)本文方法

Fig. 16 Statistical histogram of error distribution extracted from the river edge. (a) Contour tracking method; (b) our method

如表 1 所示,从均方根误差来看,本文方法比等值线追踪法的均方根误差降低了约 24.6%,无误差点的个数也多了 30.2%。从误差分布统计直方图中不难看出:本文方法的均方根误差主要集中在 0.3 m 以内,仅有几个点在大于 1 m 的范围内;等值线追踪法虽然也取得了较为优秀的结果,但其均方根误差明显大于本文方法,并且有部分点的均方根误差在 1.5 m 左右。

综上所述,本文方法在误差控制上要优于等值线追踪法。针对边缘提取结果,选取了具有代表性的两

处地形来进行实验,分别是岛礁和河岸。将所提取的河岸边缘与真实点云数据进行对比,结果如图 17 所示。

从图 17(a)、(b)可以看出,对于岛礁地形,两种方法均能较为完美地提取河岸边缘。由于江心洲处于水中,其河岸基本处于同一水平面,等值线追踪法具有天然优势,而本文所提方法可以与之媲美。但是,对于较为复杂的河岸地形,等值线追踪法暴露出了其局限性,对于流动的河流,上游和下游的水平面往往不同,此时很难仅凭平面来提取边缘,如图 17(c)所示,会存在错误提取的现象。而本文所提基于动态阈值的方法就可以根据不同的地形,自适应地选择河岸点的阈值,进而实现河岸边缘的精确提取,如图 17(d)所示。

综上所述,本文所提方法在提取效果上要优于经典的等值线追踪法,更适合处理复杂地形。

表 1 河道边缘提取误差分析表

Table 1 River edge extraction error analysis table

Method	RMSE /m	Correct number of points
Contour tracking method	0.2675	278
Ours	0.2018	362

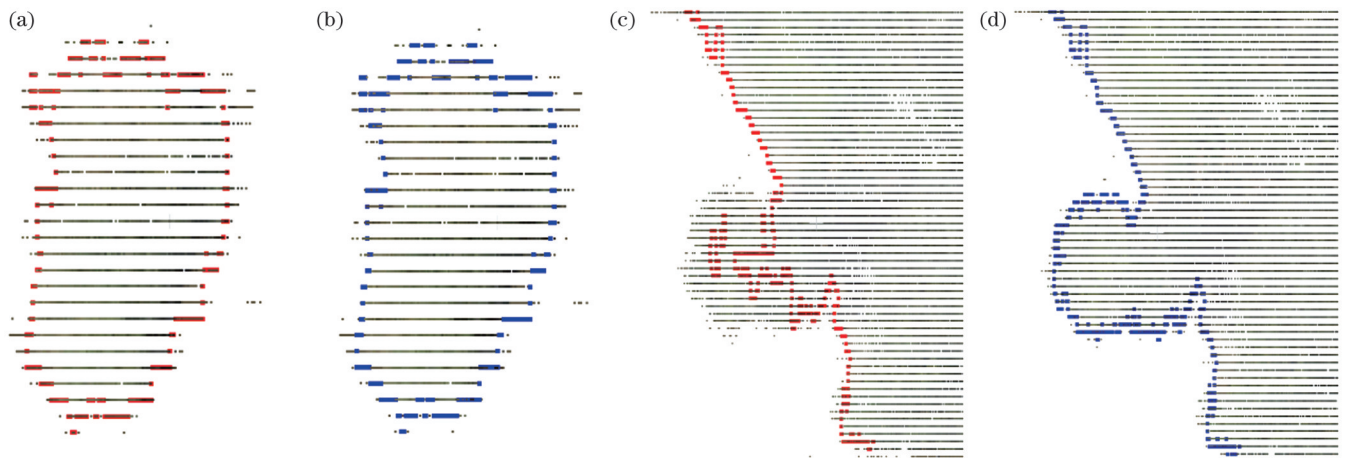


图 17 本文方法与等值线追踪法在不同环境下的提取结果对比。(a)等值线法对江心洲的提取结果;(b)本文方法对江心洲的提取结果;(c)等值线法对河岸的提取结果;(d)本文方法对河岸的提取结果

Fig. 17 Extraction results comparison of our method and contour tracking method in different environments. (a) Extraction result of central island by contour tracking method; (b) extraction result of central island by our method; (c) extraction result of river bank by contour tracking method; (d) extraction result of river bank by our method



## 4 结 论

河流岸线具有形状曲折、易被岸边树木遮盖等特点,给传统的基于激光点云的边缘提取方法带来了诸多困难。本文提出了基于线扫描激光点云的复杂环境下河岸线的精确提取方法。所提方法的优点为:①利用扫描线特点提取扫描线断点;②通过自适应调整高程阈值,使得实时变动的阈值能够有效去除岸边树冠等非河岸点云数据;③考虑到法向一致性约束的河岸线滤波,利用法向渐变约束进一步将河岸点云数据转化成平滑、封闭的矢量数据。

实验证明本文方法可以有效地提取出复杂环境下的河岸线,同时该方法也可在河流调查、河道轨迹检测、河岸水土流失监测等重要任务中提供技术支持。

### 参 考 文 献

- [1] 李勇, 佟国峰, 杨景超, 等. 三维点云场景数据获取及其场景理解关键技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 040002. Li Y, Tong G F, Yang J C, et al. 3D point cloud scene data acquisition and its key technologies for scene understanding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 040002.
- [2] 何东健, 邵小宁, 王丹, 等. Kinect获取植物三维点云数据的去噪方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 331-336. He D J, Shao X N, Wang D, et al. Denoising method of 3-D point cloud data of plants obtained by Kinect[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 331-336.
- [3] 徐鹏. 海量三维点云数据的组织与可视化研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013: 1-16. Xu P. Research on organization and visualization of massive 3D point cloud data[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013: 1-16.
- [4] 庞勇, 赵峰, 李增元, 等. 机载激光雷达平均树高提取研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(1): 152-158. Pang Y, Zhao F, Li Z Y, et al. Forest height inversion using airborne lidar technology[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(1): 152-158.
- [5] 赵煦. 基于地面激光扫描点云数据的三维重建方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010: 35-62. Zhao X. Research on 3D reconstruction method based on ground laser scanning point cloud data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010: 35-62.
- [6] Wang G F, Li Z, Yan J Y, et al. Application of multi-platform LiDAR in the construction of slow traffic system[C]//2022 3rd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing (ICGMRS), April 22-24, 2022, Zhoushan, China. New York: IEEE Press, 2022: 408-411.
- [7] 苗松, 王建军, 李云龙, 等. 基于建筑物激光点云边缘线自动提取提高DSM精度[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 012803. Miao S, Wang J J, Li Y L, et al. Digital surface model accuracy improvement based on edge line automatic extraction of building laser point cloud[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 012803.
- [8] 陈华伟, 袁小翠, 吴禄慎, 等. 基于曲率突变分析的点云特征线自动提取[J]. 光学精密工程, 2019, 27(5): 1218-1228. Chen H W, Yuan X C, Wu L S, et al. Automatic point cloud feature-line extraction algorithm based on curvature-mutation analysis[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(5): 1218-1228.
- [9] 高佳月, 许宏丽, 邵凯亮, 等. 基于局部边缘特征描述子的自适应边缘检测算法[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604003. Gao J Y, Xu H L, Shao K L, et al. An adaptive edge detection method based on local edge feature descriptor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604003.
- [10] 王明军, 易芳, 李乐, 等. 自适应局部邻域特征点提取和匹配的点云配准[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 20210342. Wang M J, Yi F, Li L, et al. Local neighborhood feature point extraction and matching for point cloud alignment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(5): 20210342.
- [11] Wang C S, Ning X, Sun L J, et al. Learning discriminative features by covering local geometric space for point cloud analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5703215.
- [12] 李维刚, 樊响, 梅洋, 等. 基于车载激光点云的道路标线提取方法[J]. 中国激光, 2022, 49(7): 0710001. Li W G, Fan X, Mei Y, et al. Road marking extraction method based on vehicle laser point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(7): 0710001.
- [13] 姜怀刚. 基于LiDAR的海岸线提取及性质识别技术[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2020: 13-20. Jiang H G. Coastline extraction and property identification technology based on LiDAR[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2020: 13-20.
- [14] 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. Dong B G, Zhang L, Zhang G, et al. Smooth shoreline extraction with topographic constraints using LiDAR point clouds[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2012, 29(2): 113-117.
- [15] 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, 196. Yu C X, Wang J Y, Bao J Y, et al. A binary image optimization method of extracting coastline based on LiDAR data[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2015, 32(2): 187-191, 196.
- [16] 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(7): 897-903. Yu C X, Wang J Y, Huang W Q, et al. An improved binary image method of extracting shoreline based on LiDAR data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(7): 897-903.
- [17] 刘森波, 林旭波, 杨龙, 等. 基于无人机影像密集匹配点云的海岛岸线提取方法研究[J]. 海洋湖沼通报, 2020(5): 26-31. Liu S B, Lin X B, Yang L, et al. Research on island shoreline extraction method based on UAV image dense matching point cloud[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(5): 26-31.
- [18] Robertson W V, Whitman D, Zhang K Q, et al. Mapping shoreline position using airborne laser altimetry[J]. Journal of Coastal Research, 2004, 20(3): 884-892.

# Riparian Line Extraction in Complex Environment Based on Line Scanning Data

Zhu Cencen<sup>1</sup>, Li Jia<sup>1,2\*</sup>, Lan Qiuping<sup>1</sup>, Wang Xu<sup>1</sup>, Chen Yanming<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Spatial-Temporal Big Data Analysis and Application of Natural Resources in Megacities, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200063, China;*

<sup>3</sup>*Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Natural Resources, Shenzhen 518034, Guangdong, China*

## Abstract

**Objective** In recent years, with the rapid development of LiDAR, algorithms for point cloud edge extraction have been widely used in coastline extraction. Compared to coastline extraction, riparian line extraction has more significance; however, it often presents more challenges, especially when confronted with the task of extracting riparian lines in environments characterized by substantial elevation variations and dense tree cover. To address these problems, we propose an accurate extraction process for riparian lines in complex environments using a line-scanning laser point cloud. This approach enables precise riparian line extraction even in scenarios where the riverbank elevation varies significantly and the riverbank is obscured by tree canopies.

**Methods** First, the original river point cloud data were preprocessed, and the number of points within a certain range was counted using the center point neighborhood and elevation information. The center points were then categorized into noise and riverbank points, and an initial representation of the riverbank was established using the breakpoint analysis method (Fig. 2). Second, an adaptive threshold frame was generated. With the rough outline as the reference and the rough outline point as the center point of the threshold frame, elevation statistics were performed on the object elevation within the threshold frame. Concurrently, ground objects, such as tall trees, were selectively removed to refine the threshold frame (Fig. 11). Finally, considering the smoothness characteristics of the riparian edge in real conditions, “defective” points were removed by the normal gradient constraint between adjacent edge points. This ensured the smoothness of the edge, and the remaining edge points were subsequently connected to form vector riparian lines. The detailed process for precisely extracting a riparian line in a complex environment is shown in Fig. 1.

**Results and Discussions** Experiments were conducted on islets in the middle of a river and shorelines obscured by trees using the method described in this study and the mainstream contour tracing method, respectively. The shorelines extracted using the two methods were compared with real shorelines. The root mean square error (RMSE) of the calculated distances was used to qualitatively analyze the performance of the two methods. As shown in Table 1, the proposed method exhibit an approximately 24.6% lower RMSE compared to the contour tracing method, along with 30.2% more error-free matches. Moreover, it is evident from the statistical histogram of the error distribution that the errors of the proposed method are mainly concentrated within 0.3 m, with only a few points exceeding 1 m (Fig. 16). Although the error of the contour line tracking method also achieved excellent results, it is significantly larger than that of the proposed method, with certain points exhibiting an error of approximately 1.5 m. For island and reef terrain, both methods demonstrate excellent capability in extracting the bank edge. However, when dealing with coastlines concealed by trees, the edge extracted by the proposed method is more closely aligned with the actual terrain (Fig. 17). In summary, the proposed method outperforms the traditional contour tracing method in terms of extraction quality and error control, making it particularly well-suited for processing data in complex terrains.

**Conclusions** Considering the complex environment of riverbanks, this study proposes an accurate extraction method for riparian lines using line-scanning laser point clouds in complex environments. The advantages of the method are as follows: (1) it utilizes scan line characteristics to identify breakpoints; (2) an adaptive threshold is employed to eliminate non-riparian point cloud data like shoreline canopy; (3) riparian point cloud data are further transformed into smooth, closed vector data using the normal gradient constraint method. The experimental results show that this method can effectively extract riparian lines in a complex environment. This proposed method holds promise in supporting critical tasks such as river surveys, river track detection, and riverbank soil and water loss monitoring.

**Key words** adaptive optics; 3D laser point clouds; breakpoint analysis method; dynamic threshold; normal gradient constraint; river shoreline extraction