

基于 LIDAR 点云海岛的 DTM 生成算法研究

周绍光^{1,2}, 凡 莉², 向 晶², 孙金彦²

(1. 海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 淮海大学 测绘科学与工程系, 江苏 南京 210098)

摘 要:提出一种基于 LIDAR 点云的海岛 DTM 生成算法。先将 LIDAR 点云数据规则格网化,对每个格网内的点云数据进行三次曲面拟合,在拟合基础上初步区分每一格网内的地面点与非地面点。若靠近格网边缘处有足够多的地面点,则认为此格网内地面点与非地面点可分,记录其中被初步归为地面类的点;若格网四周没有足够多的地面点,则用其邻域格网内初步确定的地面点推测本格网地面信息,并以推知的地面信息确定本格网内点的归属。初步确定的地面点决定了初始地形,在初始地形上对点云进行迭代曲面拟合滤波,从而精确识别地面点及非地面点,平滑地面点数据得到最终的 DTM。

关键词:LIDAR 点云;海岛(礁);三次曲面拟合;数字地面模型

中图分类号:P237

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)03-0053-09

Island's DTM Generating Method Based on LIDAR Point Cloud

Zhou Shaoguang^{1,2}, Fan Li², Xiang Jing², Sun Jinyan²

(1. Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Department of Surveying and Mapping Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: This paper proposes a DTM generation algorithm of island based on LIDAR point cloud. Firstly, LIDAR point cloud data is transformed into regular grids. Then ground points and non-ground points are preliminarily distinguished based on the cubic curved surface fitting of the point cloud data in each grid. If there are enough ground points near the grid edge, it is concluded that ground points and non-ground points are separable, and the points which are initially classified as ground points are recorded. Otherwise, the grid ground information can be speculated through points of the neighborhood grid, and then the speculated ground information is used to determine the belonging of the grid points. After the initial terrain is determined by the initially identified ground points, the points cloud is filtered by iterative curved surface fitting on the initial terrain. In this way, ground points and non-ground points is accurately identified and the final DTM is got through smoothing.

Key words: LIDAR point cloud; the island and reef; cubic curved surface fitting; digital terrain model

海岛蕴含丰富的资源,具有很高的战略价值,及时掌握海岛精确 DTM(数字地面模型, digital terrain model)对国家实施海洋经济开发、掌握海洋国土资源和维护国家权益等具有重要的意义。海岛区域具有地面坡度变化大,附着物数量较多,规模不一,分布离散,形状不规则等特点^[1]。由于高技术测绘手段的缺乏,获取海岛的精确 DTM 有较大困难,特别是众多小岛、无人岛以及无数礁石,往往无法进行实地勘测。而机载激光扫描技术(light detection and ranging, LIDAR)可以直接获取目标对象的三维点坐标,具有自动化程

收稿日期:2014-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41271420, D010702);海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室资助项目(51342112)

作者简介:周绍光(1966—),男,江苏淮安人,副教授,博士后,主要从事摄影测量与遥感以及数字图像分析。

E-mail:zhousg1966@126.com

度高、受天气影响小、数据生产周期短、精度高等技术特点^[2],因此成为目前获取海岛地形信息的主要手段。

原始 LIDAR 点云数据包括地面点和地物点,为了生成 DTM,需要对点云数据进行滤波处理,即剔除其中的地物点,因此以生成 DTM 为目标的主要研究任务是剔除点云数据中的非地面点。国内外研究者已提出多种滤波方法:基于数学形态学的滤波算法^[3-4],将数学形态学运用于机载 LIDAR 点云数据滤波处理过程中,达到滤除地物点的目的;基于坡度变化的滤波算法^[5-7],计算两点间的坡度值或高程差,通过与一定阈值比较判断计算点的属性;基于表面的算法^[8-10],根据每个小区域内的脚点(footprints)拟合该区域的近似表面,通过一定准则提取地面点。Maguya^[9]等提出了一种针对陡峭的、点云密度较低的森林覆盖区域的自适应 DTM 内插方法,将点云数据进行规则格网化后,根据设定的判断准则对每一格网内的点云数据进行不同的处理(一次趋势面拟合、二次趋势面拟合或三次样条插值方法)生成 DTM;熊俊华^[10]等提出一种基于二次多项式的局部最小二乘拟合滤波算法,采用二次多项式拟合网化后的点云数据,通过比较原始点云高程和拟合曲面上高程的差值来判断是否为地面点或非地面点。

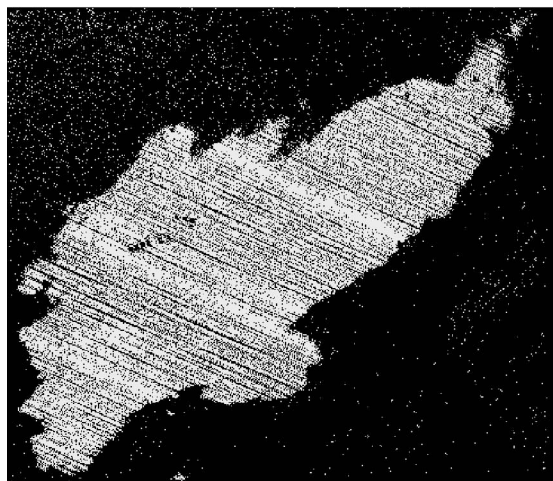
迄今为止,国内外研究利用机载 LIDAR 系统探测海岛 DTM 的报道较少,而且大多借助专业软件平台处理点云数据。史照良等^[11]以江苏沿海滩涂为例研究 LIDAR 技术在海岛、滩涂测绘中的应用,研究较多的仍是提取城区、农村等地势平缓区域的 DTM^[12-15]。

因此,本研究提出一种基于 LIDAR 点云的海岛 DTM 生成算法。将 LIDAR 点云数据切分成规则格网,对每个格网内的点进行三次曲面拟合,得到每点的拟合高程。若观测高程与拟合高程之差小于阈值,则将这些点归为候选地面点;反之,则将这些点视作候选地物点。假如一格网里的周边(靠近格网线)区域有足够多的地面点,则将本格网内的候选地面点作为地面点,否则暂时不接受本格网的候选地面点为地面点。依次将每一暂无确定地面点的格网作为当前格网,以其八邻域格网中已确定的地面点进行三次曲面拟合,得出本格网的近似地面,当前格网内那些观测高程与拟合高程之差小于阈值之点被确定为当前格网内的地面点。

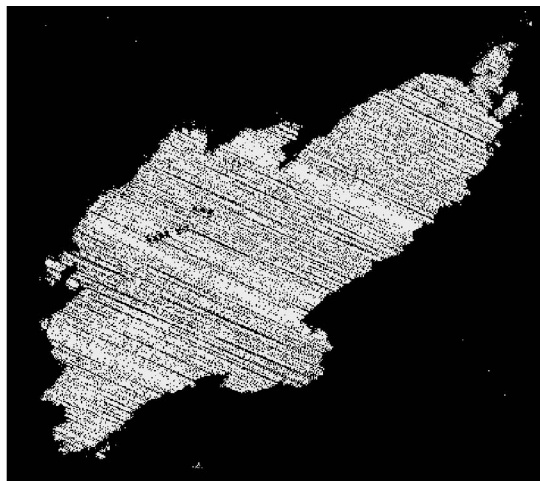
区分了所有格网内的地面点与非地面点之后,对整个区域进行迭代精细滤波:在更大的格网内对点云数据进行迭代三次曲面拟合滤波,以精细地调整少数处于分界面附近点的类别。最后对地面点数据进行平滑处理,构建 TIN(不规则三角网,triangular irregular network),得到海岛的 DTM。通过与文献[10]进行比较,证明新方法具有良好的实用性与可靠性。

1 海岛(礁)LIDAR 点云数据预处理

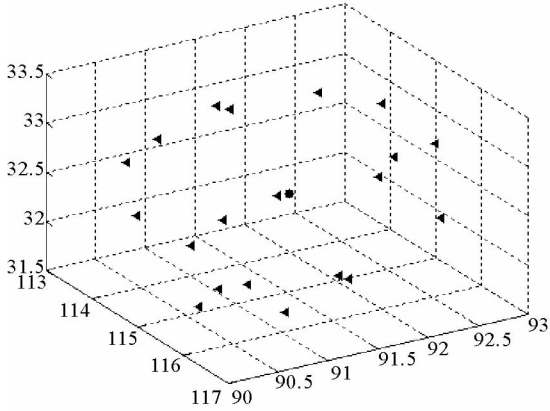
实验所用数据(图 1(a))的覆盖区域为一独立的无人居住海岛,其上附着物种类型较为单一,只有植被,离散分布于海岛上,覆盖区密度较大。研究的目的是滤除地面坡度变化大、形状不规则的海岛 LIDAR 点云数据中的植被点,生成 DTM。机载激光雷达扫描系统实施扫描过程中,激光束不可避免地触及海岛周围海



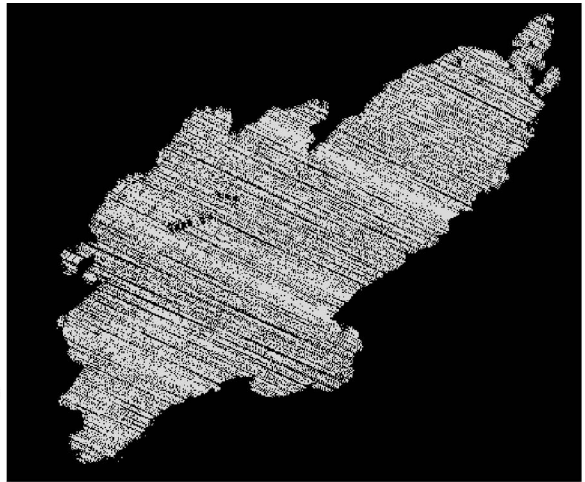
(a)原始点云数据
(a)The original point cloud data



(b)经高程阈值处理后的数据
(b)The data after the processing of elevation threshold



(c)最近邻点(圆点为中心点)
(c)The nearest points (the centeris dot)



(d)对图(b)进行k近邻算法处理得到的数
(d)The data after the processing of k nearest neighbor method of Fig(b)

图1 LIDAR点云数据预处理示意图

Fig. 1 The preprocessing of LIDAR point clouds data

面。由于海水的吸收作用,产生回波的海面点很稀疏,但还是妨碍海岛的DTM提取,故首先要设法去除。鉴于海面点高程比海岛上的点高程低的事实,通过观察原数据的高程信息,发现绝大多数海面点的高程低于13.0 m,故高程阈值 $h=13.0$ m,将高程低于 h 的点去掉。经上述处理后得到的数据如图1(b)所示,图中海面点明显减少,但还存在少量孤立点,采用 k 近邻方法将其去除,具体步骤:找到图1(b)中每个点周围最邻近的20个点(图1(c)),以图1(c)中的圆点为中心点,三角点为距中心点最近的20个点,若这20个点到中心点的距离的最大值大于3 m,则将对应的中心点剔除,否则予以保留,以此准则得到去除海面点的点云数据(图1(d))。

2 算法流程

处理流程如图2所示,操作步骤如下。

1)原始点云预处理,剔除海面上的粗差点。

2)对预处理后的点云数据进行规则格网化处理,对每个格网面元内的点进行三次曲面拟合,若点的观测高程与拟合高程之差小于阈值,则将其归为候选地面点;反之,若点云的观测高程与拟合高程之差大于阈值,则视其为候选地物点。

3)判断拟合后每个格网四周是否分布有足够多的地面点,若分布有足够多的地面点,则将候选地面点视作地面点存储于格网内;反之,若四周未分布足够多的地面点,则以其八邻域格网中已确定的地面点进行三次曲面拟合,得出本格网的近似地面,当前格网内那些观测高程与拟合高程之差小于阈值之点被确定为当前格网内的地面点。

4)对第3)步判断及处理后的数据进行迭代三次曲面拟合以精细调整地面点:在更大的格网内对点云数据进行迭代三次曲面拟合滤波,以精细地调

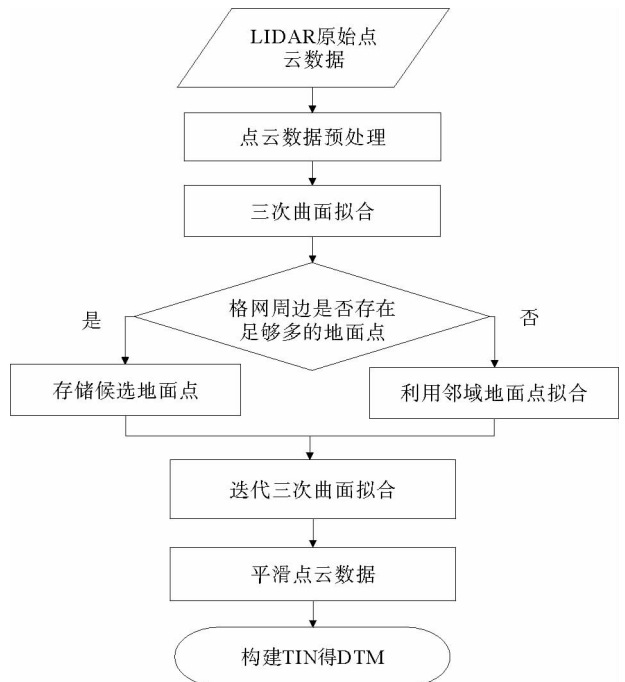


图2 提取DTM流程图

Fig. 2 The flowchart of extracting DTM

整少数处于分界面附近的点的类别;

5) 对地面点数据采用移动曲面拟合进行平滑处理, 构建 TIN 得到海岛的 DTM。

3 关键步骤描述

3.1 格网化

对预处理后的点云数据进行规则格网化。本研究的实验数据格式是 LAS 格式, 其第一、二、三列分别是 x, y, z 坐标, 基于此构建如图 3 所示的坐标系, y 坐标为横坐标, x 坐标为纵坐标。将所有点的横纵坐标减去横纵坐标的最小值, 如此能更直观地在图上显示点云的坐标值, 且便于计算。覆盖点云数据的矩阵区域的左上角和右下角的坐标分别为 $(0, x_{\max})$, $(y_{\max}, 0)$, 则格网的行列数 M, N 分别为:

$$\begin{cases} M = \lceil x_{\max}/l_G \rceil + 1 \\ N = \lceil y_{\max}/l_G \rceil + 1 \end{cases} \quad (1)$$

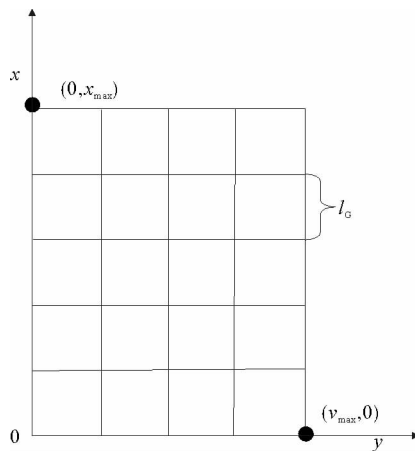


图 3 坐标系及格网划分图

Fig. 3 The coordinate system and grid division

l_G 为每个小格网的宽度, 针对本文实验数据, 格网宽度取为 20 m。若格网宽度取的过大, 则地形的变化过快, 不利于对地形的表达; 若格网宽度取的过小, 则不能保证绝大多数格网的四周都分布有足够多的地面点。从矩形区域的左上角第一个格网开始滤波运算, 该格网的左上角坐标为 $y_{\text{UpperLeft}} = 0$, $x_{\text{UpperLeft}} = x_{\max}$; 右下角坐标为 $y_{\text{LowerRight}} = 20$, $x_{\text{LowerRight}} = x_{\max} - 20$, 将满足公式(2)的点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ 划分为该格网内的点。

$$\begin{cases} y_{\text{UpperLeft}} \leq y_i < y_{\text{LowerRight}} \\ x_{\text{LowerRight}} \leq x_i < x_{\text{UpperLeft}} \end{cases} \quad (2)$$

3.2 三次曲面拟合

实验数据如图 1(a) 所示, 海岛地形表面是一个空间曲面, 但整个岛面难以用一个显式方程描述, 根据 3.1 节所述将海岛地形曲面规则划分成水平投影大小为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的独立面元, 对每个面元进行三次曲面拟合, 拟合方程:

$$z^0 = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6x^2y + a_7xy^2 + a_8x^3 + a_9y^3; \quad (3)$$

其中, a_0, a_1, \dots, a_9 为模型的 10 个待定参数, 需要至少列 10 个方程进行解算, 因此, 每个面元内至少需要 10 个点才能得到三次曲面方程, 为了提高曲面拟合的精度, 选择多于 10 个点进行解算, 将区域内的 n 个观测点 $p_i(x_i, y_i, z_i^0)$ 带入式(3), 列出误差方程为:

$$v_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2 + a_6x_i^2y_i + a_7x_iy_i^2 + a_8x_i^3 + a_9y_i^3 - z_i^0. \quad (4)$$

若令

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_9 \end{bmatrix}, \mathbf{z}^0 = \begin{bmatrix} z_1^0 \\ z_2^0 \\ \vdots \\ z_n^0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 & x_1^2 & y_1^2 & x_1^2y_1 & x_1y_1^2 & x_1^3 & y_1^3 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 & x_2^2 & y_2^2 & x_2^2y_2 & x_2y_2^2 & x_2^3 & y_2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_ny_n & x_n^2 & y_n^2 & x_n^2y_n & x_ny_n^2 & x_n^3 & y_n^3 \end{bmatrix},$$

则误差方程为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{XA} - \mathbf{z}^0. \quad (5)$$

这里使用最小二乘拟合曲面的目的是近似拟合出局部地形的大体走势,从而判断目标点的属性,所以应对 n 个点取等权,使它们对曲面的拟合做出同等的贡献。然后,根据平差理论进行求解,得出三次曲面系数的解为:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{z}^0; \quad (6)$$

根据拟合的三次曲面,可以对点 p_i 进行重新插值,得到拟合高程:

$$z_i' = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i y_i + a_4 x_i^2 + a_5 y_i^2 + a_6 x_i^2 y_i + a_7 x_i y_i^2 + a_8 x_i^3 + a_9 y_i^3. \quad (7)$$

通过比较原始点云的观测高程与拟合高程的差值来判断该点是否为地面点。对于点 p_i ,若 $z_i^0 - z_i' > \theta$,则点 p_i 被归为候选地物点,将其从点云数据中剔除;反之,若 $z_i^0 - z_i' < \theta$,则将点 p_i 视作候选地面点,并将其存储于对应的格网内。

3.3 拟合条件及格网填充

假如格网里的点明显地分为上下两层(图4(a)),则可以判定上层是树冠,下层是地面。当然,要正确区分地面点与地物点,拟合面与实际地面必须比较接近。保证拟合面准确可靠的一个先决条件是格网的四周需分布有足够多的地面点。这一事实可借助图4加以说明,通过手动滤波确定图4(a)中三角形点为地面点,星号点为相对较高的地物点,显然此格网的四周未分布足够多的地面点;图4(b)是图4(a)中的右边点云数据的剖面图,可明显看出地物点较密集的分布于右边,而地面点主要集中在左边;图4(c)为图4(b)中的点云数据的曲面拟合图,图中右边的地物点相对于对应的地面点对拟合做出的贡献更大,导致拟合曲面偏向地物点,拟合后地面点的拟合高程偏差过大,若拟合前后的高程差大于阈值,则这些地面点会被错分为地物点,因此需保证格网面元四周有足够多的地面点。

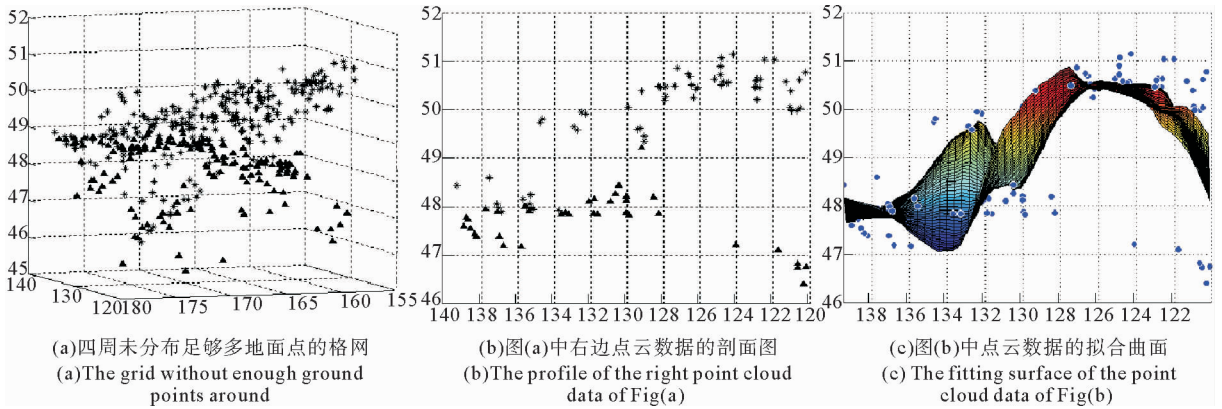


图4 格网内点云数据分布图

Fig. 4 The distribution of point clouds data in the grid

将每个格网按图5所示进行划分,格网里的四周被划分为八部分,其中A,C区域大小为 $5\text{ m} \times 10\text{ m}$,B,D区域大小为 $10\text{ m} \times 5\text{ m}$,而E,F,G,H区域大小则为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 。若三次曲面拟合后,格网内A,B,C,D四个区域中候选地面点的数目均大于 η_1 个,且E,F,G,H四个区域中候选地面点的数目均大于 η_2 个,则判定该格网的四周分布有足够多的地面点,可将候选地面点视作地面点存储于本格网内,否则暂时不接受本格网的候选地面点为地面点。

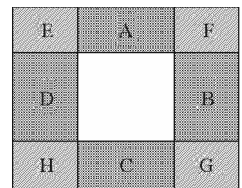


图5 格网里的四周划分图

Fig. 5 The division of grid's surrounding

表1为空格网的分布情况,其中有点云数据的格网为四周分布有足够多地面点的格网,而标记为‘1’的格网则为四周未分布足够多地面点的格网。从表可知标记为‘1’的空格网较多的分布于海岛的边缘,少数分布于海岛的中间。依次将标记为‘1’的格网作为当前格网,以其

八邻域格网中已确定的地面点进行三次曲面拟合,拟合前需保证其八邻域里已确定地面点的格网数不小于 3 个,拟合后得出本格网的近似地面,当前格网内那些观测高程与拟合高程之差小于阈值 θ 的点被确定为当前格网内的地面点,多次重复上述操作,直到所有标记为‘1’的格网里均有点云数据为止。

表 1 空格网分布情况

Tab. 1 The distribution of empty grid

(a) 分布于海岛边缘的一些空格网 (a) Some empty grids located in edge of the island				(b) 分布于海岛中间的一空格网 (b) An empty grid located in the middle of the island			
格网列				格网列			
	□	1	<220×3>	<311×3>	<284×3>	<269×3>	
	□	1	<190×3>	<229×3>	<220×3>	<233×3>	
格网行	1	<201×3>	<200×3>	<150×3>	1	<198×3>	
	<238×3>	<215×3>	<193×3>	1	<285×3>	<233×3>	
	<266×3>	<315×3>	<307×3>	<282×3>	<253×3>	<242×3>	
	<235×3>	<233×3>	<240×3>	<287×3>	<275×3>	<255×3>	

3.4 迭代三次曲面拟合精细调整地面点

经填充格网后,每个格网内的点云数据绝大多数为地面点,但还存在少量的地物点,需要将这些少量的地物点剔除。由于拟合后每个格网内点云数据密度下降,故在精细调整地面点时,适当扩大格网宽度,将格网宽度取为 25 m。迭代三次曲面拟合精细调整地面点算法效仿了 RANSAC 算法(随机采样一致性算法, random sample consensus algorithm),通过一定准则重复迭代生成最优内点数据集,处理过程如下:

1)对每个格网内的 m 个点 $p_i'(x_i, y_i, z_i^0)$ 进行三次曲面拟合,得到每点的拟合高程 z_i' ,则每个点到拟合面的距离为 $d_i = |z_i^0 - z_i'|$,距离 d_i 的标准偏差为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (d_i - \bar{d})^2}; \quad \bar{d} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_i。$$

其中, \bar{d} 是距离 d_i 的均值, m 为每个格网内点的数目。若 $d_i \leq 2\sigma$,则点 p_i' 被归为候选地面点点集 $\{Q_1\}$; 反之,若 $d_i > 2\sigma$,则点 p_i' 被归为候选地物点;

2)用候选地面点点集 $\{Q_1\}$ 中的所有点作第二次曲面拟合,判断原格网内的 m 个点 p_i' 到拟合面的距离 d_i^1 是否小于对应的距离标准偏差 σ_1 ,若 $d_i^1 \leq 2\sigma_1$,则点 p_i' 被归为候选地面点点集 $\{Q_2\}$; 反之,若 $d_i^1 > 2\sigma_1$,则点 p_i' 被归为候选地物点;

3)用候选地面点点集 $\{Q_2\}$ 作第三次曲面拟合,重复上述操作直到点集 $\{Q_n\}$ 和点集 $\{Q_{n-1}\}$ 内点的数目相同时停止迭代,输出每个格网内的地面点点集 $\{Q_n\}$ 。

3.5 移动曲面拟合平滑

为得到平滑的 DTM,将上述结果用移动曲面拟合进行平滑处理。如图 6 所示,每次取大小为 2×2 (即 $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$) 的格网区域及右移一格的 2×2 格网区域,分别对其中的点云数据进行三次曲面拟合,而黑色重叠区域中的点云数据参与了两次曲面拟合,因此将每点两次拟合高程的均值作为该点的最终拟合高程。操作完成后,移动到下一大小为 2×2 的格网区域及右移一格的 2×2 格网区域处重复上述操作,按从左到右、从上到下的顺序依次移动窗口遍历整个海岛格网,得到平滑的 DTM 模型。

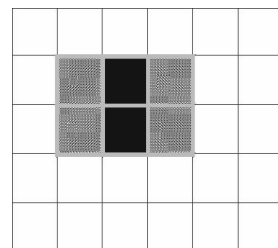


图 6 窗口重叠区域示意图

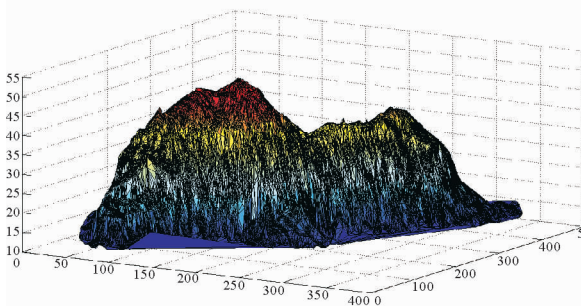
Fig. 6 The overlapping area of the window

4 实验

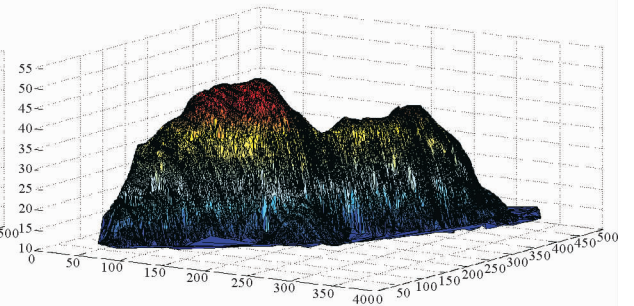
实验平台为 Windows7 操作系统, CPU 主频为 2.10 GHz, 内存为 2 GB, 用 MATLAB R2012b 软件编程实现。实验数据为机载 LIDAR 点云数据, 数据格式为 .las 格式, $\theta = 1 \text{ m}$, $\eta_1 = 20$, $\eta_2 = 10$ 。图 7(a) 为用 RealWorks 软件显示的预处理后的原始点云数据, 可见海岛上存在明显的地物点; 图 7(b) 为采用文献[10]的方法对本文实验数据处理的结果, 对点云数据共进行了 3 次二次曲面拟合滤波; 图 7(c) 为本文方法处理的结果。



(a) 预处理后的点云数据图
(a) The point cloud data after the preprocessing



(b) 文献[10]处理的结果图
(b) The result of reference[10]



(c) 本文方法的结果图
(c) The result of this method

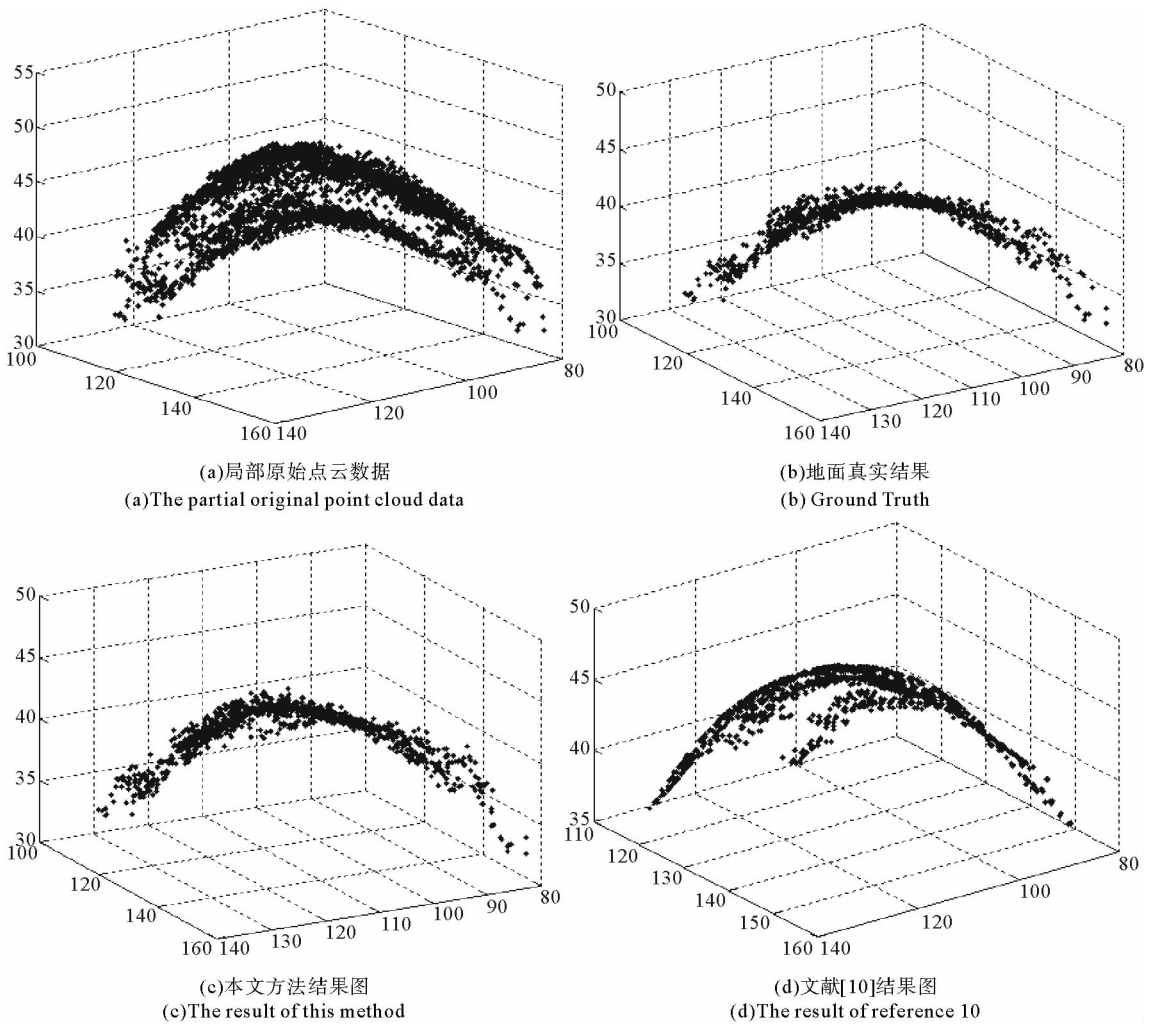
单位: m

图 7 实验结果对比图

Fig. 7 The comparison of experimental results

图 8(a) 为图 7(a) 的局部点云数据, 由图可知点云数据存在明显分层现象, 上层为地物点, 下层为地面点; 图 8(b) 为将图 8(a) 的点云数据导入 RealWorks 软件后手动剔除地物点后的结果 (即 Ground Truth); 图 8(c) 为本文方法对图 8(a) 的点云数据滤波处理后的结果; 图 8(d) 为文献[10]采用最小二乘二次曲面拟合滤波方法对图 8(a) 的点云数据滤波处理后的结果。对比实验结果可知, 本方法较文献[10]方法能更好地提取地面点表达地面信息, 构建 DTM。从精度上看, 本文方法处理结果的中误差与最大误差均较文献[10]的方法低, 证明本文方法具有一定的有效性和准确性。

从图 7 可知, 文献[10]的实验结果中有很多毛刺, 提取地形坡度变化较大的海岛 DTM 的效果不太好; 本文的方法能够较好地提取海岛的 DTM, 为了更好地说明本文方法的有效性和准确性, 截取实验数据的一部分进行局部直观的对比试验 (图 8)。最后, 使用最大误差和中误差这两个精度评价指标, 定性评价本文算法与文献[10]的海岛礁的 DTM 提取效果, 结果如表 2 所示。对比可得, 本文方法的精度有较为明显的提高, 进一步验证了本文提取精度的有效性和可靠性。



单位:m

图 8 局部点云数据的实验结果对比图

Fig. 8 The comparison of partial point clouds' experimental results

5 结论

海岛地形具有坡度变化大、附着物数量较多、形状不规则等特征,使用经典滤波方法较难提取准确的 DTM,因此提出一种基于 LIDAR 点云的海岛 DTM 生成算法。将点云数据规则格网化后进行三次曲面拟合,确定了初步的地面点;每个格网四周有足够多的地面点保证了三次曲面拟合的准确性;迭代三次曲面拟合精细调整地面点使得保留下来的点是地面点,而移动曲面拟合平滑使得最终输出结果为平滑的 DTM 模型。实验结果表明,提取海岛 DTM 的方法适用于地形坡度变化较大的海岛区域,能够完整、较精确地提取海岛的 DTM,因此具有较强的实用性与可靠性。

参考文献:

[1]沈春宇,关贤恩.利用机载激光雷达系统对我国领海岛礁进行精确地面三维数据获取应用探讨[J].中国西部科技,2010,9(8):15-19.

Shen Chunyu,Guan Xianen. Discussion on the application of airborne laser radar system in accurate three-dimensional data

表 2 精度评价表

Tab. 2 The table of accuracy evaluation m

精度指标	本文方法	文献[10]方法
最大误差	2.876 1	5.709 8
中误差	0.535 2	0.924 7

- acquisition for islands and reefs within China's territorial waters[J]. *Science and Technology of West China*, 2010, 9(8): 15-19.
- [2] 王宗跃, 马洪超, 彭检贵. 利用 LiDAR 数据提取山谷(脊)线的关键技术研究[J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 29(6): 19-24.
- Wang Zongyue, Ma Hongchao, Peng Jianguai. Research on key technologies of extracting valley and ridge lines with LiDAR data[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science*, 2010, 29(6): 19-24.
- [3] Zhang K, Chen S C, Whitman D, et al. A progressive morphological filter for removing non-ground measurements from airborne LIDAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(4): 872-882.
- [4] Chen Q, Gong P, Baldocchi D, et al. Filtering airborne laser scanning data with morphological methods[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, 73(2): 175-185.
- [5] Meng X L, Wang L, Silván-Cárdenas J L, et al. A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(1): 117-124.
- [6] Sithole G, Vosselman G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, 59(1): 85-101.
- [7] 李勇, 吴华意. 基于形态学梯度的机载激光扫描数据滤波方法[J]. *遥感学报*, 2008, 12(4): 633-639.
- Li Yong, Wu Huayi. Filtering airborne LIDAR data based on morphological gradient[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(4): 633-639.
- [8] Mongus D, Žalik B. Parameter-free ground filtering of LiDAR data for automatic DTM generation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 67: 1-12.
- [9] Maguyaa S, Junttila V, Kauranne T. Adaptive algorithm for large scale DTM interpolation from LIDAR data for forestry applications in steep forested terrain[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 85: 74-83.
- [10] 熊俊华, 方源敏, 邓德标. 最小二乘曲面拟合的 LiDAR 数据滤波方法[J]. *测绘科学*, 2013, 38(4): 74-76.
- Xiong Junhua, Fang Yuanmin, Deng Debiao. Surface fitting filtering based on least square method from LiDAR data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2013, 38(4): 74-76.
- [11] 史照良, 曹敏. 基于 LiDAR 技术的海岛礁、滩涂测绘研究[J]. *测绘通报*, 2007(5): 49-53.
- Shi Zhaoliang, Cao Min. A study of surveying and mapping of island and tidal flat based on LiDAR[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2007(5): 49-53.
- [12] Chen Z Y, Devereux B, Gao B, et al. Upward-fusion urban DTM generating method using airborne Lidar data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 72: 121-130.
- [13] 王涛, 杨建思, 廖明生. 一种从 LIDAR 数据提取城区 DTM 的方法[J]. *遥感学报*, 2007, 11(2): 209-213.
- Wang Tao, Yang Jiansi, Liao Mingsheng. Deriving digital terrain models from LIDAR data in urban area[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(2): 209-213.
- [14] 陶金花, 苏林, 李树楷. 一种保护细节的从机载激光点云中提取城区 DTM 的方法[J]. *遥感学报*, 2008, 12(2): 233-238.
- Tao Jinhua, Su Lin, Li Shukai. A Detailed protected method of extracting digital terrain model from airborne laser point cloud in urban areas[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(2): 233-238.
- [15] 张齐勇, 岑敏仪, 周国清, 等. 城区 LiDAR 点云数据的树木提取[J]. *测绘学报*, 2009, 38(4): 330-335.
- Zhang Qiyong, Cen Minyi, Zhou Guoqing, et al. Extracting trees from LiDAR data in urban region[J]. *Journal of Surveying and Mapping*, 2009, 38(4): 330-335.

(责任编辑:高丽华)