

螺旋式扫描激光雷达数据的 DEM 内插算法

杨书娟^{1,2*}, 张珂殊^{2**}, 邵永社²

¹中国科学院大学, 北京 100049;

²中国科学院电子学研究所, 北京 100190

摘要 提出一种螺旋式扫描机载激光雷达系统的数字高程模型(DEM)内插算法。首先,描述螺旋式扫描激光雷达系统的扫描特点,并阐述实时计算重叠区域的原理;然后,介绍改进的三角网迭代加密滤波法,并将其用于地面点与非地面点的分离;最后,基于随机森林法内插 DEM。实验结果表明,该方法实现了螺旋式扫描机载激光雷达系统的 DEM 内插,且内插精度符合工业生产的数据要求。

关键词 遥感; 螺旋式扫描; 激光雷达系统; 三角网滤波; 随机森林法; 数字高程模型

中图分类号 TP732

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1110006

DEM Interpolation Algorithm of Data from Spiral Scanning Lidar

Yang Shujuan^{1,2*}, Zhang Keshu^{2**}, Shao Yongshe²

¹University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

²Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract An algorithm for the digital elevation model (DEM) interpolation in the spiral scanning airborne lidar system is proposed. First, the scanning characteristics of this spiral scanning lidar system is described and the principle of real-time calculation of the overlapping area is clarified. Then the improved method of triangulation iterative encryption filtering is introduced and is also used to separate the terrestrial and non-ground points. Finally, the DEM interpretation is carried out based on the random forest. The experimental results show that with this method, the DEM interpolation in the spiral scanning airborne lidar system can be realized with an interpolation accuracy meeting the data requirements for industrial production.

Key words remote sensing; spiral scanning; lidar system; triangulation filter; random forest method; digital elevation model

OCIS codes 280.3400; 280.3420; 280.3640; 280.1100

1 引言

目前,数字高程模型(DEM)的获取方法主要包括传统地面测量法、地形图等高线扫描数字化、航空摄影测量法、星载合成孔径雷达干涉(InSAR)和机载激光雷达技术等^[1-2]。其中,激光雷达是一种主动式遥感测量设备,具有作业周期短、精度高、成本低等优点,是当前获取高精度 DEM 的一种新技术^[3]。目前,国内主要使用大型机载激光雷达系统获取 DEM,但激光雷达系统对飞行器的要求很高,且价格昂贵,因此应用领域较狭窄。近年来,随着无人机技术的迅速发展,轻巧型激光雷达系统可搭载在无

人旋翼机上,广泛应用于地理信息采集等领域。

虽然激光雷达系统可直接测量三维坐标,但点云数据的离散特性不能连续表征地表信息,因此 DEM 内插算法受到了学者们的广泛关注。Kidner^[4]对线性到五次多项式的插值方法进行了研究;Rees^[5]通过实验数据研究了格网 DEM 的高阶插值;王克涛等^[6]针对双高次多项式曲面和加权平均法的缺陷,提出了一种双高次多项式加权平均组合方法;胡海等^[7]研究了 DEM 内插方法的稳定性,以及高程序同构特性等问题;胡璐锦等^[8]对几种常用的 DEM 内插算法进行了不同地貌类型的比较分析;兰玉芳等^[9]研究了基于等高线生

收稿日期: 2018-06-02; 修回日期: 2018-06-21; 录用日期: 2018-08-17

* E-mail: yangshujuan880822@126.com; ** E-mail: kszzhang@mail.ie.ac.cn

成 DEM 的内插算法,并分析了该算法的精度,提出要根据不同的地貌特点来合理选择内插算法。上述内插方法都是以拟合函数为基础来推算出区域范围内任意点或任意分区的高程值,但实际地形地貌复杂多变,过于复杂的曲面不利于插值计算,过于简单的曲面又不能很好地拟合已知点,这两者之间存在着矛盾。

针对上述拟合函数的弊端,本文提出了基于随机森林回归法内插 DEM。首先描述了螺旋式扫描激光雷达系统的特点,推导出实时计算重叠区域的公式;然后采用改进的三角网迭代加密滤波法获得地面点云;最后基于随机森林回归法内插 DEM。

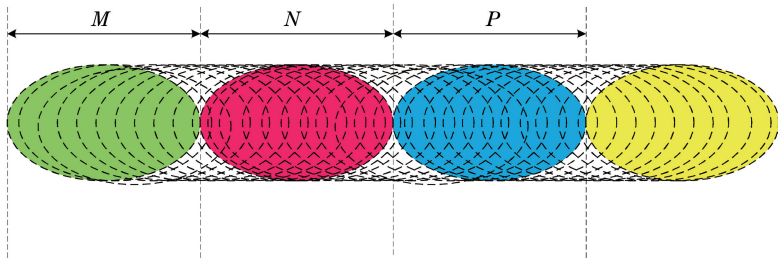


图 1 螺旋式激光雷达的扫描线

Fig. 1 Scan lines of spiral laser radar

螺旋式扫描激光雷达系统按照固定大小进行数据存储,同一重叠区域的数据可能储存在相邻的两个文件中,因此须先计算重叠区域,再对重叠区域的数据进行 DEM 内插。

2.2 实时计算重叠区域

重叠区域的范围由激光雷达视场角度、飞行高度和飞行方向决定,而飞行高度和飞行方向实时变化。因此,为了生成基于规则格网的 DEM,需实时计算激光雷达系统扫描重叠区域的范围。

2.2.1 飞行方向

1) 重叠区第一条扫描线的飞行方向定义

由于惯性导航系统实时记录飞行速度,可根据 x 轴和 y 轴的飞行速度来确定飞行方向,如图 2 所示。

飞行方向的定义为:若 $\text{abs}(V_y) > \text{abs}(V_x)$,则飞行方向为南北方向,否则飞行方向为东西方向。其中: V_x 和 V_y 分别为沿 x 轴和 y 轴的飞行速度; $\text{abs}(\cdot)$ 为取绝对值函数。

在南北飞行方向中,若 $V_y > 0$,飞行方向为由南向北,如图 2 的区域 3;否则飞行方向为由北向南,如图 2 的区域 1。在东西飞行方向中,若 $V_x > 0$,飞行方向为由西向东,如图 2 的区域 2;否则飞行方向为由东向西,如图 2 的区域 4。

2 理论依据

2.1 螺旋式扫描激光雷达

螺旋式扫描激光雷达采用倾斜椭圆方式扫描,视场角度范围为 $70^\circ \times 50^\circ$,既可获取立面建筑物侧面的三维信息,又可从不同角度穿透植被茂密区域的植被来扫描地面区域,从而增加地面点的密度。

图 1 所示为螺旋式激光雷达系统的扫描线。当飞行平台运动时,不同时间内椭圆扫描线的前半圈和后半圈存在重叠区域,如图 1 中红色重叠区域 N 和蓝色重叠区域 P 的扫描线。

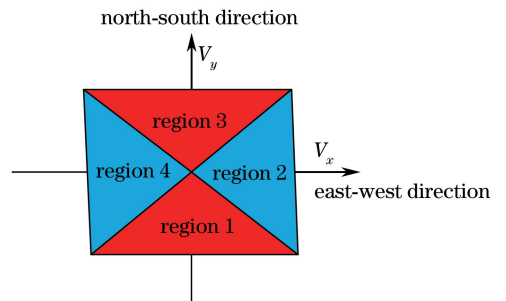


图 2 重叠区第一条扫描线的飞行方向

Fig. 2 Flight direction of first scan line in overlapping area

2) 判断飞行方向是否变化

飞行平台运动时,飞行方向可能会发生变化,因此需实时判断飞行方向是否变化。由于螺旋式激光雷达数据按扫描线的方式进入缓存,可根据相邻扫描线的飞行方向来判断当前扫描线的飞行方向是否发生变化。

若上一条扫描线是东西方向,则判断是否满足

$$[\text{abs}(V_y) - \text{abs}(V_x) > V \times 0.5] \&\& [\text{abs}(V_y) > V \times 0.8], \quad (1)$$

式中: V 为飞行速度, $V = \sqrt{V_x \cdot V_x + V_y \cdot V_y}$; $\&\&$ 为条件与符号。若满足(1)式,则当前飞行速度为 $V_c = \text{abs}(V_y)$,当 $V_y > 0$ 时,当前扫描线的飞行方向为由南向北,否则飞行方向为由北向南。若不满足(1)式,则

当前扫描线的飞行方向与上一扫描线的方向一致。

若上一条扫描线是南北方向,则判断是否满足

$$[\text{abs}(V_x) - \text{abs}(V_y) > V \times 0.5] \&\& [\text{abs}(V_x) > V \times 0.8]. \quad (2)$$

若满足(2)式,则当前飞行速度为 $V_c = \text{abs}(V_x)$,当 $V_x > 0$ 时,当前扫描线的飞行方向为由西向东,否则飞行方向为由东向西。若不满足(2)式,则当前扫描线的飞行方向与上一扫描线的方向一致。

2.2.2 重叠区域扫描线圈数

首先,根据飞行高度和扫描视场角度,计算重叠区域的长度;然后,根据重叠区域长度、飞行速度和扫描电机转速,计算重叠区域扫描线的圈数。

$$\begin{cases} L = 2H \times \tan \theta \\ N = \text{int}(FL/V) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: H 为飞行高度; θ 为一般的扫描视场; L 为重叠区域的长度; F 扫描仪点频; $\text{int}(\cdot)$ 为取整函数; N 重叠区域扫描线的圈数。

若飞行方向不变,如图3中黄色区域 Q_1 ,重叠

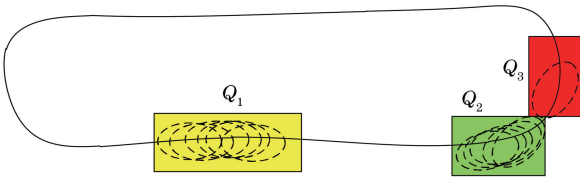


图3 重叠区扫描线的个数

Fig. 3 Number of scan lines in overlapping area

区扫描线的总圈数可根据(3)式计算得到。若飞行方向发生变化,由于扫描线圈数从1开始累加,则重叠区扫描的总圈数为当前累加的扫描线圈数,如图3中绿色区域 Q_2 ,当前扫描线开始为下一重叠区域(图3中红色区域 Q_3)的第一圈数据。

2.2.3 重叠区域点云

将每条扫描线上的激光点记录到一个集合 I 中,并实时更新当前重叠区域的范围,直到累计扫描圈数与重叠区扫描总圈数相同。为了保证相邻重叠区域的连续性,需判断相邻重叠区域的飞行方向是否一致,再分情况计算当前重叠区域的范围,如图4中的绿色区域和红色区域。

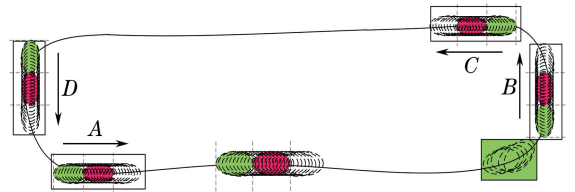


图4 重叠区域的范围

Fig. 4 Scope of overlapping area

1) 飞行方向一致

在图4中A、B、C和D位置,红色区域与绿色区域的飞行方向一致,为了保证两块区域的连续性,则红色区域的范围与绿色区域的飞行方向和范围、当前区域飞行方向和范围以及飞行速度有关(图5),红色区域范围的计算公式为

$$\begin{cases} \text{position A: } X_{\min} = X_{\text{lastmax}}; X_{\max} = X_{\text{lastmax}} + L; Y_{\min} = Y_{\text{currmin}}; Y_{\max} = Y_{\text{currmax}} \\ \text{position B: } X_{\min} = X_{\text{currmin}}; X_{\max} = X_{\text{currmax}}; Y_{\min} = Y_{\text{lastmax}}; Y_{\max} = Y_{\text{lastmax}} + L \\ \text{position C: } X_{\min} = X_{\text{lastmin}} - L; X_{\max} = X_{\text{lastmin}}; Y_{\min} = Y_{\text{currmin}}; Y_{\max} = Y_{\text{currmax}} \\ \text{position D: } X_{\min} = X_{\text{currmin}}; X_{\max} = X_{\text{currmax}}; Y_{\min} = Y_{\text{lastmin}} - L; Y_{\max} = Y_{\text{lastmin}} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $[X_{\text{currmin}}, X_{\text{currmax}}; Y_{\text{currmin}}, Y_{\text{currmax}}]$ 为当前 N 条扫描线的坐标范围; $[X_{\text{lastmin}}, X_{\text{lastmax}}; Y_{\text{lastmin}}, Y_{\text{lastmax}}]$ 为上一重叠区的坐标范围; L 为当前重叠区域的长度; $[X_{\min}, X_{\max}; Y_{\min}, Y_{\max}]$ 为重叠区域的坐标范围。

2) 飞行方向不一致

在图4中的A、B、C和D位置,绿色区域与上一相邻重叠区域的飞行方向不一致,则绿色区域的范围只与当前区域范围、飞行方向和飞行速度有关。红色区域范围的计算公式为

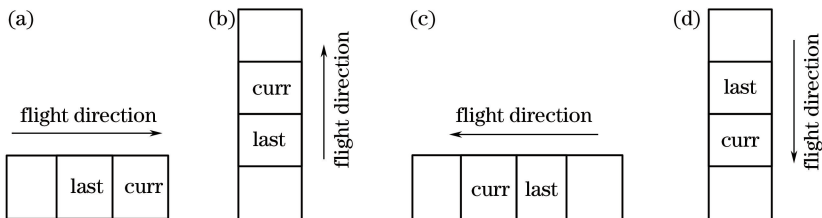


图5 重叠区的连续性。(a) A位置;(b) B位置;(c) C位置;(d) D位置

Fig. 5 Continuity of overlapping areas. (a) Position A; (b) position B; (c) position C; (d) position D

$$\begin{cases} \text{position A: } X_{\min} = X_{\text{currmin}}; X_{\max} = X_{\text{currmin}} + L; Y_{\min} = Y_{\text{currmin}}; Y_{\max} = Y_{\text{currmax}} \\ \text{position B: } X_{\min} = X_{\text{currmin}}; X_{\max} = X_{\text{currmax}}; Y_{\min} = Y_{\text{currmin}}; Y_{\max} = Y_{\text{currmin}} + L \\ \text{position C: } X_{\min} = X_{\text{currmax}} - L; X_{\max} = X_{\text{currmax}}; Y_{\min} = Y_{\text{currmin}}; Y_{\max} = Y_{\text{currmax}} \\ \text{position D: } X_{\min} = X_{\text{currmin}}; X_{\max} = X_{\text{currmax}}; Y_{\min} = Y_{\text{currmax}} - L; Y_{\max} = Y_{\text{currmax}} \end{cases} \quad (5)$$

3) 重叠区域点云

螺旋式激光雷达系统采用椭圆方式扫描,则对于一圈扫描线,部分落在重叠区域之内,部分在重叠区域之外,如图 1 中一圈扫描线的部分激光点属于区域 N ,部分激光点属于区域 P 。因此需将集合 I 中落在当前重叠区域内的点记录到集合 J_1 ,将落在当前重叠区域外的点记录到集合 J_2 ,集合 J_2 的点云将用于下一重叠区的计算。

2.3 改进三角网迭代加密滤波

在森林地区,激光束可透过树冠层直接打到地面,从而获取地表的空信息。从激光雷达点云中分离出地面点和非地面点是生成 DEM 的关键步骤之一,此过程称为激光雷达数据滤波。最具有代表性的方法有插值滤波法^[10]、倾角滤波法^[11]和形态学滤波法^[12]。插值滤波法不适合陡坡和地表差异变化较大的山区;倾角阈值需要结合研究区域的地形知识;形态学滤波法受内插精度的影响;而不规则三角网(TIN)迭代加密滤波法在城区和森林地区都有较好的适用性^[13]。

三角网迭代加密滤波在迭代加密时,采取随机选取待定点的方式,若待定点满足加密要求,则待定点判定为地面点,并更新 TIN,再判定下一个待定点。在地形起伏时,低矮植被可能会被误判断为地面点,地面点可能会被误判为非地面点,因此,采用改进三角网迭代加密滤波,将每个待判定点赋予一个与距离相关的优先级,保证优先级最高(距三角形顶点最近)的激光点优先判断。

2.4 基于随机森林内插 DEM

作为一种统计学理论,随机森林综合了装袋(Bagging)集成学习思想和随机子空间方法^[14]。利用 Bagging 重抽样方法从原始样本集中有放回地随机抽取多个与原始样本集元素数量相等的训练样本集,每个训练样本集对应一个构建的决策树。在决策树模型生成过程中,采用随机子空间法从所有特征中随机选择特征,并选择最优特征进行节点分裂。联合上述两种方法构建不同的决策树,预测时每棵决策树均会给出一个预测结果。对于分类问题,通过少数服从多数的投票方法决定随机森林的预测结果;对于回归问题,将所有回归决策树输出值的平均

值作为随机森林的预测值。

随机森林回归的训练过程:1)给定训练集 S 、测试集 T 、特征维数 F 。2)从 S 中有放回抽取与 S 同样大小的训练集 $S(i)$,作为根节点的样本,并从根节点开始训练。3)如果当前节点达到终止条件,当前节点设置为叶子节点,预测输出为当前节点各个样本值的平均值;如果当前节点没有达到终止条件,需从 F 维特征中无放回地随机选取 f 维特征,并寻找回归效果最优的特征及阈值。对于当前节点的样本集,若最优特征值小于阈值,样本被划分到左节点,否则样本被划分到右节点。4)重复步骤 3),直到所有节点都被标记为叶子节点。5)重复步骤 2)~4),直到所有决策树都被训练完成。

随机森林通过对样本空间的划分,设置决策树的棵数和随机特征选取个数,使样本空间分割更为多样化,从而拟合出复杂的非线性关系。在数学模型方面,随机森林与神经网络和支持向量的明显区别在于非参数。因此,随机森林回归应用到 DEM 插值时,不需要拟合函数,只需把地形点的平面位置作为高程值的影响因素。

2.5 整体流程

基于螺旋式激光雷达数据生成 DEM 的具体工作流程如图 6 所示。该方法共包括 3 个主要步骤。1)实时计算重叠区域。判断当前扫描线的飞行方向是否发生变化,若发生变化,则计算当前重叠区域的范围;否则,根据重叠区第一条扫描线的飞行速度和高度,计算当前重叠区域的扫描线 N_{over} ,然后累加扫描线数 N_{sta} ,直到 N_{over} 与 N_{sta} 相等时,计算当前重叠区域的范围。2)基于改进三角网迭代加密滤波,分离地面点云和非地面点云。3)基于随机森林回归法内插 DEM。

采用数值精度指标,将插值方法得到的高程值与实际高程值进行比较,根据高程差的平均误差和均方差来评判插值方法的优劣,精度指标的计算公式为

$$\begin{cases} H_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i - z_i| \\ r_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - z_i)^2} \end{cases}, \quad (6)$$

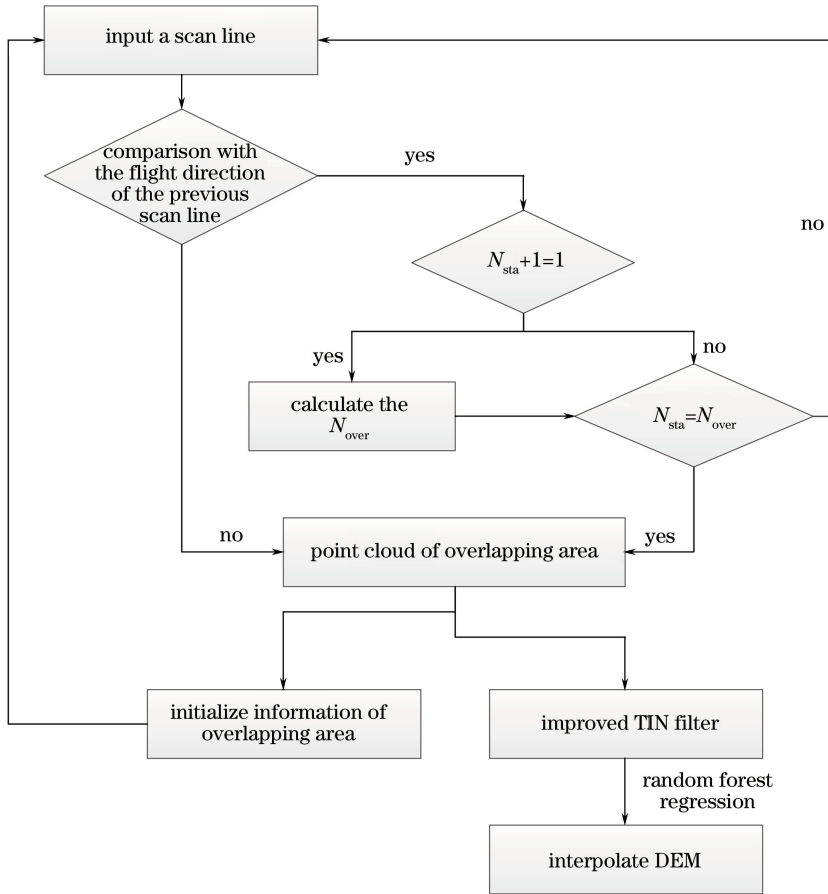


图 6 基于螺旋式激光雷达数据生成 DEM 的具体工作流程

Fig. 6 Detailed flow chart of DEM generation based on data from spiral laser radar

式中： Z_i 为第 i 个已知点的实测高程值； z_i 为已知点的内插高程值； n 为已知点的个数； H_{mean} 为已知点高程差的均值； r_{RMSE} 为已知点高程差的均方差。

3 实 验

实验数据由北科天绘螺旋式扫描激光雷达系统获取，该系统集成了高精度的惯导系统、螺旋式

扫描激光雷达和高分辨数码相机，可安装于固定翼无人机上进行数据采集。实验数据来源于实测数据，共飞行了 2 条航带，飞行高度为 300 m，激光点云间隔约为 0.5 m，如图 7 所示。图 7(a) 中，不同颜色代表不同的文件编号；图 7(b) 中，不同颜色代表不同的高程，从红色到蓝色表示高程值由高到低。

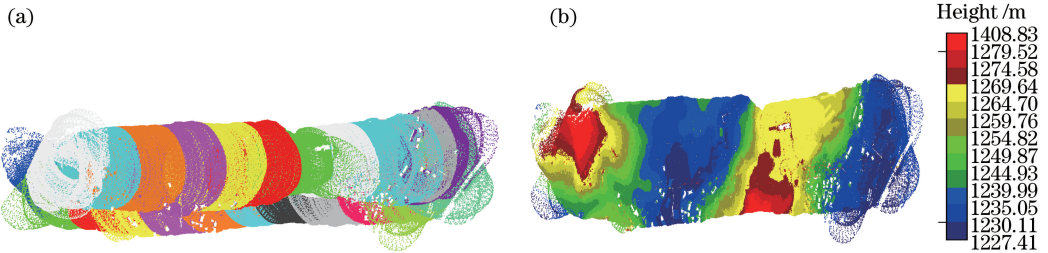


图 7 按不同方式显示的原始 DEM 数据。(a)按文件名；(b)按高程

Fig. 7 Raw DEM data displayed by different ways. (a) By file name; (b) by height

3.1 实时计算重叠区域

根据所提出的按照飞行速度实时计算重叠区域的方法，输出连续的重叠区域，不同颜色为不同的重

叠区域，并按起飞时间从 1 开始编号，结果如图 8 所示。由图 8 可知：

1) 区域 1 到区域 5 的飞行方向为由东向西，由



图 8 实时计算所得到的重叠区域

Fig. 8 Overlapping areas obtained by real-time calculation at flight direction without change, therefore the size of the area can be calculated according to (4).

2) In region 6, the direction of the scan line with number N_{um} has changed, therefore region 6 only contains $(N_{um} - 1)$ scan lines, the size of region 6 is significantly smaller than the size of the previous 5 regions.

3) The flight direction of region 7 is from north to south, the range of the overlapping area can be calculated according to (5). When the flight direction of the scan line changes, the range of the overlapping area 8 is calculated.

4) The flight direction of region 8 to region 12 is from west to east, when the flight direction does not change, the range of the overlapping area is calculated according to (4); when the flight direction of the scan line changes in region 13, the overlapping area of region 14 is calculated according to (5).

3.2 改进三角网迭代滤波

分别采用 TIN 迭代加密滤波方法和改进的 TIN 迭代加密滤波方法测量地形起伏较大的山区, 滤波结果如图 9 所示。

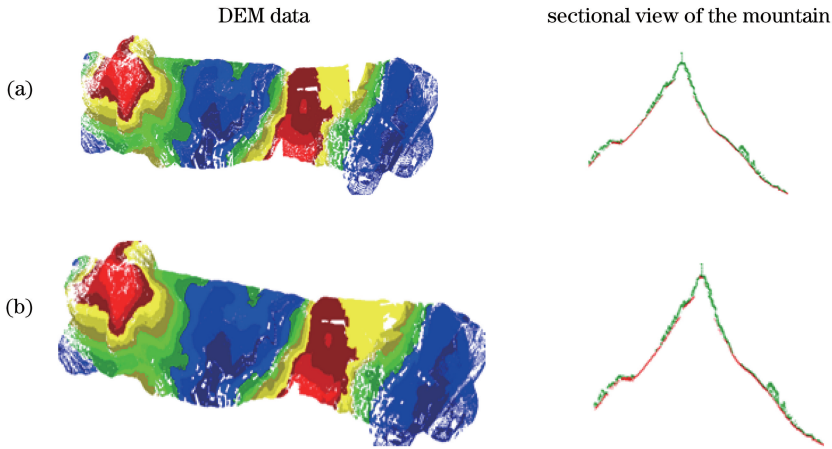


图 9 不同滤波方法的滤波点云。(a) TIN 迭代滤波;(b)改进 TIN 迭代加密滤波

Fig. 9 Filter point clouds for different filtering methods. (a) TIN iterative filter; (b) improved TIN iterative encryption filter

从图 9 可以看到:1)两组方法滤波均可有效剔除房屋和植被;2)右侧剖面图中,红色点云为地面点,绿色点云为植被点。图 9(a)没有保留山顶地面点,即山顶被削平,因此不能真实反映山区地形的起伏变化;而图 9(b)保留了山顶的地面点,与实际地形相符。因此改进 TIN 迭代加密滤波方法的效果更好。

3.3 基于随机森林内插 DEM

滤波处理剔除了植被和房屋点,并形成了大量空白区域,如图 10(a)所示。而基于随机森林对空

白区域进行内插处理后,基本可以恢复山体的起伏变化,真实地反映了实际地形,如图 10(b)所示。图 10(c)所示为整个区域基于随机森林内插的 DEM 数据,从红色到蓝色表示高程值由高到低。可以看到,内插 DEM 真实反映了山区地形的起伏变化。

分别采用随机森林内插法、克里金插值(Kriging)法、反距离加权内插(inverse distance weighting)法和移动曲面(moving surface)法内插研究区域,并比较不同内插法的 DEM 内插效果

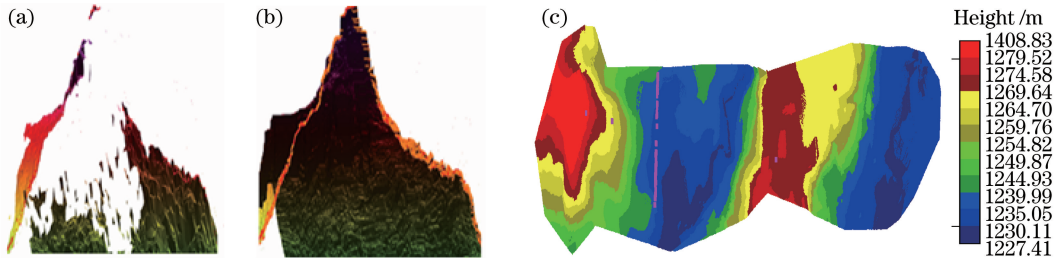


图 10 点云效果。(a)山体滤波后的点云;(b)山体的 DEM 数据;(c)整个区域的 DEM 数据

Fig. 10 Point cloud effects. (a) Point cloud for mountain after filtering; (b) DEM data of mountain; (c) DEM data of entire area

(图 11)。可以看到,随机森林内插点与原始地面点基本重合,真实地反映了山体和平缓区域的地形。克里金插值法的内插点和反距离加权法的内插点与

原始地面点不完全重合,但与真实地形的起伏基本一致。但移动曲面法内插点与原始地面点的差异明显,与实际地形相差较大。

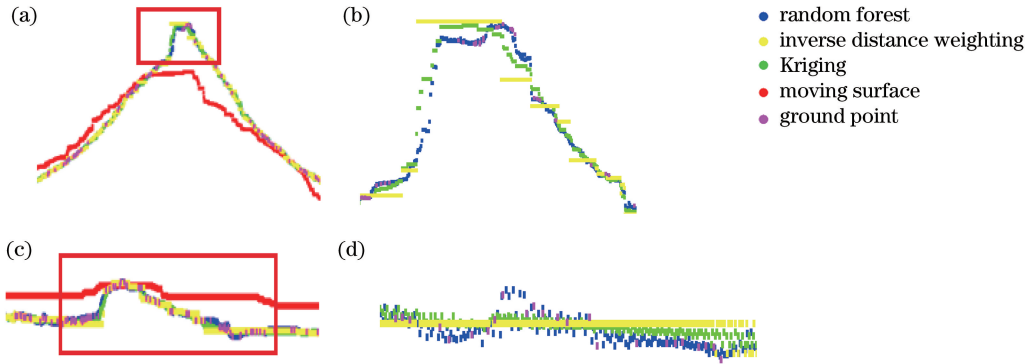


图 11 局部区域的剖面图。(a)山体的剖面图;(b)图 11(a)中红框区域的放大图;
(c)平缓区域的剖面图;(d)图 11(c)中红框区域的放大图

Fig. 11 Sectional view of local area. (a) Sectional view of mountain; (b)enlarged sectional view of red box area in Fig. 11(a); (c) sectional view of flat area; (d) enlarged sectional view of red box area in Fig. 11(c)

为了进一步验证内插精度,实测了 50 个控制点(图 10(c)中的粉红色点),计算实测高程值与内插高程值的高程差,图 12 所示为不同内插法对应的控制点高程差。可以看到,随机森林内插法的高程差最小,克里金内插和反距离加权的高程差次之,移动曲面拟合内插的高程差最大。此外,图 12 中 6、18、36 号控制点为分布在山坡上的控制点,其余控制点分布在地势相对平坦的区域。由

于地形起伏变化和植被的影响,山坡控制点的内插精度稍差。

根据(6)式,分别计算不同内插法的高程差均值(H_{mean})和均方差(r_{RMSE}),结果如表 1 所示。从精度看,随机森林内插法的平均误差和均方差最小,克里金内插法和反距离加权内插法的平均误差和均方差次之,移动曲面拟合内插法的平均误差和均方差最大,因此随机森林内插法的精度最高。

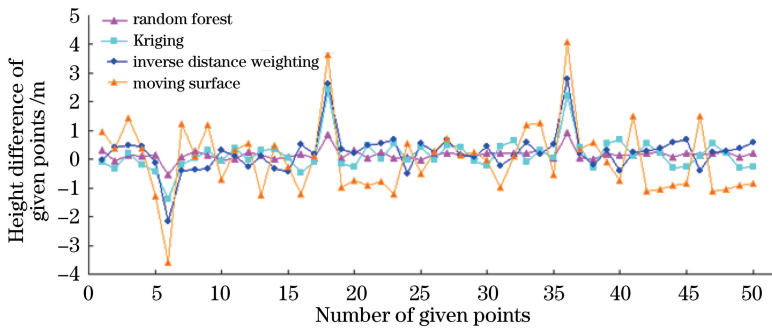


图 12 已知点的高程差值

Fig. 12 Elevation difference values of given points

表 1 不同内插算法的精度对比

Table 1 Accuracy comparison among different interpolation algorithms

Interpolation algorithm	Random forest	Kriging	Inverse distance weighting	Moving surface
H_{mean}/m	0.35	0.51	0.56	0.75
r_{RMSE}/m	0.16	0.26	0.29	0.36

4 结 论

针对螺旋式扫描激光雷达的特点,提出实时计算重叠区域的方法,然后采用改进三角网迭代加密

滤波法获得地面点云,最后基于随机森林回归法内插 DEM。实验结果表明,实时计算重叠区的方法适用不同飞行方向的航带,改进三角网迭代加密滤波后的地面点云反映了真实的地貌,随机森林内插

DEM不用考虑参数的设置问题,同时具有较高的准确度和容噪性。

参 考 文 献

- [1] Wu Y L, Hu H, Hu P, *et al.* A review on the issues in DEM error and DEM quality assessment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(5): 568-574.
吴艳兰, 胡海, 胡鹏, 等. 数字高程模型误差及其评价的问题综述[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2011, 36(5): 568-574.
- [2] Zhang L S, Cheng X J. Tunnel deformation analysis based on lidar points[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0404004.
张立朔, 程效军. 基于激光点云的隧道形变分析方法[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0404004.
- [3] Chen G B, Gao Z H, He L. Step-by-step automatic calibration algorithm for exterior parameters of 3Dlidar mounted on vehicle[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1010004.
陈贵宾, 高振海, 何磊. 车载三维激光雷达外参数的分步自动标定算法[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1010004.
- [4] Kidner D B. Higher-order interpolation of regular grid digital elevation models[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(14): 2981-2987.
- [5] Rees W G. The accuracy of digital elevation models interpolated to higher resolutions [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(1): 7-20.
- [6] Wang K T, Wang C, Zhu T Y, *et al.* Effective method of improving DEM interpolation accuracy[J]. *Journal of University of Science and Technology Liaoning*, 2014, 37(4): 378-380.
王克涛, 王昶, 朱添翼, 等. 提高DEM内插精度的一种有效方法[J]. *辽宁科技大学学报*, 2014, 37(4): 378-380.
- [7] Hu H, You L, Hu P, *et al.* Research on the choice of interpolation methods for generating DEM [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(1): 82-85.
胡海, 游涟, 胡鹏, 等. 数字高程模型内插方法的分析和选择[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2011, 36(1): 82-85.
- [8] Hu L J, Wang L, Tao K W. The analysis and choice of DEM interpolation algorithm based on different landform [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2012, 35(12): 202-206.
胡璐锦, 王亮, 陶坤旺. 基于不同地貌类型的DEM内插算法分析与选择[J]. *测绘与空间地理信息*, 2012, 35(12): 202-206.
- [9] Lan Y F, Xu X, Hu Y M. Quality assessment on different DEM interpolation algorithms based on contours [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(4): 25-28.
兰玉芳, 徐霞, 胡英敏. 等高线内插DEM算法的质量评价[J]. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(4): 25-28.
- [10] Kraus K, Pfeifer N. A new method for surface reconstruction from laser scanner data [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1997, 32(2): 80-86.
- [11] Sithole G. Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 34(3/4): 203-210.
- [12] Chen Q. Airborne LIDAR data processing and information extraction [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007, 73(2): 109-112.
- [13] Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33: 110-117.
- [14] Sun X L, Shu Q T, Ou G L, *et al.* Remote sensing estimation of the biomass of artificial simao pine forest based on random forest regression[J]. *Forest Resources Management*, 2015(1): 71-76.
孙雪莲, 舒清态, 欧光龙, 等. 基于随机森林回归模型的思茅松人工林生物量遥感估测[J]. *林业资源管理*, 2015(1): 71-76.