

基于建筑物激光点云边缘线自动提取提高 DSM 精度

苗松¹, 王建军¹, 李云龙¹, 范媛媛²

¹ 山东理工大学机械工程学院, 山东 淄博 255049;

² 新泽西理工大学交通工程系, 新泽西州 纽瓦克 07102

摘要 在机载激光雷达扫描过程中, 建筑物背面的地面边缘线常常被遮挡, 无法获取精确的建筑物背面边缘点信息, 在利用获得的激光点云进行三维重建时, 使得创建数字表面模型(DSM)的精度较低。为消除背面边缘点缺失造成的 DSM 精度降低, 提出了一种建筑物地面缺失边缘线的自动提取算法; 通过提取建筑物侧面和地面局部点云的拟合趋势面, 计算两相邻局部趋势面的交线, 并补充缺失部分的边缘点数据; 最后采用补充了边缘点的建筑物激光点云重建了建筑物的 DSM, 并对边缘点补充前后的 DSM 精度进行了对比仿真实验。仿真结果表明, 通过提取和补充建筑物的边缘点可有效提高建筑物重建 DSM 的高程精度。

关键词 遥感; 机载激光雷达; 数字表面模型; 表面边缘点; 局部趋势面

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.012803

Digital Surface Model Accuracy Improvement Based on Edge Line Automatic Extraction of Building Laser Point Cloud

Miao Song¹, Wang Jianjun¹, Li Yunlong¹, Fan Yuanyuan²

¹ School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China;

² Department of Transportation Engineering, New Jersey Institute of Technology, Newark, New Jersey 07102, USA

Abstract During the scanning process of airborne laser radar (LiDAR), ground edge line in the back of the building is always shaded, edge point data of building surface are usually hard to be obtained accurately, so a digital surface model (DSM) with low precision is obtained by three dimensional reconstruction with these low accurate LiDAR point cloud data. In order to improve the DSM accuracy, we propose an edge line automatic extraction algorithm. This approach initially extracts local point cloud of building surface edge to fit local trend surface. Then two neighborhood trend surfaces are used to compute the intersection's equation and add edge point cloud data. Finally, using the laser point cloud of the building with the additional extracted edge points, we rebuilt the DSM of the building, and the accuracy of the reconstructed DSM with adding the edge points is compared with that of the DSM without adding the edge points. Simulated results show that the accuracy of the DSM reconstructed by this method can be improved significantly.

Key words remote sensing; airborne laser radar; digital surface model; surface edge point; local trend surface

OCIS codes 280.3640; 110.3000; 110.6880

1 引言

当今社会科技发展日新月异, 机载激光雷达

(LiDAR)是测绘领域的热门技术和研究方向。相对于传统雷达而言, LiDAR 具有高精度、高分辨率、远距离和大范围等优点, 可快速、实时获取被测区域

收稿日期: 2017-06-11; 收到修改稿日期: 2017-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(51575326)、国家留学基金(201508370010)、山东省自然科学基金教育厅联合专项(ZR2014JL027)、山东省青年教师成长计划项目(2015)、山东理工大学博士科研基金(4041-413028)

作者简介: 苗松(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达三维成像、误差分析与补偿方面的研究。

E-mail: miaosong7828@163.com

导师简介: 王建军(1973—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事机载激光雷达三维成像、误差分析与补偿方面的研究。E-mail: wangjianjun@sdut.edu.cn(通信联系人)

的三维空间信息,构建被测区域的数字高程模型(DEM)和数字表面模型(DSM),从而在大地测量、森林勘探、城市建模和灾害评估等方面获得了日益广泛的应用^[1-2]。

在LiDAR扫描获取的点云数据中,往往不包含各个表面边缘线上的点云。这主要是由于地面建筑物和地形起伏等因素对激光脉冲束的遮挡,使雷达无法获得地面被测建筑物相对于飞机所在位置背侧方向上被遮挡表面的点云数据,从而导致的激光点云数据缺失被称为激光点云的自遮挡缺失^[3]。缺失的点云数据会导致三维重建得到的DSM产生较大误差,极大地影响DSM的精度。因此,如何补充建筑物的地面边缘点信息,有效提高DSM精度,具有重要的研究意义。

目前国内外研究者已针对利用DSM提取的物体边缘线(轮廓线)进行了广泛研究。程效军等^[4]分析了LiDAR点云数据与航空影像数据的特点,通过融合航空影像和LiDAR点云数据提取出建筑物轮廓线,并将其用于建筑物的点云分类。Vosselman等^[5]利用Hough变换处理LiDAR数据,结合地面信息提取建筑物点云。马红^[6]利用高精度DSM数据,通过随机抽样一致性算法提取了建筑物轮廓信息。赵宗泽等^[7]利用植被指数限制的分水岭分割算法分割获得了DSM提取建筑物模型。卢维欣等^[8]利用点云局部几何特征聚类形成点云簇,并对其进行整体特征分析,以此来识别目标建筑物。以上研究者利用激光雷达点云及DSM数据提取出被测地形中的建筑物轮廓线来进行目标探测与分类探测,但忽略了DSM精度对提取结果的影响。在提高DSM精度方面,目前的研究主要侧重于大面积的点云空洞修复,而对于建筑物被遮挡区域表面上缺失边缘点的补充研究则鲜有详细报道。汪承义等^[9]采用不同插值算法分别补充水面及非水面区域的点云数据,提高了重建DSM的精度。李迁等^[10]利用Canny算子提取建筑物轮廓矢量线及离散地面点数据来构建高精度DSM。Zhou等^[11]应用2.5-D双轮廓线方法填补了因树木遮挡而形成的建筑物顶面缺失点云数据。本文提出了一种建筑物地面缺失边缘线的自动提取算法,首先提取出各表面的边缘点,然后对每个表面边缘点的局部区域利用最小二乘法拟合趋势面,通过求解两相邻拟合趋势面方程获得其交线,将该交线作为两相邻表面的局部边缘线,根据边缘点信息确定边界点,在所获得的边缘线上等距采样得到新的点云数据,用以补

充各表面的边缘线。最后利用补充了遮挡面边缘点的激光点云进行DSM重建,有效提高了重建DSM的精度,获得了满意的结果。

2 基本原理

2.1 缺失点云对建筑物三维重建的影响

LiDAR向被测地面发射的激光脉冲束的反射回波信号被接收器接收,经计算后可获得激光脚点处的三维信息^[12-13]。由于激光扫描有一定的倾斜角,地面上的被扫描建筑物对激光脉冲束存在遮挡问题,相对于飞机飞行位置背侧方向上的表面及邻近的地面区域被遮挡,在该区域内存在激光脚点缺失。由于激光点云自遮挡缺失的影响,利用激光点云数据插值重建的DSM与实际的模型存在明显偏差。同时,对于存在激光脚点的表面,由于激光脚点密度的影响,往往也无法获得该表面比较精确的边缘信息。激光点云的自遮挡缺失及表面精确边缘点缺失情况如图1(a)所示。

DSM的常规表示方法有规则矩形网(RSG)模型和不规则三角网(TIN)模型。RSG按照一定的步长取值,将相应区域划分为一系列等间距的方形网格。利用RSG模型表示被测地形具有结构简单、计算量小的优点,但该模型在点云密集区域的精度较低,无法准确表达被测地形的细节。TIN利用相邻的三个点构成三角形,将相应区域划分为一系列不规则分布的三角网格,其数字高程由连续的三角面构成,可充分利用点云信息,较为精确地反映被测地形的细节特征^[14-15]。采用Delaunay方法构建的TIN具有结构优良、冗余数据小、存储效率高等特性,常用于构建TIN模型,因此在本研究中采用Delaunay方法构建TIN模型^[16]。使用有遮挡缺失的激光点云,基于Delaunay三角网构建的TIN模型及DSM分别如图1(b)、(c)所示。

2.2 表面边缘点的提取方法

对采集到的激光点云,按其获取顺序对每个激光脚点进行标号并聚类至各个表面中,分别对各个表面中的激光点云构建点云二维矩阵。以图1中立方体建筑物顶面的边缘点提取为例,对二维点云矩阵的构建进行详细说明。由于激光雷达扫描方向为y轴正向,并且按行进行扫描,将顶面点云中第一个激光脚点标为顶面点云二维矩阵的第一行第一列元素,其他激光脚点根据y坐标的大小进行排序,即:令二号激光脚点的y坐标与一号激光脚点的y坐标进行比较,若二号脚点的y坐标值较大,则将二

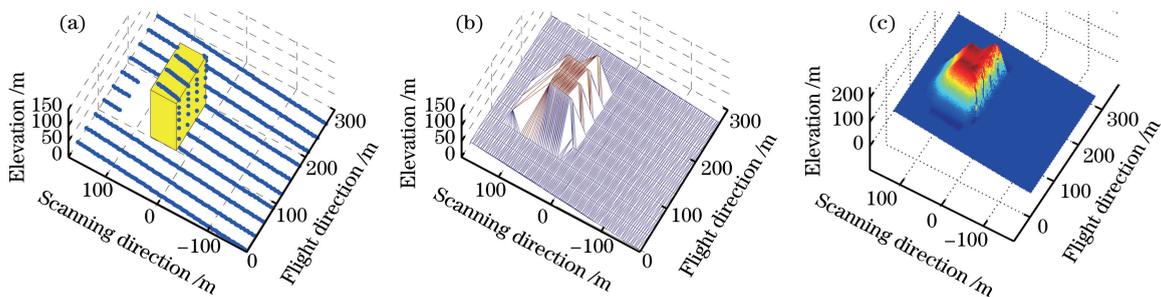


图1 有遮挡缺失的机载激光扫描点云及其重建 DSM。(a)原始点云;(b)重建 TIN 模型;(c)重建 DSM

Fig. 1 Airborne laser scanning point cloud with missing due to blocking and its reconstructed DSM.

(a) Original laser point cloud; (b) reconstructed TIN model; (c) reconstructed DSM

号脚点标号作为该行下一列中的元素;若二号脚点的 y 坐标值较小,则将二号脚点标号作为下一行第一列中的元素。依次循环,直至遍历顶面中全部的激光脚点,从而可构建顶面经过标号的点云二维矩阵。

对于已构建的顶面点云二维矩阵,由第一行第一列开始,按逆时针方向依次提取矩阵中的周边元素,其标号所指的激光脚点即可作为顶面边缘点。对每个边缘点,其相邻向量的夹角可反映连续三点的夹角关系。对于同一边缘线附近的边缘点,其相邻向量的夹角近似于 180° ,若某边缘点的相邻向量夹角出现明显变化,则该点即可认为是该表面的一

个顶点。

获得该表面全部的边缘点后,按其提取顺序求得两相邻边缘点所构成的向量,继而可依次求得各边缘点相邻向量的夹角;若夹角近似为 180° ,则认为该点为表面某一边缘线上的点;若该夹角明显小于 180° ,则认为该点为表面相邻边缘线处的顶点。依次循环,直至遍历全部边缘点后,可获得该表面的全部顶点,同时可确定其边缘线的数量。建筑物顶面呈矩形的激光点云边缘点及顶点的提取结果如图 2(a)所示;建筑物顶面呈圆形的激光点云边缘点及顶点的提取结果如图 2(b)所示,圆形顶面无顶点。

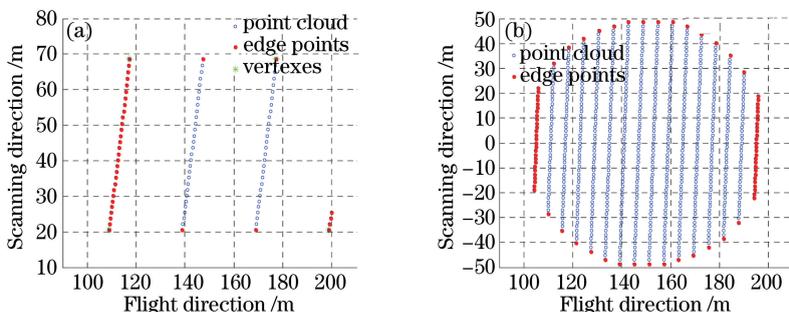


图2 建筑物顶面边缘点及顶点的提取结果。(a)矩形顶面;(b)圆形顶面

Fig. 2 Extraction of edge points and vertexes for top surface of building.

(a) Rectangular top surface; (b) round top surface

2.3 边缘局部趋势面拟合

对每个提取出的边缘点,按其趋势方向顺次提取该边缘点及其相邻的 5 个点构成边缘局部点云进行最小二乘法趋势面拟合。同时,提取该边缘点位于相邻表面中最临近的点,以相同的方法提取相邻表面中的边缘局部点云。

边缘局部点云的提取方法为:设边缘点位于表面点云矩阵中的第 n 行,若该点的列坐标为 1,则提取该行中列坐标为 2 和 3 的点作为局部点;若该点的列坐标为该行中列坐标的最大值 m ,则提取该行中列坐标为 $m-1$ 和 $m-2$ 的点作为局部点。同

时,提取表面点云矩阵中第 $n+1$ 行中相应的点。以上 6 个被提取出的局部点即可作为边缘局部点云进行局部趋势面拟合。相邻表面中的边缘局部点云提取方法与此相同。

设所提取出的点的具体数据为 (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$,则二次趋势面模型为

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2, \quad (1)$$

式中 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 为趋势面方程系数。令 $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = x^2, x_4 = xy, x_5 = y^2$,则:

$$\begin{aligned} \hat{z} = & a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \\ & a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5, \end{aligned} \quad (2)$$

其误差平方和 Q 为

$$Q = \sum_{i=1}^6 (z_i - \hat{z}_i)^2. \quad (3)$$

为使 Q 为最小值,需使 Q 对 a_0, a_1, \dots, a_5 的偏导数均为零,可得正规方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^6 z_i = 6a_0 + a_1 \sum_{i=1}^6 x_{1i} + \dots + a_5 \sum_{i=1}^6 x_{5i} \\ \sum_{i=1}^6 x_{1i} z_i = a_0 \sum_{i=1}^6 x_{1i} + \\ \quad a_1 \sum_{i=1}^6 x_{1i} x_{1i} + \dots + a_5 \sum_{i=1}^6 x_{5i} x_{1i} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^6 x_{5i} z_i = a_0 \sum_{i=1}^6 x_{5i} + \\ \quad a_1 \sum_{i=1}^6 x_{1i} x_{5i} + \dots + a_5 \sum_{i=1}^6 x_{5i} x_{5i} \end{cases}. \quad (4)$$

将(4)式化为矩阵形式:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{A} = \mathbf{X}^T \mathbf{Z}, \quad (5)$$

可解得:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Z}, \quad (6)$$

由此可得趋势面方程: $z = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2$.

2.4 被遮挡表面缺失边缘点云补充

通过两相邻局部趋势面方程可计算得到其交线,将该交线作为两相邻表面的公共边缘线,边缘线端点取值需能够包含其全部相邻表面中的全部激光脚点,以此端点作为表面的顶点。设已求得两表面局部趋势面为 $z = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2$, $z = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2$, 令

$m_i = b_i - a_i$, 可解得:

$$y = (-m_5)^{-1/2} \left\{ \pm \left[m_0 + m_1 x + m_3 x^2 + \frac{(-m_4 y - m_2)^2}{-4m_5} \right]^{1/2} - \frac{-m_4 x - m_2}{2\sqrt{-m_5}} \right\}. \quad (7)$$

对提取出的两局部边缘点的 x 坐标值进行等距取值,可解得对应的 y 坐标值。将 x 和 y 代入局部趋势面方程中,即可计算出补充点的三维坐标,从而补充缺失的边缘点。当两相邻表面趋势面法向量夹角较小或两平面边缘局部点位于补充点同侧时,认为两平面在该处无交线。此时,将表面上的边缘点投影至地面处,作为其边缘线补充点。

3 实验结果与精度评价

3.1 实验结果

为验证本算法的有效性和可靠性,采用 MATLAB 编程模拟 LiDAR 扫描过程,获得的激光点云用于重建模拟地形的 DSM。本实验所设置的模拟地形地面是高程值为零的平面,存在三个不同形状的建筑物:1) 尺寸为 $100 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的立方体建筑,位于直升机飞行轨迹左侧 70 m ;2) 尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的立方体建筑物,位于直升机飞行轨迹正下方;3) 长宽分别为 $100, 30 \text{ m}$, 高分别为 $50, 100 \text{ m}$ 的顶面为斜面的立方体建筑物,位于直升机飞行轨迹右侧 70 m 。直升机沿 x 轴正向飞行,飞行高度为 300 m ,飞行速度为 5 m/s ,扫描方向为 y 轴,扫描镜角速度为 0.523 rad/s ,激光测距仪采样频率为 100 Hz ,获得的激光点云如图 3 所示。

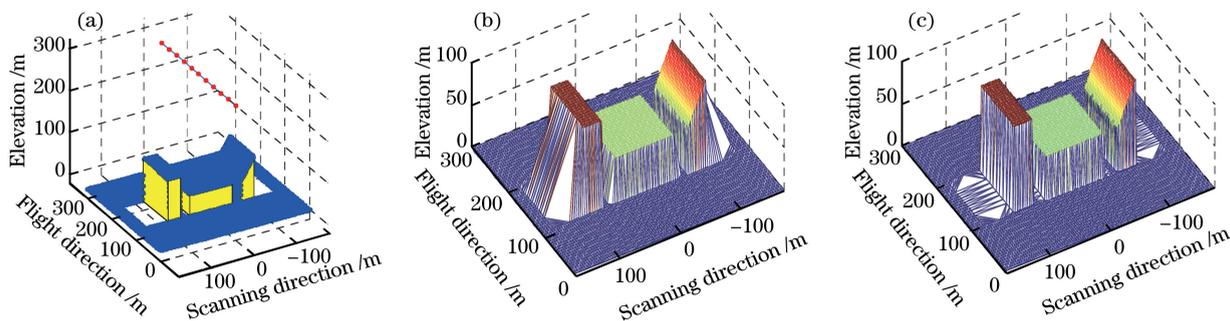


图 3 模拟地形激光扫描点云及补充前后点云重建 DSM。(a)模拟地形原始点云;

(b)原始点云重建 TIN 模型;(c)原始点云重建 DSM

Fig. 3 Laser scanning point cloud of simulative terrain and reconstructed DSM with point cloud before and after supplementation. (a) Original laser point cloud of simulative terrain; (b) reconstructed TIN model with original point cloud; (c) reconstructed DSM with original point cloud

3.2 DSM 精度评估

对于由激光点云重建的被测地形 DSM 的精度评估,目前并没有通用的计算方法。在此,可以根据全部激光点云的范围按预设尺寸建立规则网格,将 xOy 平面网格化,每个网格采样点的高程值可根据构建的 TIN 模型插值获得。因此,分别使用原始激光点云与补充缺失边缘点后的激光点云对网格采样点进行插值,获得补偿前后各网格采样点的高程值,将二者与模拟地形中各网格采样点的真实高程值进行比较,以检验重建 DSM 的精度。

设共有 N 个网格采样点,则模拟地形中各网格采样点的真实高程值为 z_i , DSM 中各网格采样点的高程值为 \hat{z}_i 。设 \bar{z} 为网格采样点真实高程值的平均值,则 DSM 网格采样点的误差均值 e_m 、标准偏

差 d_s 、均方根误差 e_{rms} 分别为

$$e_m = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{z}_i - z_i)}{N}, \quad (8)$$

$$d_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{z}_i - \bar{z})^2}{N}}, \quad (9)$$

$$e_{rms} = \sqrt{e_m^2 + d_s^2}. \quad (10)$$

目前,常用的插值算法有基于三角形的三次插补法 cubic、基于三角形的线性插补法 linear 和最近邻插补法 nearest^[14]。本研究中,网格采样点插值尺寸设置为 1 m,分别采用三种插值算法获得的网格采样点如图 4 所示,DSM 各项精度指标如表 1、2 所示。

表 1 不同插值算法下 DSM 各项精度指标

Table 1 Precision of DSM at different interpolation methods

Point cloud	Flight height/m	Cubic			Linear			Nearest		
		e_m/m	d_s/m	e_{rms}/m	e_m/m	d_s/m	e_{rms}/m	e_m/m	d_s/m	e_{rms}/m
Original point cloud	300	4.5745	16.6057	17.2243	4.6206	16.5837	17.2154	4.2588	20.5453	20.9820
	375	2.8362	13.2277	13.5284	2.8780	13.2162	13.5260	2.6700	16.4284	16.6439
	450	1.7436	10.6227	10.7649	1.7754	10.6052	10.7528	1.6477	13.2047	13.3071
Supplementary point cloud	300	-0.7149	6.8991	6.9360	-0.1272	6.1806	6.1819	0.4211	8.9990	9.0089
	375	-0.5450	5.8088	5.8343	-0.1846	5.1922	5.1954	0.1708	7.6287	7.6306
	450	-0.6522	5.9879	6.0233	-0.3766	5.4603	5.4733	-0.3478	6.8959	6.9046

表 2 不同差值算法下 e_m 、 d_s 和 e_{rms} 的误差降低比例

Table 2 Proportional reduction of error of e_m , d_s and e_{rms} at different interpolation methods

Flight height/m	PRE of cubic /%			PRE of linear /%			PRE of nearest /%		
	e_m	d_s	e_{rms}	e_m	d_s	e_{rms}	e_m	d_s	e_{rms}
300	84.37	58.45	59.73	97.25	62.73	64.09	90.11	56.20	57.71
375	80.78	56.09	56.87	93.59	60.71	61.59	93.60	53.56	54.15
450	62.59	43.63	44.05	78.79	48.51	49.10	78.89	47.78	48.11

4 分析与讨论

由图 4(a)~(c)可见,利用原始激光点云通过 cubic 和 linear 插值方法获得的网格采样点高程值在遮挡缺失处形成一个倾斜面,nearest 方法则形成一个与顶面高程值相同的梯形平面,与实际模型存在较大偏差,其 DSM 分别如图 4(d)~(f)所示。而利用补充了边缘点的激光点云通过三种插值方法获得的网格采样点高程值则补充了遮挡缺失处的地面高程值,与实际模型偏差较小,其 DSM 分别如图 4(g)~(i)所示。

由表 2 可知,在同一飞行高度下,三种插值方法获得的网格采样点的误差均值 e_m 、标准偏差 d_s 及均方根误差 e_{rms} 均明显降低,其中 e_m 的降幅最

为明显,其误差降低比例(PRE)约为 80%~90%, d_s 及 e_{rms} 的 PRE 约为 50%~60%,网格采样点平均误差减小,但误差波动较大。不同飞行高度下,各插值方法获得的网格采样点的 e_m 、 d_s 及 e_{rms} 的 PRE 随飞行高度增加而降低,这是由于飞行高度增加导致被遮挡区域减小,遮挡缺失的激光点云数量减少,故利用原始激光点云重建 DSM 的精度相对提高,利用补充后的激光点云重建 DSM 的精度提升相对较小。

目前采用的空洞修补算法仅适用于较为平坦的地形,而其他的算法则是针对水面、树木遮挡等激光点云缺失的情况,对于建筑物自遮挡缺失的修复效果较差。在三维地形建模方面,大多采用面片方法直接构建建筑物模型,并未考虑其 DSM 精度的提

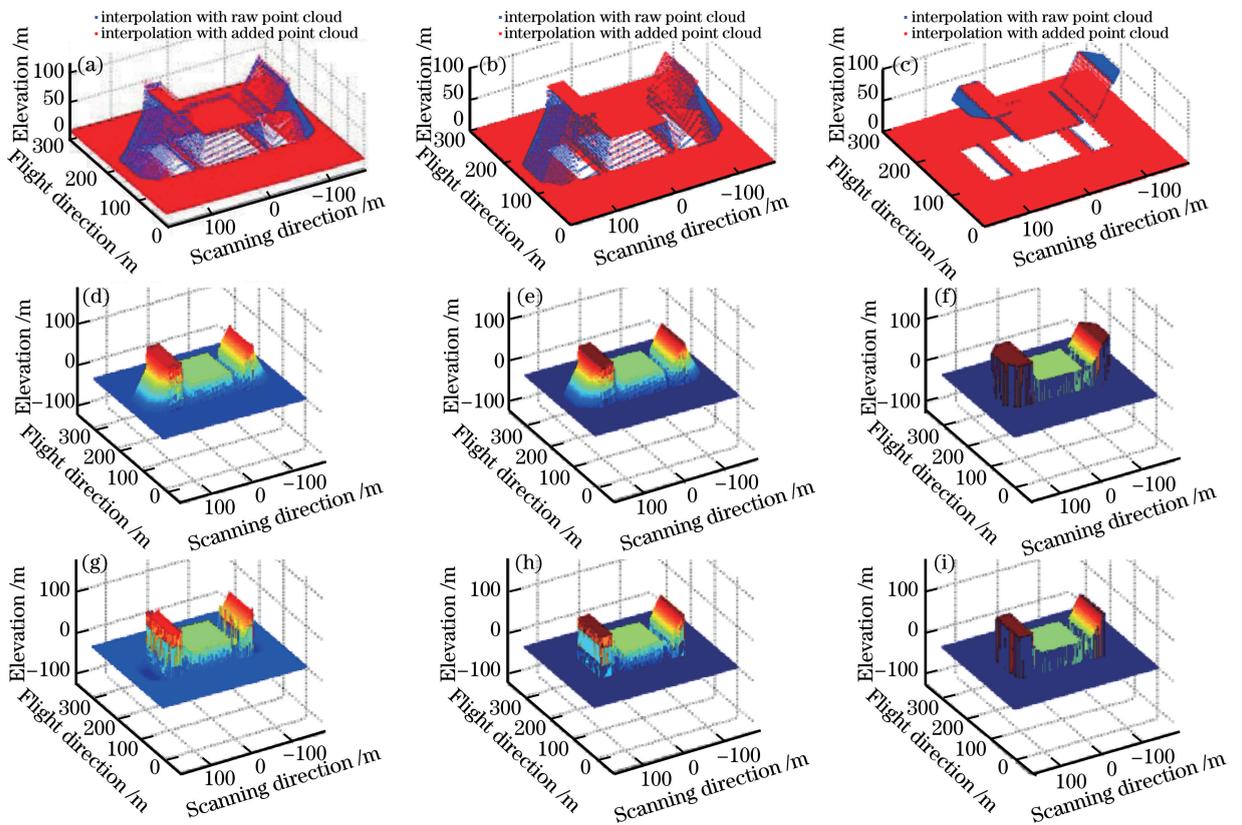


图4 补充边缘点前后不同插值方法得到的网格采样点高程值及其DSM。(a) cubic插值高程;(b) linear插值高程;(c) nearest插值高程;(d)原始点云cubic插值DSM;(e)原始点云linear插值DSM;(f)原始点云nearest插值DSM;(g)补充边缘点后的cubic插值DSM;(h)补充边缘点后的linear插值DSM;(i)补充边缘点后的nearest插值DSM

Fig. 4 Elevations of points using different interpolation methods and reconstructed DSMs with point clouds before and after supplementation. (a) Interpolation elevations using cubic method; (b) interpolation elevations using linear method; (c) interpolation elevations using nearest method; (d) reconstructed DSM from original point cloud using cubic method; (e) reconstructed DSM from original point cloud using linear method; (f) reconstructed DSM from original point cloud using nearest method; (g) reconstructed DSM from supplementary point clouds using cubic method; (h) reconstructed DSM from supplementary point clouds using linear method; (i) reconstructed DSM from supplementary point clouds using nearest method

高。对于仅使用原始激光点云弥补建筑物自遮挡缺失来提高DSM精度方面的研究较少,因此本研究采用拟合局部趋势面方法获得建筑物两相邻表面交线上的点云数据,并将其补充至原始点云中,对补充后的激光点云进行插值,从而提高了被测地形的DSM精度。

5 结论

通过对LiDAR获取的原始激光点云提取各表面边缘点,计算相邻表面边缘局部拟合趋势面交线获得更为精确的表面边缘线,取边缘线上的边缘点补充有遮挡缺失的激光点云,利用补充了边缘点的激光点云重建DSM。仿真实验结果表明,该方法有效地提高了重建DSM的精度。由于本算法仅补充了被遮挡表面的边缘点,插值所得数据在地面遮挡

缺失处会形成一个较小的凹陷,导致误差均值较小,但误差波动较大。后续工作将研究如何对被遮挡区域内部激光点云进行补充。

参考文献

- [1] Li Q Q, Li B J, Chen J. Research on laser range scanning and its application[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000, 25(5): 387-392.
李清泉, 李必军, 陈静. 激光雷达测量技术及其应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(5): 387-392.
- [2] Liu B, Zhang J, Lu M, *et al.* Research progress of laser applications[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2): 117-122.
刘斌, 张军, 鲁敏, 等. 激光雷达应用技术研究进展

- [J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 117-122.
- [3] Lu M F, Wu H B, Liu C, *et al.* Classification and cause analysis of terrestrial 3D laser scanning missing data[J]. Remote Sensing Information, 2013, 28(6): 82-86.
陆旻丰, 吴杭彬, 刘春, 等. 地面三维激光扫描数据缺失分类及成因分析[J]. 遥感信息, 2013, 28(6): 82-86.
- [4] Cheng X J, Cheng X L, Hu M J, *et al.* Buildings detection and contour extraction by fusion of aerial images and LIDAR point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0514002.
程效军, 程小龙, 胡敏捷, 等. 融合航空影像和 LIDAR 点云的建筑物探测及轮廓提取[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0514002.
- [5] Vosselman G, Djimkan S. 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, 34(3): 37-44.
- [6] Ma H. Research on algorithm for building outline extraction based on high-precision DSM data [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(4): 111-113.
马红. 利用高精度 DSM 数据提取建筑物轮廓算法研究[J]. 测绘通报, 2015(4): 111-113.
- [7] Zhao Z Z, Zhang Y J. Building extraction from airborne laser point cloud using NDVI constrained watershed algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1028002.
赵宗泽, 张永军. 基于植被指数限制分水岭算法的机载激光点云建筑物提取[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1028002.
- [8] Lu W X, Wan Y C, He P P, *et al.* Extracting and plane segmenting buildings from large scene point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0914004.
卢维欣, 万幼川, 何培培, 等. 大场景内建筑物点云提取及平面分割算法[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0914004.
- [9] Wang C Y, Zhao Z M. Digital surface model generation from LIDAR data in urban areas [J]. Computer Engineering, 2008, 34(1): 59-63.
汪承义, 赵忠明. 基于 LIDAR 数据的城市数字表面模型生成技术[J]. 计算机工程, 2008, 34(1): 59-63.
- [10] Li Q, Xiao C L, Chen J, *et al.* Method for constructing DSM based on building contour line and airborne LiDAR data [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(2): 95-100.
李迁, 肖春蕾, 陈洁, 等. 基于机载 LiDAR 点云和建筑物轮廓线构建 DSM 的方法[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(2): 95-100.
- [11] Zhou Q Y, Neumann U. Complete residential urban area reconstruction from dense aerial LiDAR point clouds[J]. Graphical Models, 2013, 75(3): 118-125.
- [12] Yang M M, Wan Y C, Xu J Z. Research of error analysis and positioning accuracy with four-prism of laser scanning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0914001.
杨蒙蒙, 万幼川, 徐景中. 激光扫描仪四棱塔镜误差分析及定位精度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0914001.
- [13] Wang J J, Liu J D. Analysis and sorting of impacts of measurement errors on positioning accuracy of laser point cloud obtained from airborne laser scanning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0414001.
王建军, 刘吉东. 影响机载激光扫描点云精度的测量误差因素分析及其影响大小排序[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0414001.
- [14] Miao Q G, Shi J J, Liu T G, *et al.* New efficient DSM generating algorithm based on TIN [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(9): 1868-1873.
苗启广, 史俊杰, 刘天歌, 等. 一种快速生成 DSM 的不规则三角网构网新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(9): 1868-1873.
- [15] Shi J J. Design and implementation of a rapid method for DSM generation based on triangulation irregular network[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
史俊杰. 基于不规则三角网的 DSM 快速生成方法设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [16] Xu W, Sun Z P, Xu P, *et al.* Interpolation method based on the point cloud data LIDAR [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(3): 365-370.
徐巍, 孙志鹏, 徐朋, 等. 基于 LIDAR 点云数据插值方法研究[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(3): 365-370.