

基于机载 LiDAR 点云估测林分的平均树高

焦义涛, 邢艳秋*, 霍 达, 尤号田, 赵晨阳

(东北林业大学 森林作业与环境研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:以内蒙古上库力农场为研究区, 基于高程归一化后的植被点云数据计算了植被点云高度阈值平均值, 建立林分平均树高线性回归模型, 并进行精度评定。结果表明, 模型估测平均树高精度最高为 99.81%, 最低为 87.09%, 总体平均精度为 94.56%。利用植被点云高度阈值平均值估测林分平均树高具有较高的可靠性。

关键词:激光雷达; 植被点云高度; 阈值平均值; 平均树高

中图分类号:S758.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)03-0170-05

Study on Mean Canopy Height Estimation from Airborne LiDAR Point Cloud Data

JIAO Yi-tao, XING Yan-qiu*, HUO Da, YOU Hao-tian, ZHAO Chen-yang

(Center for Foerest Operations and Environment, Northeast Forest University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: The mean canopy height is a critical parameter for evaluating forest structure. In this paper, taking the Shangkuli Farm in Inner Mongolia as the study area, the mean canopy height was estimated. The threshold mean of vegetation point height was acquired, which was generated from the vegetation point data set of elevation normalized, and then the linear regression model was established for estimating the mean canopy height in this area. Afterwards, the accuracy of model was evaluated, with 99.81% of the highest accuracy, 87.09% of the lowest accuracy and 94.56% of the average accuracy. The results indicated that the threshold mean of vegetation point height was able to estimate mean canopy height with the higher reliability.

Key words: LiDAR; vegetation point height; threshold mean; mean canopy height

激光雷达 (light detection and ranging, LiDAR) 作为一种新的遥感技术, 已由最初的概念验证变成了可靠的三维遥感技术。相比于传统的 2D 光学遥感, 激光雷达系统发射的脉冲可以穿透森林冠层^[1], 进而获取森林垂直结构的三维坐标^[2-3], 为研究森林结构分布特征提供了一种新方法^[4]。机载三维扫描仪能够连续向地面发射脉冲, 获得森林冠层或地面的距离, 通过对距离进行解算获取林区点云数据^[5]。

近年来, 使用机载激光雷达技术测量森林结构特性获得了快速发展, 其收到的回波次数最多可达到 6 次^[6]。点云数据可以用来描述林区地形的起伏, 森林植被的特征^[7], 如郁闭度、生物量、蓄积量等, 还可以用来提取冠层表面和植被参数^[8], 如树高^[9]、胸径、冠幅等^[10-12]。T. Brabandtberg^[13] 和 J. Hyypa^[14] 基于北欧森林高密度点云数据提取了单木的轮廓曲线, 而 S. C. Popescu^[4] 等利用局部滤波方法处理 LiDAR 点云数据提取了样方平均树高, 取得了较好的效果。基于北方森林的 LiDAR 点云数据成功地估测了单木的生长变化^[15]。林分的平均树高是森林计划中最重要的特征之一, 其是反映林地材积和立地质量的一个重要参数^[16]。由小光斑激光雷达点云数据估算的树高与野外实际测量的相比一般偏低^[17], 主要因为激光雷达在扫描过程中

收稿日期: 2014-08-27 修回日期: 2014-10-31
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (DL12EB07); 国家自然科学基金 (41171274)。
作者简介: 焦义涛, 男, 在读硕士, 研究方向: 机载小光斑激光雷达对森林结构参数定量估测。E-mail: jiaoyitao23@163.com
* 通信作者: 邢艳秋, 女, 教授, 博士生导师, 研究方向: 森工管理与林业信息工程。E-mail: yanqiuqing@nefu.edu.cn

收到从树的顶点返回脉冲要远少于从树冠返回的脉冲^[18]。目前从点云数据中提取林分树高,一般采用间接的方法,即将点云数据转成栅格图像,采用传统的摄影测量算法对图像做局部最大值搜索,进而获得树高。虽然采用间接的方法可以从点云数据中提取林分树高,但在点云数据转换成栅格图像时会造成一部分点高程的损失,进而影响提取树高的精度,以致影响对森林结构参数的估测。因此,如何从点云数据中直接提取林分树高的研究,以提高树高估测精度至关重要。

以激光雷达点云数据为数据源,对点云数据进行处理、建立数字高程模型(digital elevation model, DEM)及植被点云数据高程归一化,然后提取点云高度的阈值平均值,建立回归模型并进行精度评价。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古呼伦贝尔市西北部、额尔古纳市东南部的上库力农场(120°36′50.48″—120°52′56.53″E、50°21′11.08″—50°24′32″N),地处草原和森林过渡地带,属寒温带大陆季风气候,海拔为 600~700 m。研究区内地形起伏落差小,但较多为丘陵,地形地貌比较复杂。山脉丘陵阴坡广泛分布着以白桦(*Betula platyphylla*)为主的天然次生林,混生树种包括落叶松(*Larix gmelinii*)和樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)等,树下灌木层主要由石棒绣线菊(*Spiraea media*)、筐柳(*Salix linearistipularis*)等中层灌木类组成。

1.2 野外数据获取

于 2012 年 8 月野外数据采集,布设 33 块半径为 10 m 的圆形样地。使用 Trimble GeoXT6000 GPS 分别对样地中心点和周边开阔地带比较明显的不受遮挡地物点进行差分定位,记录每个样方中心点坐标和至少 10 个以上明显的不受遮挡地物点的坐标。在点云数据中找到至少 4 个同野外数据采集的不受遮挡地物点的同名点,然后,使用四参数^[19]坐标转换方法,解算出 4 个参数,将野外采集的坐标数据同点云数据进行匹配,匹配精度<1 cm,若>1 cm 重新在点云数据中找其它的同名点。用胸径尺测量样方内每株立木 1.3 m 处的胸径,用超声波测高仪(Vertex IV)分别对样方内每株立木的树高、枝下高进行测量,并用皮尺分别测量每株立木东西南北方向的冠幅。采用林木断面积加权法对样方平均树高进行计算。

$$H=\frac{\sum_{i=1}^k h_i g_i}{\sum_{i=1}^k g_i} \tag{1}$$

式中, H 为平均树高, h_i 为第 i 株立木的树高, g_i 为第 i 株立木的胸高断面面积, k 为样方内立木株数。

随机选取 23 个样地的实测林分平均高参与树高模型回归,其余 10 个样地的实测数据用于模型精度评价。

1.3 LiDAR 数据采集

2012 年 8 月 26 日,由搭载在飞机上的 Leica ALS60 机载激光扫描系统获取云数据。数据采集期间天气状况良好,晴朗少云。飞机飞行高度 1 300 m,平均飞行速度 160 km·h⁻¹,激光脉冲波长为 1 064 nm,最大扫描频率 200 kHz,采用线性扫描方式,点平均密度为 2~4 个脉冲·m⁻²,光斑大小为 0.22 m,沿东西方向共采集了 22 个条带,数据存储采用 las1.2 格式。

1.4 LiDAR 数据预处理

1.4.1 点云去噪 在 LiDAR 数据采集过程中,由于各种测量误差和随机误差,例如测量仪器的震荡、被测物表面粗糙不平、镜面反射、遮挡物遮挡等各种因素的原因,造成所测点云数据中出现噪声点。通常表现为明显的高于或低于地表的孤立点。这部分噪声点可以计算机程序处理剔除,也有部分点比较靠近地表或地物即体外孤点,程序难以实现对其自动识别,因此,采用人工手动剔除。本研究采用点云处理软件 Terrasolid 对点云进行去噪。选择一点作为球心,以 20 m 为半径进行搜索判断是否有点云存在,若在球心 20 m 范围内无其他点则当前点即判为噪声点,反则为非噪声点,最后在 Terrasolid 软件中手动去噪,剔除不易被程序识别的噪声点。图 1 和图 2 分别为原始点云和去噪后的点云。

1.4.2 点云分类 基于 Terrscan V8(Terrasolid, Helsinki, Finland) 软件平台,采用不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)算法对去噪后的点云数据进行滤波分类。TIN 是建立数字高程模型和数字表面模型一种重要的方法,能够较好的描述离散点间的邻近关系。以 TIN 为基础对点云数据进行滤波分类,根据点云间高程差值临界条件和满足此条件的邻近点进行分类,即首先选择一部分最低点作为种子点建立最初的不规则三角网模型,然后连续加入满足临界条件的点作为种子点,建立新的不规则三角网模型,进行迭代运算,直到没有新的种子点加入为止,最终完全分类出地面点和非地面点^[20]。

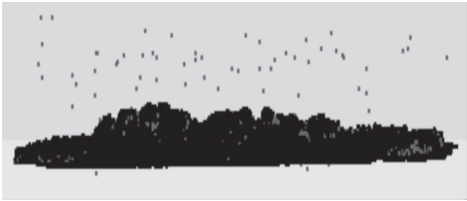


图 1 原始点云
Fig. 1 Original point cloud



图 2 去噪后的点云
Fig. 2 Point cloud after denoising

1.5 林分平均树高估测

1.5.1 数字高程模型建立 使用一次样条有限元建立 1 m 分辨率的 DEM 即格网单元大小为 1 m×1 m。在建立 DEM 的过程中,首先选择一部分点作为拟合点,一部分点作为检查点。在选点的过程中,选择每个格网单元内距格网单元中心最近的点为拟合点,距离格网单元中心最远的点为检查点。利用拟合点内插建立 DEM,然后利用检查点检验建立的 DEM 的精度。

1.5.2 高程归一化 将地面点云使用一次样条有限元建立数字高程模型,然后将植被点云的高程减去数字高程模型上的高程,即得到高程归一化后的植被点云数据。

1.5.3 树高估测模型的建立 为了获得估计样方林分平均树高的有效参数,建立较高精度的树高估测模型,对高程归一化的植被点云进行计算。样方内植被点云的三维坐标反映了样方内林分在立体空间上的分部情况,通过计算(式(2)、(3)和(4))样方内植被点云高度的平均值(Z_mean)、方差($Variance$)和频率曲线峰态(kurtosis of frequency curve, $Kurtosis$),可以得到林分高度分布情况。植被点云高度平均值反映了样方林分高度的大小状况,方差反映了样方内植被点云高程的离散度,频率曲线峰态反映了样方内较高植被点云的分布情况。方差越小样方内植被点云高程离散度越小,频率曲线峰态值越大较高植被点云数量就越多,反之就越少。由此可知,这 3 个参数能够反映样方内不同高度林木的分布情况。基于这 3 个变量,如式(5)所示计算得到植被点云高度阈值平均值 T_mean 。

$$Z_mean = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{2}$$

$$Variance = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \tag{3}$$

$$Kurtosis = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sqrt{Variance}} \right)^4 - 3 \tag{4}$$

$$T_mean = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j \tag{5}$$

式中: n 为样方内高度>1 m 的植被点云数量, x_i 为样方内高度>1 m 的单个植被点的高程, m 为样方内植被点云高度大于阈值 T 的植被点的数量, x_j 为样方内植被点云高度大于阈值 T 的单个植被点的高程。

由于 T_mean 直接反映了植被点云高度信息,其与林分平均树高呈线性相关($R=0.878\ 1$),因此,本研究拟建立如式(6)所示的回归模型,用于估测林分平均树高。

$$H = a(T_mean) + b \tag{6}$$

式中, a 和 b 为模型参数。

为了排除林下低矮灌木的影响,本研究仅选取高度>1 m 的植被点参与计算, T_mean 是样方内高度大于阈值 T 的植被点的平均值。阈值 T 是由 $Variance$ 和 $Kurtosis$ 共同决定的,当 $Variance$ 的值小于阈值 V 或 $Kurtosis$ 的值大于阈值 K 时则阈值 T 为 Z_mean ,否则阈值 T 为 $1/2Z_mean$ 。

1.5.4 模型评价指标 利用式(7)所示的 P 值对林分平均树高估测模型精度进行评价。

$$P = 1 - \frac{H-h}{h} \tag{7}$$

式中: H 为野外实测加权平均树高, h 为平均树高估测模型估测的样方平均树高。

2 结果与分析

2.1 数字高程模型 DEM 的建立

针对分类后所有样地的地面点(图 3),使用一次样条有限元内插法建立分辨率为 1 m 的规则格网数字高程模型(图 4),该方法处理速度快,生成的 DEM 数据结构简单,精度高,而且占据的存储空间小。建立的 DEM 最大高程中误差为 0.074 m,最小高程中误差为 0.039 m,平均高程中误差为 0.046 m。

2.2 树高估测模型

经试验 $Variance$ 和 $Kurtosis$ 分别设为 6 和 0.8 时模型达到最优,求得模型参数 $a=0.86$, $b=2.59$, $R^2=0.931\ 4$ 。图 5 为点云数据计算的植被点云高度阈值平均值与实测树高的回归分析结果,回归模型如式(8)所示。

$$H = 0.86T_mean + 2.59 \ (R^2=0.931\ 4) \tag{8}$$

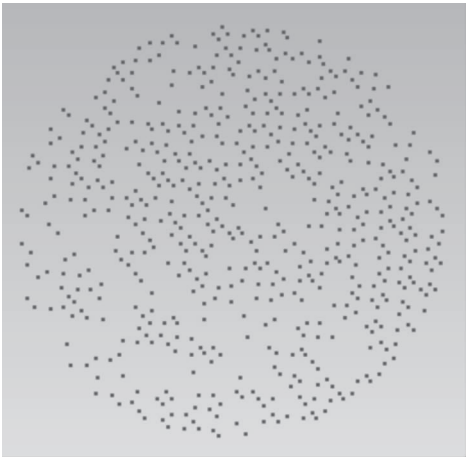


图 3 地面点

Fig. 3 Terrain points

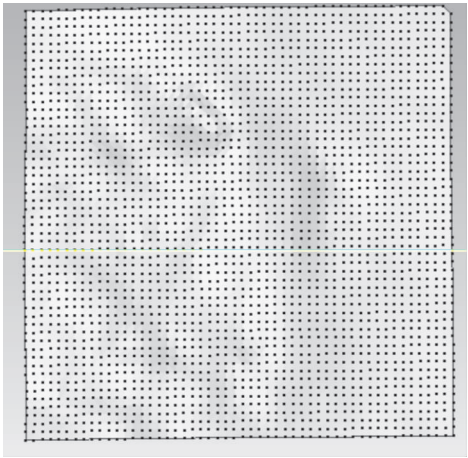


图 4 规则格网数字高程模型

Fig. 4 Regular square grid DEM

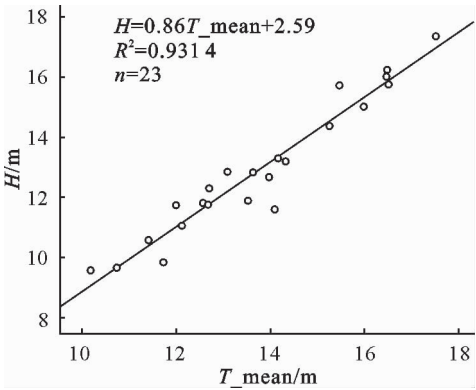


图 5 林分平均树高回归分析结果

Fig. 5 The result of mean canopy height regression analysis

2.3 树高估测模型精度评价

基于式(7),利用野外实测的 10 块未参与建模的样地对模型进行精度评价(表 1)。模型估测最高精度为 99. 81%,最低为 87. 09%,总体精度为 94. 56%。结合数据采集和实际情况分析发现,在模型估测精度较低的样方。

3 结论与讨论

为了探究机载激光雷达技术在森林平均树高估测方面的应用,以内蒙古呼伦贝尔市西北部、额尔古纳市东南部的上库力农场农林交错区为研究对象,通过对机载激光雷达点云数据进行处理分析,提取

表 1 检验样地平均树高估测结果及精度评价

Table 1 The mean canopy height estimation results and accuracy evaluation from control plots

样地号	树种	阈值 平均值/m	实测 树高/m	估测 树高/m	树高 差值/m	精度 /%
1	白桦	9. 8	11. 7	11. 1	−0. 6	94. 71
4	白桦	11. 6	13. 2	12. 6	−0. 6	95. 25
6	白桦	13. 3	13. 4	14. 1	0. 7	94. 41
7	白桦	11. 5	12. 5	12. 5	0. 0	99. 81
9	白桦	9. 4	12. 3	10. 7	−1. 6	87. 09
13	兴安落叶松	14. 2	15. 9	14. 9	−1. 0	93. 61
20	兴安落叶松	13. 3	13. 2	14. 1	0. 9	93. 21
25	兴安落叶松	13. 4	15. 0	14. 1	−0. 9	94. 16
29	兴安落叶松	12. 5	13. 8	13. 4	−0. 4	97. 24
31	兴安落叶松	12. 3	13. 8	13. 2	−0. 6	96. 08

3 个统计变量,即反映样方林分高度状况的植被点云高度平均值、描述激光点在垂直方向离散度的参数方差和描述高层激光点分布情况的参数频率曲线峰态,用于提取样方一定高度以上点云高程的阈值平均值,最后对点云阈值平均值和野外实测树高进行回归分析建立样方平均树高单变量反演模型用于估测林分样方平均树高。结果表明,应用机载激光雷达技术,估测林分样方平均树高是可行的,估测精

度均高于 87. 09%,最高精度为 99. 81%,总体精度为 94. 56%。应用一定高度以上离散点云高程的阈值平均值可以准确估测林分样方平均树高。

本研究提取样方点云的阈值平均值建立的模型能够较好地估测林分平均树高,但仅考虑了单个变量建立线性回归模型,容易受外在因素的影响,激光雷达在扫描过程中受飞行高度、扫描角、飞行速度等的影响,造成采集的离散的点云密度不均匀,点云密

度较小,未能扫描到树顶,导致样方内平均树高估算偏低,估测精度也就偏低。地形条件、野外实测样方的数量和数据精度等,因此,需进一步研究提取多个变量或采用非线性的方法建立模型估测林分平均树高。

参考文献:

[1] 王蕊,邢艳秋,尤号田,等. 基于星载 LiDAR 波形数据的森林胸高断面面积估测研究[J]. 西北林学院学报,2014,30(5):156-162.
WANG R,XING Y Q, YOU H T, *et al.* Forest basal area estimation based on spaceborne LiDAR waveform data[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,30(5):156-162. (in Chinese).

[2] KOCH B, HEYDER U, WEINACKER H. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2006, 72(4):357-363.

[3] ZIMBLE D A, EVANS D L, CARLSON G C, *et al.* Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR [J]. Remote sensing of Environment, 2003, 87(2):171-82.

[4] POPESCU S C, WYNNE R H, NELSON R F. Estimating plot-level tree heights with lidar:local filtering with a canopy-height based variable window size [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 37(1):71-95.

[5] NÆSSET E, ØKLAND T. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(1):243-247.

[6] MALLET C, BRETAR F. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(1):1-16.

[7] 刘鲁霞,庞勇. 机载激光雷达和地基激光雷达林业应用现状[J]. 世界林业研究,2014,27(1):49-56.

[8] 尤号田,邢艳秋,王铮,等. 利用 LiDAR 离散点云估测针叶林叶面积指数[J]. 西北林学院学报,2014,29(3):41-47.
YOU H T, XING Y Q,WANG Z, *et al.* Estimation of the leaf area index of coniferous forests using LiDAR discrete point cloud[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3):41-47. (in Chinese).

[9] NÆSSET E, BJERKNES K-O. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 78(3):328-340.

[10] LEE A C, LUCAS R M. A LiDAR-derived canopy density model for tree stem and crown mapping in Australian forests [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(4):493-518.

[11] POPESCU S C, ZHAO K. A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3):767-81.

[12] HOLLAUS M, WAGNER W, EBERHFER C, *et al.* Accuracy of large-scale canopy heights derived from LiDAR data under operational constraints in a complex alpine environment [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(5):323-338.

[13] BRANDTBERG T. Automatic individual tree-based analysis of high spatial resolution remotely sensed data[D]. Silvestria (Sweden):Acta Universitatis Agriculturae Sueciae,1999.

[14] HYYPP J, INKINEN M. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner [J]. The Photogrammetric Journal of Finland, 1999, 16(2):27-42.

[15] MALTAMO M, MUSTONEN K, HYYPPÄ J, *et al.* The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(9):1791-1801.

[16] NÆSSET E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1997, 52(2):49-56.

[17] 邢艳秋,尤号田,霍达,等. 小光斑激光雷达数据估测森林树高研究进展[J]. 世界林业研究,2014(2):29-34.

[18] GOODWIN N R, COOPS N C, CULVENOR D S. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 103(2):140-52.

[19] 杨国清,张予东. 平面控制网四参数法坐标转换与残差内插[J]. 测绘通报,2010(11):48-50.

[20] 毛建华,何挺,曾齐红,等. 基于 TIN 的 LiDAR 点云过滤算法[J]. 激光杂志,2007,28(6):36-38.