

基于机载 LiDAR 落叶松树冠几何形状三维重建关键技术研究

赵晨阳, 邢艳秋*, 霍 达, 焦义涛, 尤号田

(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:森林冠层的三维重建研究能够更加直观反映森林空间结构,提高森林参数的测量精度。目前小光斑激光雷达已经广泛应用于林业研究中。为建立落叶松树冠三维形状模型,以长春净月潭实验区落叶松机载 LiDAR(LiDAR, Light Detection And Ranging)数据为基础,采用 K-means 算法提取建模参数。该算法以单木树冠顶点作为初始聚类中心,经过 4 次迭代估测出单木树高和单木树冠直径,通过与试验区的单木实测数据对比,进行相关性分析,得到估测树高和估测树冠与实测数据相关系数分别为 0.892 4 和 0.769 0,经过验证,估测树高和估测树冠的精度为 94.06% 和 82.21%。利用激光雷达提取出的单木坐标、树高、树冠和冠基高采用旋转抛物线方法重建森林尺度三维模型呈现森林结构。

关键词:小光斑激光雷达;K-means;单木参数;冠幅形状;三维重建

中图分类号:S771 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)02-0186-05

Key Technologies of Three-dimensional Geometric Reconstruction of Larch Crown Shape Based on LiDAR Data

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

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

Abstract: The research on forest three-dimensional reconstruction can response forest structure intuitively and improve estimation precision of forest parameters. At present, the small footprint LiDAR has been widely used in forest study. To establish the three-dimensional model of larch based on its canopy shape, the field measured data of larch at Jingyuetan area in Changchun and airborne LiDAR data were selected, and the K-means cluster algorithm was used to extract the modeling parameters, in which the individual tree top was taken as the initial clustering center, and individual tree height and crown diameter were estimated after four iteration procedures. Regression analysis were made between the field measured individual tree height and crown diameter and LiDAR measured individual tree height and crown diameter, resulting in the corresponding correlation coefficients of 0.892 4 and 0.769 0, and the precisions of 94.06% and 82.21%, respectively. Finally, the 3D model to represent forest structure was established by using the parameters such as the LiDAR measured individual tree top coordinate, tree height, crown diameter, crown base height and a rotating parabolic method.

Key words: airborne Lidar; K-means; individual tree parameter; canopy shape; 3D reconstruction

森林垂直结构^[1-2]的研究与分析工作备受森林管理研究人员的重视,因此,获得准确的森林垂直结构能够改善森林参数的估测模型,能够提高其估测

精度,也是森林火灾评估中的一项重要工作^[3-4]。机载激光雷达(LiDAR, Light Detection And Ranging)具有高精度三维测量的特点,所以它很适合对

收稿日期:2014-06-27 修回日期:2014-08-17

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41171274);中央高校基本科研业务费专项资金项目(DL12EB07)。

作者简介:赵晨阳,女,硕士研究生,研究方向:森林管理与林业信息工程。E-mail:840949552@qq.com

* 通信作者:邢艳秋,女,博士,教授,研究方向:森林管理与林业信息工程。E-mail: yanqiuqing@nefu.edu.cn

森林的垂直结构的重建^[5]。当点云密度达到 10 个·m⁻² 点以上时,可以根据物体的几何形状区分地上物体(如建筑物,树木等)。分割单木树冠成为重建森林的垂直结构的关键问题^[2,6]。唐菲菲^[7]等采用标记约束的局部流域跟踪算法对 CHM(Canopy Height Model)栅格图像进行检测识别出单株木树冠。HU B X^[8]等运用多尺度分割法对 CHM 分割,并对有问题的分割结果进行“分离”和“合并”,准确描绘了单木树冠。这些传统的分割单木的方法都是在栅格图像上进行分割,这可能丢失点云的基本信息,为了防止点云基本信息的丢失,直接对原始点云处理就显得尤为重要。原始点云的聚类已经被应用于地面、植被和建筑物的探测,但是在分割单木阶段还没有具体的应用。本研究的主要目标是利用落叶松的原始点云数据做 K-means 聚类分析^[9-10] 分割单木树冠,提取单木的树高、树冠直径、冠基高和位置坐标等参数;由于本研究所用的机载激光雷达数据密度较低,难以实现落叶松表面模型重建,所以结合前人对落叶松树冠形状的研究^[11-12],以及提取的单木参数对落叶松进行几何形状模型重建,重建森林尺度落叶松树冠的几何形状,为落叶松单木表面模型重建做尝试和铺垫。

1 研究区概况

研究区为长春市净月潭国家森林公园,地理位置 125°20′—125°34′E、43°41′—43°51′N,属长白山余脉,地貌主要以低山丘陵地形为主,时有阶地、河漫滩等,海拔在 220.1~406.6 m,土壤主要为暗棕壤。研究区内主要由人工林和天然次生林组成,森林面积约为 100 km²,植被丰富,有高等植物 550 余种,主要的乔木、灌木植物有 30 余种,树种主要有樟子松(*Pinus sylvestris*)、白桦(*Betula platyphylla*)、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、赤松(*Pinus densiflora*)、榆树(*Ulmus pumila*)、红松(*Pinus koraiensis*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、国槐(*Sophora japonica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)。

2 材料与方法

2.1 野外数据收集与处理

研究于 2012 年 10 月 8 日至 16 日期间对长春净月潭公园实验区进行相应的地面调查,共选取了 24 个樟子松圆形样方,11 个兴安落叶松圆形样方,1 个蒙古栎圆形样方、1 个柞树圆形样方和 1 个杨树圆形样方。根据林分密度不同,分别设计了半径为

10 m 和 15 m 2 种规模的样方。用手持 GPS(Global Positioning System)定位样地中心点并记录其坐标,定位精度可达 50 cm。采用胸径尺测量每木胸径(1.3 m 高处的直径),采用 Vertex IV 超声波树木测高测距仪测量单株树高及枝下高,在 30 m 范围内高度分辨率为 0.1 m。用皮尺测量每木东、南、西、北 2 个方向的冠幅。本研究随机选取 2 个落叶松样方,一个用来建模,另一个用来精度验证。

2.2 小光斑激光雷达点云数据收集

本研究所用 LiDAR 数据的飞行时间是 2012 年 5 月 31 日,由搭载在飞机上的 ALS70 型传感器扫描得到,飞行相对高度为 500 m,扫描频率 40.3 Hz,激光器所用波长 1 064 nm,激光发散角 0.22 mrad,扫描密度约为 2~4 个脉冲/m²,光斑直径为 0.28 m,共获取南北向 9 条航带数据。ALS70 型传感器能够记录 3 次回波脉冲,即首次回波脉冲、末次回波脉冲和单次回波脉冲。

2.3 LiDAR 数据预处理

激光雷达数据包含一些明显高于地物或明显低于地表的激光点,这些点云一般为孤立点,称为噪声点。本研究采用基于距离的孤立点算法去除噪声点,该算法的基本思路是把数据点看作空间中的点,孤立点被定义为在数据集中与大多数数据对象之间的距离大于某个给定的阈值的对象点^[13]。即任意一点云为球心、一定距离为半径的球形空间内不存在其他点云,那么当前点云为噪声点。根据研究区地形地貌和地物的分布情况,球形半径分别取 5、10、15、20 m 和 25 m,经过试验得出半径 25 m 时效果最高,所以球形半径取 25 m,最后辅助一定的人工修正。LiDAR 数据保存成 LAS 格式,每个激光点包含了该点的点类别、回波强度值、高程、坐标值等信息。

2.4 K-means 聚类分割单木树冠

2.4.1 K-means 聚类算法原理 基于 K-means 聚类法进行单木树冠点云分割是通过迭代的过程把每一个点云划分到不同的空间聚类中来实现树冠的分割。即将被划分为 k 个聚类的 n 个数据对象满足:类内对象具有高度的相似性,类间对象的相似性较低^[14-15]。算法步骤如下:

1) 从 n 个对象数据任意选择 k 个对象作为初始聚类中心。由于落叶松树冠大体上是椭圆体,树顶位于椭圆体的水平中心位置,本文直接以外业调查中单木 GPS 定位点作为初始聚类中心,将最后一次迭代后的每个聚类中 Z 值最大的点云数据视为激光雷达估测的单木树冠顶点,该点相对高程值作为激光雷达估测的单木树高。

2)计算每个点云数据与这些初始聚类中心的欧式距离,删除不需要参与运算的地面点,并根据最小距离原则将每个点云重新分配到最邻近聚类。k-means 算法适合于在三维特征空间内大体为球形、簇密度均匀的数据集的聚类分析,而落叶松单木点云分布并非球形,采用将点云相对高程值按一定尺度缩放使落叶松单木的点云分布大体呈球形。根据野外测量的数据,本研究选取样方的落叶松单木的树高与树冠直径的比值范围 2~5,即树高是树冠直径的 2~5 倍。选择 3 作为缩放比例,对点云数据相对高程值进行缩放,利用缩放后的点云的 x,y,z 坐标值计算每个点云数据到每个聚类中心的欧式距离。

3)计算每个聚类的均值,对于聚类均值有变化的,将变化后的聚类均值作为下一步迭代的聚类中心。

4)循环(2)到(3)直到每个聚类均值不再发生变化为止。

2.4.2 k-means 聚类算法结果的评估 K-means 聚类算法是用误差平方和准则函数来评价聚类性能^[16]。几次迭代后的聚类结果应该使误差平方和逐步降低,最终得到一个最小的值为当前的最优分割结果。数据集 X 包含 K 个聚类子集,各个聚类子集中的样本数量和聚类中心分别为和。误差平方和判别准则函数公式为:

$$E=\sum_{i=1}^k \sum_{p \in X_i} \| p - c_i \|^2$$

(1)

2.5 提取单木冠基高

单株木的冠基高位置可以从单木点云高程值的直方图来提取。利用 Terrsolid 软件读取分割后的落叶松单株木点云数据,并按一定厚度分层,统计每层中的点云数目并绘制直方图。直方图中高程较低的区域存在大量点云,这一区域为地面。在高于地面的高程值部位存在一段点云数目为零的连续区域,由于机载雷达很难将激光点打到树干,所以将这段连续高程值范围视为树干。在直方图中与这段连续区域相邻的下一个高程值即为冠基高的位置。

2.6 模型精度预测

预测精度的公式为:

$$P=1-\frac{|y-\hat{y}|}{y}$$

(2)

式中: P 为估测精度; y 为实测单木参数; \hat{y} 为激光雷达估测单木参数。

3 结果与分析

进行若干次迭代,每次迭代后更改有变化的聚

类中心。前 3 次迭代结果误差平方和分别为 24 169.46、10 844.52、8 658.65,误差平方和依次降低并进行第 4 次迭代,第 4 次迭代结果误差平方和为 8 658.65,与第 3 次相同并且为最小值,根据误差平方和最小原则及效率最高原则,不再进行迭代,将第 4 次迭代结果视为最终的树冠分割结果。

3.1 单木树高估测结果

本文将 k-means 聚类算法最后的迭代结果(聚类簇)中 Z 值最高的点视为激光雷达估测的单木树冠顶点,该点相对高程值作为估测的单木树高。用建模样方的 25 株落叶松的实测数据与激光雷达的估测数据进行建模,图 1 为估测树高与实测树高的散点图,估测结果平均相对误差为-2.54%,相关系数 $R^2=0.8924$ 。用验证样方的 20 株落叶松进行验证,单木树高的预测精度为 94.06%,说明机载 LiDAR 数据通过 k-means 聚类算法的处理可以获得精度较高的落叶松单木树高。

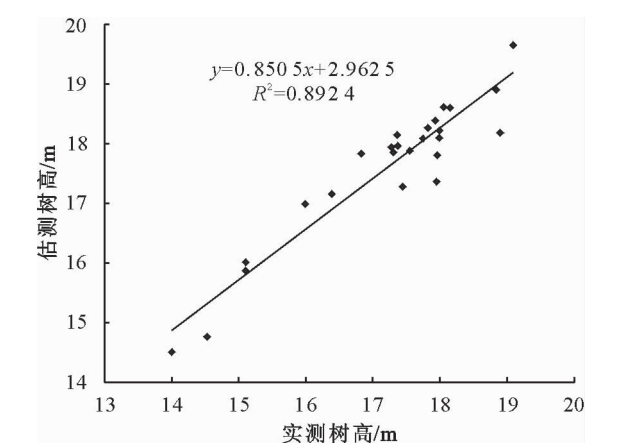


图 1 实测树高与估测树高散点

Fig. 1 The scatter plot between field measured tree height and LiDAR measured tree height

3.2 单木冠幅估测结果

对 k-means 聚类方法分割后的点云数据(聚类簇)实施二维凸包算法,图 2 为一个聚类簇的凸包运算结果。将每个聚类簇的凸包运算的结果东西和南北 2 方向的直径的平均值作为冠幅直径,结合野外测量的平均冠幅直径,用建模样方的 25 株落叶松的实测数据与激光雷达的估测数据进行建模,并绘制估测值与实际值的散点图(图 3)。估测结果平均相对误差为 14.55%,相关系数为 $R^2=0.7690$ 。用验证样方的 20 株落叶松进行验证,预测精度为 82.21%,说明激光雷达估测的单木冠幅可以大致反映样方的树冠分布和大小。

3.3 单木树高和冠幅估测误差分析

对落叶松单木树高和单木冠幅估测结果进行分析发现:估测冠幅与实测冠幅之间的相关系数偏低;

估测树高与实测树高的平均相对误差百分比为-2.54%,说明整体估测单木树高与实测树高相比偏低。这2种现象可能是由以下几个方面原因造成的:1)K-means 聚类法分割结果的优劣很大程度上取决于聚类中心的选择,直接以外业调查的单木中心点坐标作为初始聚类中心,外业测量时存在较大误差使外业测量的树冠顶点与 K-means 算法得到的树冠顶点的位置不匹配,造成很大的匹配误差;2)可能是在 LiDAR 系统采集数据时由于采样密度不够,导致点云并没有处在真正的树顶处;3)由于单株木可能存在偏冠现象,树冠聚在一起导致树冠之间的界限不明显,树冠分割算法可能将这几个树冠看作一个树冠进行处理,造成冠幅尺寸估测存在很大误差。

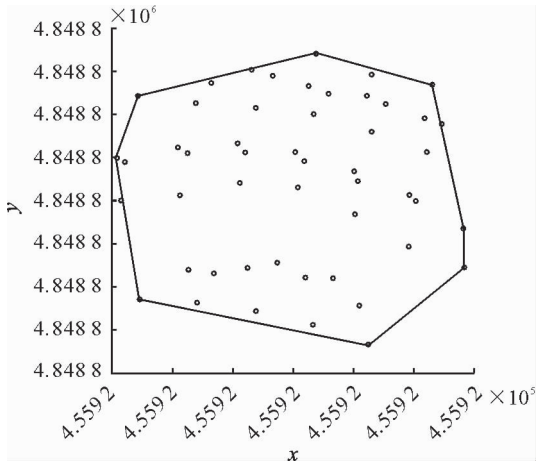


图2 一个聚类簇的凸包运算结果

Fig.2 Convex hull computation result of one cluster

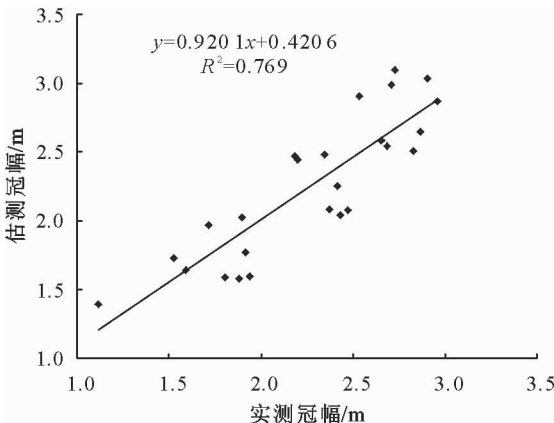


图3 实测冠幅与估测冠幅散点

Fig.3 The scatter plot between field measured tree crown and LiDAR measured tree crown

3.4 冠基高提取结果

以建模样方中的一株落叶松为例,将落叶松单木的点云数据按照高程由低到高分层,每层厚度为1 m,统计每一层高程范围对应的点云的数量,并绘制折线图(图4)。由于机载激光雷达的大部分脉冲

落在树冠,并且透过树冠打到地面,有的通过树叶之间的缝隙直接打到地面,而很难打到树干,所以地面和树冠区域存在大量点云数据,树干区域几乎不存在点云数据。由于本研究区的实际海拔在220.1~406.6 m之间,所以由图4分析可得到,高程在256.06~260.06 m范围内存在大量的点云,将这段区域视为地面,高程在260.81~266.54 m范围内点云数量为零,这段高程范围为树干,这段区域之后的点云为树冠上的点,这些点中最低点的高程,即高程为266.54 m的位置为该落叶松单木的冠基高位置。

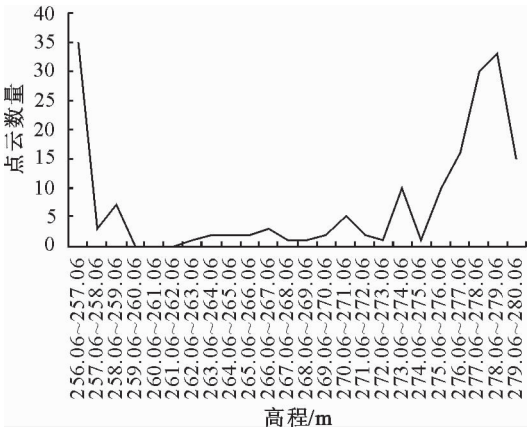


图4 提取冠基高折线

Fig.4 The broken line of crown base height

3.5 几何形状建模

针对落叶松树冠的形状,李凤日研究发现树冠形状在树冠的中上部呈抛物线体,而在树冠的下部则为近圆柱体^[11]。结合前人对落叶松树冠形状的研究,姜石磊提出了一种带有拐点参数的连续的分段函数模型模拟落叶松的冠形曲线^[12],发现落叶松冠形曲线的最优模型为分段抛物线模型,该模型的拐点参数为0.834 7,说明落叶松最大树冠半径出现在冠深为0.8左右的位置。分段抛物线模型为:

$$r=[-b_1-b_2\cdot(1-a_1)^2]\cdot rx+b_1\cdot rx_2+b_2\cdot(rx-a_1)^2\cdot I$$
$$I=\begin{cases} 0 & rx\leq a_1 \\ 1 & rx>a_1 \end{cases} \quad rx\in[0,1]$$

(3)

式中:rx为相对冠深, $rx=\frac{lr}{cl}$,lr为树冠深度,cl为树冠长度;r为相对冠深为rx处的树冠半径;b₁、b₂、b₃、a₁为模型的宽度,其中a₁为拐点参数。分段抛物线模型的拟合结果为b₁=-3.508 6,b₂=-66.828 6。

结合激光雷达估测的树高、树冠直径、冠基高,用旋转分段抛物线模型重建树冠形状,结合实测的胸径数据用圆柱体模型重建树干形状。对建模样方落叶松进行森林尺度的三维模型重建结果如图5所示。

