

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.039

长白落叶松单木参数与生物量机载 LiDAR 估测*

刘峰 谭畅 张贵 刘京轩

(中南林业科技大学理学院, 长沙 410004)

摘要: 采用黑龙江长白山地区长白落叶松人工林 LiDAR 数据和野外调查补充样地数据, 利用树冠高层模型和三维点云分割相结合的方法实现单木识别, 选择逐步回归分析法进行单木参数和生物量估算。结果表明: 机载 LiDAR 估测的长白落叶松单木参数与实测数据具有较好的相关性, 单木树高、冠幅、胸径和地上生物量的 R^2 分别为 0.873 2、0.633 5、0.790 3 和 0.799 2; 平均拟合精度分别为 88.34%、83.46%、85.11% 和 86.19%; 幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的单木平均生物量分别为 25.12、94.08、117.74、279.33 kg。

关键词: 长白落叶松 单木 生物量 估测 机载激光雷达

中图分类号: S758.1; TN958.98 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)09-0219-06

Estimation of Forest Parameter and Biomass for Individual Pine Trees Using Airborne LiDAR

Liu Feng Tan Chang Zhang Gui Liu Jingxuan

(School of Science, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The LiDAR point cloud and a survey of seven plots *Larix olgensis* plantation in Changbai Mountain area of Heilongjiang were utilized as the experimental data. A method combined crown height model and 3-D point cloud segmentation was used to identify individual tree. The forest parameters and aboveground biomass based were estimated by using stepwise regression analysis. Experimental results showed that the forest parameters estimated by LiDAR had good correlation with field data. The coefficient of determination between prediction values and observed values of the tree height, crown diameter, DBH and aboveground biomass were 0.873 2, 0.633 5, 0.790 3 and 0.799 2, respectively. The average fitting accuracy was 88.34%, 83.46%, 85.11% and 86.19%, respectively. The average biomass of young, half mature, near mature and mature *Larix olgensis* were 25.12, 94.08, 117.74 and 279.33 kg, respectively.

Key words: *Larix olgensis* Individual tree Biomass Estimation LiDAR

引言

森林生物量对全球气候变化和可持续发展都有重要意义, 通过生物量不仅可推算出森林固碳量, 还能估算出潜在的纤维材料可再生资源量, 因此对森林生物量的监测越来越受到重视。由于工作量大、费用高、周期长等缺点, 传统的生物量实地测量方法

不能及时准确地反映大面积宏观生态系统的动态变化及生态环境状况。相对于光学遥感技术, 机载 LiDAR (Light detection and ranging) 有高采样度、高度直接量算、定位精确和自动化处理等优势, 激光束能够穿透植被冠层获得丰富的植被垂直结构信息, 特别有利于直接测定植被特征, 估算从单木到林分范围的多尺度森林生物量^[1-4]。目前欧洲几个国家

收稿日期: 2012-08-29 修回日期: 2012-10-14

* 国家自然科学基金资助项目(31200346)、湖南省高等学校科学研究项目(12C0465)、2012 湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划资助项目和 2012 中南林业科技大学人才引进科研启动基金资助项目

作者简介: 刘峰, 博士生, 主要从事林业遥感研究, E-mail: liufeng0808@126.com

已经开始使用机载 LiDAR 进行大区域的森林资源调查^[5],专门针对单木尺度的相关研究也相继报道^[6-8],主要是将激光点云内插成树冠高程模型,然后在其基础上利用图像处理技术进行分类或识别。国内学者也利用 LiDAR 在林分尺度内针对平均树高和树冠等信息的提取做了相关的试验,取得了不错的效果^[9-11]。如何加强生态资源调查工作,提高信息化成效,为保障科学发展和保护资源提供有力支撑,是当前生态环境监测工作面临的重要课题。本文探讨一种利用机载 LiDAR 估测单木参数和生物量的方法,为精准林业资源调查提供新的途径。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

研究地区位于黑龙江省宁安市东南兴隆林场(44°2'~44°55'N,129°24'~129°37'E),林场地形以丘陵地貌为主,地势南高北低,平均海拔高度400~800 m。该地区属于大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖多雨。年平均气温3.5℃,年降水量500~600 mm,无霜期约120 d,土壤一般为暗棕色森林土。地带性植被是以长白落叶松(*Larix olgensis*)为主的针阔混交林,主要乔木林种有红松(*Pinus koraiensis*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、黑桦(*Betula davidiana*)、柞树(*Quercus mongolica*)等;主要灌木有毛榛子(*Corylus mandshurica*)、忍冬(*Lonicera altamanni*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和

毛樱桃(*Cerasus tomento*)等;主要草本植物有苔草(*Carex tristachya*)和黄花蒿(*Herba artemisiae*)等。

1.2 LiDAR 数据和样地资料

机载激光雷达数据获取时间为2008年9月,选择天气晴朗少云进行飞行,根据试验地区范围和地形高度、坡度等情况,沿着地势设计航线18条,航带间重叠率为25%,飞行高度800~1100 m。激光雷达系统是 LiteMapper5600,该系统包括 Riegl LMS-Q560 型激光扫描仪, AEROcontrol-II 直接地理定位系统和一台 IGI DigiCAM 14K 型数码相机。LiteMapper5600 系统通过发射单束窄带激光脉冲并接收反射的回波信号记录地物空间信息,测量精度±20 mm,光斑大小约25 cm,波形采样间隔1 ns,脉冲重复频率最高100 kHz,激光束散射角0.5 mrad,扫描角范围±22.5°,扫描速度5~160行/s,扫描角精度0.0025°,多对象分辨率0.6 m,平均点云密度5~10个/m²。

收集研究区域内的2005年森林资源连续清查固定样地数据及2008年9月野外调查补充样地数据,沿着地形走势设置7个边长为50 m×50 m的人工林方形样地,对样地进行每木检尺:用测树胸径尺测量单木胸径;皮尺测量冠幅;手持激光测高仪测量树高;DGPS和全站仪测量样地每木定位。剔除特异样木后保留568株试验样木,主要树种是落叶松和红松,占85%,而桦树、刺槐等占15%,基本统计量如表1所示。

表1 样地特征表

Tab.1 Field data characteristics of sample plots

样地 编号	林龄 /a	海拔高度 /m	平均 树高/m	树高方差 /m	平均冠幅 直径/m	冠幅直径 方差/m	平均胸径 /cm	胸径方差 /cm	林分密度 /株·hm ⁻²	郁闭度
1	7	412	2.64	0.85	2.06	0.43	3.55	0.32	2185	0.20
2	15	425	11.66	1.09	3.43	0.88	10.97	0.65	1850	0.55
3	20	458	13.26	1.24	4.58	0.97	13.62	2.91	1060	0.70
4	24	550	14.77	2.03	5.25	0.99	15.59	2.98	1150	0.75
5	27	421	15.63	2.14	5.41	1.11	16.88	3.12	970	0.85
6	35	526	18.54	2.31	5.32	1.29	18.94	3.45	680	0.80
7	47	606	23.33	2.41	5.99	1.32	25.46	3.92	520	0.85

1.3 研究方法

1.3.1 样地生物量计算

在样地内对人工落叶松进行每木检尺,分别测定乔木的胸径、树高、冠幅等数据,再按径阶选择标准株,将选出的标准株按其高径规格进行伐倒,做树干解析。树干生物量通过体积乘以密度求得,密度通过分段切取圆盘测定。由树干、粗枝、细枝和叶构成单木地上部分生物量。以固定样地为单位,合计样地内各株树木的生物量,即为本文中固定样地的

生物量。

1.3.2 激光雷达数据预处理

主要包括点云解析和点云分类编辑两部分:
①地物点云坐标计算, $P_i = P_0 + RM_A$,式中 P_0 为由DGPS原理计算得到的传感器空间坐标, R 为由激光脉冲之间的延时计算得到的地物采样点的距离, M_A 为IMU(惯性导航单元)决定的传感器瞬间姿态方向余弦矩阵, M_A 结合系统误差校正参数和坐标投影参数,依航带求出具有WGS84坐标系统的三维坐标

点云^[12]。利用航带重叠数据进行航带平差并校正系统性误差,可提高航带间的内部一致性,试验中将航带高程差大于 5 cm 的数据点采用文献[13]的模型进行航带平差。②采用 Axellson^[14]提出的不规则三角网加密滤波方法进行非地面点和地面点的分类,先通过一些较低种子点生成一个稀疏 TIN,然后根据每个点与 TIN 的距离,逐步迭代加密直至对所有点进行分类。滤波后仍需进行人工编辑去除可能存在的错误或不合理数据点,进一步提高分类精度。分别对地面点云和非地面点云进行 Kriging 插值,搜索半径为 12 个数据点,生成栅格化的数字高程模型 (DEM) 和数字表面模型 (DSM)。由于试验地区是林地,可直接将 DEM 和 DSM 进行灰度差值运算得到树冠高程模型 (Crown height model, CHM)。

1.3.3 单木识别

采用在 CHM 上进行树冠提取和在三维空间进行单木点云分割相结合的方法进行单木识别。

(1) 数学形态学方法是 CHM 提取树冠有效方

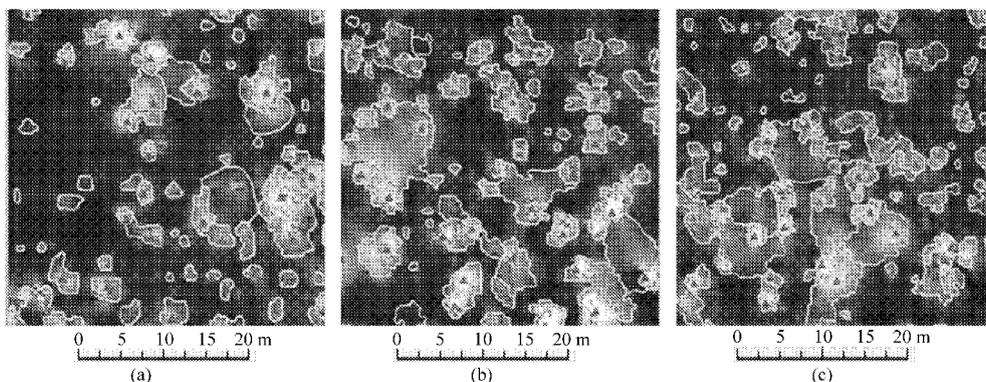


图1 不同郁闭度 CHM 树冠提取效果

Fig. 1 Crown edges with CHM at different canopy densities

(a) 低郁闭 (b) 中等郁闭 (c) 高郁闭

(2) 在三维空间中对单木点云分割是提高其参数估测准确率的重要途径^[15~16]。首先将点云用马尔可夫模型 (Markov random field, MRF) 组织, MRF 模型既能反映点云的随机性又能反映点云的潜在空间结构,利用 Bayesian 理论将单木点云先验知识转换为先验分布模型描述,采用最大后验估计 (Maximum a posteriori, MAP) 得出点云标号的分布。

$$\arg \max p(f|x) \approx \arg \max p(x|f)p(f) \quad (1)$$

式中 $p(f|x)$ —— 标号场的后验概率

$p(x|f)$ 、 $p(f)$ —— 点云分布的似然概率和点云标号的先验概率

根据 Bayesian 理论,式(1)相当于求解 δ 邻域内原子团 (Cliques) 的能量 E 最小化

$$E(f) = \sum_{i=1}^K \theta(x_i | \mu_i, \sigma_i^2) + \lambda \sum_{\{p,q\} \in \delta} w_{p,q} \beta_{p,q}^w \quad (2)$$

式中 p, q —— 代表原子团内每对数据点

法之一,但直接在梯度图像上进行处理通常会造成分割现象^[15~16],改进的方法是将树冠顶点作为标记后再利用分水岭算法进行树冠边缘提取^[15]。在 CHM 中树冠顶点的灰度值较大,首先利用高斯 Laplacian 算子检测出树冠区域,在灰度图像上应用卷积核为 α 的局部非极大值抑制法检测树冠参考点集 p' ,鉴于树冠顶点通常在树冠区域的中心位置 (假设 1 个单木只有 1 个树顶),在树冠为 1、非树冠为 0 的二值图像上计算每个非零值像素与它最近的零值像素之间的距离,取较大值为树冠参考点集 p'' ,将最终的树冠点集 $p \subseteq p' \cap p''$ 作为标记,对 CHM 进行分水岭分割实现树冠提取。上述方法对低郁闭孤立单木树冠提取效果较好,提取的树冠和实测情况基本对应,但在高郁闭树冠连片的情况下树冠分割误差较大,有的树冠对应多个树顶 (图 1),主要原因是单凭二维 CHM 很难将树冠彼此重叠部分分割开,须从三维角度考虑单木点云分布特征以提高识别率。图 1 中的白线为树冠提取边缘。

$\beta_{p,q}^w$ —— 克罗内克符号 (kronecker delta)

$w_{p,q}$ —— 点云空间关系的权值

根据单木点云分布特征,设定空间关系权值为

$$w_{p,q} = \begin{cases} 0 & (f(p \in \delta) = f(q \in \delta)) \\ e^{-d_{(p,q)}} e^{-Z_{(p,q)}} e^{-M_{(p,q)}} e^{-\phi_{(p,q)}} & (f(p \in \delta) \neq f(q \in \delta)) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $f(p \in \delta)$ —— 邻域 δ 范围内数据点 p 的标号

$d_{(p,q)}$ —— 两点之间的水平距离

$Z_{(p,q)}$ —— 两点之间垂直距离

$M_{(p,q)}$ —— 数据点到邻域内单木树冠顶点先验位置 (利用标记控制分水岭方法从 CHM 得出) 的水平距离比值

$\phi_{(p,q)}$ —— 点云方向的势能

图 2a 是郁闭环境中利用分水岭算法在 CHM 基

基础上提取的2个树冠区域,其中一个区域包含1株单木,另外一个区域内包含3株实测单木,显然这是误差;图2b是根据三维点云分布特征,利用各向异

性MRF模型较好地将点云分割成4株完整的单木;图2c是在上述分割基础上提取的树冠效果,与实测数据基本一致。

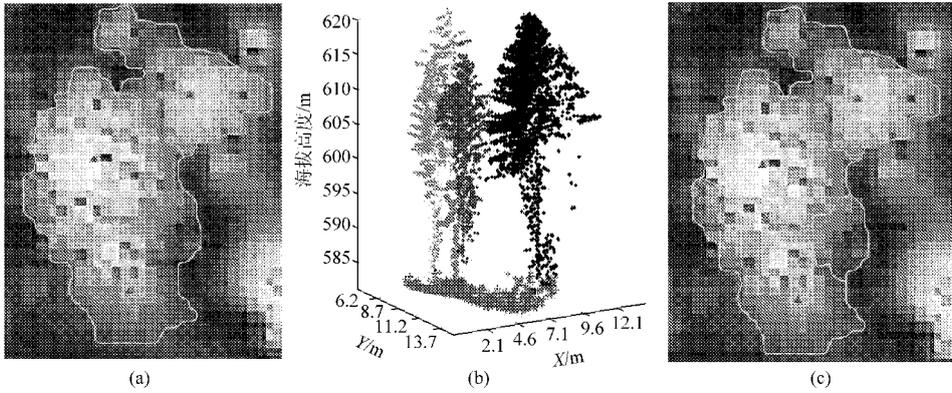


图2 三维空间单木点云分割结果

Fig. 2 Individual tree point cloud segmentation in 3-D space

(a) 标记控制分水岭方法提取树冠 (b) 单木点云分割 (c) 点云分割后提取的树冠

1.3.4 单木参数与生物量估测

在单木识别的基础上进行单木参数估测,可直接得到的有树高和冠幅,胸径和生物量需通过相关生长方程间接得到。在三维点云中通过计算单木点云最高点与地面点之间的距离直接得到树高 H (m)。在CHM上通过树冠边缘分割计算冠幅 D (m),通常有面积法和主方向法。

由于高郁闭林中单木树冠分割呈不规则形状,冠幅应分东南西北4个方向记录并计算

$$D = (R_E + R_S + R_W + R_N) / 4 \quad (4)$$

机载LiDAR数据很难直接估测单木胸径 φ (cm),通常采用树高和冠幅间接得到,二元回归方程可设为自然对数形式^[17]

$$\ln \varphi = \ln(\alpha_1 D) + \ln(\alpha_2 H) + \alpha_3 \quad (5)$$

式中 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ——胸径拟合参数

机载LiDAR数据不能直接估测生物量,只能通过单木的树高和胸径等参数间接估测生物量,参照文献[18]的方法,建立长白落叶松各器官生物量 η (kg)估测模型

$$\eta = \beta_1 (\varphi^2 H)^{\beta_2} \quad (6)$$

式中 β_1, β_2 为生物量拟合参数。地上生物量是树干生物量 η_s 、枝生物量 η_b 和叶生物量 η_l 的总和。采用SPSS 16.0软件分别对式(5)、(6)进行多元逐步回归分析,在样地范围内568株单木中随机选择70%的单木数据,即398株单木数据对应LiDAR数据构建模型,剩余的30%,即170株单木的数据进行模型评价分析。将验证样本代入模型中求出验证样本估测值并得到拟合精度和均方根误差,作进一步分析。

$$P_{re} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \text{abs} \left(T_i - \frac{P_i}{T_i} \right) \times 100\% \right) \quad (7)$$

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - P_i)^2} \quad (8)$$

式中 T_i ——实测数据 P_i ——估测数据
 P_{re} ——拟合精度
 E_{RMSE} ——均方根误差

2 结果与分析

2.1 单木识别率

平均单木识别率为83.63%(表2),其中第4和第5块样地(中龄林)的识别率最高,分别为88.46%和90.91%,第6和第7块(近熟林和成熟林)次之,分别为85.39%和84%,第1、2、3块样地(幼龄林)最低,分别为72.73%、79.57%、82.93%。长白落叶松中龄林单木较大,树干和枝叶匀称,且未完全郁闭,LiDAR点云分布较有规律,利用CHM和三维点云分割相结合的方法能有效提高单木识别率;近熟林和成熟林已郁闭,单木树冠彼此重叠,在CHM上的一个分割区域内可能包含多个单木,而幼龄林的单木通常较小,相应的LiDAR点云稀少,且容易与地面或其他灌木点云混淆,造成识别率较低。

2.2 树高、冠幅和胸径估测

单木树高估测值与实测值之间的决定系数为0.8732(图3)(X 表示实测值, Y 表示估测值,下同),平均拟合精度为88.34%,均方根误差为0.46m,表明LiDAR数据能较好估测出单木树高。较矮单木的估测值普遍偏低,主要原因是LiDAR点云密度不够大错失树冠顶部,而高大单木的树高顶部可由CHM邻域范围内求得,故估测相对准确。针对树高估测偏低的问题,主要可通过森林冠层激光雷达波形特征分析^[19]及其他遥感数据集成等手

表2 单木识别率及参数设定

Tab.2 Single tree recognition rate and parameter setting

样地 编号	样地 株数	识别 株数	识别 率/%	位置平均 误差/m	位置 标准差/m	参数				
						α /像素	$d_{(p,q)}$ /m	$Z_{(p,q)}$ /m	$M_{(p,q)}$ /m	$\phi_{(p,q)}$ /($^{\circ}$)
1	77	56	72.73	1.60	0.56	3×3	0.5	1	1.5	60~80
2	93	74	79.57	1.62	0.58	3×3	0.5	1	1.5	60~80
3	82	68	82.93	1.52	0.56	3×3	0.5	1	1.5	80~90
4	78	69	88.46	1.37	0.54	3×3	0.5	1	2	80~90
5	99	90	90.91	1.38	0.55	5×5	0.5	1	2	80~90
6	89	76	85.39	1.45	0.57	5×5	0.5	1	4	80~90
7	50	42	84.00	1.46	0.55	5×5	0.5	1	6	80~90
合计	568	475	83.63	1.52	0.56					

段来提高单木信息响应,以提高参数估测精度。

单木冠幅估测值与实测值之间的决定系数为 0.633 5(图 4),平均拟合精度为 83.46%,均方根误差为 0.82 m,造成冠幅的估测精度偏低的原因是 CHM 分辨率较低,树冠边缘不明显,特别是在郁闭林中优势树种与受压木交错生长,树冠彼此重叠,标记控制分水岭算法可能造成错分或漏分。

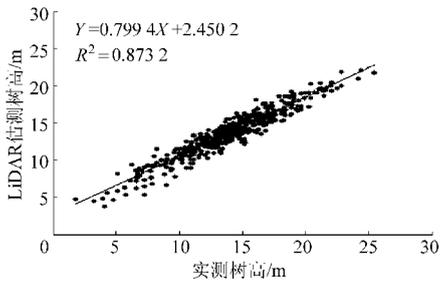


图3 树高估测值与实测值散点图

Fig.3 Scatter plots of height between estimated value and field value

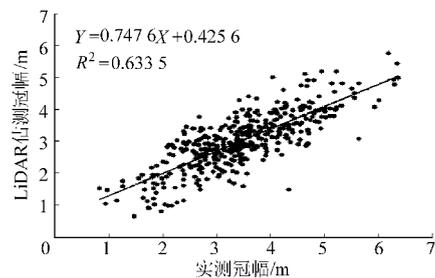


图4 冠幅估测值与实测值散点图

Fig.4 Scatter plots of crown diameter between estimated value and field value

将长白落叶松单木胸径与树高和冠幅进行拟合,拟合方程采用式(5),回归系数 α_1 、 α_2 、 α_3 分别为 0.534、0.632、0.136,均方根误差为 0.23 cm,决定系数 R^2 为 0.818 ($p < 0.001$)。从决定系数和标准误差来看,说明单木胸径与树高和冠幅呈显著正相关。其中 $\alpha_2 > \alpha_1$,说明胸径回归方程中树高对胸径估测值的贡献率大于冠幅的贡献率,这与其他研究成果基本一致^[17]。单木胸径估测值与实测值之

间的决定系数为 0.790 3(图 5),平均拟合精度为 85.11%,均方根误差为 2.01 cm,拟合线穿过左下角的散点,说明实测胸径的自然对数与冠幅和树高的自然对数之间回归关系对细小单木的胸径较敏感,这种回归关系也能解释散点图末端发散的原因。

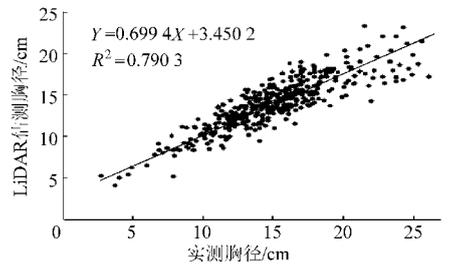


图5 胸径估测值与实测值散点图

Fig.5 Scatter plots of DBH between estimated value and field value

2.3 单木生物量估测

各器官生物量与树高和冠幅进行拟合(表 3),将各器官生物量求和得到单木地上生物量 $\eta = \eta_s + \eta_B + \eta_L$,估测值与实测值之间的决定系数为 0.799 2(图 6),平均拟合精度为 86.19%,表明 $\varphi^2 H$ 能较好反映单木生物量。由于树冠形状、大小和饱满程度对单木生物量影响较大,且受到地形和环境等影响,所以有些大的单木生物量变动范围也变大。

表3 单木生物量回归方程及参数设定

Tab.3 Regression equation and parameter setting of single tree biomass

回归方程	回归系数		均方根 误差/kg	R^2
	β_1	β_2		
$\eta_s = \beta_1 (\varphi^2 H)^{\beta_2}$	0.026	0.899 2	9.85	0.898 **
$\eta_B = \beta_1 (\varphi^2 H)^{\beta_2}$	0.019	0.800 1	2.54	0.854 **
$\eta_L = \beta_1 (\varphi^2 H)^{\beta_2}$	0.001 3	0.943 4	0.93	0.799 **

** $p < 0.001$

表 4 为利用表 3 中估测模型计算 7 块样地的长白落叶松单木各器官平均生物量,可见各器官生物量随林龄增大而增加,体现了该树种的速生性。幼龄林(样地 1、2 和 3)单木平均生物量为 25.12 kg,

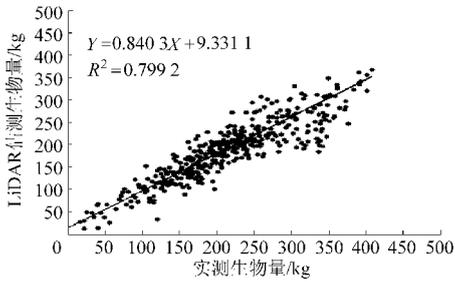


图6 单木生物量估测值与实测值散点图

Fig. 6 Scatter plots of individual tree biomass between estimated value and field value

中龄林(样地4和5)单木平均生物量为94.08 kg,近熟林(样地6)和成熟林(样地7)单木生物量为117.74 kg和279.33 kg。幼龄林未郁闭,枝叶得到充分生长,但因个体小,所以单木生物量不多。随着林分逐渐郁闭,长白落叶松个体也开始增大,树干积累超过枝叶增长。林龄为7到24年的林分中,单木生物量出现一个快速生产期,26到35年期间,林木

表4 不同样地长白落叶松平均单木生物量

Tab. 4 Average individual biomass of *Larix olgensis* at different sites

样地编号	林龄/d	单株生物量/kg			
		树干	枝	叶	合计
1	7	0.985	0.840	0.173	1.998
2	15	13.221	6.423	1.425	21.069
3	20	38.522	10.904	2.542	51.968
4	24	69.441	19.428	3.895	92.764
5	27	73.024	18.421	3.953	95.398
6	35	88.955	23.823	4.966	117.744
7	47	224.454	45.545	9.331	279.330

之间对日照的激烈竞争,导致树高生长加快,枝、叶生长受到抑制,因而这段时间单木生物量增长相对减慢。此后,个体进入成熟期,胸径不断加大,单木生物量持续增长。通过 $\beta_1 (\varphi^2 H)^{\beta_2}$ 形式的拟合方程反演出长白落叶松单木各器官的生物量,并对不同样地及不同林龄单木生物量进行了估算与分析,结果与王秀云^[20]研究成果相符合。

3 结束语

以黑龙江兴隆林场为研究区,采用小光斑LiDAR数据对人工林长白落叶松单木进行了参数估算及生物量反演。利用CHM树冠边缘提取和三维空间点云分割进行单木识别,在此基础上对单木的树高和冠幅进行估算,拟合精度分别为88.34%和83.46%,结果表明机载LiDAR估测的长白落叶松单木参数与实测数据具有较好的相关性,能满足实际应用要求。胸径是在树高和冠幅的基础上推导出来的,从拟合效果看,本文方法对小树胸径的估测也较为敏感。

现有识别方法比较适合长白落叶松这种树形有规律的树种,主要原因是其树冠顶部、树冠与树干比例、枝叶分布以及树干长势等先验知识比较容易确定。面对现实情况,设计既能满足实际要求又不增加参数复杂度的识别模型是个可探讨的问题。

实地研究工作时,一般都选取生长较好的林分作为调查对象,其结果往往高于实际的森林生物量,另外,不同季节LiDAR数据所反映的树冠信息也不同,因此研究对象的选择应考虑典型性和时效性。

参 考 文 献

- Nelson R F, Krabill W, Tonelli J. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24(2): 247~267.
- Maclean G A, Krabill W B. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne LiDAR system[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1986, 12(1): 7~18.
- Næsset E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1997, 52(2): 49~56.
- Popescu S C, Wynne R H, Nelson R H. 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(1~3): 71~95.
- Næsset E, Gobakken T, Holmgren J, et al. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2004, 19(6): 482~499.
- Reitberger J, Schnorr Cl, Krzystek P, et al. 3D segmentation of individual tree exploiting full waveform LiDAR data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(6): 561~574.
- Curtis Edson, Michael G Wing. Airborne light detection and ranging (LiDAR) for individual tree stem location, height, and biomass measurements[J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(11): 2494~2528.
- Kwak D A, Lee W K, Lee J H, et al. Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data[J]. *Journal of Forest Research*, 2007, 12(6): 425~434.
- 庞勇,赵峰,李增元,等. 机载激光雷达平均树高提取研究[J]. *遥感学报*, 2008, 12(1): 152~158.
Pang Yong, Zhao Feng, Li Zengyuan, et al. Forest height inversion using airborne lidar technology[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(1): 152~158. (in Chinese)

- 24 Thompson J A, Basista M J, Wu Wei, et al. Dual pre-motor contribution to songbird syllable variation [J]. *The Journal of Neuroscience*, 2011, 31(1): 322 ~ 330.
- 25 方峻, 徐诚. 决策树学习方法在参数设计中的应用[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(2): 127 ~ 131.
Fang Jun, Xu Cheng. Application research of decision tree learning in parametric design [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(2): 127 ~ 131. (in Chinese)
- 26 刘双喜, 张馨, 郑文秀, 等. 棉花异性纤维图像特征提取[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3): 158 ~ 162.
Liu Shuangxi, Zhang Xin, Zheng Wenxiu, et al. Image feature extraction of cotton foreign fiber [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3): 158 ~ 162. (in Chinese)
- 27 程克非, 程蕾, 黄永东. 基于 J48 决策树算法的水质评价方法[J]. *计算机工程*, 2012, 38(11): 264 ~ 267.
Cheng Kefei, Cheng Lei, Huang Yongdong. Water quality evaluation method based on J48 decision tree algorithm [J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(11): 264 ~ 267. (in Chinese)
- 28 Theodoridis S, Koutroumbas. 模式识别[M]. 4版. 李晶皎, 王爱侠, 王娇, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010: 146 ~ 150.
- 29 Grzesiak W, Zaborski D, Sablik P, et al. Detection of difficult conceptions in dairy cows using selected data mining methods [J]. *Animal Science Papers and Reports*, 2011, 29(4): 293 ~ 302.

~~~~~

(上接第 224 页)

- 10 刘峰, 龚健雅. 基于机载激光雷达技术的茂密林地单株木识别[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(7): 200 ~ 204.  
Liu Feng, Gong Jianya. Individual trees recognition in dense forest based on airborne lidar [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(7): 200 ~ 204. (in Chinese)
- 11 刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 机载 LiDAR 点云数据估测单株木生物量[J]. *高技术通讯*, 2010(7): 765 ~ 770.  
Liu Qingwang, Li Zengyuan, Chen Erxue, et al. Estimating biomass of individual trees using point cloud data of airborne LiDAR [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2010(7): 765 ~ 770. (in Chinese)
- 12 Hofton, Minster, Blair. Decomposition of laser altimeter waveforms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 38(4): 1 989 ~ 1 996.
- 13 Burman H. Laser strip adjustment for data calibration and verification [C] // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing (IAPRS)*, 2002, 34: A67 ~ A72.
- 14 Axellson P E. DEM Generation from laser scanner data using adaptive TIN models [J]. *IAPRS*, 2000, 33: B100 ~ B117.
- 15 Wang L, Gong P, Biging G S, et al. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70(3): 351 ~ 357.
- 16 Chen Q, Baldocchi D, Gong P, et al. Isolating individual trees in a Savanna Woodland using small footprint LiDAR data [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2006, 72(8): 923 ~ 932.
- 17 刘清旺. 机载激光雷达森林参数估算方法研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.  
Liu Qingwang. Study on the estimation method of forest parameters using airborne LiDAR [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009. (in Chinese)
- 18 陈传国, 朱俊凤. 东北主要林木生物量手册 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1989.
- 19 Liu Q W, Li Z Y, Chen E X, et al. Feature analysis of LiDAR waveforms from forest canopies [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 2011, 54: 1 206 ~ 1 214.
- 20 王秀云. 不同年龄长白落叶松人工林碳储量分布特征 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.  
Wang Xiuyun. Distribution of carbon storage for *Larix olgensis* plantation of different stand ages [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)