

基于无人机影像的银杏单木胸径预估方法

贾鹏刚^{1,2}, 夏 凯^{1,2}, 董 晨^{1,2}, 冯海林^{1,2}, 杨垠晖^{1,2}

(1. 浙江农林大学 信息工程学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省林业智能监测与信息技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311300)

摘要: 胸径是立木测定的基本因子, 自动获取胸径数据是准确高效计算森林蓄积量和生物量的关键。以银杏 *Ginkgo biloba* 为研究对象, 通过无人机获得影像数据, 利用运动恢复结构(SFM)方法生成数字表面模型和正射影像图, 进而提取单株银杏的树冠面积(A_c), 冠幅(W_c)及树高(H)。3 个参数分别与胸径(D_{BH})建立一元回归模型(A_c-D_{BH} , W_c-D_{BH} , $H-D_{BH}$), 二元回归模型($A_c&W_c-D_{BH}$, $A_c&H-D_{BH}$, $W_c&H-D_{BH}$)和三元回归模型($A_c&W_c&H-D_{BH}$)。52 组拟合样本的结果显示: $A_c&W_c&H-D_{BH}$ 模型的决定系数(R^2)最高为 0.825 0, 均方根误差(E_{RMS})最小为 0.959 1。19 组检测样本的结果显示: $A_c&W_c&H-D_{BH}$ 模型反演的胸径值误差率为 4.20%, 小于 A 类森林资源胸径因子允许的误差值(5%)。研究结果表明: 通过无人机采集树冠面积、冠幅和树高 3 个参数, 可计算得到较高精度的胸径值。图 2 表 4 参 17

关键词: 森林测计学; 无人机; 胸径; 树冠面积; 冠幅; 树高; 反演模型

中图分类号: S758.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2019)04-0757-07

Predicting DBH of a single *Ginkgo biloba* tree based on UAV images

JIA Penggang^{1,2}, XIA Kai^{1,2}, DONG Chen^{1,2}, FENG Hailin^{1,2}, YANG Yinhui^{1,2}

(1. School of Information Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Forestry Intelligent Monitoring and Information Technology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To efficiently calculate and predict forest stock and biomass, diameter at breast height (D_{BH}), a basic factor of a tree, was used in a regression model. In this study, *Ginkgo biloba* was used as the research object. Image data was obtained with an unmanned aerial vehicle (UAV), and using the method of structure from motion (SFM), a digital surface model and an orthophoto map were generated. Next, the canopy area (A_c), crown width (W_c) and tree height (H) of *G. biloba* were extracted. Then, one-way regression models (A_c-D_{BH} , W_c-D_{BH} , $H-D_{BH}$), binary regression models ($A_c&W_c-D_{BH}$, $A_c&H-D_{BH}$, $W_c&H-D_{BH}$), and a ternary regression model ($A_c&W_c&H-D_{BH}$) were established. Results of 52 groups of fitted samples showed that the $A_c&W_c&H-D_{BH}$ model had the highest coefficient of determination ($R^2 = 0.825\ 0$) and the lowest root mean square error ($E_{RMS} = 0.959\ 1$). Results of 19 groups of test samples showed that the D_{BH} error rate for the $A_c&W_c&H-D_{BH}$ model was 4.20%, which was less than the allowable error value (5%) for the A-type forest resource D_{BH} factor. Thus, a high precision D_{BH} value could be calculated using the three parameters of canopy area, crown width, and tree height, thereby providing a new idea for automated forest resource surveying and monitoring. [Ch, 2 fig. 4 tab. 17 ref.]

Key words: forest mensuration; unmanned aerial vehicle (UAV); diameter at breast height (DBH); crown area;

收稿日期: 2018-08-29; 修回日期: 2018-12-03

基金项目: 浙江省自然科学基金委员会-青山湖科技城管委会联合基金项目(LQY18C160002); 浙江省科技重点研发计划资助项目(2018C02013)

作者简介: 贾鹏刚, 从事农业信息化研究。E-mail: jiapenggang@126.com。通信作者: 夏凯, 副教授, 从事地理信息系统、数据分析与数据可视化研究。E-mail: xiakai@zafu.edu.cn

crown width; height; inversion model

胸径(D_{BH}), 树高(H), 树冠面积(即树冠投影面积 $^{[1]}A_c$)及冠幅(W_c)是进行森林资源清查的重要参数, 是计算森林生物量、蓄积量的基础。传统森林资源调查主要通过人工检尺获得胸径值, 这种方法具有成本高、效率低、数据滞后等弊端。遥感技术和激光雷达技术的发展与完善为森林信息的提取评估提供了新的方法^[2]。研究人员可以利用光检测和激光测量来估算林分层次上个体树的信息^[3], 新设备如激光测距仪和智能手机^[4]的使用提高了数据收集的效率和精度。步国超等^[5]为了自动化地、准确地从单站地面激光雷达数据中提取一定范围内的树木胸径, 提出一种基于点云切片的圆形-椭圆自适应胸径估计方法。该方法可以快速有效地进行自适应胸径估计。国外学者较早通过建立线性或非线性预估模型的方法来反演单木参数^[6-8], 如 DE'ATH^[9]通过建立树高一胸径回归方程预测不同样地树高。近年来, 随着森林价值的不断挖掘, 建立单木树冠面积、树高等因子与胸径的反演模型成为国内学者的研究重点。王冬至等^[10]建立了树高一胸径生长关系非线性混合效应模型, 为研究混交林多树种生长规律提供参考依据。董晨等^[11]以杉木 *Cunninghamia lanceolata* 为研究对象, 使用参数预估法构造胸径和树高的参数化预估模型。何游云等^[12]采用人机交互的方式提取单木树冠面积数据, 并结合野外实测的胸径, 建立树冠面积-胸径估算模型。结果显示: 两者存在较好的非线性相关关系。无人机(UAV)是利用无线电遥控设备和自备的程序控制装置操纵的不载人飞行器, 具有体积小、速度快、使用方便等优势, 便于进行跟踪、定位、遥测和数字传输等工作, 成为传统航空摄影测量手段的有效补充^[13-14]。由于无人机可以携带高分辨率相机, 能够满足森林资源调查中高空间分辨率的要求, 学者开始关注利用无人机获取具体林木信息以及森林信息量化等方面的工作。无人机遥感的影像分辨率大大超越了卫星遥感, 在获取单木参数上具有天然优势, 相关研究不断涌现。HERNANDEZ 等^[15]基于无人机影像采用混合像元法估测出了单木树高、冠幅等参数; DEMETRIOS 等^[16]使用无人机搭载的激光雷达对树冠覆盖度高的雨林进行树高测量。刘文萍等^[17]通过拟合无人机正射图像中的单木树冠面积与胸径的关系预测树木胸径值。前述研究表明: 以树高, 冠幅等参数反演胸径的方法基本成立, 但传统手工量测提取单木参数的方法工作量大, 难以应用于实践, 而目前基于无人机影像的胸径预测研究较少, 也不够全面。基于此, 本研究以银杏 *Ginkgo biloba* 为研究对象, 采用无人机获取样地影像数据, 以树冠面积, 冠幅和树高为自变量分别建立一元回归模型、二元回归模型和三元回归模型, 目的是证明无人机遥感影像数据可用于胸径预估, 并探索最佳的反演模型, 推进森林资源调查研究的自动化。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省杭州市浙江农林大学校园内, 30.25°~30.26°N, 119.72°~119.73°E, 亚热带季风气候, 四季分明, 夏季湿润多雨, 冬季干燥少雨; 校园内有 300 余种乔木, 以亚热带常绿阔叶林为主。从谷歌地球(Google Earth)上截取研究区范围, 共选取 4 块银杏样地作为试验区, 每块样地为 15 m × 150 m。其中样地 1, 样地 2 和样地 3 用来做模型拟合, 共 52 组有效数据; 样地 4 用来做模型反演精度检验, 共 19 组有效数据。

1.2 无人机系统

本研究所使用的无人机为大疆悟 INSPIRE 2 系列, 主要由 4 部分组成: 飞行器、遥控器、云台相机、电源。飞行器的型号为 T650, 质量为 3 290 g(含 2 块电池), 适用工作环境温度: -10~40 °C, 双电池系统可实现最长飞行时间约 25 min。无人机搭载的云台相机型号为大疆 ZenmuseX5S, 镜头规格为 DJI MFT 15 mm, 有效像素为 2 080 万(表 1)。在飞行中搭配 DJI GO PRO 软件使用, 主要是用于样地飞行路线规划。

1.3 技术路线

本研究基于无人机遥感影像研究单木胸径反演模型。具体流程为: 首先利用无人机进行样地影像的拍摄, 同时实测样地内单木的胸径; 利用运动恢复结构(structure from motion, SFM)方法进行三维重建并生成数字表面模型(digital surface model, DSM)和正射影像图(digital orthophoto map, DOM); 利用

表 1 大疆悟 INSPIRE 2 无人机参数

Table 1 Dajiang Wu INSPIRE 2 UAV parameters

指标		参数
飞行器	类型	四轴飞行器
	飞行载质量	4 kg
	飞行速度	最大水平飞行速度：108 km·h ⁻¹
	飞行高度	最大起飞海拔高度：2 500 m
遥控器	工作频率	2.400~2.483 GHz；5.725~5.850 GHz
	控制距离	2.4 GHz：7.0 km(FCC)；3.5 km(CE)；4.0 km(SRRC)
		5.8 GHz：7.0 km(FCC)；2.0 km(CE)；5.0 km(SRRC)
云台相机	型号	大疆 ZenmuseX5S
	外形尺寸	140 mm × 98 mm × 132 mm
	产品质量	461 g
	有效像素	2 080 万
	图像分辨率	4:3 5 280 × 3 956
		16:9 5 280 × 2 970
	可控转动范围	俯仰：30°~90°

ENVI Lidar 读取数字表面模型点云数据并提取树高；通过 Arc GIS 10.1 获得树冠的面积值和冠幅值，进而根据胸径、树高、冠幅和冠幅面积 4 个林木因子，分别建立一元回归模型(A_c-D_{BH} , W_c-D_{BH} , $H-D_{BH}$)，二元回归模型($A_c&W_c-D_{BH}$, $A_c&H-D_{BH}$, $W_c&H-D_{BH}$)和三元回归模型($A_c&W_c&H-D_{BH}$)，最后通过误差检验获得最佳反演模型。

2 数据采集

数据采集时间为 2018 年 5 月 20 日中午，天气晴朗、风速小，适合无人机作业，正午时分可以保证树冠的阴影面积小，对后期树冠面积的提取影响小。前期试验结果表明：飞行高度和飞行速度是影响无人机遥感影像成像效果的主要因素，当无人机的飞行高度大于 50 m 或者飞行速度大于 3 m·s⁻¹ 时，生成的正射影像图中树冠的成像效果较差。为了提高成像效果，本研究中设置飞行高度为 40 m，速度为 2 m·s⁻¹，相机垂直于地面，旁向重叠率为 85%，航向重叠率为 85%，最短拍照间隔为 2 s。

本研究 4 块样地共采集无人机遥感影像 2 500 余张，利用无人机数据处理软件 Pix4D mapper 生成 4 个样地的数字表面模型(DSM)和正射影像图(DOM)。将样地正射影像图导入 Arc GIS 10.1 后，利用 Spatial Analyst Tools 进行树冠面积值和冠幅值提取。冠幅为东西冠幅(W_{CEW})和南北冠幅(W_{CNS})的平均值，即 $W_c=(W_{CEW}+W_{CNS})/2$ 。

Pix4D 软件在生成样地数字表面模型的同时生成了样地的点云数据集，Envi Lidar 软件进一步基于点云数据实现银杏树的三维重建，进而提取单木高度值，主要步骤包括：加载点云数据；调整滤波框的位置及大小来选定目标物；去噪声处理后，点云数据最高点读数即树高(图 1)。

本研究共提取了 71 株银杏的树冠面积、冠幅和树高值，并按照《中国林业辞典》实测了每株银杏的胸径和树高。由表 2 可知：(1)提取的数据中，树冠面积平均为 12.97 m²，冠幅平均为 4.28 m，树高平均为 9.46 m，胸径平均为 18.54 cm；(2)实测树高平均为 8.73 m，与提取的树高值误差率为 9.86%，满足 B 类森林资源树高因子误差值规定(10%)，提取结果良好。

3 结果与分析

3.1 相关性分析

本研究旨在构建以胸径为因变量的反演模型。为了在模型拟合中能明确自变量，首先对 52 组拟合样本中的 4 项林分因子进行皮尔森相关性分析。结果表明：树冠面积、冠幅和树高与胸径值的皮尔森相关系数分别为 0.862，0.747 和 0.749，且显著性值都小于 0.05，说明胸径与树冠面积、冠幅、树高因子

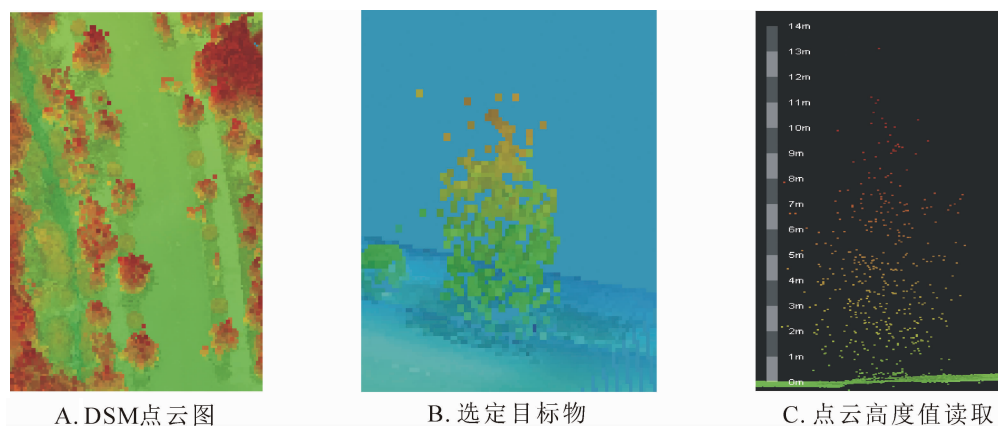


图1 树高提取图

Figure 1 Tree height extraction

表2 银杏基本数据统计表

Table 2 Ginkgo basic data statistics

项目	树冠面积(提取)/m ²	冠幅(提取)/m	树高(提取)/m	树高(实测)/m	胸径(实测)/cm
最小值	4.08	3.02	4.8	5.2	13.8
最大值	21.78	6.25	13.9	12.3	23.1
平均值	12.97	4.28	9.5	8.7	18.5
标准差	4.84	0.74	1.81	1.39	2.08

均具有较强的相关性,这3项因子均可作为自变量进行模型构建。

3.2 模型拟合

在相关性研究的基础上,对52组数据通过Matlab软件进行模型拟合,分别构建了一元回归模型、二元回归模型和三元回归模型。在一元回归模型中采用指数函数、幂函数、一次多项式函数、二次多项式函数拟合;二元回归模型中采用一次多项式函数、二次多项式函数拟合;三元回归模型采用一次多项式函数拟合。

模型的拟合效果采用决定系数(R^2)和均方根误差(E_{RMS})2个指标进行评价。决定系数是用来表征方程对观测值的拟合程度,均方根误差是用拟合值与实测值的偏差来评价模型的回归效果,决定系数越高,拟合效果越好;均方根误差越小越好。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}; \quad (1)$$

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}}。 \quad (2)$$

式(1)~(2)中: y_i 为实测值, $\hat{y}_i$ 为模型拟合值, $\bar{y}$ 为实测平均值。

根据决定系数最大、均方根误差最小为最优模型原则,由表3可知:(1)一元回归模型中, A_c-D_{BH} 模型的拟合效果最好,其中, A_c-D_{BH} 二次多项式模型决定系数最高,为0.7618,均方根误差(E_{RMS})最小,为1.1000;(2)二元回归模型中, $W_c \& H-D_{\text{BH}}$ 模型的拟合效果最好,其中, $W_c \& H-D_{\text{BH}}$ 二次多项式模型决定系数最高,为0.8134,均方根误差最小,为1.0740;(3)三元回归模型中, $A_c \& W_c \& H-D_{\text{BH}}$ 模型的决定系数为0.8250,均方根误差为0.9591;(4)总体来看,三元回归模型的决定系数最高,均方根误差最小,拟合效果优于其他模型。

3.3 精度检验

由拟合效果可知:一元模型和二元模型中,二次多项式方程的拟合效果均最优(决定系数最大,均方根误差最小),因此将19组检测样本数据分别带入一元回归模型(以二次多项式为例)、二元回归模型

表 3 模型拟合结果表

Table 3 Model fitting result

模型	类型	表达式	决定系数 (R^2)	均方根误差 (E_{RMS})
一元模型	A_c-D_{BH}	指数函数 $D_{\text{BH}}=14.11e^{(0.020\ 89A_c)}$	0.729 9	1.168 0
		幂函数 $D_{\text{BH}}=9.423A_c^{0.270\ 4}$	0.758 7	1.100 0
		一次多项式 $D_{\text{BH}}=0.401\ 7A_c+13.37$	0.743 2	1.140 0
		二次多项式 $D_{\text{BH}}=-0.013\ 42A_c^2+0.769\ 6A_c+11.15$	0.761 8	1.100 0
	$H-D_{\text{BH}}$	指数函数 $D_{\text{BH}}=12.56e^{(0.042\ 03H)}$	0.546 1	1.514 0
		幂函数 $D_{\text{BH}}=7.615H^{0.403\ 7}$	0.569 2	1.480 0
		一次多项式 $D_{\text{BH}}=0.817\ 3H+11.02$	0.560 4	1.490 0
		二次多项式 $D_{\text{BH}}=-0.043\ 95H^2+1.66H+7.16$	0.575 3	1.480 0
	W_c-D_{BH}	指数函数 $D_{\text{BH}}=11.78e^{(0.106\ 2W_c)}$	0.534 1	1.534 0
		幂函数 $D_{\text{BH}}=8.98W_c^{0.503\ 8}$	0.579 3	1.458 0
		一次多项式 $D_{\text{BH}}=2.141W_c+9.448$	0.557 8	1.495 0
		二次多项式 $D_{\text{BH}}=-0.928\ 1W_c^2+10.68W_c-9.583$	0.648 9	1.354 0
二元模型	$A_c\&W_c-D_{\text{BH}}$	一次多项式 $D_{\text{BH}}=0.613A_c-1.389W_c+16.58$	0.772 3	1.084 0
		二次多项式 $D_{\text{BH}}=-0.004\ 122A_c^2+0.818\ 8A_c-0.631\ 1W_c-0.031\ 71A_cW_c+13.31$	0.780 2	1.087 0
		$D_{\text{BH}}=0.046\ 69W_c^2-0.566\ 4W_c+0.841\ 3A_c-0.063\ 62A_cW_c+12.96$	0.780 1	1.087 0
	$W_c\&H-D_{\text{BH}}$	一次多项式 $D_{\text{BH}}=0.447\ 5H+2.114W_c+5.624$	0.807 6	1.069 0
		二次多项式 $D_{\text{BH}}=-0.025\ 26H^2+1.117H+2.519W_c-0.048\ 53HW_c+1.912$	0.813 4	1.074 0
		$D_{\text{BH}}=0.098\ 34W_c^2+2.621W_c+1.062H-0.149W_cH+1.929$	0.812 3	1.077 0
	$A_c\&H-D_{\text{BH}}$	一次多项式 $D_{\text{BH}}=0.310\ 7A_c+0.3H+11.75$	0.780 6	1.064 0
		二次多项式 $D_{\text{BH}}=-0.005\ 197A_c^2+0.619\ 1A_c+0.517\ 8H-0.017\ 21A_cH+8.909$	0.795 1	1.050 0
		$D_{\text{BH}}=0.041\ 04H^2+0.132H+0.762\ 5A_c-0.047\ 16HA_c+9.747$	0.796 7	1.045 0
	三元模型 $A_c\&W_c\&H-D_{\text{BH}}$ 一次多项式 $D_{\text{BH}}=0.55A_c-1.695W_c+0.374H+15.226$		0.825 0	0.959 1

说明： A_c 为树冠面积(m^2)， W_c 为冠幅(m)， H 为树高(m)

(以二次多项式为例)和三元回归模型(以一次多项式为例)中反演胸径值，并与实测胸径值进行比较，计算误差。检验指标计算如式(3)和式(4)所示，检验结果如表 4 所示：

$$\varepsilon=x-a; \tag{3}$$

$$\delta=(\varepsilon/a)\times100\%。 \tag{4}$$

式(3)~(4)中： ε 为误差值； x 为反演值； a 为实测值； δ 为误差率。

表 4 模型精度检验表

Table 4 Model accuracy analysis

模型	表达式	平均误差率/%
一元模型	A_c-D_{BH} $D_{\text{BH}}=-0.0134\ 2A_c^2+0.769\ 6A_c+11.15$	5.34
	$H-D_{\text{BH}}$ $D_{\text{BH}}=-0.043\ 95H^2+1.66H+7.16$	7.40
	W_c-D_{BH} $D_{\text{BH}}=-0.928\ 1W_c^2+10.68W_c-9.583$	6.74
二元模型	$A_c\&W_c-D_{\text{BH}}$ $D_{\text{BH}}=-0.004\ 122A_c^2+0.818\ 8A_c-0.631\ 1W_c-0.031\ 71A_cW_c+13.31$	4.90
	$W_c\&H-D_{\text{BH}}$ $D_{\text{BH}}=-0.025\ 26H^2+1.117H+2.519W_c-0.048\ 53HW_c+1.912$	4.95
	$A_c\&H-D_{\text{BH}}$ $D_{\text{BH}}=0.041\ 04H^2+0.132H+0.762\ 5A_c-0.047\ 16HA_c+9.747$	4.27
三元模型	$A_c\&W_c\&H-D_{\text{BH}}$ $D_{\text{BH}}=0.55A_c-1.695W_c+0.374H+15.226$	4.20

由表 4 可知：(1)一元二次回归模型中， A_c-D_{BH} 模型的误差率最小为 5.34%；(2)二元二次回归模型中， $A_c\&H-D_{\text{BH}}$ 模型的误差率最小为 4.27%；(3)三元一次回归模型中， $A_c\&W_c\&H-D_{\text{BH}}$ 模型的误差率为 4.20%，满足 A 类森林资源胸径因子误差值小于 5%的规定；(4)随着模型自变量的增加，模型的精度越

高,模型的误差率越小。

相比较刘文萍等^[17]基于无人机的单因子模型(A_c-D_{BH}),本研究增加了树高和冠幅2个因子来建立胸径反演模型,也采集了更多的样本进行模型拟合和检验。对比所建立的一元模型、二元模型和三元模型可知:随着自变量的增多,决定系数逐渐提高,均方根误差逐渐减少。由图2可知:三元模型 $A_c&W_c&H-D_{BH}$ 的19组检验数据的误差最小为0.10 cm,最大为1.68 cm,平均误差为0.76 cm,是最优模型。

4 结论

本研究以银杏为研究对象,通过无人机获取影像数据并提取树冠面积、冠幅和树高3个参数,与胸径建立了多个反演模型。其中以冠幅、树冠面积和树高为自变量反演胸径的三元一次模型的决定系数为0.825 0,均方根误差为0.959 1,19组验证数据的平均误差值为0.76 cm,误差率为4.2%,是最优的模型,满足A类森林资源调查胸径因子误差小于5%的规定,可以应用到森林资源调查的实践中。另一方面,二元二次模型 $W_c&H-D_{BH}$ 的拟合精度较高,反演误差率较低,在实际应用中,可根据客观条件选择合适的模型。本研究证明了无人机遥感影像数据可以用于胸径预估,并找到了单木银杏胸径的最佳反演模型。下一步的工作是通过编程实现树冠面积、冠幅和树高值的提取,进而推动森林资源调查的自动化。

由于本研究是在特定立地条件下进行的,而复杂地形(例如山区)或者具体密集林分地区可能会在一定程度上影响实验结果,如何提高复杂地形或者具体密集林分地区单木信息的提取精度是需要进一步解决的问题。同时也要指出,本研究仅针对较小区域内的一个树种进行多元胸径反演模型研究,不同区域或者不同树种可能会影响研究结果。

5 参考文献

- [1] 徐伟恒,冯仲科,苏志芳,等.1种基于三维激光点云数据的单木树冠投影面积和树冠体积自动提取算法[J].光谱学与光谱分析,2014,34(2):465-471.
XU Weiheng, FENG Zhongke, SU Zhifang, et al. An automatic extraction algorithm for individual tree crown projection area and volume based on 3D point cloud data [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2014, 34(2): 465-471.
- [2] PANAGIOTIDIS D, ABDOLLAHNEJAD A, SUROVY P. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery [J]. *Int J Remote Sensing*, 2017, 38(8/10): 2392-2410.
- [3] BRANDTBERG T, WARNER T A, LANDENBERGER R E, et al. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density LiDAR data from the eastern deciduous forest in North America [J]. *Remote Sensing Environ*, 2003, 85(3): 290-303.
- [4] VASTARANTA M, LATORRE E G, LUOMA V, et al. Evaluation of a Smartphone APP for forest sample plot measurements [J]. *Forests*, 2015, 6(4): 1179-1194.
- [5] 步国超,汪沛.基于单站地面激光雷达数据的自适应胸径估计方法[J].激光与光电子学进展,2016,53(8):278-286.
BU Guochao, WANG Pei. Adaptive estimation method for diameter at breast height based on terrestrial laser scanning [J]. *Laser Optoelectronics Prog*, 2016, 53(8): 278-286.
- [6] HUANG Shaoming, TITUS S J, WIENS D P. Comparison of nonlinear height diameter functions for major Alberta tree species [J]. *Can J For Res*, 1992, 22(9): 1297-1304.
- [7] SOARES P, TOMÉ M. Height-diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal [J]. *For Ecol Manag*, 2002, 166(1): 99-109.
- [8] TRINCADO G, VANDERSCHAAF C L, BURKHART H E. Regional mixed-effects height-diameter models for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations [J]. *Eur J For Res*, 2007, 126(2): 253-262.
- [9] DE'ATH G. Multivariate regression trees: a new technique for modeling species-environment relationships [J]. *Ecol-*

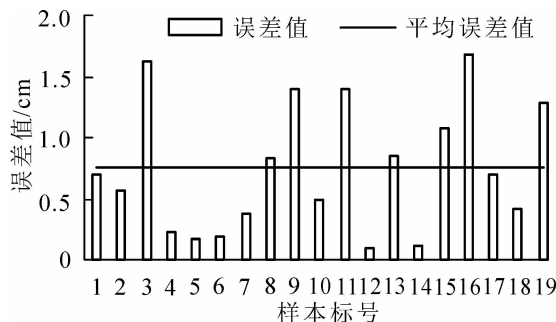


图2 $A_c&W_c&H-D_{BH}$ 模型误差值分析

Figure 2 Accuracy analysis of $A_c&W_c&H-D_{BH}$ Model

- ogy, **83**(4): 1105 – 1117.
- [10] 王冬至, 张冬燕, 张志东, 等. 基于非线性混合模型的针阔叶混交林树高与胸径关系[J]. 林业科学, 2016, **52**(1): 30 – 36.
- WANG Dongzhi, ZHANG Dongyan, ZHANG Zhidong, *et al.* Height-diameter relationship for conifer mixed forest based on nonlinear mixed-effects model [J]. *Sci Silv Sin*, 2016, **52**(1): 30 – 36.
- [11] 董晨, 吴保国, 张翰. 基于冠幅的杉木人工林胸径和树高参数化预估模型[J]. 北京林业大学学报, 2016, **38**(3): 55 – 63.
- DONG Chen, WU Baoguo, ZHANG Han. Parametric prediction models of DBH and height for *Cunninghamia lanceolata* plantation based on crown width [J]. *J Beijing For Univ*, 2016, **38**(3): 55 – 63.
- [12] 何游云, 张玉波, 李俊清, 等. 利用无人机遥感测定岷江冷杉单木树干生物量[J]. 北京林业大学学报, 2016, **38**(5): 42 – 49.
- HE Youyun, ZHANG Yubo, LI Junqing, *et al.* Estimation of stem biomass of individual *Abies faxoniana* through unmanned aerial vehicle remote sensing [J]. *J Beijing For Univ*, 2016, **38**(5): 42 – 49.
- [13] PENA J M, TORRES-SÁNCHEZ J, SERRANO-PÉREZ A, *et al.* Quantifying efficacy and limits of unmanned aerial vehicle (UAV) technology for weed seedling detection as affected by sensor resolution [J]. *Sensors*, 2015, **15**(3): 5609 – 5626.
- [14] 毕凯, 李英成, 丁晓波, 等. 轻小型无人机航摄技术现状及发展趋势[J]. 测绘通报, 2015(3): 27 – 31.
- BI Kai, LI Yingcheng, DING Xiaobo, *et al.* Aerial photogrammetric technology of light small UAV: status and trend of development [J]. *Bull Surv Mapp*, 2015(3): 27 – 31, 48.
- [15] HERNANDEZ J G, FERREIRO E G, SARMENTO A, *et al.* Using high resolution UAV imagery to estimate tree variables in *Pinus pinea* plantation in Portugal [J]. *For Syst*, 2016, **25**(2): eSC09. doi: 10.5424/fs/2016252-08895.
- [16] DEMETRIOS G, JEREMYS F, VICENTES M. Challenges to estimating tree height via LiDAR in closed-canopy forests: a parable from western Oregon [J]. *For Sci*, 2010, **56**(2): 139 – 155.
- [17] 刘文萍, 仲亭玉, 宋以宁. 基于无人机图像分析的树木胸径预测[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(21): 99 – 104.
- LIU Wenping, ZHONG Tingyu, SONG Yining. Prediction of trees diameter at breast height based on unmanned aerial vehicle image analysis [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2017, **33**(21): 99 – 104.