

## 基于无人机可见光遥感的单木树高提取方法研究

白明雄, 张 超, 陈 棋, 王 娟, 李华玉, 史小蓉, 田湘云, 张玉薇

(西南林业大学 林学院, 昆明 650224)

**摘要:**利用目前流行的高分辨率可见光无人机遥感影像生成树木冠层高度模型, 采用分水岭分割算法提取单木树高的研究具有重要理论和实践意义。以位于云南省富民县的天然云南松纯林为研究对象, 通过大疆 Phantom 4 Pro 无人机获取低空可见光遥感影像, 利用 Pix4D Mapper 对无人机影像进行预处理及三维重建, 生成三维点云, 利用 LiDAR360 处理三维点云, 构建 DSM, DEM 并生成 CHM; 采用分水岭分割算法对不同郁闭度条件下获得的 CHM 进行单木分割及树高提取, 对提取结果进行精度评价。结果表明: 分水岭分割算法能够准确分割 CHM, 利用无人机可见光遥感影像进行单木树高提取是可行的; 将基于无人机可见光影像提取的树高值与野外实地调查得到的树高值进行对比,  $R^2$  为 0.893,  $RMSE$  为 1.23m, 估测精度为 87.58%; 同时, 林分郁闭度会对单木树高估测产生影响, 根据不同郁闭度条件下提取的 3 组样木树高与实地测量树高的决定系数 ( $R^2$ ) 分别是 0.857, 0.939 和 0.921,  $RMSE$  分别为 1.450, 1.097, 0.896m, 在低郁闭度林分内树高估测的精度显著高于高郁闭度林分。

**关键词:**树高提取; 无人机; 三维点云; 郁闭度

中图分类号: S771.5 文献标识码: A 文章编号: 1002-6622(2021)01-0164-09

DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2021.01.021

## Study on the Extraction of Individual Tree Height Based on UAV Visual Spectrum Remote Sensing

BAI Mingxiong, ZHANG Chao, CHEN Qi, WANG Juan, LI Huayu,

SHI Xiaorong, TIAN Xianyun, ZHANG Yuwei

(College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**Abstract:** The feasibility of using the watershed segmentation algorithm to extract tree height based on the canopy height model (CHM) generated by high-resolution imagery of UAV was discussed. Tree height data were obtained from *Pinus yunnanensis* Franch in Fuming County of Yunnan Province. Remote sensing imagery in the study area of the near ground was obtained through the DJI Phantom 4 Pro drone remote sensing system. Pix4D Mapper software was used to preprocess UAV images and reconstruct the research area in three dimensions and 3D point cloud. LiDAR360 software was used to process 3D point cloud and build a DSM (Digital Surface Model), DEM (Digital elevation Model) and CHM were generated. Then, for

收稿日期: 2020-11-06; 修回日期: 2020-12-25

基金项目: 云南省“万人计划”人才培养项目 (YNWR-QNBJ-2018-334)

作者简介: 白明雄 (1995-), 男, 云南玉溪人, 在读硕士, 从事森林经理学研究。Email: 1957701738@qq.com

通讯作者: 张超 (1980-), 男, 河北唐山人, 教授, 博士, 从事森林经理学研究。Email: zhchgis@126.com

different canopy density of CHM, the watershed segmentation algorithm was used to divide and extract tree height. The accuracies of the results were elevated. Results showed that CHM could be accurately divided by the watershed segmentation algorithm and it was feasible that UAV imagery was used to extract the height of *Pinus yunnanensis* Franch. The comparative analysis of the data on the height of trees acquired from the UAV image and the field measurement shows that the  $R^2$ ,  $RMSE$ ,  $rRMSE$  is 0.893, 1.23m, 12.42%. At the same time, the measurement of tree height was affected by canopy density with the  $R^2$  and root mean squared error ( $RMSE$ ) value for the least density being  $R^2 = 0.939$ ,  $RMSE = 1.097m$ , for the next one was  $R^2 = 0.921$ ,  $RMSE = 0.896m$ , and for the largest was  $R^2 = 0.857$ ,  $RMSE = 1.450m$ . The accuracy of the measured height of the larger density was higher than that of the smaller density.

**Key words:** individual tree height, extraction, 3D point cloud, visual spectrum remote sensing, UAV

林分平均高是评价森林立地质量和林木生长状况、划分林层的重要依据,是反映林分结构特征的重要因子之一,亦是森林资源调查的一项重要指标。在森林调查及经营管理工作中,单木树高的测定与立木材积和材积生长率的确定密切相关。利用林分中若干林木的树高测量值,采用测树学中的林分平均高计算公式,即可计算林分平均高<sup>[1-2]</sup>。

目前,单木树高的测量方法主要可分为传统地面测量和遥感估测二类方法。传统地面测量方法是森林调查工作中最为常用的方法,主要包括目测法<sup>[3]</sup>或借助经纬仪<sup>[4]</sup>、全站仪等<sup>[5]</sup>工具对活立木单木进行树高测定。传统地面测量方法因工作量大、调查效率低、易受人为、地形因素及仪器设备等影响,树高测量精度会产生一定的不确定性<sup>[6]</sup>。近年来,遥感技术(特别是激光雷达技术)已成为森林资源调查领域的热门方法,被越来越多地应用于林分调查因子的估测研究中,如,王涛等<sup>[7]</sup>通过机载激光雷达点云数据,研究冠层高度模型(CHM)并从中提取单木参数(树高和冠幅);吴宾等<sup>[8]</sup>基于车载激光扫描点云数据,提出一种利用分层网格点密度的单木信息提取方法,并获取了单木树高信息;Selkowitz等<sup>[9]</sup>通过融合多角度和多光谱激光雷达数据,对林分内的树木进行三维模型重建,提取树高并绘制林木冠高图;杨婷<sup>[10]</sup>同时采用星载激光雷达GLAS和光学MODIS数据,建立树木高度反演模型,结果表明该反演模型精度较高。利用激光雷达技术可获取较高精度的树高参数信息,但使用成本高、技术复杂,对大尺度的林分参数调查存在一定

偏差,制约了该技术在林业领域的推广应用。

近年来,随着轻小型无人机遥感技术的快速发展,在森林遥感估测领域已得到广泛应用。无人机可见光遥感因其具有自动化、智能化、高时效、低成本及操作便捷灵活等特点,能够在很大程度上弥补传统航天和航空遥感估测树高的不足<sup>[11-16]</sup>。刘晓农等<sup>[17]</sup>以无人机高分影像为数据源,通过多尺度分割方法进行杉木人工林冠幅提取和树高反演;王彬等<sup>[18]</sup>采用无人3D摄影测量技术对云南大学校区内的雪松林分高度进行估测,其测量精度较高;杨坤等<sup>[19]</sup>利用Pix4D Mapper处理高分辨率无人机可见光影像,通过最大类间方差法分割生成单木点云和地面点云,提取单木树高信息,树木高度的提取精度相对较高为93.7%;刘江俊等<sup>[20]</sup>基于无人机可见光影像生成的冠层高度模型,采用局部最大值算法进行树顶点和单木树高提取,其研究的树高提取精度为89.3%;谢巧雅等<sup>[21]</sup>利用无人机遥感系统获取研究区遥感影像,通过自动化三维重构方法构建了杉木人工林数字表面模型、数字高程模型,基于2个模型实现杉木树高的提取,树高估测精度达到90.8%。

上述研究通常以无人机可见光影像或经过影像后处理所得的点云数据为基础数据源,分别利用不同方法构建研究区林分的冠层高度模型,进而估测树高。而综合利用影像数据和点云数据来提取树高的研究相对较少,本研究利用无人机影像及其生成的三维点云数据构建冠层高度模型,利用分水岭分割法进一步对CHM分割并提取林分高度。云

南省拥有丰富的云南松林资源<sup>[22]</sup>,是云南植被资源中重要的针叶树种之一,快速、准确地获取云南松林的高度信息对估算蓄积量和生物量具有重要意义。为此,本研究选取滇中地区典型天然云南松纯林为研究对象,以高分辨率无人机可见光影像为数据,使用分水岭分割算法对云南松单木进行树高提取,旨在为今后单镜头无人机可见光遥感在林业调查中的应用提供方法借鉴。

## 1 研究区与数据获取

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市富民县罗免乡黄草坝,介于北纬  $25^{\circ}22'39'' \sim 25^{\circ}23'32''$ ,东经  $102^{\circ}28'36'' \sim 102^{\circ}29'31''$  之间,总面积约  $150 \text{ hm}^2$ ,最高海拔  $2\,306 \text{ m}$ ,最低海拔  $2\,019 \text{ m}$ 。地势较为平坦,主要树种为天然云南松(*Pinus yunnanensis* Franch)纯林,林分郁闭度较低,多数单木树冠间不相连,视线通透良好,上方无遮挡。

### 1.2 标准地调查

2019 年 7 月对研究区内的天然云南松纯林开展了标准地调查。现地选取位于缓坡地形的天然云南松林典型地块设置了 6 个标准地,标准地设置为  $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ ,共调查云南松样木 96 株,实测了每木胸径、树高、长冠幅、短冠幅,并利用罗盘仪对每木进行了定位。

### 1.3 无人机影像获取

利用大疆 Phantom 4 Pro 四旋翼无人机飞行器作为飞行平台,搭载单镜头可见光传感器,以 DJI GS Pro 作为地面站系统进行外业影像数据采集。单镜头可见光传感器的有效像素为 2 000 万,单幅影像分辨率为  $5\,472 \times 3\,648$ 。

为获取高质量无人机影像数据,起飞前对飞行任务进行规划设计,包括飞行方向、飞行航线、飞行高度及飞行速度等。本次实验设置了 3 个飞行计划,即针对疏、中、密 3 个郁闭度等级分别进行影像获取,飞行路线的航向重叠和旁向重叠率分别设置为 90% 和 80%。共采集了 893 张单幅可见光影像。图 1 为不同郁闭度等级的无人机可见光正射拼接影像。

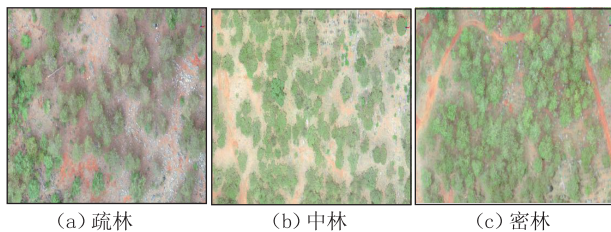


图 1 研究区不同郁闭度林分的正射影像

Fig. 1 Orthophoto of the standing forest from different density of study area

## 2 研究方法

经过无人机获取研究区低空可见光遥感影像后,采用 Pix4D Mapper, LiDAR360 等软件进行无人机影像预处理、获取冠层高度模型及树高的提取。技术流程如图 2 所示。

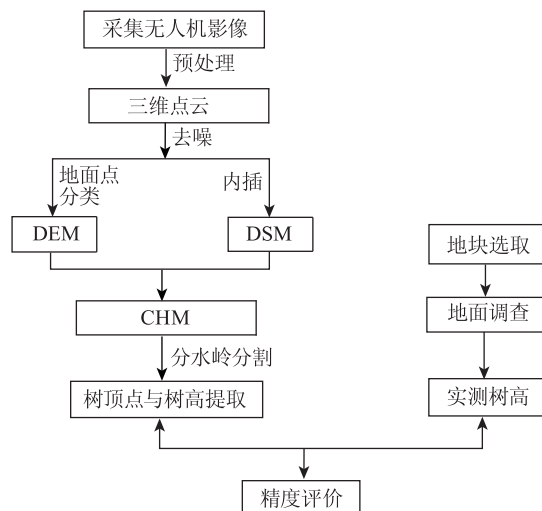


图 2 技术流程

Fig. 2 Technical process

### 2.1 影像预处理

采用无人机影像处理软件 Pix4D Mapper 对获取的原始影像进行预处理,并获得三维点云和研究区正射影像。预处理过程主要包括:1) 获取原始资料,即确认原始影像数据的完整性、查看 POS 数据文件、相机参数及控制点文件;2) 建立工程并导入数据,即在 Pix4D Mapper 中创建工程、添加无人机影像、设置影像属性及加入控制点;3) 影像自动处理过程,包括初始化设置、点云加密、区域三维重建及正射影像生成。无人机影像预处理后的 3 维点云结果如图 3 所示。

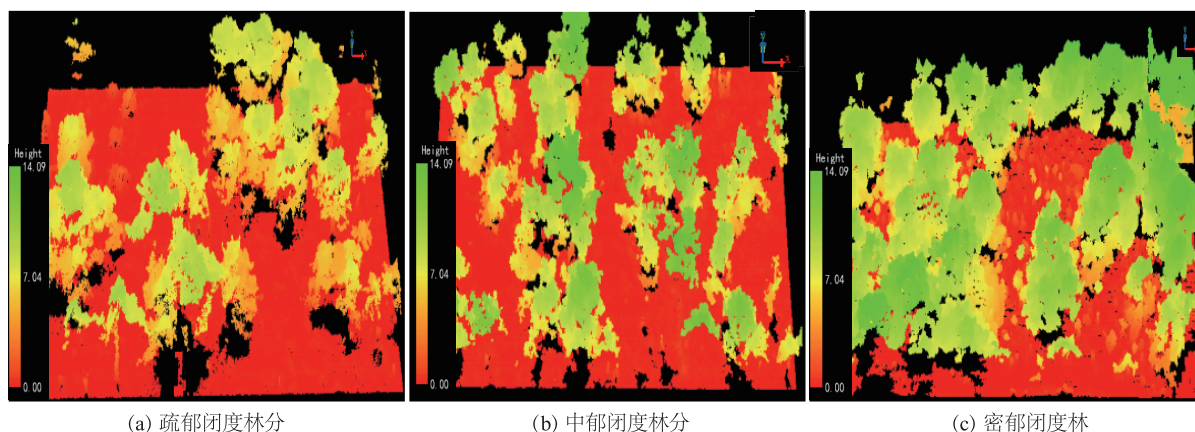


图 3 研究区 3 维点云数据

Fig. 3 Point cloud data of the study area

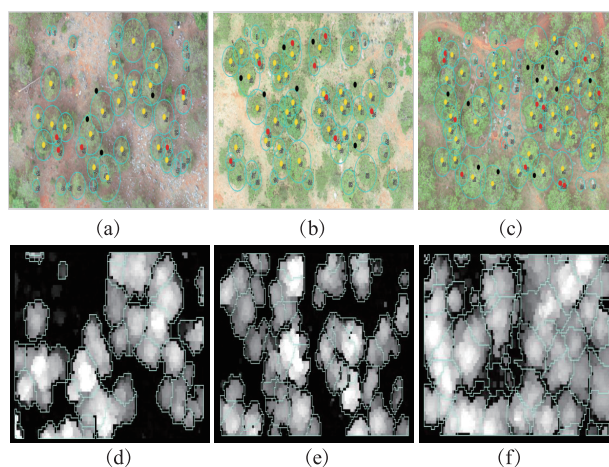
## 2.2 冠层高度模型构建

林分冠层高度模型 (Canopy Height Model, CHM) 是能够反映植被与地面高度之间距离信息的表面模型, 常应用于反演冠幅、树高、郁闭度及森林生物量等重要森林参数<sup>[23-25]</sup>。本研究中, CHM 的获取主要通过数字表面模型 (Digital Surface Model, DSM)、数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 二者相减后得到<sup>[26]</sup>。将经过无人机影像预处理所得的点云数据导入 LiDAR 360 中, 对原始点云进行噪声点去除并插值生成数字表面模型 DSM; 为获取地面信息, 利用改进的渐进加密三角网滤波算法对去噪后的点云进行地面点分类, 然后对分类后的地面点云进行插值生成数字高程模型 DEM。

## 2.3 树顶点与单木树高提取

利用分水岭分割算法, 结合目视解译, 对研究区云南松林冠层高度模型 (CHM) 进行单木分割, 实现树顶点的提取及单木树高估测。分水岭分割算法是就是根据分水岭的结构来进行图像的分割, 是一种基于拓扑理论的数学形态学的分割方法。本研究对林分 CHM 进行单木分割, 确定研究对象的分割区域即树冠边界, 然后使用局部最大值法在每一个分割出来的树冠边界内探测局部最大值点作为树顶点<sup>[27]</sup>。

单木树高提取的主要过程为: 首先, 利用 LiDAR360 对标准地内的 CHM 数据进行分割, 对冠幅叠加较密区域采用调整分割参数方法进行多次分割, 获取不同郁闭度等级下的单木树冠边界; 然后利用  $3\text{m} \times 3\text{m}$  大小的固定窗口移动探测所有单木树冠边界区域内的局部最大值作为树顶, 树顶所在的像元值即为该单木的树高值, 最终的树顶点提取及单木树高分割结果如图 4 所示。



注: 图(a), (b), (c) 分别为疏、中、密郁闭度林分的树顶点提取结果图, 其中黄点为正确的树顶点, 黑点为遗漏的树顶点, 红点为错误的树顶点; 图(d), (e), (f) 分别为疏、中、密郁闭度林分的树高分割结果图。

图 4 CHM 分割结果

Fig. 4 Results of CHM segmentation

## 2.4 树高提取精度检验

利用 SPSS 分析软件对经过无人机遥感影像提取的树高与样地每木树高数据进行线性回归分析。分别以利用无人机影像提取的树高值作为自变量,以样地实测树高值为因变量,建立回归分析模型。使用  $R^2$ 、均方根误差 ( $RMSE$ )、相对均方根误差 ( $rRMSE$ ) 等指标对树高提取精度进行评价,相关计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - H_i)^2}$$

$$rRMSE = 100\% \frac{RMSE}{\bar{H}}$$

式中:  $h_i$  为经过无人机遥感影像提取的单木树高值;  $H_i$  为样地每木实测树高值;  $\bar{H}$  为样地内的实测树高平均值;  $n$  为研究区样地林木株数。

## 3 结果与分析

### 3.1 树顶点提取精度评价

本研究树顶点的提取基于 CHM 的分水岭分割及局部最大值法,提取结果如图 4(a), (b), (c) 所示,并进行统计及精度评价,结果如表 1 所示。

表 1 树顶点提取结果

Tab. 1 Extraction result of tree vertex

郁闭度 等级	树顶点/个				精度 (正确率)
	参考/个	正确点/个	遗漏点/个	错误点/个	
疏	28	24	4	5	0.85
中	39	32	7	9	0.82
密	51	40	11	14	0.78

研究中参考树顶点的个数通过目视解译正射影像并结合实地样地调查林分来获取。由表 1 可知,在不同郁闭度林分的树顶点提取过程中,都存在树顶点的遗漏及错误提取,其提取结果表现为林分郁闭度越大,出现树顶点遗漏提取、错误提取的数量越多的现象。本次研究中疏、中、密不同郁闭度林分的树顶点提取精度分别为 0.85, 0.82 和 0.78,进一步说明了郁闭度对林分树顶点提取存在影响。除此以外,本次不同郁闭度林分树顶点提取

的精度相差很小,其原因可能与样地内单株树木的实际分布有关,即在相同郁闭度条件下,不同的树木分布情况(多数树木生长间距小,难以区分单木冠幅)对树木冠幅的布局有影响,进而影响整体树顶点的提取结果。

### 3.2 单木树高提取结果及精度分析

本研究利用罗盘仪和皮尺准确地测量得到接近于真值的每木树高,来验证经过无人机影像提取树高的精度。由于树高提取过程中存在遗漏提取和错误提取树顶点的现象,只将正确提取的单木树高与对应的参考树高进行精度验证。本次调查 6 块标准地共实测 96 株云南松,计算了实测单木树高与无人机提取单木树高的误差及相对误差,提取结果如表 2 所示。

由表 2 可知,基于无人机影像提取的云南松林高度与样地调查实测高度的误差绝对值最大值为 2.46m,误差最小值为 0m,相对误差绝对值的最大值为 26.15%,最小值为 0。由误差结果分析可知此次树高估测存在较大差异,其原因可能与研究区树种有关。由于本研究区内的云南松树冠内部结构分散,不具有明显的树干及树顶点,导致不容易分辨出真正的树顶点以及生成的树冠点云数量较少。同时,利用 SPSS 对罗盘仪外业实测数据和基于无人机影像提取的树高数据进行线性相关分析并验证无人机的树高测量精度。经建立线性相关函数关系(图 5(a)),分析可得决定系数  $R^2$  为 0.893,标准高度误差为 1.23m,树高提取精度为 87.58%。本研究的树高提取分析及精度结果与相关学者的研究结果比较接近,同时也符合在林业调查活动中对树高估测精度的要求。综上可知,利用无人机影像进行云南松单木树高的提取效果较为理想,其方法在生产实践中具有可行性。

### 3.3 郁闭度对单木树高提取的影响

树号 1—40 为密郁闭度的样木,树号 41—72 为中郁闭度的样木,树号 73—96 为疏郁闭度的样木。为了便于分析林分郁闭度对于单木树高提取的影响,计算在不同郁闭度等级下提取树高的标准误差、相对均方根误差和真实值与测量值的决定系数,其统计结果如表 3 所示。

表 2 树木高度提取结果

Tab. 1 Extraction result of tree height

树号	测量值/m	实测值/m	误差/m	相对误差	树号	测量值/m	实测值/m	误差/m	相对误差
1	6.20	7.93	1.73	0.2182	21	6.15	6.97	0.82	0.1176
2	6.32	8.30	1.98	0.2386	22	6.86	8.43	1.57	0.1862
3	6.60	7.65	1.05	0.1373	23	6.49	8.54	2.05	0.2400
4	6.10	7.65	1.55	0.2026	24	7.64	10.10	2.46	0.2436
5	9.10	11.15	2.05	0.1839	25	7.61	9.36	1.75	0.1870
6	7.44	8.60	1.16	0.1349	26	7.66	9.67	2.01	0.2079
7	7.63	7.80	0.17	0.0218	27	6.32	7.66	1.34	0.1749
8	6.90	7.63	0.73	0.0957	28	8.29	10.09	1.80	0.1784
9	6.30	8.00	1.70	0.2125	29	8.92	9.48	0.56	0.0591
10	5.84	7.30	1.46	0.2000	30	5.55	6.55	1.00	0.1527
11	5.56	6.90	1.34	0.1942	31	5.49	6.12	0.63	0.1029
12	11.82	13.60	1.78	0.1309	32	6.27	7.41	1.14	0.1538
13	8.60	9.19	0.59	0.0642	33	6.27	7.63	1.36	0.1782
14	5.76	7.80	2.04	0.2615	34	8.33	8.69	0.36	0.0414
15	7.90	8.50	0.60	0.0706	35	7.72	10.04	2.32	0.2311
16	9.30	9.70	0.40	0.0412	36	7.81	8.46	0.65	0.0768
17	8.90	9.30	0.40	0.0430	37	6.93	7.74	0.81	0.1047
18	8.90	10.60	1.70	0.1604	38	6.38	7.83	1.45	0.1852
19	6.63	8.16	1.53	0.1875	39	5.97	7.43	1.46	0.1965
20	11.02	13.33	2.31	0.1733	40	5.15	6.46	1.31	0.2028
41	5.71	6.22	0.51	0.0820	57	5.35	6.69	1.34	0.2003
42	8.52	8.78	0.26	0.0296	58	5.54	6.73	1.19	0.1768
43	9.52	9.89	0.37	0.0374	59	4.95	6.45	1.50	0.2326
44	9.15	9.87	0.72	0.0729	60	6.00	7.33	1.33	0.1814
45	9.29	9.90	0.61	0.0616	61	4.80	6.00	1.20	0.2000
46	8.28	9.44	1.16	0.1229	62	7.52	8.71	1.19	0.1366
47	4.95	6.45	1.50	0.2326	63	9.50	11.90	2.40	0.2017
48	4.05	4.50	0.45	0.1000	64	10.69	12.41	1.72	0.1386
49	5.93	7.15	1.22	0.1706	65	11.62	12.66	1.04	0.0821
50	4.12	4.12	0.00	0.0000	66	10.56	11.12	0.56	0.0504
51	8.30	8.44	0.14	0.0166	67	9.10	10.19	1.09	0.1070
52	8.19	8.45	0.26	0.0302	68	9.06	10.00	0.94	0.0940
53	8.44	8.45	0.01	0.0012	69	9.12	10.12	1.00	0.0988
54	7.40	8.59	1.19	0.1385	70	10.27	11.74	1.47	0.1252
55	7.40	8.59	1.19	0.1385	71	5.23	6.15	0.92	0.1496
56	7.03	7.61	0.58	0.0762	72	4.62	6.15	1.53	0.2488
73	7.20	7.49	0.29	0.0387	85	8.15	8.74	0.59	0.0675
74	5.46	7.08	1.62	0.2288	86	8.86	9.49	0.63	0.0664
75	5.46	6.20	0.74	0.1194	87	10.64	11.18	0.54	0.0483
76	5.46	5.91	0.45	0.0761	88	6.53	6.79	0.26	0.0383
77	9.38	10.10	0.72	0.0713	89	8.67	8.71	0.04	0.0046
78	7.30	7.68	0.38	0.0495	90	9.54	10.74	1.20	0.1117
79	7.15	9.45	2.30	0.2434	91	10.55	11.74	1.19	0.1014
80	2.78	3.36	0.58	0.1726	92	9.87	10.17	0.30	0.0295
81	8.50	9.80	1.30	0.1327	93	9.60	9.87	0.27	0.0274
82	9.45	10.80	1.35	0.1250	94	9.42	9.53	0.11	0.0115
83	8.27	9.36	1.09	0.1165	95	10.14	10.23	0.09	0.0088
84	6.95	7.76	0.81	0.1044	96	10.54	10.57	0.03	0.0028



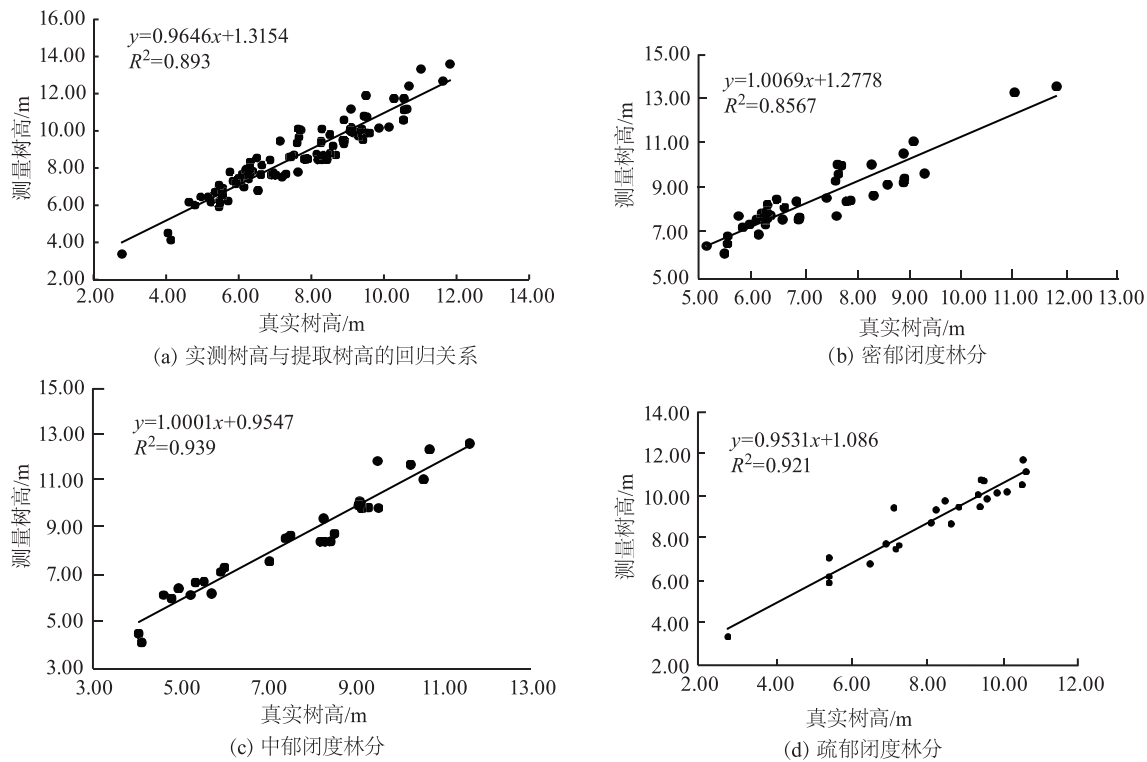


图5 实测树高与真实树高的回归关系

Fig. 5 Regression relationship of real and measured tree heights

表3 不同郁闭度林分的高度标准误差

Tab. 3 Root mean square error (RMSE) of tree height of different density

郁闭度	$R^2$	RMSE	rRMSE/%
疏	0.921	0.896m	10.0
中	0.939	1.097m	12.96
密	0.857	1.450m	16.87

由表3可知,在密郁闭度条件下获取的树高标准误差明显大于中郁闭度和疏郁闭度,同时对测量值与真实值进行拟合,如图5(b),(c),(d)所示,其决定系数分别为0.857,0.939,0.921。本次实验中,在相同的无人机飞行高度、相同的影像空间分辨率的条件下,由于密郁闭度的云南松林树冠之间有部分重叠区域,导致在无人机影像采集、处理计算过程中对树冠顶端和树冠边界的识别增加了难度,使得利用无人机技术提取树高的精度较低;而在中、疏郁闭度林分中其林木相对独立且易于分辨,能够获取相对完整的树冠信息及较高的树高提

取精度。同时,郁闭度的高低对无人机获取林木点云数据也有很大的影响:包括树冠点云和地面点云。在较高的郁闭度林分内因多个树冠相交,能够获取的点云数据不完整,且因大量的树冠遮蔽地面所以获取地面点云数据较少,无法准确获取地面高程数据;在相对稀疏的低郁闭度林分中获取的树冠点云数据和地面点云数据比较完整,提取的树高精度较高。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本研究利用单镜头可见光无人机采集研究区的云南松林低空影像数据,经过Pix4D Mapper处理得到研究区正射影像图和三维点云数据,并经过原始点云的去噪、滤波及地面点分类等处理,得到DSM,DEM及CHM;采用分水岭分割法对林分冠层高度模型(CHM)进行单木分割,最终提取单株树木高度。结果表明:

1)由最终的树高提取结果可知,使用分水岭分割法能够准确分割CHM,无人机可见光影像提取的树高值与野外实地调查得到的树高值进行对比, $R^2$ 为0.893,估测精度为87.58%,高度标准误差(RMSE)为1.230m,树高测量精度较高。

2)郁闭度对树高估测的影响结果表明,不同郁闭度条件下的树高提取值与样地调查实测值存在相关性:即3种不同郁闭度(高、中、低郁闭度)林分树高的无人机提取值与实测值的 $R^2$ 分别为0.857, 0.921和0.939, RMSE分别为1.450, 1.097和0.896m。由此可知,不同的林分郁闭度对树高测量精度有影响,郁闭度越高相对误差越大,反之测量误差越小,其主要原因是郁闭度对无人机获取林木冠幅信息及地面点云数据时有影响,进而影响插值后的DSM,DEM值的获取及CHM的分割结果。

## 4.2 讨论

目前,已有学者在森林调查中利用激光雷达遥感及无人机航测等技术对林木高度信息进行提取。张颖等<sup>[28]</sup>、杨伯钢等<sup>[29]</sup>分别利用大光斑星载激光雷达数据进行植被冠层高度的反演以及利用机载激光雷达技术来测定树高。还有学者以无人机航测影像为数据源,利用立体像对原理获取像方与物方的转换坐标,并将其带进旋转矩阵提取树高<sup>[30]</sup>。上述方法都存在一定的局限性,使用星载激光测高系统反演冠层高度的方法由于光斑尺寸较大且易受地表复杂环境的影响,虽能进行大面积森林的调查,但工作量大以及树高反演精度较低。利用立体像对原理提取树高的方法一般针对单棵树木或稀疏林分的高度计算,不适用于大面积的森林调查活动。使用机载激光雷达技术估测树高的方法虽然精度较高,但其采用的是单木树高逐一测量的方法,同样难以适应大面积的林业调查,并且星载激光雷达或机载激光雷达,其影像数据质量受天气条件(尤其是风速)、复杂的环境因子(地形、坡度)等因素的影响。本研究利用单镜头无人机可见光遥感技术,在保证树高提取精度的同时能够快速高效地进行较大范围林分尺度的树高估测。本文通过对树木三维点云进行克里金内插获取DSM,基于点云数据依据分类提取地面点云并内插生成DEM,最

后通过叠加计算及分割获取树高,此方法相较于激光雷达技术,受天气条件及环境的影响较小且利用无人机搭载可见光相机的方法具有更加低廉的优势。

此前,有关研究者也曾利用无人机影像、三维点云等数据,进行林分树高的提取。其研究通常利用无人机影像生成的数字表面模型或影像的立体像对进行树高提取,但通过数字表面模型估测树高会导致单株树木部分细节的丢失及误差的形成,而使用影像立体像对的方法提取树高将会导致人为误差的增大。利用三维点云数据提取树高,则通过点云数据的多尺度分割及构建冠层高度模型的方法来实现,生成的点云质量及其分割精度会导致树高的估测,同时复杂的林分条件对林分点云的分割增加了难度。本研究综合利用影像数据及经过后处理生成的点云数据,采用内插法获取DSM,DEM并计算得到CHM,且利用分水岭分割方法对CHM进行分割提取林木高度,该方法不仅避免了因直接使用数字表面模型而导致的单木细节丢失、立体像对导致人为误差的增大,还降低了对研究区点云进行分割的难度,提高了无人机遥感技术估测林分高度的精度和效率。

王彬等<sup>[18]</sup>于2018年利用无人3D摄影技术获取云南大学人工种植的雪松林高度值,并利用线性回归的方法验证测量值与真实值的差异。杨坤等<sup>[19]</sup>利用无人机高分辨率影像,基于最大类间方差法原理提取的树高值与实测值做了误差计算和线性回归分析。2019年,李涛等<sup>[31]</sup>利用无人机摄影获取单木三维信息方法提取树木总高度和第一枝下高,同样也做了树高提取值的相对误差分析计算。本研究也同样利用线性回归的方法进行测量值与真实值的差异验证,结果表明本研究方法所获得的树高结果误差在可接受范围内并且测量值比较接近真实值。

本研究方法所获取的树高数据会受到冠层间相互连接遮蔽的影响,被遮蔽部分通过内插方法获得且易受边缘数据的影响;同时,基于三维点云进行地面点分类的结果在一定程度上也受树冠间遮蔽的影响,现阶段针对多树冠相连区域只能提取较



高位置处的树高值。本研究成功提取了研究区域内的云南松林分高度,并通过相关计算验证了此方法的可靠性与准确性。相较于传统的人工调查和激光雷达技术,无人机可见光遥感技术具有快速高效、成本低廉、获取周期短、数据精度更高的优势。但本文仍然存在一些不足,如,缺乏无人机在不同飞行高度、不同树种及不同林分结构条件下树高提取的研究;在前期的无人机影像预处理过程中自动化程度不够高。在后续的研究中,可以针对以上不足之处进行研究探讨,为林业调查活动提供一个高效率、低成本及可获取高精度数据的方法可能性。

### 参考文献:

- [1] 隋宏大. 树高测量综合技术比较研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.
- [2] Takashi K, Eizl S, Tukirin P, et al. Tree species differentiation in growth, recruitment and allometry in relation to maximum height in a Bornean mixed dipterocarp forest[J]. Journal of Ecology, 2003, 91(5): 797-806.
- [3] 侯红亚, 王立海, 徐华东, 等. 目测法估测树高的误差分析[J]. 森林工程, 2012, 28(2): 6-8.
- [4] 冯仲科, 隋宏大, 邓向瑞, 等. 三角高程法树高测量与精度分析[J]. 北京林业大学学报, 2007(S2): 31-35.
- [5] 谢鸿宇, 温志庆, 钟世锦, 等. 无棱镜全站仪测量树高及树冠的方法研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(11): 53-58.
- [6] 周志强, 岳彩荣, 徐天蜀, 等. 森林高度遥感估测研究综述[J]. 现代农业科技, 2012(2): 198-199.
- [7] 王涛, 龚建华, 张利辉, 等. 基于机载激光雷达点云数据提取林木参数方法研究[J]. 测绘科学, 2010, 35(6): 47-49.
- [8] 吴宾, 余柏菡, 岳文辉, 等. 一种基于车载激光扫描点云数据的单株行道树信息提取方法[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2013(2): 38-49.
- [9] Selkowitz D J, Green G, Peterson B, et al. A multi-sensor lidar, multi-spectral and multi-angular approach for mapping canopy height in boreal forest regions[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 458-471.
- [10] 杨婷, 王成, 李贵才, 等. 基于星载激光雷达 GLAS 和光学 MODIS 数据中国森林冠层高度制图[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(11): 2487-2498.
- [11] 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(2-3): 171-182.
- [12] Clark M L, Clark D B, Roberts D A. Small-footprint Lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(1): 68-89.
- [13] Sailesh Samanta, Dilip Kumar Pal, Debasish Lohar, et al. Interpolation of climate variables and temperature modeling[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 107(1-2): 35-45.
- [14] Natascha O, Wolfram M. The airborne visible/infrared imaging spectrometer AVIS: Design, characterization and calibration[J]. Sensors, 2007(7-9): 1934-1953.
- [15] 高珍, 邓甲昊, 孙骥, 等. 微型无人机图像无线传输系统方案与关键技术[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(12): 1078-1082.
- [16] Rango A, Laliberte A, Herrick J E, et al. Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring and management[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2009, 3(1): 11-15.
- [17] 刘晓农, 旦增, 邢元军. 基于无人机高分影像的冠幅提取与树高反演[J]. 中南林业调查规划, 2017, 36(1): 39-43.
- [18] 王彬, 孙虎, 徐倩, 等. 基于无人 3D 摄影技术的雪松(*Cedrus deodara*)群落高度测定[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3524-3533.
- [19] 杨坤, 赵艳玲, 张建勇, 等. 利用无人机高分影像进行树木高度提取[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(8): 17-23.
- [20] 刘江俊, 高海力, 方陆明, 等. 基于无人机影像的树顶点和树高提取及其影响因素分析[J]. 林业资源管理, 2019(4): 107-116.
- [21] 谢巧雅, 余坤勇, 邓洋波, 等. 杉木人工林冠层高度无人机遥感估测[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(2): 335-342.
- [22] 周瑞伍. 云南植被主要类型分布区预测研究[D]. 昆明: 云南大学, 2015.
- [23] 唐菲菲, 阮志敏, 刘星, 等. 基于机载激光雷达数据识别单株木的新方法[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 196-201.
- [24] 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): 200-203.
- [25] 刘会玲, 张晓丽, 张莹, 等. 机载激光雷达单木识别研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 40-48.
- [26] 刘群. 基于小光斑机载 LiDAR 数据的单木三维分割[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [27] Chen Qi, Baldocchi D, Gong Peng, et al. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint LIDAR data[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2006, 72(8): 923-932.
- [28] 张颖, 李松, 张文豪, 等. 基于星载激光测高数据的植被冠层高度反演[J]. 应用光学, 2020, 41(4): 697-703.
- [29] 杨伯钢, 冯仲科, 罗旭, 等. LIDAR 技术在树高测量上的应用与精度分析[J]. 北京林业大学学报, 2007(S2): 78-81.
- [30] Huiquan Bi, Julian C. Fox, Yun Li, et al. Evaluation of nonlinear equations for predicting diameter from tree height[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2012, 42(4): 789-806.
- [31] 李涛, 冯仲科, 于东海, 等. 无人机摄影获取单木三维信息方法研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(3): 61-68.