浙 江 农 林 大 学 学 报，2019，**36**(2)：335-342
Journal of Zhejiang A&F University
doi:10.11833/j.issn.2095-0756.2019.02.015

杉木人工林冠层高度无人机遥感估测

谢巧雅[1,2]，余坤勇[1,2]，邓洋波[1,2]，刘　健[1,2]，范华栋[1,2]，林同舟[1,2]

（1. 福建农林大学 林学院，福建 福州 350002；2. 福建农林大学 “3S”技术与资源环境优化利用福建省高校重点实验室，福建 福州 350002）

摘要：冠层高度是森林资源调查的重要因子。传统的森林树高调查方法存在外业调查难度大，效率低等问题。无人机(UAV)的发展为快速估测森林树高提供了手段。以福建省闽清县的杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林为研究对象，通过 Eco Drone-UA 无人机遥感系统获取研究区遥感影像，利用 Pix4D Mapper 软件对航拍多光谱影像进行预处理，构建数字表面模型(DSM)，利用 1:10 000 地形图生成数字高程模型(DEM)；基于 DSM 和 DEM 叠加相减得到树冠高度模型(CHM)，实现杉木树高的提取。结果表明：植被指数和多光谱波段结合随机森林算法能够有效识别真实树冠顶点；利用无人机遥感影像能够实现杉木树高估测，相对误差最小值为 0.81%，最大值为 23.48%，标准误差为 1.48 m，估测精度为 90.8%。高程变化对树高估测精度有影响，根据高程大小排序的 3 组样木实测树高与提取树高的决定系数(R^2)分别是 0.97，0.84 和 0.78，标准误差分别是 0.67，1.17 和 1.99 m，在高程较高区域树高估测精度明显高于高程相对较低区域。图 10 参 32

关键词：森林测计学；树高；杉木；无人机 ；遥感

中图分类号：S758.8　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2019)02-0335-08

Height measurement of *Cunninghamia lanceolata* plantations based on UAV remote sensing

XIE Qiaoya[1,2], YU Kunyong[1,2], DENG Yangbo[1,2], LIU Jian[1,2], FAN Huadong[1,2], LIN Tongzhou[1,2]

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Fujian Provincial Colleges Key Laboratory of “3S” Technology and Optimization & Utilization of Environment and Resources, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: Tree height, an important parameter in a forest resource survey, has been problematic in traditional methods of a forest survey making it difficult and inefficient to conduct further investigations. To utilize the rapid development, in recent years, of unmanned aerial vehicle (UAV) technology as a means for quickly estimating the height of forest trees, tree height data were obtained from *Cunninghamia lanceolata* plantations in Minqing County, Fujian Province. Remote sensing imagery in the study area was obtained through the Eco Drone-UA drone remote sensing system, setting the flight altitude to 120 m and the flight belt overlap to 50%. Pix4D Mapper software was used to preprocess aerial multispectral images and build a DSM (Digital Surface Model) using kriging interpolation to obtain a DEM (Digital Elevation Model). Based on the estimated idea of the canopy height model (CHM) = digital surface model (DSM)-digital elevation model (DEM), the tree height of *C. lanceolata* was extracted. Results showed that combining the vegetation index, multispectral bands, and random forest algorithm were effective in identifying the true crown vertex, and it was feasible to use high resolution UAV imagery to extract tree height. The minimum relative error for tree height was 0.81%, the maxi-

收稿日期：2018-04-03；修回日期：2018-07-04

基金项目：福建省重大科技专项资助项目(2018NZ0001-1)；国家重点研发计划项目(2018YFD0600103)；国家自然科学基金资助项目(31770760)

作者简介：谢巧雅，从事林业“3S”技术应用研究。E-mail: 1004865212@qq.com。通信作者：余坤勇，副教授，博士，从事林业“3S”技术应用研究。E-mail: yuyky@126.com

mum was 23.48%, the estimation accuracy was 90.8%, and the standard error was 1.48 m. At the same time, the measurement of tree height was affected by the DEM with the R^2 and root mean squared error (R_{MSE}) value for the least DEM being R^2 = 0.781, R_{MSE} = 1.99 m, for the next one was R^2 = 0.84, R_{MSE} = 1.17 m, and for the largest it was R^2 = 0.966, R_{MSE} = 0.67 m. The accuracy of the measured height of the larger DEM was higher than that of the smaller DEM. Therefore, This approach integrates UVA with random forest, which makes up of the shortcomings of each. In addition, the results also provide a reference guidelines for the tree height. [Ch, 10 fig. 32 ref.]

Key words: forest mensuration; tree height; *Cunninghamia lanceolata*; UAV; remote sensing

冠层高度是森林资源调查的重要指标，也是重要的测树因子之一，与树木长势、生长量、林分蓄积量计算等密切相关[1-2]。快速、准确估测树高对于森林资源监测，森林生物量计算具有重要意义。当前，对于树高的测定有传统地面测量和遥感数据估测 2 类，传统的地面测量调查依据测高仪对活立木进行树高测定，是森林资源调查中树高测量最常用的方法[3]，但工作效率低，且受到人为因素、仪器质量等影响，测量精度有一定的误差[4]。现阶段出现的森林树高遥感测定技术，如干涉合成孔径雷达估算技术、机载小光斑激光雷达数据结合光数码影像技术以及利用激光雷达数据点云数据提取树高[5-7]等，能够克服外界环境因素对树高估测的影响，但存在成本相对高，在大比例尺下测定地物仍有较大误差的缺陷。随着民用无人机的兴起，无人机遥感技术也得到了发展。无人机遥感影像具有分辨率高、重叠度大、信息量大等特点，并且小型民用无人机使用成本低、操作便捷、采集周期灵活等特点在很大程度上弥补了现有遥感估测树高的不足[8-13]。基于无人机平台搭载不同传感器，能够获取多光谱、高光谱、激光点云等多种类型的高精度数据，为遥感技术在森林资源调查和动态监测中的应用提供了新的发展思路[14-17]，也将推动小型无人机在林业方面的普及应用[18]。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国重要的速生树种和用材树种，在森林资源中占有重要的地位[19-20]。快速、可靠地获取杉木的树高对于森林生物量的计算具有重要意义。为此，本研究选择福建省闽清县白云山国有林场的杉木林为对象，利用无人机多光谱影像数据，开展杉木人工林冠层高度遥感估测，以期为无人机在森林资源的调查应用提供理论借鉴和参考。

1 研究区概况与数据收集

1.1 研究区概况

福建省闽清县白云山国有林场(26°24′06.42″~26°28′44.10″N，118°49′11.53″ ~118°55′46.19″E)，海拔为 800~1 200 m，坡度为 26~35°。林场气候温和偏凉，年平均气温为 19.5 ℃，雨水充沛，年均降水量约为 1 800.0 mm，湿度大，适宜营造杉木 *Cunninghamia lanceolata*，马尾松 *Pinus massoniana*，湿地松 *Pinus elliottii*，秃杉 *Taiwania flousiana*，柳杉 *Cyptomeria fortunei* 等用材树种。该林场经营总面积为 3 858.3 hm^2，森林覆盖率为 85.3%，林木蓄积量为 58 万 m^3，其中生态公益林面积为 2 316.1 hm^2，占林场经营面积 60.0%。在白云山林场 3 个以杉木为主要树种的人工林小班(004 林班-25 大班-040，050，070 小班，分别简称为 A 小班，B 小班，C 小班)开展无人机遥感树高估测研究，3 块小班总面积约 11 hm^2，优势树种为杉木，西部林分密度较东部小，坡度约为 25°，东、东南坡向，高程西高东低。

1.2 无人机遥感数据获取

2018 年 1 月 16 日，利用 Eco Drone-UA 无人机搭载的多光谱镜头[蓝(380~500 nm)，绿(500~600 nm)，红(600~760 nm)，红边(红光范围 680~760 nm 内反射光谱的一阶导数最大值所对应的光谱位置)和近红外(760~860 nm)等 5 个光谱波段]获取遥感影像，利用地面控制站软件 Mission Planner 设置飞行相对航高为 120 m，航带重叠度 50%以及航程、航时、飞行航线等一系列参数。

1.3 地面数据获取

随机选取研究区内的 60 株树，利用激光测高仪(型号 TruPulse200)测量树高，作为杉木实测高度；利用手持全球定位系统(GPS)采集研究区高程数据。地面数据还包括白云山林场二类调查小班数据、地形图、林场概况等其他辅助资料。

2　数据处理及研究方法

2.1　数据预处理

无人机影像获取过程中，受像素高、数量大以及气流扰动等因素影响，影像会产生几何畸变[7,21]，需进行信息检测、拼接及几何校正等预处理。预处理分为 3 个阶段。一是利用人工手段初步检验，剔除无关影像数据。二是将筛选好的原始影像导入 Pix4D Mapper 软件进行检测，完成覆盖研究区的影像拼接；为满足制作高精度数字表面模型(DSM)影像精度要求，本次处理使用原始数据影像 2 078 张，各影像的校准率为 99%，重叠度为 50%，初始焦距与最终焦距的相对差为 1.69%，地理定位均方根误差 X 为 1.26%，Y 为 0.71%，Z 为 1.33%，同时基于无人机获取的多幅正射照片生成研究区数字正射影像(DOM)[21]。三是利用空中三角测量，自动计算、识别同名地物点，求得像方坐标，得到研究区 DSM 影像[22]，实现遥感影像校正。

2.2　无人机遥感杉木树高提取

2.2.1　单木树冠顶点识别　冠层高度数据提取关键在于树冠顶点的识别。首先利用无人机遥感影像的纹理特征和光谱信息，面向对象分类筛选样木，通过遥感图像处理平台(ENVI)将数字正射影像信息分为森林、道路、林隙 3 类，得到研究区实际森林覆盖区域。其次基于块统计分析原理(即统计生成的值会赋予指定邻域的最小外接矩形中的所有像元，各邻域间无重叠)，根据研究对象的树冠特征，将邻域设置为圆形，利用地图单位结合 DOM 目视判定半径，反复试验后，确定邻域半径为 1.5 m。据指定的半径值计算出准确的圆面积，再计算出另外 2 个圆面积值，一个是指定半径值向下舍入后的圆面积，另一个是指定半径值向上舍入后的圆面积。这 2 个面积分别与用指定半径计算出的准确面积值进行比较，两者中更为接近准确值的一个将被用于运算过程中(图 1)。最后利用 DSM 块统计后新的影像与原始 DSM 影像相减，结合邻域分析块统计原理，搜索目标区中的最大值，并认定为潜在树顶点(图 2)；对于判定混合的点，选取归一化植被指数(NDVI)，比值植被指数(SR)，增强植被指数(EVI)，大气阻抗植被指数(ARVI)等植被指数，以及红、绿、蓝、红边、近红外 5 个波段进行树冠顶点识别，采用随机森林算法对冠顶点特征差异识别的指标重要性进行排序，获取实际树冠顶点作为提取冠层的基础数据。

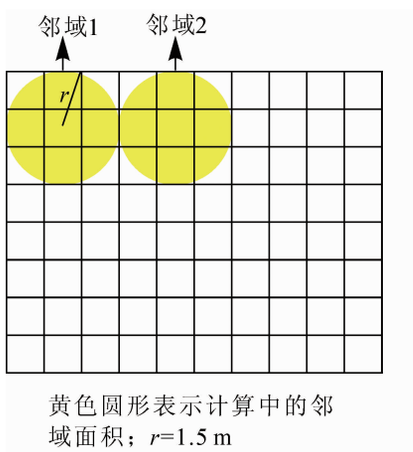


图 1　单木树冠的顶点识别

Figure 1　Vertex identification of single tree canopy

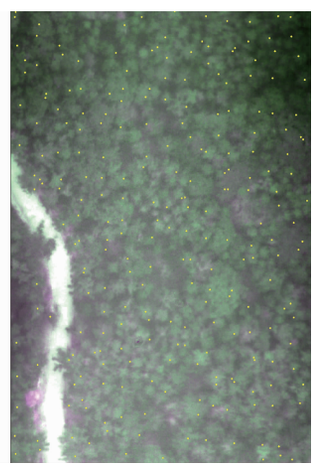


图 2　树顶点分布示意图

Figure 2　Probability of distribution of vertices of potential trees

2.2.2　杉木树高的判定　用 DSM 表示研究区林分树冠表面的海拔变化，用 DEM 表示立木基部的海拔高度变化，两者相减即为数字冠层高度模型(CHM)[23]，可作为杉木树高基础数据(图 3)。构建 CHM 模型，以研究区 1:10 000 地形图(图 4)为基础，在地理信息系统软件(GIS)上生成不规则三角网(TIN)，利用 TIN 的转栅格功能，重采样生成与 DSM 像元大小一致的 DEM 影像，即像元 0.15 m[24-26]；DSM 模型的实现则基于 DOM 影像利用计算机相邻影像匹配，量测每个像素的视差，利用空中三角测量，自动计算、识别同名地物点，求得其像方坐标，经解算获得物方空间坐标 DSM[27-29]，然后将 DSM 影像进行配准和裁剪，生成覆盖研究区的 DSM 影像。

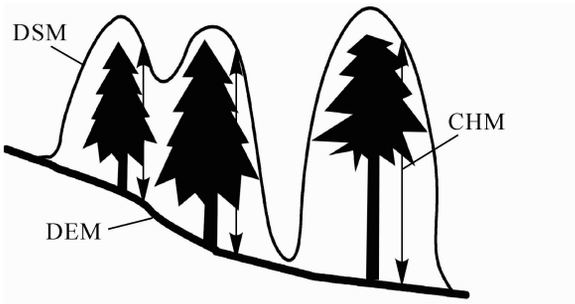


图 3 树冠高度模型(CHM)构建原理

Figure 3 Canopy height model (CHM) construction principle

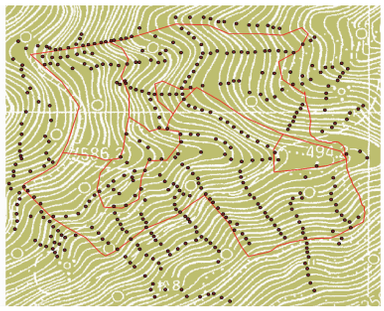


图 4 地形图点选示意图

Figure 4 Topographic map selection point

3 结果与分析

3.1 树冠顶点的识别

基于邻域分析得到的潜在树冠顶点，结合无人机获取的 DOM 影像，通过目视抽样的方法检测随机森林算法的训练集，再利用不同指数在训练集的树冠顶点识别中重要性进行排序，得到归一化植被指数(NDVI)＞比值植被指数(SR)＞大气阻抗植被指数(ARVI)＞近红外波段(NIR)＞蓝色波段(BLUE)＞增强植被指数(EVI)＞红色波段(RED)＞绿色波段(GREEN)＞红边波段(REDEDGE)(图 5)。选择重要性较大的 NDVI，SR，ARVI 和 NIR 作为树冠顶点识别指标，叠加随机森林算法识别的树顶点分类结果，剔除伪树冠顶点(图 6)，得到真实树冠顶点(图 7)。试验共得到潜在树顶点 6 629 个，其中伪树冠顶点 1 483 个，真树冠顶点 5 146 个；C 小班的潜在树冠顶点和伪树冠顶点数量均最多，分别为 3 549 个和 977 个，A 小班最少，分别为 984 个和 101 个，基本实现潜在树顶点的准确分类。结合研究区概况可知，A 小班海拔高程较高，林分密度较小，C 小班总体海拔高程低，而林分密度较大；由此推测，真实树冠顶点识别的效果可能与林分密度和海拔高程有关。

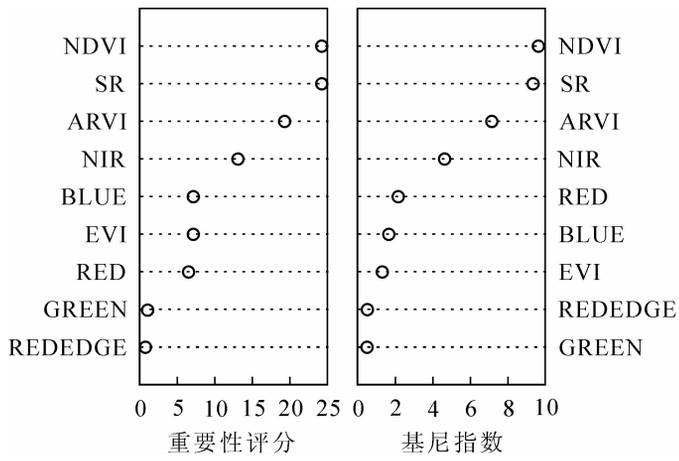
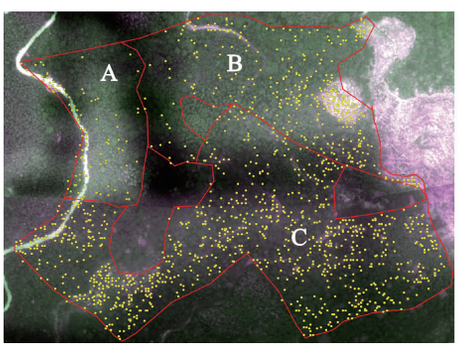


图 5 变量重要性指标

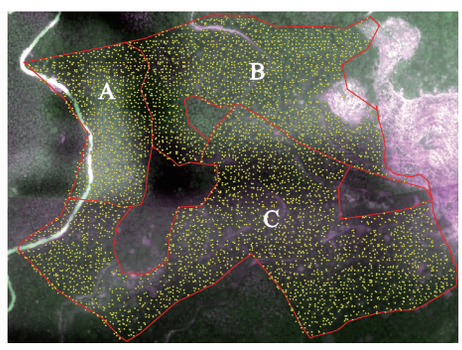
Figure 5 Variable importance index



A，B，C 为小班号

图 6 伪树冠顶点分布图

Figure 6 Pseudo-tree vertex distribution map



A，B，C 为小班号

图 7 真实树冠顶点分布图

Figure 7 Real tree vertex distribution map

3.2 冠层高度估测结果分析

基于无人机遥感影像判定杉木的真实树冠顶点及样地的 DEM 信息，提取随机选取的 60 株杉木冠层高度信息，并将高度信息与实测的杉木高度进行比较分析，显著性值小于 0.000 01，表明提取树高

与实测树高显著相关，树高相关性分析具有统计学意义。以无人机遥感影像提取数据为自变量，外业实测数据为因变量，建立线性函数关系(图 8)；相关性分析得到决定系数 R^2 为 0.85，提取树高与实测树高的相对误差最小值为 0.81%，最大值为 23.48%，计算得到标准误差(R_{MSE})为 1.48 m，树高估测精度为 90.8%。由此可知：提取效果较佳，利用无人机高分辨率影像实现树高估测的方法具有可行性。

3.3　高程对冠层高度提取的影响

对 60 株样木树高实测值和提取值的相对误差与对应的 DEM 值作相关性分析，得到 R^2 为 0.84；树高相对误差随着高程的变化而变化(图 9)，两者具有显著相关性。基于 60 株样木的不同高度信息，将其按高程划分为 A 组(551.4~625.2 m)，B 组(498.6~551.4 m)和 C 组(434.8~498.6 m)3 组，20 株·组$^{-1}$，研究不同高程对杉木树高无人机估测的影响。通过计算不同高程的树高标准误差和决定系数发现，高程对树高提取有影响，3 组树高值的误差分别为 0.67，1.17 和 1.99 m；表现为随着高程的降低树高估测的标准误差明显增大。对 3 组树高的测量值与真实值进行拟合(图 10)，其决定系数分别为 0.97，0.84 和 0.78；表明在相同影像空间分辨率下，高程较高的杉木由于距离无人机较近，提取精度更高，山坳或者山谷的杉木则不容易分辨。对采集到的影像进行分析发现，高程较低的区域林分密度较大，伪树冠顶点总体增多，这些因素也是提取杉木树高时精度存在较大差异的原因。

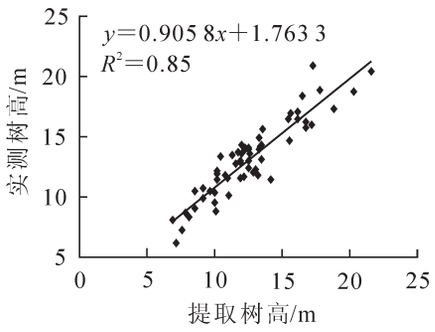


图 8　研究区杉木提取树高与实测树高结果的验证分析

Figure 8　Verification analysis of the tree height and the tree height of cunninghamia lanceolata in the research area

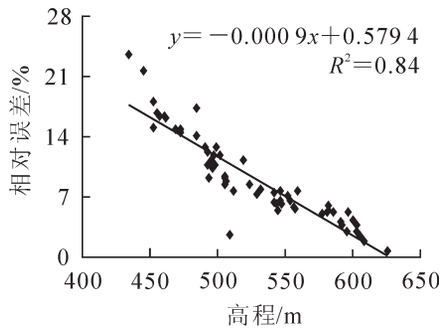
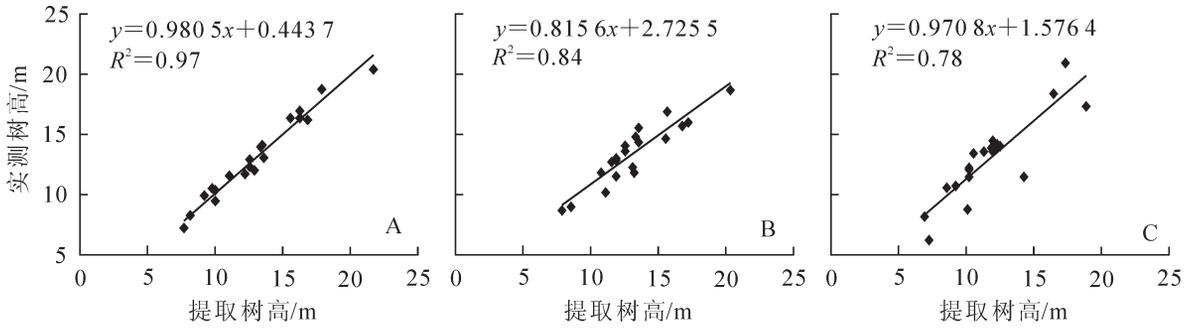


图 9　高程与相对误差相关性分析

Figure 9　Correlation analysis of DEM and relative error



A. 高程 551.4~625.3 m；B. 高程 498.6~551.4 m；C. 高程 434.8~498.6 m

图 10　不同高程杉木提取树高与实测树高比较

Figure 10　Comparison of measured tree height and real tree height of different elevation

4　结论与讨论

以杉木人工林为对象，利用无人机获取遥感影像，通过随机森林算法结合 DSM 多光谱波段和植被指数识别真实树冠顶点，叠加 DSM 数据和地面 DEM 数据差值来构建 CHM 模型，实现杉木树高提取。结果表明：①树冠顶点识别的过程存在非树冠顶点错分现象；利用随机森林算法结合植被指数和 DSM 多光谱波段可剔除错分的树冠顶点，同时可避免点云分割算法在提取树冠顶点中的繁琐运算，提高了树冠顶点提取效率及精度。C 小班的伪树冠顶点数量最多，A 小班最少，各小班伪树冠顶点均为山坳处多，高程较低处多；分析原因是 C 小班的高程较低，地势较为平坦，人工林的森林密度大，树冠顶点识

别错误的可能性增加；A 小班的高程较高，不利于杉木人工林生长，造成森林密度较小，因而伪树冠顶点误分的概率减小；山坳和高程较低处距离无人机较远，影像易产生形变，树冠顶点识别偏差。②点云数据生成 DEM 时，常因遮挡无法获取完整的地面信息，精度误差大[30]。本研究基于冠层高度模型等于数字表明模型与数字高程模型之差的估测思路，以根据地形图生成的 DEM 作为树高提取的基础数据之一，很大程度上改善了 DEM 对树高提取所带来的影响；结合无人机获取的 DSM，有效实现杉木树高的提取。提取树高值与实测树高值的偏差[31]，更多归因于同一像元值的平均化，并非树冠顶点真实值的反映，因而树高估测中低值高估，高值低估的现象仍然存在；同时由于树冠的遮挡，无人机搭载的多光谱镜头无法获取林冠层以下的影像数据，只能将林分的最高点当作林木的树高，是估测值存在一定误差的另一原因。本试验中提取树高的决定系数 R^2 为 0.85，精度为 90.8%，在总体上满足林业对于树高估测的精度要求[32]。③高程与估测树高的相对误差分析结果表明，高程与树高相对误差具有显著相关性，其决定系数为 0.84；不同高程下树高的提取值与实测值存在相关性，A 组(625.2~551.4 m)，B 组(551.4~498.6 m)，C 组(498.6~434.8 m)的决定系数分别是 0.97，0.84 和 0.78，标准误差分别是 0.67，1.17 和 1.99 m。由此可知，高程变化对树高提取精度有影响，高程越高相对误差越小，其原因是高程对无人机获取样木影像的完整度和森林密度有影响。以上分析可以看出，DEM 在南方丘陵山区数据应用上存在一定局限，因此将来可以使用与实际地形相似度更高的 DEM 数据进行树高估测；DSM 精度也是影响树高提取精度的要素之一，改进 DSM 提取方法对提高树高的提取精度具有重要意义。

基于无人机获取的高分辨率遥感影像，经过模型构建、空间分析、技能算法识别等一系列处理，实现树高遥感估测，能够为高精度林木树高估测提供有效途径，表明高精度无人机遥感系统在林业调查中具有可行性，能够快捷、有效且准确地获取森林特征参数数据。

5 参考文献

[1] 崔少伟，范文义，金森，等. 基于树影与快鸟图像的单木树高提取[J]. 东北林业大学学报，2011，**39**(2)：47 – 50.

CUI Shaowei，FAN Wenyi，JIN Sen，*et al.* Extraction of individual tree height using quickbird images based on tree shadow [J]. *J Northeast For Univ*, 2011, **39**(2): 47 – 50.

[2] 唐守正，张会儒，胥辉. 相容性生物量模型的建立及其估计方法研究[J]. 林业科学，2000，**36**(增刊 1)：19 – 27.

TANG Shouzheng, ZHANG Huiru, XU Hui. Study on establish and estimate method of compatible biomass model [J]. *Sci Silv Sin*, 2000, **36**(suppl 1): 19 – 27.

[3] 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.

SUI Hongda. *Comparative Study on Comprehensive Technologies of Tree Height Measurement* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.

[4] 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 – 199，203.

ZHOU Zhiqiang, YUE Cairong, XU Tianshu, *et al.* Review on forest height estimation using remote sensing [J]. *Modern Agric Sci Technol*, 2012(2): 198 – 199, 203.

[5] 庞勇，李增元，谭炳香，等. 点云密度对机载激光雷达林分高度反演的影响[J]. 林业科学研究，2008，**21**(增刊)：14 – 19.

PANG Yong, LI Zengyuan, TAN Bingxiang, *et al.* The effects of airborne LiDAR point density on forest height estimation [J]. *For Res*, 2008, **21**(suppl): 14 – 19.

[6] 于大洋，董贵威，杨健，等. 基于干涉极化 SAR 数据的森林树高反演[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2005，**45**(3)：334 – 336.

YU Dayang, DONG Guiwei, YANG Jian, *et al.* Forest tree height estimates based on polarimetric SAR interferometry [J]. *J Tsinghua Univ Sci Technol*, 2005, **45**(3): 334 – 336.

[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.

WANG Tao, GONG Jianhua, ZHANG Lihui, *et al.* Estimating parameters of trees in forest using point cloud data of airborne LIDAR [J]. *Sci Surv Map*, 2010, **35**(6): 47 – 49.

[8] ZIMBLE D A, EVANS D L, CARLSON G C, *et al*. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR [J]. *Remote Sens Environ*, 2003, **87**(2/3): 171 – 182.

[9] 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 Sens Environ*, 2004, **91**(1): 68 – 89.

[10] SAMANTA S, PAL D K, LOHAR D, *et al*. Interpolation of climate variables and temperature modeling [J]. *Ther Appl Climatol*, 2012, **107**: 35 – 45.

[11] OPPELT N, MAUSER W. Airborne visible/infrared imaging spectrometer AVIS: design, characterization and calibration [J]. *Sensors*, 2007, **7**(9): 1934 – 1953.

[12] 高珍，邓甲昊，孙骥，等. 微型无人机图像无线传输系统分类方案与关键技术[J]. 北京理工大学学报，2008，**28**(12)：1078 – 1082.
GAO Zhen, DENG Jiahao, SUN Ji, *et al*. Scheme and key technologies of wireless image transmission system for micro unmanned air vehicles [J]. *Trans Beijing Inst Technol*, 2008, **28**(12): 1078 – 1082.

[13] RANGO A, LALIBERTE A S, HERRICK J E, *et al*. Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management [J]. *J Appl Remote Sens*, 2009, **3**(1): 33542.

[14] 孙中宇，陈燕乔，杨龙，等. 轻小型无人机低空遥感及其在生态学中的应用进展[J]. 应用生态学报，2017，**28**(2)：528 – 536.
SUN Zhongyu, CHEN Yanqiao, YANG Long, *et al*. Small unmanned aerial vehicles for low-altitude remote sensing and its application progress in ecology [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28**(2): 528 – 536.

[15] 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]. *J Remote Sens*, 2008, **12**(1): 152 – 158.

[16] 李廷伟，梁甸农，朱炬波. 极化干涉 SAR 森林高度反演综述[J]. 遥感信息，2009(3)：85 – 91.
LI Tingwei, LIANG Diannong, ZHU Jubo. A review of inversion of the forest height by polarimetric interferometric SAR [J]. *Remote Sens Inf*, 2009(3): 85 – 91.

[17] 刘晓双，黄建文，鞠洪波. 高空间分辨率遥感的单木树冠自动提取方法与应用[J]. 浙江林学院学报，2010，**27**(1)：126 – 133.
LIU Xiaoshuang, HUANG Jianwen, JU Hongbo. Research progress in the methods and applications of individual tree crown's automatic extraction by high spatial resolution remote sensing [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2010, **27**(1): 126 – 133.

[18] 汪沛，罗锡文，周志艳，等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. 农业工程学报，2014，**30**(18)：1 – 12.
WANG Pei, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, *et al*. Key technology for remote sensing information acquisition based on micro UAV [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2014, **30**(18): 1 – 12.

[19] 张雄清，张建国，段爱国. 基于贝叶斯法估计杉木人工林树高生长模型[J]. 林业科学，2014，**50**(3)：69 – 75.
ZHANG Xiongqing, ZHANG Jianguo, DUAN Aiguo. Tree-height growth model for Chinese fir plantation based on Bayesian method [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, **50**(3): 69 – 75.

[20] 李燕，张建国，段爱国，等. 杉木人工林生物量估算模型的选择[J]. 应用生态学报，2010，**21**(12)：3036 – 3046.
LI Yan, ZHANG Jianguo, DUAN Aiguo, *et al*. Selection of biomass estimation models for Chinese fir plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(12): 3036 – 3046.

[21] 王玉宏，陈永立. 低空遥感影像匹配与拼接技术研究[J]. 测绘信息与工程，2009，**34**(2)：47 – 49.
WANG Yuhong, CHEN Yongli. Automatic matching and panorama generation of low altitude aerial images [J]. *J Geom*, 2009, **34**(2): 47 – 49.

[22] 陈信华. SIFT 特征匹配在无人机低空遥感影像处理中的应用[J]. 地矿测绘，2008，**24**(2)：10 – 12.
CHEN Xinhua. Application of SIFT feature matching in the process of unmanned air vehicle remotely-sensed imagery on the low altitude [J]. *Surv Map Geol Miner Res*, 2008, **24**(2): 10 – 12.

[23] 王佳，杨慧乔，冯仲科，等. 利用轻小型飞机遥感数据建立人工林特征参数模型[J]. 农业工程学报，

2013，**29**(8)：164 – 170.

WANG Jia, YANG Huiqiao, FENG Zhongke, *et al.* Model of characteristic parameter for forest plantation with data obtained by light small aerial remote sensing system [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2013, **29**(8): 164 – 170.

[24] KINKAID T J. *Study of Mirco-sized Technology, Mirco Air Vehicles, and Design of A Payload Carrying Flapping Wing Micro Air Vehicle* [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2006.

[25] 刘国峰，孟小红，岳延波，等. 克里金法在 GPS 数据内插中的应用[J]. 物探与化探，2006, **30**(2): 175 – 178.

LIU Guofeng, MENG Xiaohong, YUE Yangbo, *et al.* The application of Kriging to GPS data interpolation [J]. *Geophys Geochem Explor*, 2006, **30**(2): 175 – 178.

[26] 王艳梅，李楠，魏林，等. 基于无人机航测的 DEM 数据生产及编辑[J]. 物探装备，2014，**24**(5)：330 – 336.

WANG Yanmei, LI Nan, WEI Lin, *et al.* Processing and editing of DEM data from the UVA aerial [J]. *Equip Geophys Prospect*, 2014, **24**(5): 330 – 336.

[27] OLIVER M A, WEBSTER R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems [J]. *Int J Geogr Inf Syst*, 1990, **4**(3): 313 – 332.

[28] PARIS C, BRUZZONE L. A three-dimensional model-based approach to the estimation of the tree top height by fusing low-density lidar data and very high resolution optical images [J]. *Trans Geosc Remote Sens*, 2015, **53**(1): 467 – 480.

[29] 吴迪，范文义. 激光雷达协同多角度光学遥感数据反演树高[J]. 北京林业大学学报，2014，**36**(4)：8 – 15.

WU Di, FAN Wenyi. Forest canopy height estimation using LiDAR and optical multi-angler data [J]. *J Beijing For Univ*, 2014, **36**(4): 8 – 15.

[30] 易柳城. 无人机遥感影像与数字高程模型的三维可视化研究[D]. 长沙：中南大学，2013.

YI Liucheng. *Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing Images and Digital Elevation Model of Three Dimension Visualization Research* [D]. Changsha: Centeral South Universty, 2013.

[31] 李祥，吴金卓，林文树，等. 一种高郁闭度林分树高的估测方法[J/OL]. 测绘科学，2018-04-02[2018-06-21]. http://kns.cnki. net/kcms/detail/11.4415.P.20180402.1549.004.html.

LI Xiang, WU Jinzhuo, LINWenshu, *et al.* A tree height estimation method with high canopy density [J/OL]. *Sci Surv Map*, 2018-04-02[2018-06-21]. http://kns.cnki. net/kcms/detail/11.4415.P.20180402.1549.004.html.

[32] 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)：1 – 9.

WANG Bin, SUN Hu, XU Qian, *et al.* Height measurement of a Cedar (*Cedrus deodara*) community based on unmanned aerial vehicles (UAV) 3D photogrammetry technology [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(10): 1 – 9.