

基于无人机航测数据的森林郁闭度和蓄积量估测

苏迪 高心丹*

(东北林业大学信息与计算机工程学院 哈尔滨 150040)

摘要: 蓄积量是评价森林资源质量或状况的重要指标,为了解决实测郁闭度和蓄积量费时费力以及无法充分利用航测原始数据生成各项数据的问题,以无人机航测数据的点云数据和正射影像为研究数据,利用冠层高度模型提取高程,通过一元线性回归分析估测平均树高和平均胸径模型;使用改进形态学分水岭方法提取树冠个数;通过主成分回归建立郁闭度模型;结合提取与估测的 GIS 因子,用偏最小二乘法建立蓄积量模型。结果表明:平均树高模型精度为 97.34%、平均胸径模型精度为 91.27%、改进分水岭提取树冠精度为 80.03%、郁闭度模型精度为 83.18%、蓄积量模型精度可达 88.43%。蓄积量模型的所有特征因子均是通过遥感方法从无人机原始航测数据中提取而来,充分利用了无人机航测数据。实验建立的树高、胸径和郁闭度模型可以有效地估测森林平均树高、胸径及郁闭度,改进后的分水岭算法减少了过分割,蓄积量模型能够有效估测蓄积量,提高了蓄积量提取效率,节省了大量的人力物力。

关键词: 图像处理; 蓄积量; 偏最小二乘; 郁闭度; 分水岭算法; 无人机航测数据

中图分类号: S758.5

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2096-1359(2020)01-0156-08



Estimation of forest canopy density and stock volume based on UAV aerial survey Data

SU Di, GAO Xindan*

(College of Information and Computer Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Stock volume is an important index to evaluate the quality or condition of forest resources. This study was aimed at solving the problems of the measurement of canopy density and stock volume because it was time-consuming, laborious, and the inability to make full use of the data generated from the aerial survey raw data. In the experiment, point cloud data and orthophoto images from the UAV aerial survey data were used as research data, the forest in the Laoshan industrial area of Maoershan Forest Farm was taken as the research area, the canopy height model was used to extract elevation, the average tree height and the DBH model were estimated by the univariate linear regression analysis, the crown number was extracted by the improved Morphological watershed method, and the canopy closure model was established by the principal component regression. This method can simplify the analysis process and improve the analysis efficiency, and the stock model was established by the partial least square's regression with extraction and estimation of GIS factors. The experimental results showed that the average tree height model accuracy was 97.34%, the average DBH model accuracy was 91.27%, the improved watershed algorithm extraction accuracy of crown number was 80.03%, the canopy density model accuracy was 83.18%, and the stock volume model accuracy could reach 88.43%. All the characteristic factors of the stock volume model were extracted from the original aerial survey data of UAV by the remote sensing method, which made full use of the UAV aerial survey data. The model of tree height, DBH and canopy density established in the experiment could effectively estimate the average tree height, DBH and canopy density of the forest. The improved watershed algorithm reduced over-segmentation. The volume model can effectively estimate the stock volume, improve the extraction efficiency of the stock volume, and significantly save manpower and material resources. At the same time, the aerial survey data are used as research data to improve the iteration efficiency of stock volume.

Keywords: image processing; stock volume; partial least squares; canopy density; watershed algorithm; UAV aerial survey data

收稿日期: 2019-04-19

修回日期: 2019-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(31770768, 31870530); 中央高校基本科研业务费专项资助基金 E 类(2572017EB09)。

作者简介: 苏迪,女,研究方向为遥感图像处理和地理信息系统。通信作者: 高心丹,女,副教授。E-mail: gaoxd@nefu.edu.cn

森林是地球生态系统中重要的组成部分,其碳汇功能在维持全球碳平衡方面发挥着重要作用。森林蓄积量是生物量和碳储量研究的重要参考因素,是评价森林固碳能力的重要指标,也是森林资源调查的重要因素。传统的一、二类森林资源调查是测算森林蓄积量的重要方法,这两种方法虽然准确度较高,但在时间与空间上存在较大的局限性,调查过程会耗费大量的时间和人力^[1-2]。如何在准确获取森林蓄积量信息的同时,快速、高效地为区域生态状况评估提供参考^[3-5]已成为研究热点。

近年来,随着遥感技术的发展,基于遥感因子的森林蓄积量估测方法因其可以快速、高效获得蓄积量模型而引起了国内外学者的广泛关注^[6-8]。回归建模估测法因其工作量相对较少、估测频率高、估测覆盖面积大等优点逐步成为基于遥感因子蓄积量估测研究的主要方向^[9-11]。按照自变量数量可以将蓄积量回归模型分为一元和多元回归,按照方程表现形式可以分为线性和非线性回归^[12-13]。研究森林蓄积量的线性回归方法主要有最小二乘法、逐步回归法、主成分回归法、偏最小二乘法^[14-16]。其中,偏最小二乘法结合了多种回归方法的功能和优点,有效地改善了模型自变量间的多重共线性问题,目前已广泛地应用于各领域的估测研究中^[17-20]。带有点云数据的航测数据与其他遥感数据相比,具有分辨率高、细节更完善、时效性强、成本低等优点,可以更准确地提取蓄积量的相关特征因子^[21-23],从而提高蓄积量估测精度。

本研究利用无人机航摄影像点云数据估测树高和胸径因子,使用正射影像通过分水岭算法提取树冠个数,结合提取的坡向等因子,用主成分回归方法估测郁闭度,结合全部因子通过偏最小二乘回归方法估测森林蓄积量。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

以帽儿山林场老山施业区森林为研究区域(127°18'0"~127°41'6"E, 45°2'20"~45°18'16"N),该林场是东北林业大学实验林场,位于尚志市西北部,场址距市区40 km,隶属于尚志国有林场管理局。林业用地面积26 067 hm²,其中有林地面积23 204 m³,森林总蓄积1 879 380 hm²,森林覆盖率83.29%。老山施业区属于帽儿山林场的一部分,原始地带植被为阔叶红松混交林,现存植被以红松、樟子松、落叶松人工林为主,该区域具有丰富的森林资源适合进行蓄积量研究。

1.2 研究数据

研究数据1来源于航测数据,原始图像数据来源于型号为DJI X3的无人机拍摄而成的影像,机上搭载Canon-EOS-60D数码相机拍摄,有效像素1 240万,最大分辨率可达到4 000×3 000 ppi,成像时间为2015年9月14日,利用航空影像中获得DOM(digital orthophoto map,数字正射影像图),DOM影像面积达到4 723.169 7 hm²,其地理坐标为xian80,研究区域内的DOM与小班矢量图叠加图像见图1。用lasmerge软件将多个点云数据合成为一个点云数据,按照研究数据2实测范围对点云数据进行裁剪,其地理坐标为xian80,其面积为3 129.276 hm²,平均点云密度为49 point/m²,按高程显示的点云数据图像见图2。

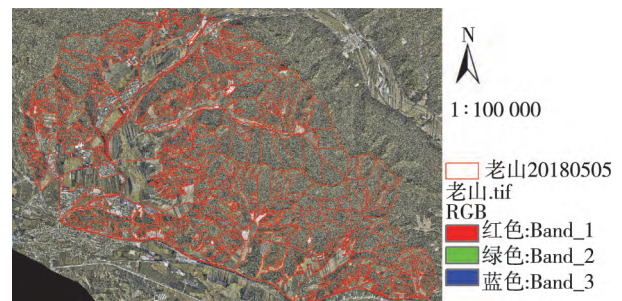


图1 DOM与小班矢量图叠加图像

Fig. 1 DOM and sub-compartment vector overlay image

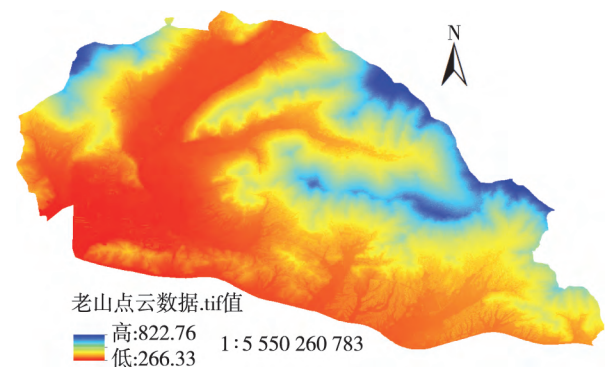


图2 点云数据图像

Fig. 2 Point cloud data image

研究数据2是实测数据,为帽儿山林场老山实验区森林资源二类调查数据。其中包括2015年调查的1:10 000地形图,618个以矢量地理信息数据形式储存的小班二类调查数据。

研究数据3为实测数据,为东北林业大学帽儿山实验林场森林固定样地数据,2004年调查更新的比例尺1:25 000的固定样地分布图,调查总面积为26 496 hm²,包含263个样地的二类调查信息。

1.3 样地筛选

不同类型的GIS因子数据对蓄积量模型精度

有严重的影响,为了减少该影响,对研究数据 2、3 中的针阔混交林小班采用标准差分析法剔除样本中离群较大的数据,即剔除样本中 $|x_{ij} - \bar{x}_j| > 2S_j$ 的数据。重复上述步骤,最终选择到 120 个针阔混交林样本数据。将所有数据进行中心标准化处理,去除因各个因子间量纲不同带来的影响,统一所有因子的量纲,如式(1)所示:

$$x'_{ij} = [x_{ij} - \bar{x}_j] / s_j \quad (1)$$

式中: x'_{ij} 为中心标准化观测值; x_{ij} 为原始观测值; \bar{x}_j 为第 j 变量的均值; s_j 为第 j 变量的标准差。将研究数据 1 按照研究数据 2 二类调查的小班标号顺序进行标定,1~70 号样本为实验样本,71~120 号为估测特征因子模型的检验样本,也是蓄积量估测模型的实验样本;从研究数据 3 中选取 30 个样本,同理对样地进行标定,121~150 号作为蓄积量模型的检验样本。

2 特征参数提取与结果

利用 GIS 技术提取与森林蓄积量相关的树冠个数、平均树高、平均胸径、坡度、坡向、海拔、小班面积、郁闭度这 8 个 GIS 因子建立蓄积量模型,通过该方法提高蓄积量的估测精度。本研究先使用 ArcGIS10.2 软件将 DOM 图像和点云数据图像按照小班边界进行裁剪,为进行特征因子提取做准备。本研究结合点云数据、DOM 图像和研究区小班矢量数据,以二类调查小班为单位对树冠个数、平均树高等因子进行估测,对海拔、坡向等因子进行提取,获得建立蓄积量模型所需的特征因子,特征因子提取流程图见图 3。

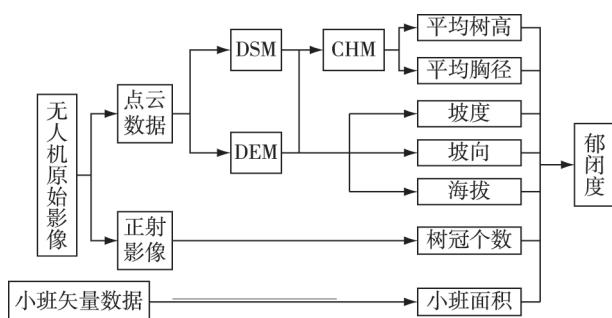


图 3 特征因子提取流程图

Fig. 3 Feature factor extraction flow chart

2.1 特征参数的提取

2.1.1 分水岭树冠个数提取

分水岭算法适合提取边缘微弱较敏感、分辨率高、细节多的影像轮廓,但传统分水岭算法存在过分割问题,为了解决该问题,本研究将 120 个小班正射影像作为分水岭分割的原始图像,首先使用支

持向量机的分类方法将其分为针叶林和阔叶林;其次采用最大熵法分别获得针叶林和阔叶林的最优阈值,比较针、阔叶林的最大熵最优阈值,发现针叶林最优阈值大于阔叶林最优阈值;最后对形态学开闭重建处理后的针阔混交林图像进行基于阈值标记的分水岭分割,第 1 次将小于阔叶林阈值区域进行标记和分水岭分割,第 2 次将大于阔叶林最优阈值,小于针叶林最优阈值进行分割得到树冠轮廓图像。

2.1.2 树高和胸径的估测

使用 LIDAR360 工具对点云数据进行去噪处理,生成 0.5 m 分辨率的 DEM (digital elevation model, 数字高程模型) 和 DSM (digital surface model, 数字地表模型)。由于 DEM 模型中只有地形的高程信息,不包括 DSM 模型中的森林树木高度等地表信息的高程,因此从 DSM 中减去 DEM 即可获得 CHM (canopy height model, 冠层高度模型)。

CHM 中每个点的像素值即为该点的高程值,通过 MATLAB 2013b 软件编程,读取各个小班样本的 CHM 模型平均高程,只保留高程值不为 0 的点进行平均高程的计算。由于 CHM 为冠层模型不能等同于树高,因此需要结合读取的 CHM 平均高程利用一元线性回归方法建立平均树高模型和平均胸径模型。

2.1.3 海拔、坡向、坡度、小班面积因子的提取

使用 LIDAR360 软件在 DEM 基础上生成等高线图(图 4a)。其中比例尺为 1:1 000、三角形最大边为 30 m、间曲线等高距为 2.5 m、首曲线等高距为 5 m、计曲线等高线为 25 m。利用 DEM 数据生成坡向图像和以 10° 为间隔进行处理生成坡度图像,如图 4b、c 所示。

使用 Python2.0 编程,用双线性插值法提取等高线、坡向和坡度平均值。使用 ArcGIS10.2 软件结合小班矢量图计算小班面积,提取各项因子为接下来建立郁闭度和蓄积量模型提供特征因子。

2.1.4 郁闭度估测

主成分回归是主成分分析和回归估计结合的方法,主成分分析是一种变量降维技术,是将多个相关变量重新组合成几个主成分变量,减少变量个数的变量分析方法。该方法能够简化分析过程,提高分析效率。同理主成分回归是用合成后的主成分变量进行回归分析,不仅保留了原自变量对因变量的影响,还消除了各个变量相互间的共线性问题。本研究通过主成分回归将树冠个数、平均树

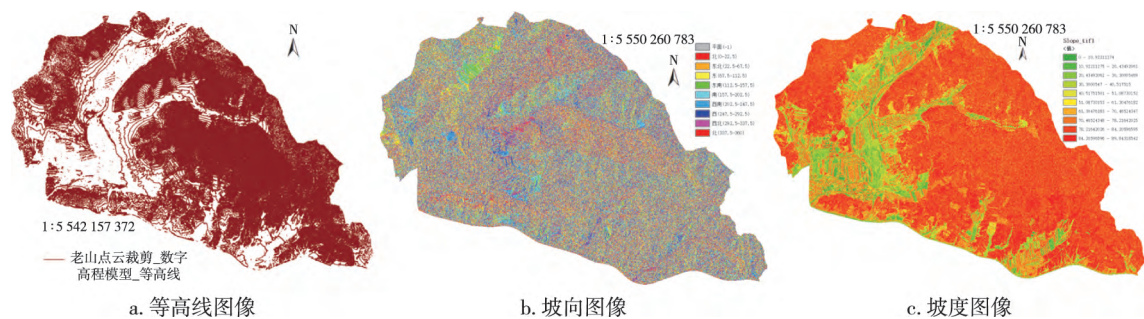


图 4 等高线、坡向、坡度图像
Fig. 4 Contour line , aspect , slope image

高、平均胸径、坡度、坡向、海拔、小班面积这 7 个特征因子组成若干相互独立的主成分 根据各个主成分的贡献率大小选取模型最终的主成分变量 建立郁闭度回归模型。使用 MATLAB 2013b 编程 分析 1~70 号小班数据 得出了各主成分的特征根、主成分得分、主成分累积贡献率。按照贡献率累积 80% 以上的选取标准 根据贡献率的大小顺序选取主成分 主成分与特征因子间的关系方程 再根据主成分的构成 还原郁闭度方程 得到郁闭度与 7 个特征因子的关系模型。

2.2 特征参数的提取结果
2.2.1 树冠个数提取结果

实验使用 2.1.1 部分改进后分水岭分割算法 提取树冠轮廓信息 将树冠分割结果图像进行二值化处理计算连通区域得到树冠个数 通过公式 (2)

计算分割准确率和平均分割准确率来显示分割效果。

$$A_d = \frac{N_c}{N_d} \times 100\% \quad \overline{A_d} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{d_i}}{n} \quad (2)$$

式中: A_d 为准确率; $\overline{A_d}$ 为平均准确率; N_c 为分割的树冠个数; N_d 为小班树木株数总数 (实测小班株数); n 为图像个数。

通过计算得到 120 个样地 DOM 图像的传统分水岭平均分割精度为 52.89% 改进后分水岭平均分割精度为 80.03% 能够达到基本分割要求 改善了传统分水岭存在的过分割现象 分割后得到的树冠个数可以用于建立蓄积量模型。经计算 23 号样地树冠分割精度与平均分割精度最相近 所以选择该样地图像进行显示 (图 5)。

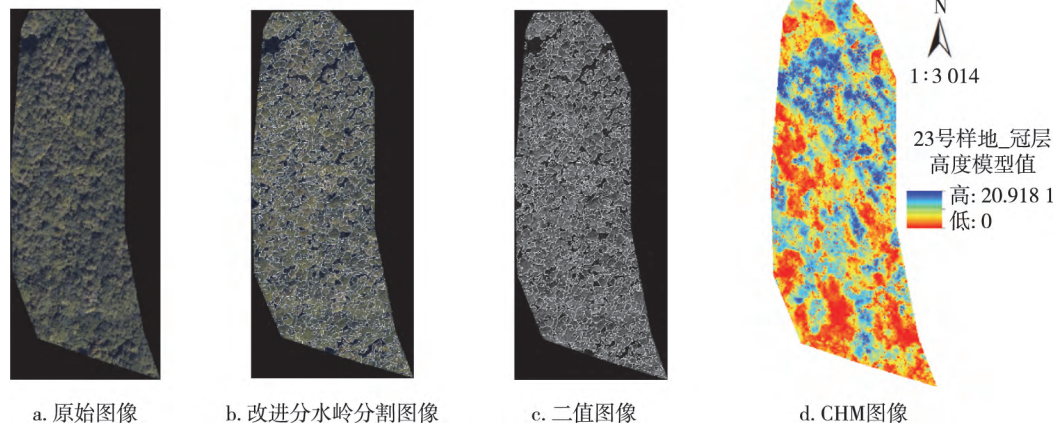


图 5 样地 23 图像
Fig. 5 Sample plot 23 image

2.2.2 平均树高、平均胸径估测结果

根据 2.1.2 部分得到平均树高和平均胸径模型结果如下:

$$\bar{H} = 0.979 \bar{H}_{CHM} + 0.321 \quad (3)$$

$$\bar{R}_{DBH} = 0.733 \bar{H}_{CHM} + 4.27 \quad (4)$$

式中: \bar{H} 为估算的平均树高; \bar{R}_{DBH} 为估算的平均胸径; \bar{H}_{CHM} 为 CHM 提取小班的平均高程。平均树高

模型 (公式 3) 精度达到 97.34% 平均胸径模型 (公式 4) 精度达到 91.27%。用 71~120 号这 50 个检验样本对平均树高和平均胸径的估测值与实测值建立一元线性回归方程 50 个检验样本的平均树高和平均胸径估测值与实测值的拟合曲线见图 6。

由图 6 和平均树高、平均胸径模型的平均精度可知 估测值与实测值的拟合程度较好 且都是由

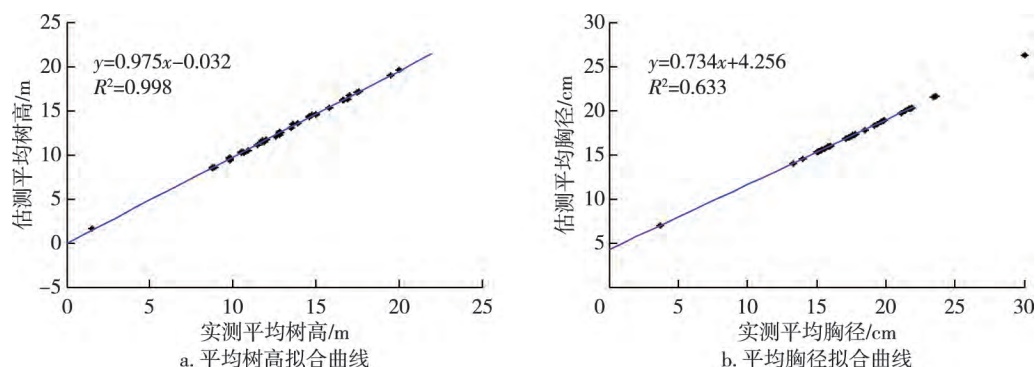


图6 平均树高和平均胸径拟合曲线

Fig. 6 Average height and average DBH curve

CHM 直接进行估测而成,充分利用点云数据所生成的 CHM 数据。

2.2.3 郁闭度估测结果

由 2.1.4 部分将 7 个变量进行主成分分析,其中第 1 主成分贡献率 32.087%,第 2 主成分贡献率 24.375%,第 3 主成分贡献率 18.005%,第 4 主成分贡献率 13.769%。前 4 个主成分贡献率已达到 88.235%,符合主成分选取要求,选取前 4 个主成分因子为新变量。则公式(5)~(8)为 4 个主成分与特征因子间的关系方程。

第 1 主成分为:

$$F1 = 0.024X1 - 0.065X2 - 0.082X3 + 0.042X4 - 0.083X5 + 0.506X6 + 0.586X7 \quad (5)$$

第 2 主成分为:

$$F2 = 0.532X1 + 0.530X2 - 0.062X3 + 0.011X4 + 0.046X5 + 0.049X6 - 0.080X7 \quad (6)$$

第 3 主成分为:

$$F3 = -0.069X1 + 0.052X2 + 0.569X3 - 0.013X4 + 0.564X5 - 0.002X6 - 0.141X7 \quad (7)$$

第 4 主成分为:

$$F4 = 0.180X1 - 0.092X2 - 0.098X3 + 0.978X4 + 0.076X5 + 0.018X6 + 0.045X7 \quad (8)$$

公式(5)~(8)中: $X1$ 为小班平均树高; $X2$ 为平均胸径; $X3$ 为坡度; $X4$ 为坡向; $X5$ 为海拔; $X6$ 为小班面积; $X7$ 为分水岭提取的树冠个数。

主成分回归在减轻原始变量的多重共线性问题后,得到以 4 个主成分为新自变量的郁闭度模型,回归方程为:

$$X8 = 0.739 - 0.002F1 - 0.005F2 + 0.010F3 + 0.019F4 \quad (9)$$

根据 4 个主成分的构成,将回归方程还原,得到关于自变量 $X1$ — $X7$ 的回归方程为:

$$X8 = -0.5737 + 0.0084X1 - 0.0067X2 - 0.0012X3 + 2.8697X4 + 5.0139X5 - 0.0086X6 +$$

$$6.4118X7 \quad (10)$$

方程(9)和(10)中 $X8$ 为郁闭度,通过 71~120 号 50 个检验数据进行精度检验,郁闭度模型(公式 10)精度为 83.18%,可以达到精度要求,再结合前文所有提取和估测的特征因子建立蓄积量模型,进一步研究各个特征因子与蓄积量之间的关系。

3 蓄积量估测模型

3.1 偏最小二乘回归方法

偏最小二乘回归方法是一种集典型相关分析和主成分分析优点以及功能于一身的多元线性分析方法。该方法由于精度高、稳健性实用性好而被广泛地应用于各种估测研究中。

设已知单个因变量 Y 和自变量 $X = [x_1, x_2, \dots, x_p]$ 样本个数 n ,偏最小二乘法从 X 和 Y 的相关矩阵中提取主成分 t ,使用 Y 和 X 对 t 进行回归,对于回归分析的需要,偏最小二乘回归在提取成分时添加以下两个目标:1) 尽可能多地在 t 中携带 X 矩阵数据表中的变异信息;2) t 和 Y 的相关程度能够达到最大。在对 X 和 Y 进行一次成分提取后,分别进行 X 对 t 的回归和 Y 对 t 的回归。如果回归方程达到了满意的精度,就停止计算,否则将 X 关于 t 回归后的残差矩阵与 Y 关于 t 回归后的残差矩阵进行新一轮的成分提取。反复重复这个过程,直至满足交叉有效性原则规定的条件,最终确定提取主变量成分的个数,建立偏最小二乘回归方程^[19]。

3.2 蓄积量模型的建立

借助 SPSS 软件,通过相关性分析得到与蓄积量存在显著关系的 8 个自变量如表 1 所示,表中 $X1$ — $X8$ 同前文。

表 1 表明各因子间存在多重相关性,一般回归模型已不适用,偏最小二乘法对自变量的选择门槛不高,不需要选择最优因子,且较多变量有益于对提取的主成分进行累计解释分析,因此本研究采用

偏最小二乘法建立森林蓄积量估测模型。

在 MATLAB 2013b 软件中按照偏最小二乘原理编写 PLS 回归代码 ,对 1~120 号样本用偏最小二乘法建立蓄积量模型 ,对模型进行交叉有效检验 ,得到原始变量的回归方程系数 ,据此可以拟合出基于偏最小二乘回归方法蓄积量方程。

表 1 特征因子相关系数

Table 1 Characteristic factor correlation relationship table

特征因子	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X1	1	0.706**	-0.108	0.014	0.054	0.134	0.033	0.053
X2	0.706**	1	0.027	-0.105	0.091	0.191	-0.065	-0.127
X3	-0.108	0.027	1	-0.016	0.594**	0.271*	0.224*	0.040
X4	0.014	-0.105	-0.016	1	0.078	-0.108	-0.093	0.137
X5	0.054	0.091	0.594**	0.078	1	0.357**	0.123	0.134
X6	0.134	0.191	0.271*	-0.108	0.357**	1	0.797**	-0.077
X7	0.033	-0.065	0.224*	-0.093	0.123	0.797**	1	0.039
X8	0.053	-0.127	0.040	0.137	0.134	-0.077	0.039	1

$$V = -1.895\ 5 + 28.246\ 8X1 - 3.063\ 0X2 - 30.342\ 4X3 + 0.036\ 8X4 + 5.096\ 3X5 + 58.283\ 5X6 + 0.015\ 7X7 + 1.125\ 7X8 \quad (11)$$

式中: V 为蓄积量 ,方程包含的 $X1-X8$ 与上文一致 ,将 30 个固定样地检验样本数据代入方程(公式 11) ,得到蓄积量估测值 ,为模型评价和精度检验做准备。

3.3 模型评价和精度检验

结合预留的 121~150 号 30 个验证样本实测数据和蓄积量方程(公式 11) 估算的森林蓄积量得到图 7 实测值与估测值折线图。

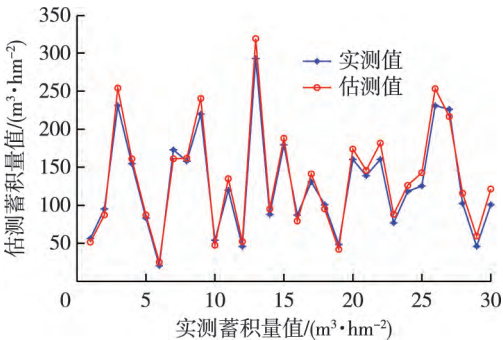


图 7 实测值与估测值折线图

Fig. 7 Line chart of stock volume measured value and estimated value

从图 7 中可以看出估测的蓄积量值整体偏大 ,通过对蓄积量实测值和估测值进行配对 T 检验 ,得到 $T = -0.374$, $P = 0.657 > 0.05$,说明实测值和估测值相比虽然整体偏小 ,但不存在显著性差异。

使用实测值与估测值对模型进行评价 ,根据模型的决定系数 R^2 ,均方根误差 R_{MSE} ,总体相对误差 R_s ,平均相对误差 M_{RE} ,预估精度 P_r 为评价指标。根据公式(12) ~ (16) 计算:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \right] / n} \quad (13)$$

$$R_s = \left(\sum y_i - \sum \hat{y}_i \right) / \sum \hat{y}_i \times 100\% \quad (14)$$

$$M_{RE} = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{y_i - \bar{y}}{\hat{y}_i} \right) \times 100\% \quad (15)$$

$$P_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \left| \frac{y_i - \bar{y}}{\hat{y}_i} \right| \right) \times 100\% \quad (16)$$

式中: y_i 为蓄积量实测值; \hat{y}_i 为蓄积量模型预测值; \bar{y} 为蓄积量实测样本平均值; n 为检验样本数; i 表示第 i 个样本。本研究蓄积量模型(公式 11) 的 $R^2 = 0.738\ 6$, $R_{MSE} = 5.135\ 3\ m^3/hm^2$,说明模型拟合效果较好。利用模型偏差统计量进行比较并评价模型的预测能力 $R_s = -1.285\ 8$ 、 $M_{RE} = -0.263\ 0$,说明估测蓄积量与实测蓄积量偏离不大 ,可以很好地进行蓄积量估测; 精度达到 88.43% ,估测能力较好 ,并且有一定的可推广性。

以蓄积量实测值为横坐标 ,估测值为纵坐标 ,建立实测值和估测值散点图 ,建立的散点图趋势线拟合效果较好 ,实测值和估测值比较吻合(图 8) 。

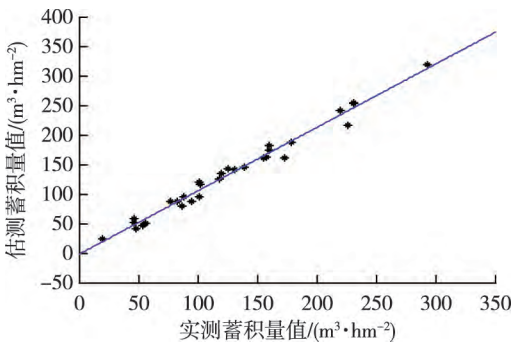


图 8 蓄积量实测值与估测值的散点图

Fig. 8 Scatter plot of measured and estimated values of stock volume

4 结 论

利用无人机影像生成的点云数据和正射影像估测蓄积量的方法,能够在充分利用无人机影像的同时最大限度地保留无人机影像的细节和各种因子的特征,提高特征参数的提取精度。该方法不仅提高了实施效率、降低了估测成本,还为代替人工野外实测森林调查信息提供了可能。无人机数据生成的正射影像与高分辨率卫星影像相比具有重叠度大、分辨率高等优点;其生成的点云数据不仅可以代替机载雷达获得高程信息,还具有航线灵活、操作方便、时效性好等优点。无人机航测数据弥补了高分辨率卫星影像无法同时获得影像和高程信息的缺点,在估测森林生物量和蓄积量方面应用前景广阔。

本研究利用无人机航摄方法采集了黑龙江帽儿山林场老山实验区航摄影像,利用三维点云数据提取 CHM 模型高程,估测了平均树高和平均胸径;用改进的分水岭算法获得了树冠个数;用 DEM 数据获得坡度等特征信息,估测了森林蓄积量。使用帽儿山林场固定样地数据作为检验样本,结果表明,平均树高提取精度达到 97.34%,平均胸径提取精度达到 91.27%,树冠个数提取精度达到 80.03%,郁闭度模型精度为 83.18%,森林蓄积量估测精度达到 88.43%,满足森林调查精度要求。研究得到如下结论:1) 在提取 CHM 平均高程值时不计算高程值为 0 的点,减少了点云数据空白点对平均树高、胸径模型的影响;2) 通过遥感技术提取特征因子,用主成分回归的方法可有效地估测郁闭度;3) 模型中所有因子都是通过遥感与回归方法提取或估测生成,使用偏最小二乘回归方法建立蓄积量模型,为信息化、自动化提取特征因子估测蓄积量提出可能。由于时间和试验条件限制,仍存在很多不足和改进的地方,如波段信息对蓄积量估测的影响等方面有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 王海宾,彭道黎,高秀会,等. 基于 GF-1 PMS 影像和 k -NN 方法的延庆区森林蓄积量估测[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(6): 1070-1078. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2018.06.010.
WANG H B, PENG D L, GAO X H, et al. Forest stock volume estimates in Yanqing District based on GF-1 PMS images and k -NN method[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2018, 35(6): 1070-1078.
- [2] 伏·特·弗罗洛夫,张道兰. 林分蓄积量测定的简便方法[J]. 江西林业科技, 1988, 16(2): 31. DOI: 10.16259/j.cnki.36-

- 1342/s.1988.02.019.
VOLT F, ZHANG D L. A Convenient method for measuring stand volume[J]. Jiangxi Forestry Science and Technology, 1988, 16(2): 31.
- [3] MCROBERTS R E, GOBAKKEN T, NÆSSET E. Post-stratified estimation of forest area and growing stock volume using lidar-based stratifications[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 125: 157-166. DOI: 10.1016/j.rse.2012.07.002.
- [4] 李利伟,黄国胜,王雪军,等. 基于高分辨率遥感影像的森林蓄积量估测[J]. 福建林业科技, 2014, 41(4): 72-76, 109. DOI: 10.13428/j.cnki.fjlk.2014.04.017.
LI L W, HUANG G S, WANG X J, et al. Estimation of the forest volume based on high resolution images[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2014, 41(4): 72-76, 109.
- [5] 汪康宁,吕杰,李崇贵. 基于多尺度遥感影像纹理特征的森林蓄积量反演[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(11): 84-89. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.11.014.
WANG K N, LYU J, LI C G. Inversion of growing stock volume using satellite image multiscale texture feature[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(11): 84-89.
- [6] 郑冬梅,夏朝宗,王海宾,等. 基于 SPOT-7 影像的马尾松生物量估测模型研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(9): 82-88. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.09.013.
ZHENG D M, XIA C Z, WANG H B, et al. Study on biomass estimation model of masson pine based on SPOT-7 image[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(9): 82-88.
- [7] THIEL C, SCHMULLIUS C. The potential of ALOS PALSAR backscatter and InSAR coherence for forest growing stock volume estimation in Central Siberia[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 173: 258-273. DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.030.
- [8] MURA M, BOTTALICO F, GIANNETTI F, et al. Exploiting the capabilities of the Sentinel-2 multi spectral instrument for predicting growing stock volume in forest ecosystems[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 66: 126-134. DOI: 10.1016/j.jag.2017.11.013.
- [9] 王希义,徐海量,潘存德,等. 胡杨单株蓄积量与生物量关系模型研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 175-179. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2016.166.
WANG X Y, XU H L, PAN C D, et al. Study on the model of relation between volume and biomass of single *Populus euphratica* [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(5): 175-179.
- [10] CHOWDHURY T A, THIEL C, SCHMULLIUS C. Growing stock volume estimation from L-band ALOS PALSAR polarimetric coherence in Siberian forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 155: 129-144. DOI: 10.1016/j.rse.2014.05.007.
- [11] XU C, MANLEY B, MORGENROTH J. Evaluation of modelling approaches in predicting forest volume and stand age for small-scale plantation forests in New Zealand with Rapid Eye and LiDAR[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 73: 386-396. DOI: 10.1016/j.jag.2018.06.021.
- [12] 潘正荣. 几种常用森林蓄积量调查方法对比分析[J]. 林业调查规划, 2010, 35(2): 9-10.
PAN Z R. Comparative analysis of several frequently-used

- methods of forest stock volume inventory [J]. *Forest Inventory and Planning*, 2010, 35(2): 9–10.
- [13] MCROBERTS R E, NÆSSET E, GOBAKKEN T. Inference for lidar-assisted estimation of forest growing stock volume [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 128: 268–275. DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.007.
- [14] 洪奕丰, 林辉, 严恩萍, 等. 基于偏最小二乘法的平南县森林蓄积量估测模型研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(7): 80–85. DOI: 10.14067/j.cnki.1673–923x.2011.07.038.
HONG Y F, LIN H, YAN E P, et al. Forest volume estimation model based on partial least square in Pingnan County, Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, 31(7): 80–85.
- [15] 刘明艳, 王秀兰, 冯仲科, 等. 基于主成分分析法的老秃顶子自然保护区森林蓄积量遥感估测 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(10): 80–83, 117. DOI: 10.14067/j.cnki.1673–923x.2017.10.013.
LIU M Y, WANG X L, FENG Z K, et al. Estimation of Laotudingzi nature reserve forest volume based on principal component analysis [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017, 37(10): 80–83, 117.
- [16] 闵志强, 胡云云, 顾丽. 基于多元线性回归的西昌市云南松蓄积量模型研究 [J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(3): 186–190. DOI: 10.3969/j.issn.1001–7461.2017.03.35.
MIN Z Q, HU Y Y, GU L. Study on forest volume model of *Pinus yunnanensis* based on multiple linear regression in Xichang City [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(3): 186–190.
- [17] 李圣娇, 舒清态, 徐云栋, 等. 基于偏最小二乘回归模型的高山松蓄积量遥感估测 [J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(8): 182–185. DOI: 10.15889/j.issn.1002–1302.2015.08.060.
LI S J, SHU Q T, XU Y D, et al. Remote sensing estimation of alpine pine volume based on partial least squares regression model [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(8): 182–185.
- [18] 张超, 彭道黎, 涂云燕, 等. 利用 TM 影像和偏最小二乘回归方法估测三峡库区森林蓄积量 [J]. *北京林业大学学报*, 2013, 35(3): 11–17. DOI: 10.13332/j.1000–1522.2013.03.021.
- ZHANG C, PENG D L, TU Y Y, et al. Predicting forest volume in Three Gorges Reservoir Region using TM images and partial least squares regression [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, 35(3): 11–17.
- [19] 刘琼阁, 彭道黎, 涂云燕. 基于偏最小二乘回归的森林蓄积量遥感估测 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(2): 81–84, 132. DOI: 10.14067/j.cnki.1673–923x.2014.02.020.
LIU Q G, PENG D L, TU Y Y. Estimation of forest stock volume based on partial least squares regression [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 34(2): 81–84, 132.
- [20] 施鹏程, 彭道黎. 基于偏最小二乘回归密云森林蓄积量遥感估测 [J]. *江西农业大学学报*, 2013, 35(4): 798–801. DOI: 10.13836/j.jjau.2013140.
SHI P C, PENG D L. Estimation of forest volume of Miyun county on remote sensing by partial least squares regression [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2013, 35(4): 798–801.
- [21] 李亚东, 冯仲科, 明海军, 等. 无人机航测技术在森林蓄积量估测中的应用 [J]. *测绘通报*, 2017(4): 63–66. DOI: 10.13474/j.cnki.11–2246.2017.0121.
LI Y D, FENG Z K, MING H J, et al. Application of UAV aerophotographic system in forest volume estimation [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(4): 63–66.
- [22] PULITI S, SAARELA S, GOBAKKEN T, et al. Combining UAV and Sentinel-2 auxiliary data for forest growing stock volume estimation through hierarchical model-based inference [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 485–497. DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.007.
- [23] 贾慧, 杨柳, 郑景飏. 无人机遥感技术在森林资源调查中的应用研究进展 [J]. *浙江林业科技*, 2018, 38(4): 89–97. DOI: 10.3969/j.issn.1001–3776.2018.04.015.
JIA H, YANG L, ZHENG J B. Advances of UAV remote sensing applied in forest resources investigation [J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2018, 38(4): 89–97.

(责任编辑 田亚玲)