

无人机遥感技术在森林资源调查中的应用研究进展

贾 慧¹, 杨 柳², 郑景飏³

(1. 重庆文化艺术职业学院, 重庆 401320; 2. 河南农业大学 林学院, 河南 郑州 450002;

3. 信息工程大学 地理空间信息学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 无人机遥感技术以其低成本、低风险、高时效及可产生高分辨率影像的优势, 成为较先进的森林资源调查手段。本文阐述了可搭载于无人机平台上的光学、红外、高光谱、激光雷达和合成孔径雷达载荷的发展现状, 并针对森林资源调查需求, 总结了不同载荷下国内外森林特征参数提取方法和技术的优缺点。最后, 分析了无人机遥感技术应用于森林资源调查中存在的问题, 并对这一技术的未来发展趋势进行展望, 为无人机遥感技术在我国森林资源调查中应用提供参考。

关键词: 无人机; 遥感技术; 森林资源调查; 研究进展

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3776(2018)04-0089-009

Advances of UAV Remote Sensing Applied in Forest Resources Investigation

JIA Hui¹, YANG Liu², ZHENG Jing-biao³

(1. Chongqing Vocational College of Culture and Arts, Chongqing 401320, China; 2. Forestry College, Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China; 3. Institute of Geographic Space, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Descriptions were made on current situation of UAV equipped with different sensors such as in frared optics, high spectrum, laser radar and synthetic aperture radar. Summaries were conducted on forest resources survey like forest characteristic parameters, division of subcompartment, conservation rate of afforestation, forest fire, forest pest by different sensors equipped on UAV at home and abroad. The problems were analyzed and development trend in the future was prospected.

Keywords: UAV; remote sensing; forest resources investigation; research progress

森林资源调查与监测是森林经营与管理的基础, 查清和落实森林资源数量和质量是保证森林资源可持续发展的前提条件^[1]。森林资源调查经过多年的发展, 我国已经构建了以国家森林资源连续清查、森林资源规划设计调查和森林资源作业调查为基础的一、二、三类调查体系^[2]。森林资源调查普遍采用角规辅助每木检尺及加密样地精度控制的方法, 这种调查方法单一且周期较长, 难以适应现代林业和精准林业的要求。近年来, 森林资源调查与监测技术无论是在数据获取还是在数据处理分析方面都有较大的创新与发展^[3-4]。尤其是多载荷无人机遥感技术的日趋成熟, 给森林资源调查注入了新的活力。多级无人机载荷的应用使森林资源调查数据采集多样化、智能化, 拓宽了遥感技术的时空尺度, 比地面静态观测、卫星航天观测更加灵活, 所获得的影像分辨率更高, 满足从小班到林场的探测需求。在无人机上搭载不同传感器能够获得森林资源调查多层面的数据, 但目

收稿日期: 2018-01-11; 修回日期: 2018-06-03

作者简介: 贾慧, 硕士研究生, 讲师, 从事地理信息系统与自然资源保护开发管理研究; E-mail: 276197619@163.com。通信作者: 杨柳, 博士, 讲师, 从事 3S 技术森林资源调查应用研究; E-mail: yangliutj@163.com。

前无人机遥感技术在森林资源调查中应用还处于探索阶段。鉴于此,本文重点阐述了森林资源调查中可利用的无人机遥感的载荷,如:光学、红外、高光谱、激光雷达和合成孔径雷达传感器国内外发展状态,并针对森林资源调查内容和要求,分析了国内外该领域内的无人机森林特征参数提取及应用,最后对无人机遥感技术在森林资源调查中的应用前景进行了展望。

1 无人机森林资源调查可用载荷

无人机是一种机上无人驾驶的航空器,其具有动力装置和导航模块,在一定范围内靠无线电遥控设备或计算机预编程序自主控制飞行^[5]。无人机森林资源调查技术是利用无人驾驶飞行器结合遥感传感器技术、遥测遥控技术、通信技术、POS 定位技术、GPS 差分定位技术和遥感技术对森林资源进行观测和信息提取。载荷是无人机成像所依赖的工具,决定着无人机森林资源调查中影像应用的深度和广度。由于市场需求的推动,无人机载荷发展迅速,逐渐向多维化和立体化方向发展^[6-7],可应用森林资源调查的载荷主要如下:

1.1 轻小型无人机光学载荷

数码相机是无人机上常用的光学载荷^[8]。利用光学载荷获所获取的森林样地观测图像,符合人眼对自然界物体的观察习惯,影像分辨率较高,能够准确反映绝大多数森林地物的形状、质地和色彩,仅依靠目视解译就能够实现林种识别,造林地成活率判别。利用无人机遥感影像可以制作高精度的数字表面模型和数字正射影像,可实现对观测样地林木的冠幅、树高、郁闭度、林分密度等森林参数信息提取。由于无人机体积和承重能力有限,用于其森林资源调查的光学载荷一般要求质量轻、体积小。目前,国内外无人机搭载的光学载荷主要有飞思(Phase)、哈苏(Hasselblad)等中画幅数码相机以及索尼、尼康、佳能、富士、莱卡、三星等小画幅单反相机。这些光学相机分辨率一般在8 000万像素上下,像素尺寸在3.9~6.4 μm 之间^[9]。小画幅单反相机常用的型号为:Canon 5D Mark II, Nikon D800, Sony NEX-7。普通相机常见的有大疆 Phantom3 Professional 的4K相机和大疆 Phantom3 Advanced 的HD高清相机。倾斜摄影中常用的相机有微软UCO相机、刘先林院士研发的SWDC-5相机、上海遥感公司的AMC580、中测新图公司的TOPDC-5、红鹏公司的2K相机、立得空间的leador AMMS等。

1.2 红外谱段无人机遥感载荷

红外谱段指的是频率低于可见光谱段以外波长在0.76~1 000 μm 范围内,位于可见光和微波之间的电磁波波段^[10]。无人机红外谱段载荷是搭载于无人机上的将辐射能量转化为红外辐射强度成正比电信号的传感器。目前,大面阵、高性能的红外探测器价格较高,不太适合轻小型无人机遥感系统大面积推广应用。红外载荷在森林资源调查中可用于林火监测,如:火点分布、过火面积、火情蔓延趋势分析以及林地土壤水分和土壤有机质含量探测等^[11]。目前,常见的无人机红外载荷产品有:Onca系列中红外相机,光谱范围在3.7~4.8 μm 或2.5~5 μm 之间。FLIR公司的热红外相机系列TAU和QUARK,ICI公司的热红外相机系列9640及Mirage640。NEC公司的H2640红外热像仪,日本Avionics无人机红外相机。我国在红外探测仪器方面,开展了从单元、线列到红外焦平面的探测器研究工作^[12]。产品覆盖1~3 μm ,3~5 μm 和8~14 μm 三个大气窗口。可用的载荷产品有:浙江大力的D840、D740G、D900红外热成像仪,广州飒特的HR640L,昆明北方红外的X4UAV,上海巨哥的XM3/6,上海蓝剑的LIRG01、RHV-MC2,中飞万通的ZFWT-1R-E1。

1.3 无人机激光雷达载荷

激光雷达是激光探测与测距系统的简称,无人机机载激光雷达系统集成激光扫描仪、全球定位系统、(GPS)、惯性导航系统(IMU)等技术于一体,是一种主动式航空遥感设备^[13]。它通过激光扫描测距测角,IMU进行姿态测量以及利用GPS进行差分定位,能够获取高分辨率、高精度的地物表面三维坐标以及数字地面模型,同时通过系统集成的航空相机获取地物的高分辨率影像。机载激光雷达技术作为森林资源调查的手段,可用于快速获取大范围森林结构信息,如林分平均高、平均胸径、冠层垂直结构、冠层体积、郁闭度、地上生物量、蓄积量、胸高、断面积、叶面积指数等森林资源调查参数。激光雷达数据可直接获取森林三维结构信息,能够对林

木垂直分布进行参数估计,能在多重时空获取森林的三维地形、植被结构参数。目前,无人机激光雷达载荷主要有微型激光雷达、多脉冲激光雷达、全波形激光雷达、多光谱激光雷达、凝视成像激光雷达、多源传感器融合激光雷达等。其产品主要有美国航空航天局的激光植被成像传感器和激光林冠扫描成像系统,以及奥地利的 Riegl、美国 Velodyne、法国的 L AvionJaune、德国 SICK、日本 Hokuyo、德国的 IBEO、中国科学院光电研究院研制的的 Lair-LiDAR、北京数字绿土研制的 Li-Air 机载激光雷达系统等。

1.4 无人机成像光谱载荷

无人机成像光谱载荷是在无人机上搭载高光谱成像仪,它可以在紫外、可见光、近红外及中红外波段内,获取多个光谱连续的图像数据,能够实时地获取研究对象的影像及每个像元的光谱分布。无人机成像光谱载荷实现了成像技术和光谱技术的融合,能够同时获取森林的光谱信息和空间信息。无人机高光谱载荷由于其具有超细的窄波段设计,光谱响应比宽波段的多光谱数据更灵敏,可更好地描述植被特征,实现冠层生物物理参数和化学参数的估测。它较好地弥补了光学无人机遥感的不足。与传统成像光谱仪有所不同,轻小型无人机成像光谱仪受质量约束,在原始数据处理以及检校方面都有自己的特点。目前高光谱成像系统的遥感平台仍以卫星和载人机为主。国外经过多年的发展,已经积累了数十款各种性能的成像光谱仪。较为著名的有美国 JPL 实验室、HeadWall 公司,加拿大的 ITRES 公司,芬兰 Specim 公司的产品等。国内成像光谱仪主要用于大飞机平台,轻小型成像光谱仪的研制刚刚起步。常用的成像光谱仪有上海技术物理所研制的 WHI、长春光机所的海洋水色成像仪、西安光学机械研究所的傅里叶变换型高光谱成像仪等。国内外轻小型无人机成像光谱仪还在试验阶段,距大规模商业化应用还有一段距离。

1.5 无人机合成孔径雷达载荷

合成孔径雷达是一种主动式相干微波遥感成像技术,其工作波段位于 P 波段到 Ka 波段之间,它能够提供大尺度、高分辨率的地表反射率图像。星载 SAR 受到轨道的限制,无法满足对连续覆盖和快速重复性观测方面的需求,相比之下,无人机微型 SAR 在分辨率,精度、性能、成本等方面有很大的优势。合成孔径雷达对植被有一定的穿透性,与可见光相比,可以更多的获取森林表层和冠层体散射信息,在生物量估测方面,具有无可替代的优势。无人机合成孔径雷达载荷可以联合多光谱载荷和激光雷达载荷进行森林类型分类和生长监测。在合成孔径雷达无人机载荷产品方面,1998 年美国 Sandia 实验室和通用院子公司为捕食者无人机联合研制了轻型 Lynx SAR。2005 年开始,该实验室研制第二代轻量化系统 Mini SAR,与第一代 Lynx SAR 相比,质量更轻、性能更加优越。随着轻小型无人机的快速发展,对更轻的载荷提出了更高要求,传统的脉冲体制 SAR 载荷在质量、功耗和作用距离方面都无法满足无人机载荷发展的需要。目前人们开始研究更具有潜力的调频连续波体制 FMCW,使用体制 FMCW 调频连续波体制,结合芯片技术实现芯片雷达。常用的微型 SAR 载荷产品有美国的 Lynx SAR 和 Mini SAR、NanoSAR,德国的 MISAR,中国科学院电子所的 MSAR。

2 无人机遥感影像森林资源调查应用

我国森林资源调查主要包括一、二、三类调查。森林资源一类调查主要是以森林固定样地为主进行每木检尺的调查。森林资源二类调查主要以小班为单位进行调查,记录小班的面积、林分蓄积量、林分平均高、郁闭度、立体条件等信息。森林资源三类调查是以采伐区为单位进行调查,实质上为主伐作业和营林作业服务的。利用无人机搭载光学数码相机、高光谱扫描仪以及红外相机、合成孔径雷达,可以获取林木和林地的几何轮廓等信息,获取激光背散射强度、高光谱和红外数据,可以实现对森林特征参数的多源信息获取。多源无人机载荷不仅能够对单株立木实现信息特征提取,还能够进行林场级森林资源调查数据采集和与信息处理。目前,多载荷无人机森林资源调查方面应用主要集中在森林特征参数信息提取、森林小班区划与造林成活率核查、森林植被覆盖率提取、森林火灾与病虫害监测方面^[14]。

2.1 森林特征参数提取

森林特征参数是森林资源调查不可或缺的内容,其中包括森林分布范围、树高、胸径、生物量、蓄积量和

碳储量的测算。通过搭载多源无人机载荷,可提取森林经营信息因子,如树高、冠幅和郁闭度等测树因子,可以建立航空森林模型估测模型。实现森林资源信息的快速、高效和低成本地获取。

2.1.1 树种识别 树种类别是森林资源调查中的重要指标,许多森林资源参数都是基于树种来进行估测的。国内外利用无人机进行树种识别研究,主要从高空间分辨率影像和高光谱影像两个方面进行。光学无人机遥感影像的分辨率较高,通过目视解译,结合林相图,根据不同树种的纹理,形状就可进行树种识别。如:冯家莉等^[15]利用固定翼无人机,搭载 Sony NEX-7 相机对广西英罗港红树林自然保护区进行 3 个架次航拍,借助 IPS 3.1 摄影测量软件对 1 469 张照片进行了拼接,利用目视解译方法提取红树林空间分布信息,研究结果表明基于无人机影像和面向对象遥感分类方法提取的红树林空间分布信息精度超过了 90%,研究结果表明,无人机遥感可成为调查和监测红树科 Rhizophoraceae 资源的重要手段。无人机高光谱影像进行树种识别的主要依据是因为植被光谱一般具有一些独特的吸收谱带,不同树种的独特谱带的特征形态和波长位置往往比较稳定,能反映出树种之间的差异。在利用高光谱无人机影像进行森林资源调查信息获取方面,勾志阳等^[16]利用无人机搭载了中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的 128 个波段的高光谱仪,在内蒙古乌拉特前旗开展了无人机高光谱成像仪场地绝对辐射定标及验证分析。吴振洲等^[17]研制了 Offner 微型成像光谱仪的系统,提出了适用于精细农业的成像光谱仪技术指标,在国内建立了基于无人机的低空农作物成像光谱遥感平台。赵旦^[18]基于激光点云数据进行了单木分离,从高光谱遥感影像中提取单木树冠对应的光谱,对单木光谱分别进行了支持向量机和光谱角制图法分类,得到单木树种,研究结果表明,基于 LiDAR 和高光谱遥感数据的单木树种识别较好的识别大多数的单木树种,优势树种的识别正确率大于 90%,优势与亚优势树种识别平均正确率大于 70%。

2.1.2 冠幅估测 冠幅是重要的森林资源调查因子,传统方法是用皮尺测量树冠垂直投影地面的东西方向和南北方向的长度,即得到东西和南北方向的冠幅值。这种地面量测冠幅的方法费时费力。

无人机遥感影像,空间分辨率可以达到 0.1 m,在中低郁闭度的林区,可以清晰看清树冠的空间特征和纹理特征。利用无人机航空摄影测量进行林区成像,数码相机一般是采用垂直地面的方式对地拍摄,获得的影像通常是树木的顶部信息,在影像上树木以颗粒状的树冠呈现。通过树冠和林窗间的颜色和色调差异,就可以识别树冠的轮廓和范围。常用的树冠信息提取方法是人工目视解译,此方法精度高,但无法实现大规模树冠信息提取,目前较多研究采用面向对象法进行冠幅信息提取。樊江川^[19]对无人机影像先按照计算机自动分类的方法进行了林地信息提取,针对林地利用 ENVI 软件进行了影像分割,在考虑光谱、纹理、颜色等信息的基础之上,进行了高、中、低郁闭度条件下的冠幅信息提取,研究结果表明提取精度达到 92.19%。Lin 等^[20]利用 K-均值聚类法和基于 RGB 的植被指数对无人机影像进行了植被盖度信息提取,利用形状分析法和标记分水岭法对单木林木进行了树冠信息提取,研究结果表明标记分水岭树冠提取法精度较高,达到 74%。Honkavaara 等^[21]利用无人机搭载高光谱扫描仪,采用高光谱影像结合可见光影像的方法对研究区的林木树冠进行了分割,在冠幅分割的基础之上利用运动场景法构建了三维场景。

2.1.3 胸径估测 冠幅和胸径存在很大的相关关系,一般来讲,对于同种树种来讲,冠幅越大,其胸径也越大。无人机遥感技术用于胸径估测,可通过典型树种冠幅与胸径之间的线性关系,建立回归模型,从而利用影像上的量测值对胸径进行估测。樊仲谋^[22]利用大地鹰 D-III 无人机对黄泥河大川林场进行了航飞成像,对研究区按针叶树、阔叶树利用线性经验模型、异速生长模型、逻辑斯蒂模型等建立了冠幅——胸径模型,利用二元模型建立了冠幅、树高——胸径模型。孙梦营等^[23]利用固定翼无人机对北京松山自然保护区进行了摄影测量实验,分树种根据冠幅和胸径拟合关系方程,通过冠幅信息进而获取到了胸径值。研究结果表明油松 *Pinus tabulaeformis* 最优胸径—冠幅幂函数模型拟合效果最佳,相关系数达到 0.962。Zhao 等^[24]利用无人机搭载激光配搭传感器,对苏格兰地区的林木进行了成像,在单木分割的基础之上,建立了冠幅、树高一胸径模型,利用随机森林和线性函数模型对区域内林木的生物量进行了估测,结果表明精度达到 0.86 以上。

2.1.4 树高估测 树高是反映材积和林地质量的重要参数,在森林资源调查中,树高分为单木树高和林分平均高。利用无人机遥感影像,可进行单木树高的提取。王伟^[25]利用大地鹰 DIII 型无人机,搭载 SONY NEX-5N 相

机对黄泥河林业局大川林场进行了航飞成像, 利用不规则三角网 TIN 邻近像元内插算法得到数字高程模型, 通过 DSM 和 DEM 求差的方法得到了数字冠层模型 DEM, 并建立了胸径—冠幅模型和胸径—冠幅树高模型, 实验验证两种模型决定系数达 0.67 以上。韦雪花^[26]利用轻小型机载 LiDAR 数据, 进行了森林特征参数提取研究, 结果表明, 利用轻小型机载 LiDAR 点云数据提取的林分平均高与地面角规样地调查相比, 精度达到 83%, 单木树高提取精度为 88%, 单木树冠提取精度为 72%, 林分平均冠幅平均精度为 87%。刘清旺等^[27]利用高采样密度的机载激光雷达数据, 研究了单株木的树高提取和树冠边界识别算法, 针对单株木的树冠特征, 提出了一种双正切角的树冠识别算法。Wallace 等^[28]研制了一种适合于林业调查的无人机激光雷达系统, 该系统搭载 GPS 接收机、IMU、高清摄像机、激光雷达, 通过对获取的图像进行卡尔曼滤波等处理后, 树高精度误差减少到 0.26 m, 冠幅提取精度从 0.69 m 下降到了 0.61 m。Mohan 等^[29]利用无人机对研究区怀俄明州内的林木进行了成像, 利用所获取的数字正射影像对研究区内的林木图像进行了分割, 在数字表面模型基础上构造了数字冠层高度模型, 研究结果表明, 单木高度信息提取精度达到 85%。Tejada 等^[30]利用无人机搭载包含红外波段的数码相机和激光雷达, 对西班牙南部的阿尔科莱阿、科尔多瓦果园进行了成像实验, 利用 pix4UAV 软件生成了研究区域 20, 25, 30, 35, 40, 50 cm/pix 大小的开 DSM 数字表面模型, 结合地面调查点, 对果园树木的高度进行了估测, 研究结果表明树高预测误差在 1.16 ~ 4.38 m 之间。

2.1.5 郁闭度估测 林分郁闭度是指林分树冠投影面积与林地总面积的比值。它反映了森林的疏密度、林木竞争状况, 是森林资源调查中一个重要指标。应用无人机遥感影像对林分密度进行估测, 需要对单木树冠进行识别和分割, 才能准确提取单位面积内林木株数。林分密度大是运用传统方法估测郁闭度最大障碍^[31]。周艳飞等^[32]以无人机航空影像为数据源, 采用目视解译和面向对象方法提取了胡杨 *Populus euphratica*, 怪柳 *Tamarix chinensis* 树冠信息, 获得了树木的冠幅和林分郁闭度。研究结果表明, 利用面向对象进行无人机树冠信息提取, 能克服目视解译速度慢的缺点, 对于大面积林分调查因子定量获取具有优势。穆喜云等^[33]基于机载 LiDAR 数据利用点云密度法对内蒙古根河辖区森林进行了林分郁闭度提取。研究结果表明 LiDAR 点云数据提取的郁闭度与实测郁闭度呈高度相关性, 相关系数为 0.852, 但 LiDAR 数据提取的郁闭度与实测值存在明显低估现象。王聪等^[34]基于光学几何模型, 利用无人机影像对毛竹 *Phyllostachys heterocycla 'pubescens'* 林郁闭度进行了定量反演研究, 实验表明几何光学模型在一定程度上能够实现毛竹郁闭度的估算, 但存在不同混合像元分界精度差异较大的问题。国外最初利用无人机探测大田农作物的郁闭度^[35-36]。Chianucci 等^[37]利用 eBee 无人机搭载红绿蓝三个波段的数码相机对意大利托斯卡纳森林进行了航摄, 利用绿叶算法和 CIE 模型, 结合鱼镜头相机获取郁闭度, 对山毛榉林进行了冠层覆盖度研究。McNeil 等^[38]大疆精灵 3 无人机和鱼镜头, 结合数字摄影测量的方法对欧洲和美国的 5 种阔叶树进行了叶倾角信息的获取, 结果表明安装在无人机上的数码相机是阔叶树叶倾角测量的有效工具, 无人机遥感技术避免了从地上很难看清林冠的障碍, 可以准确、详细的进行叶倾角的测量。

2.1.6 蓄积量估测 材积和蓄积量是森林经营中常用的评价指标。目前, 利用无人机进行蓄积量的估测多采用冠幅-蓄积量回归模型进行。何游云等^[39]利用四旋翼无人机搭载 SONY NEX-5N 相机以王朗自然保护区岷江冷杉 *Abies faxoniana* 为研究对象, 利用 ArcGIS 软件目视解译后的方法提取树冠面积, 利用回归方程和异速生长方程结合样地调查数据建立了岷江冷杉 DBH 遥感估算模型, 估测精度达 0.752。付凯婷^[40]以 EBEE 无人机搭载数码相机, 提取桉树 *Eucalyptus rudis* 单木冠幅、林分平均冠幅、郁闭度林分参数因子, 与实地调查林木胸径建立胸径—冠径回归模型, 结合胸径与单木材积之间的关系模型得到航空单木材积模型从而估测了桉树蓄积量。Puliti 等^[41]对利用无人机系统进行小区域的森林资源调查进行了研究, 采用无人机系统对挪威的沃尔威林区进行了成像, 结合地面调查数据, 进行了优势木树高估测、林木株数、蓄积量估测, 精度分别达到 0.97%, 0.60%, 0.85%。

2.1.7 生物量估测 区域尺度的森林生物量反演多通过回归分析建模进行整个研究区内森林地上生物量估算。通过直接或间接测定森林植被生产量与生物现存量再乘以生物量中碳元素的含量可得到碳储量。Zahawi 等^[42]利用无人机搭载激光雷达载荷, 对墨西哥州的拉斯克鲁塞斯生态站按照航向重叠度为 90%, 旁向重叠度为 75% 的重叠率, 利用 Trimble geoxt 2008 进行了航飞实验, 获取了三维激光点云和多光谱点云, 构建了数字地形和冠

层高度模型,借助 ArcGIS 10.1 生成了单独的树冠高度模型,估算了冠层高度和地上生物量,其与实测值对比,决定系数依次为 0.83 和 0.87。Hopkinson 等^[43]利用机载激光雷达研究了加拿大萨斯喀彻温省 Prince Albert 林场的地上生物量、总初级生产量和碳储量,并和涡度相关方法进行了对比,研究了活碳使用效率和积累生物量总初级生产量之间的关系。Saremi 等^[44]利用机载激光雷达对新南威尔士,澳大利亚的辐射松 Monterey pine 进行了航飞成像,构建了 DBH 模型,借助于异性生长模型计算了蓄积量、生物量和碳储量,对树高、胸径和激光雷达的独立派生指标的实地调查分析。研究表明,保证有足够的点密度情况下,机载激光雷达数据可估计一系列的森林生物物理属性,且具有高的精度。

2.2 森林小班区划

森林小班区划是森林资源调查中的首要任务和主要内容,也是森林资源管理与动态监测的主体业务,传统的“对坡勾绘”小班区划方法,主观性强、工作强度大,由于调查员知识水平、野外调查线路与视角等的差异,容易造成小班区划结果的边界不一致。利用无人机遥感影像进行计算机自动或半自动小班边界提取,可以极大的提高森林小班区划的效率和精度。李蕴雅^[45]利用固定翼无人机搭载 SONY NEX-5N 相机对北京延庆松山国家自然保护区进行航拍,对无人机遥感影像通过空三加密后得到的高精度 DOM 和 DEM,利用 ArcGIS 软件提取出的保护区内坡度、坡向信息,结合针叶林、阔叶林两种林型,将测区区划为了 15 个森林小班。张园等^[46]利用千里眼固定翼无人机搭载索尼 DSC-T90 相机,对浙江农林大学东湖校区周边进行成像,将测区地类,分为竹林、马尾松 *Pinus massoniana* 林、杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林、阔叶林、农业、居民地等 6 类,通过其 EDITOR 功能模板对无人机遥感图像进行了森林区划。史洁青等^[47]针对无人机遥感影像,利用 C#语言结合 ArcGIS Engine 构建了用于林业调查管理的森林资源调查系统,可实现森林区划、面积平差和高精度大比例尺的森林小班调查。

2.3 造林成活率核查

目前,全国营造林综合核查采用分层抽样的方法,各省核查县数抽样比例为 10%~15%工造林更新实绩 2%、飞播造林出苗成效 5%、封山育林实绩及成效 1%、退耕还林工程历年退耕地造林 1%。在利用无人机进行森林成活率核查方面,李宇昊^[48]对无人机在营林造林核查中的应用进行了研究,对无人机影像进行了色彩增强处理,以便识别病死苗和正常苗,结合地面调查,建立了树种病死苗判读标志,采用株数统计和面积统计的方法计算了成活率。Getzin 等^[49]利用无人机对德国南部 10 hm² 的示范林地进行了摄影成像,进行了森林成活率研究。通过无人机影像提取分割了不同林木之间的空隙,应用空间统计分析方法揭示了不同类型林隙正负相关关系,研究表明利用多边形相关函数适合从无人机影像上提取林隙,从而进行林木成活率的研究。

2.4 森林火灾监测

森林火灾是森林资源调查中的重要内容,利用无人机遥感技术进行森林火灾监测快捷、高效。张增等^[50]将无人机遥感可见光图像用于森林火灾监测,利用 HSV 颜色空间对图像进行了分割,得到完整的火灾区域,基于灰度共生矩阵和火灾边缘图像提取了火灾区域特征,用支持向量机方法完成火灾识别过程,提出的算法对森林火灾的检测率可达到 87.7%,识别率达到 89.2%。郭伟等^[51]依据无人机影像提出了基于混合高斯模型和颜色模型的多级火灾隐患验证算法,经试验验证提高了火焰像素监测准确度和图像处理速度,满足了林火监测实时性要求。马瑞升等^[52]构建了微型无人机林火监测系统,以像素 RGB 值为基础对林区火场影像进行了分类。使用聚类方法得到了颜色特征烟雾识别模型,利用该模型烟雾识别率在 77%以上。Henry 等^[53]利用无人航空影像和视频,提出了一种用于检测森林火灾新的方法,利用显色指数,用于图像分类和检测火焰的色调和烟,并构建了森林火灾检测指标。开发了基于无人机遥感的森林防火算法,利用该算法,无人机获取的燃烧和已经烧毁的数据,利用手机软件可以实时获取。Yuan 等^[54]对无人机的发展与计算机视觉系统进行了回顾,同时指出小型化的红外摄像机有很低的敏感性,可应用于火灾报警,无人机在森林火灾监测和检测中的应用,需要载荷硬件技术和图像处理技术的进一步发展。Casbeer 等^[55]对利用多个低海拔、短航程无人机进行森林火灾协同观测进行了研究,并提出了一种利用红外传感器进行火灾实时监测跟踪的算法,利用该算法使用 6 个自由度无人机对森林火灾进行了数值模拟。森林病虫害多发生在人烟稀少、交通不便的林区,常规地面调查监测方法很难迅速、全面、

客观地反映病虫害的发生发展动态,从而不能及时地、有针对性地采取防治措施。Merino 等^[56]考虑了不同种类的传感器,即红外摄像机、摄像机、火灾探测器提出了一种多个异构的协同感知系统无人机,对森林火灾利用无人机多载荷进行了协同探测、监测与测量。何诚等^[57]提出了一种基于 GPS 和微波测距的森林着火点定位方法,通过多旋翼无人机获取林火影像,判断林火位置,实验表明基于多旋翼无人机林火着火点定位精度在 10 m 之内。

2.5 森林病虫害监测

传统森林病虫害防治主要采用人工药物方法,其效率低、周期长。利用无人机进行森林病虫害检测,具有覆盖范围广、监测周期短等优势。在利用无人机进行森林病虫害监测方面,李卫正等^[58]利用固定翼无人机搭载单反数码相机获取了研究区松材线虫病影像,利用 LPS 软件正射处理后导入 Geolink,实现了病死木位置信息采集,经地面差分 GPS 测量验证,水平位置偏差在 0.24 – 2.82 之间。费运巧等^[59]利用 C-Means、FCM、PCM、Type-2 FCM、G-MW 及 FC-MW 六种方法及分水岭的图像分割算法对无人机采集的油松及沙棘 *Hippophae rhamnoides* 正射图进行了图像分割,研究结果表明,C-Means 简单快速,可满足实时性要求,对受灾油松和沙棘图像分割效果较好。胡根生等^[60]利用安装在无人机平台上的双光谱相机所获取的可见光和近红外遥感图像,采用改进的加权支持向量数据描述多分类算法,实现了病害松树识别。Lehmann 等^[61]借助无人机获取了高分辨率的彩色红外识别图像,对德国西部橡树 *Quercus palustris* 的甲虫病害进行了研究,提出了一种改进的归一化植被指数算法,借助该算法和应用不同的滤波器组合对该区域内的橡树灾害进行了评价和监测。

3 研究展望

无人机遥感为森林资源调查提供了新的技术方法,多载荷无人机平台的应用极大地扩展了森林资源调查的深度和广度,为实现精准林业奠定了基础。目前,无人机遥感技术在森林资源调查中应用已取得了一定的研究成果^[62-63],但多数研究偏重于搭载普通数码相机和激光雷达进行森林资源调查信息的提取,利用红外遥感载荷、高光谱成像载荷和合成孔径雷达载荷的研究较少。利用无人机遥感进行森林资源调查信息获取,仍处于起步和发展阶段,要使其发挥很好的作用,还有多个关键技术需要解决。

(1) 无人机光学载荷应用方面,由于树木纹理特征相似性,利用影像进行空三加密时,特征点不容易匹配,适用于林区的无人机影像匹配算法需要进一步研究。目前,多数研究偏重于利用无人机影像进行单木信息提取^[64-65],利用无人机影像进行林分空间特征和结构特征的研究还需进一步加强,再次,由于光学载荷影像,不具有穿透性,只能获取森林植被冠层表面信息,可考虑光学影像和激光雷达影像结合进行森林资源调查信息提取的形式。

(2) 无人机红外遥感影像应用方面,多数研究在可见光红绿蓝三个波段之外,增加了红外波段,从而构造多种植被指数,进行生态环境信息提取。由于无人机具有机动快速的特点,利用无人机红外遥感进行快速森林病虫害监测和森林火灾监测具有较大的优势,无人机红外遥感病虫害监测机理和森林火灾决策指挥系统需要进一步研究。

(3) 无人机激光雷达具有极高的角度分辨力、距离分辨力,可以直接获取地表的三维信息,在林木高度测量以及林分垂直结构信息提取方面具有独特的优势。但由于无人机激光雷达数据量比较大,在加上森林内部结构复杂,不同林木之间遮挡严重,利用无人机激光雷达数据进行单木和林分分割的算法需要进一步研究,以提高其提取精度。再次,无人机激光雷达数据不仅可以利用其空间信息,还可以利用其回波波形信息,如何挖掘波形信息进行森林资源信息提取还需要进一步研究。

(4) 无人机高光谱遥感由于其具光谱分辨率高、波段范围窄、图谱合一、成像连续的特点,可广泛应用于森林植被类型识别,植物生化参数探测,病虫害信息探测等。但轻小型无人机系统搭载推扫式高光谱相机时,由于震动会造成成像质量下降,利用高光谱遥感数据进行森林资源调查信息提取时,需要对图像进行配准,几何校正方法,无人机高光谱遥感监测森林病虫害的机理需要进一步研究。无人机合成孔径雷达森林资源调查应用还处于起步阶段,其应用广度和深度都需要进一步探索。

由于无人机遥感不受轨道和重访周期的限制,具有云下作业、厘米级超高分辨率数据获取和小时级响应能力,可广泛应用于森林资源连续清查、森林经理调查和森林作业设计调查等。通过在无人机上搭载各种传感器,可以获取丰富的地表信息,但由于载荷成像机理、成像条件不同,影像之间的差别较大,不同传感器需要进行优势互补。随着技术的发展,无人机载荷技术将进一步成熟,无人机遥感系统在森林资源调查中应用范围将进一步扩大,更加有效地服务于生态环境建设。

参考文献:

- [1] 赵芳. 测树因子遥感获取方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [2] 闫飞. 森林资源调查技术与方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [3] 冯仲科, 孟宪宇, 韩熙春. 建立我国多级分辨率的森林资源调查技术体系[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(6): 160-163.
- [4] 冯仲科, 黄晓东, 刘芳. 森林调查装备与信息化技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(09): 257-265.
- [5] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2014, 39(5): 505-513.
- [6] 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.
- [7] 胡健波, 张健. 无人机遥感在生态学中的应用进展[J]. 生态学报, 2018, 38(01): 20-30.
- [8] 李祥, 郑清文, 戴楚彦, 等. 基于无人机影像的森林信息获取研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(04): 41-46.
- [9] 廖小罕, 周成虎. 轻小型无人机遥感发展报告[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 109-112.
- [10] 赵英时, 李小文, 陈冬梅, 等. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 94-95.
- [11] 樊浩然, 王云, 张宏伟. 无人机载森林防火告警系统设计[J]. 大气与环境光学学报, 2017, 12(01): 74-80.
- [12] 范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3145-3153.
- [13] 李增元, 刘清旺, 庞勇. 激光雷达森林参数反演研究进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(05): 1138-1150.
- [14] 张绍飞. 森林资源调查中无人机遥感的应用[J]. 农技服务, 2017, 34(6): 104-104.
- [15] 冯家莉, 刘凯, 朱远辉, 等. 无人机遥感在红树林资源调查中的应用[J]. 热带地理, 2015, 35(1): 35-42.
- [16] 勾志阳, 晏磊, 陈伟, 等. 无人机高光谱成像仪场地绝对辐射定标及验证分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2): 430-434.
- [17] 吴振洲. 微型 Offner 成像光谱仪和光谱数据处理[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [18] 赵旦. 基于激光雷达和高光谱遥感的森林单木关键参数提取[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [19] 樊江川. 无人机航空摄影测树技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [20] LIN Y, JIANG M, YAO Y J, *et al.* Use of UAV oblique imaging for the detection of individual trees in residential environments[J]. Urban Forst and Urban Greening, 2015, 14(2): 404-412.
- [21] HONKAVAARA E, ROSNELL T, OLIVEIRA R, *et al.* Band registration of tuneable frame format hyperspectral UAV imagers in complex scenes [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 134(1): 96-109.
- [22] 樊仲谋. 摄影测树原理与技术方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [23] 孙梦莹, 冯仲科, 李蕴雅. 九棵树法提取林分调查因子原理与应用[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(4): 70-74.
- [24] ZHAO K G, SUAREZ J C, GARCIA M, *et al.* Utility of multitemporal lidar for forest and carbon monitoring: tree growth, biomass dynamics, and carbon flux[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 204(2018): 883-897.
- [25] 王伟. 无人机影像森林信息提取与模型研建[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [26] 韦雪花. 轻小型航空遥感森林几何参数提取研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [27] 刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 利用机载激光雷达数据提取单株木树高和树冠[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 83-89.
- [28] WALLACE L, LUCIER A, WATSON C S. Evaluating tree detection and segmentation routines on very high resolution UAV lidar data[J]. IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(12): 7619-7628.
- [29] MOHAN M, SILVA C A, KLAUBERG C, *et al.* Individual Tree detection from unmanned aerial vehicle (uav) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest[J]. Forests, 2017, 8(9): 340-357.
- [30] ZARCO-TEJADA P J, DIAZ-VARELA R, ANGILERI V, *et al.* Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods [J]. European Journal of Agronomy, 2014, 55(2): 89-99.
- [31] ANGELINI A, CORONA P, CHIANUCCI F, *et al.* Structural attributes of stand over story and light under the canopy[J]. Cra Journals, 2015, 39(1): 23-31.
- [32] 周艳飞, 张绘芳, 李霞, 等. 不同方法提取无人机影像树冠信息效果分析[J]. 新疆农业大学学报, 2014(3): 231-235.
- [33] 穆喜云, 张秋良, 刘清旺, 等. 基于机载 LiDAR 数据的林分平均高及郁闭度反演[J]. 东北林业大学学报, 2015(9): 84-89.

- [34] 王聪, 杜华强, 周国模, 等. 基于几何光学模型的毛竹林郁闭度无人机遥感定量反演[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (5): 1501–1509.
- [35] HUNT E R, HIVEY W D, FUJIKAWA S J, *et al.* Acquisition of nir-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring[J]. Remote Sensing, 2010, 2 (1): 290–305.
- [36] GUILLEN-CLIMENT M L, ZARCO-TEJADA P J, BERNI J A J, *et al.* Mapping radiation interception in row-structured orchards using 3D simulation and high-resolution airborne imagery acquired from a UAV[J]. Precision Agriculture, 2012, 13 (4): 473–500.
- [37] CHIANUCCI F, DISPERATI L, GUZZI D, *et al.* Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV[J]. International Journal Applied Earth Observational and Geoinformation, 2016, 47: 60–68.
- [38] MCNEIL B E, PISEK J, LEPISK H, *et al.* Measuring leaf angle distribution in broadleaf canopies using UAVs[J]. Agricultural for Meteorology, 2016: 218–219, 204–208.
- [39] 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.
- [40] 付凯婷. 无人机遥感技术估算桉树蓄积量的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [41] PULITI S, OLERKA H, GOBAKKEN T, *et al.* Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system[J]. Remote Sensing, 2015, 7 (8): 9632–9654.
- [42] ZAHAWI R A, DANDOIS J P, HOLL K D, *et al.* Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery[J]. Biological Conservation, 2015, 186: 287–295.
- [43] HOPKINSON C, CHASMER L, BARR A G, *et al.* Monitoring boreal forest biomass and carbon storage change by integrating airborne laser scanning, biometry and eddy covariance data[J]. Remote Sensing Environment, 2016, 181: 82–95.
- [44] SAREMI H, KUMAR L, STONE C, *et al.* Sub-compartment variation in tree height, stem diameter and stocking in a *pinus radiata* d. don plantation examined using airborne lidar data[J]. Remote Sensing, 2014, 6 (6): 7592–7609.
- [45] 李蕴雅. UAV-RS3D 像对森林信息提取方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [46] 张园, 陶萍, 梁世祥, 等. 无人机遥感在森林资源调查中的应用[J]. 西南林业大学学报, 2011, 31 (3): 49–53.
- [47] 史洁青, 冯仲科, 刘金成. 基于无人机遥感影像的高精度森林资源调查系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33 (11): 82–90.
- [48] 李宇昊. 无人遥感飞机在营造林核查中应用可行性的研究[J]. 林业资源管理, 2006 (1): 91–94.
- [49] GETZIN S, NUSKE R S, WIEGAND K. Using unmanned aerial vehicles (UAV) to quantify spatial gap patterns in forests[J]. Remote Sensing, 2014, 6 (8): 6988–7004.
- [50] 张增, 王兵, 伍小洁, 等. 无人机森林火灾监测中火情检测方法研究[J]. 遥感信息, 2015 (1): 107–110.
- [51] 郭伟, 昂海松, 张思玉. 小型无人机林火监测与图像处理技术[J]. 森林防火, 2014 (4): 26–29.
- [52] 马瑞升, 杨斌, 张利辉, 等. 微型无人机林火监测系统的设计与实现[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29 (5): 783–789.
- [53] CRUZ H, ECKERT M, MENESES J, *et al.* Efficient forest fire detection index for application in unmanned aerial systems(uass)[J]. Sensors, 2016, (6): 893–909.
- [54] YUAN C, ZHANG Y M, LIU Z X. A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques[J]. Canadian Journal for Research, 2015, 45 (7): 3573–3575.
- [55] CASBEER D W, KINGSTON D B, BEARD R W, *et al.* Cooperative forest fire surveillance using a team of small unmanned air vehicles[J]. International Journal of Systems Science, 2006, 37 (6): 351–360.
- [56] MERINO L, CABALLERO F, MARTNEZ-DE DIOS J R, *et al.* A cooperative perception system for multiple uavs: Application to automatic detection of forest fires[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23 (3–4): 165–184.
- [57] 何诚, 张思玉, 姚树人. 旋翼无人机林火点定位技术研究[J]. 测绘通报, 2014 (12): 24–27.
- [58] 李卫正, 申世广, 何鹏, 等. 低成本小型无人机遥感定位病死木方法[J]. 林业科技开发, 2014, 28 (6): 102–106.
- [59] 费运巧, 刘文萍, 骆有庆, 等. 森林病虫害监测中的无人机图像分割算法比较[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53 (8): 216–223.
- [60] 胡根生, 张学敏, 梁栋, 等. 基于加权支持向量数据描述的遥感图像病害松树识别[J]. 农业机械学报, 2013, 44 (5): 258–263.
- [61] LEHMANN J R K, IEBERDING F, PRINZ T, *et al.* Analysis of unmanned aerial system-based cir images in forestry—a new perspective to monitor pest infestation levels[J]. Forests, 2015, 6 (3): 594–612.
- [62] 郭庆华, 刘瑾, 陶胜利, 等. 激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应用现状与展望[J]. 科学通报, 2014, 59 (06): 459–478.
- [63] 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 (04): 63–66.
- [64] 李赞, 温小荣, 余光辉, 等. 基于 UAV 高分影像的杨树冠幅提取及相关性研究[J]. 林业科学研究, 2017, 30 (04): 653–658.
- [65] 刘清旺, 李世明, 李增元, 等. 无人机激光雷达与摄影测量林业应用研究进展[J]. 林业科学, 2017, 53 (07): 134–148.