

基于多源数据协同作业的森林信息提取研究进展*

刘浩然 范伟伟 徐永胜 林文树

(东北林业大学工程技术学院, 哈尔滨 150040)

摘要:传统森林调查手段正逐渐被激光雷达、光学遥感及卫星遥感等新兴的遥感技术所代替。随着研究的不断深入,单一遥感数据源往往难以满足高精度的森林信息提取需求。因此,文中以激光雷达为研究主体,综述摄影测量、高光谱遥感及卫星遥感等多种遥感技术在森林信息提取中不同遥感技术协同作业的研究进展。相较于单一数据源,多源数据协同作业在森林结构参数提取、生物量估测以及树种识别等领域均有明显优势。结合目前的研究工作,从数据获取成本、获取方式、多源数据融合、配套软件及系统构建等方面展望了多源数据协同作业方式的发展趋势。

关键词:森林信息,多源数据,协同作业,激光雷达

中图分类号:S757.2,S771.8

文献标识码:A

文章编号:1001-4241(2020)01-0033-05

DOI:10.13348/j.cnki.sjlyyj.2019.0096.y

Research Progress in Forest Information Extraction Based on Multi-source Data Collaboration Operation

Liu Haoran Fan Weiwei Xu Yongsheng Lin Wenshu

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

Abstract: Traditional forest inventory methods are gradually being replaced by emerging remote sensing technologies such as LiDAR, optical remote sensing and satellite remote sensing. As the research goes deeper, the use of single remote sensing data source are often difficult to meet the needs of high-precision forest information extraction. This paper is focused on LiDAR and uses various remote sensing technologies such as photogrammetry, hyperspectral remote sensing and satellite remote sensing to discuss the research progress in the collaborative operation of different remote sensing technologies in forest information extraction. Compared with a single data source, multi-source data collaborative operations have significant advantages in the areas of forest structure parameters extraction, biomass estimation and tree species identification. At the end, based on the current research work, the future development trend of multi-source data collaborative operation mode is prospected in terms of data acquisition cost, acquisition method, multi-source data fusion, supporting software and system construction.

Keywords: forest information, multi-source data, collaboration operation, LiDAR

我国传统森林调查技术手段存在野外工作强度大、成本高、耗时长以及精度低等缺点^[1]。随着遥感技术、空间技术以及人工智能技术等一系列新兴技术的发展,激光雷达、光学遥感及卫星遥感技术已被广

泛应用于森林信息提取研究。激光雷达(LiDAR)是通过向待测物体发射激光束,并接受目标回波,以此获取待测物体表面点的三维坐标观测技术^[2]。其作为一种新兴的主动遥感技术,在林业应用领域具有传

* 收稿日期:2019-05-06;修回日期:2019-07-23;网络出版日期:2019-10-21。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572019BL03);国家自然科学基金(31971574);黑龙江省博士后基金项目(LBH-215007)。

第一作者:刘浩然,硕士研究生,研究方向为林业遥感,E-mail:384656549@qq.com。

通信作者:林文树,博士,教授,研究方向为森林及其环境遥感监测,E-mail:linwenshu@nefu.edu.cn。

统光学遥感无法比拟的优势。但激光雷达数据不具备光谱信息,且机载与地基激光雷达扫描范围有限,大尺度的森林扫描成本较高。光学遥感作为一种被动遥感技术,不仅能获得高分辨率影像,而且能提供树木光谱信息,并保证数据的空间完整性与时间一致性。然而遥感图像获取易受天气影响,会出现区域性光谱信号饱和问题^[3]。卫星遥感技术则利用星载传感器实现对目标地区的大面积、多频次的森林观测,但因其解译精度较低,无法达到高精度的应用要求^[4]。因此,如何弥补单一遥感平台数据的不足,协同多源遥感数据进行森林资源信息提取成为林业研究者亟待解决的问题之一。本文将综合国内外学者的研究成果,对多源数据协同作业获取森林信息进行探讨。

1 基于地面与航空平台的激光雷达协同作业

在森林信息提取中,以机载激光雷达和地基激光雷达为代表的“空一地”平台应用最为广泛。机载激光雷达(ALS)是一种搭载于飞行平台上的激光测量系统,其发射的激光能够穿透森林冠层,获取森林垂直结构信息。但高郁闭度森林冠层间遮挡现象严重,ALS自上而下的扫描方式无法精确获取下层森林植被信息。地基激光雷达(TLS)可获取大量的高精度三维点云,能精确提取冠层以下森林结构参数,同时具有自动化处理数据的潜力^[5]。然而地基激光雷达扫描范围有限,不能完全获取树冠上层信息。由于机载和地基激光雷达具有很好的互补性,因此将ALS和TLS进行协同作业,可在很大程度上解决单一平台激光点云数据在森林信息提取研究中的技术瓶颈。

1.1 TLS为ALS数据提供验证

TLS扫描获得的点云具有数据量大、精度高的特点,通过TLS数据提取的森林信息可为ALS提供可靠验证,使得TLS的高精度优势能应用到更大范围的林分中。Lindberg等^[6]利用TLS数据作为训练样本处理基于ALS提取的胸径及树高,结果表明,胸径和树高的均方根误差分别为4.6 cm和0.94 m,这与实地调查数据作为训练样本所得结果的精度相近。Hopkinson等^[7]提出了一种利用TLS数据生成叶剖面参数的方法,对ALS数据提取的有效叶面积指数进行定标,运用该方法定标后的叶面积指数估测值可推广应用到范围更大的林分中。Yang等^[8]对地面全波形激光雷达扫描数据进行森林三维重建,快速、有

效地测量了树木垂直结构,并通过体元法直接估算叶面积指数和叶剖面,这与野外实测数据以及ALS测量值吻合较好,证明地基数据能为机载数据提供可靠的验证。

1.2 ALS与TLS数据融合

数据融合是将不同数据信息的特点进行综合,从中提取出比单一数据更丰富的信息,提高数据处理的精确度和自动化程度。Fritz等^[9]通过一系列方法将ALS和TLS数据中相关联的单木进行配准,通过配准后的点云数据提取冠幅、树高、胸径等一系列参数。但由于该方法获取的2种数据中树顶位置差别较大,所以配准精度存在一定误差。Paris等^[10]利用ALS的互补视角从TLS中提取冠状结构,对2种数据提取的冠层高度模型进行归一化处理,从而将TLS点云自动匹配到ALS点云中,实现了ALS与TLS数据的融合。研究表明,基于融合后点云数据提取的树木结构参数精度更高,提取过程所花费的时间也更短。但该方法仅适用于郁闭度不高且树木形状不规则的林分。Francesca等^[11]基于Computree软件比较了TLS及其与ALS融合后提取森林结构参数的精度,其中由TLS点云提取以及TLS与ALS点云融合后提取树高估测值的均方根误差分别为29%和23%,相应的偏差量分别为0.24 m和0.18 m。刘鲁霞^[12]在基于ALS和TLS点云数据提取树高的过程中,采用以生长方向为基准的方法将二者匹配,得到了更为准确的树高估测值($R^2 = 0.91$)。

由此可见,ALS与TLS数据的融合配准能够有效克服单一平台在林业应用中难以完整扫描整棵树木的局限性,从而提高森林信息提取的准确度及完整性。因此,基于地面平台及航空平台的多源激光雷达点云数据融合技术将为多角度、多时相的高精度森林信息获取奠定基础。

2 激光雷达与航空摄影测量协同作业

森林航空摄影测量是基于航空平台利用光学摄影机对森林进行探测,简称森林航测。主要用于森林资源调查、林区土地利用规划和管理以及森林灾害监测等^[13]。由于激光雷达扫描得到的点云数据是离散的,无法获取森林真实的纹理信息。因此,通过航空影像获得的森林表面信息可与激光雷达点云数据形成优势互补^[14]。

Baltsavias^[15]从所使用的传感器、成像原理及测量精度等方面分别介绍了激光雷达技术和摄影测量技术的优势和不足,论证了两者融合的可能性及其广泛的应用前景。Aicardi等^[16]利用运动恢复结构(SFM)算法将无人机影像转化为点云数据,并结合TLS数据获得完整的树木三维信息,建立了研究区森林的高精度三维模型。但Aicardi同时也指出,2种数据处理仍然需要同名点的交互选择,这不仅会增加时间成本,而且容易受到人为误差的影响。张吴明等^[17-18]利用光学图像与LiDAR数据中存在的几何约束进行了配准研究,该方法只需要多个目标的激光雷达点云及其在图像中的相应边界,对物体的几何和光谱特性没有限制。结果表明:该方法实现了无人机影像生成的点云与地基激光雷达点云数据的融合,配准误差为2.0 cm;在树高提取结果对比中,融合数据比TLS数据的均方根误差平均降低0.475 m,估测精度显著提高。

总之,激光雷达与航空摄影测量的协同作业属于主动遥感与被动遥感的结合。激光雷达能获取高精度、高密度的点云数据,但获取成本相对昂贵,同时在算法处理、软件和系统开发方面还有很大的改进空间;相比于激光雷达,低廉的成本、成熟的数据处理流程以及快速获取目标物体表面信息的能力是航空摄影测量所具有的优势。因此,两者融合后的数据将在森林信息提取中有着更为灵活、更加广泛的应用。

3 激光雷达与高光谱遥感协同作业

高光谱遥感技术主要应用于森林信息提取、树种识别及健康评价等方面。但光谱分辨率越高,势必会导致空间分辨率的相对降低,从而限制了高空间分辨率的森林信息提取研究需求^[19]。另外,波段数的增加会导致数据的冗余,降维和去噪的工作量也将增大。

刘丽娟^[20]基于LiDAR数据的回波数量、回波强度信息提取了表征激光穿透及叶密度参数,与高光谱植被指数共同作为统计模型的输入自变量,通过模型构建实现了叶面积指数的高精度反演。Dalponte等^[21]在激光雷达数据冠层提取的基础上引入了高光谱信息,不仅计算了冠层的最小值、最大值及标准差等,还得到了高光谱数据中不同波段冠层之间的平均值。联合获得的多个变量值构建胸径估测模型比单一遥感数据有着更优的估测值,平均绝对误差为

4.15 cm,标准均方根误差为13.2%。Luo等^[22]研究证明了与单一LiDAR数据或高光谱数据相比,融合后的LiDAR和高光谱数据通过偏最小二乘回归可得到森林生物量的最高估计准确度(对于BGB,AGB和TB, R^2 分别为0.785,0.893和0.882, $p < 0.0001$),其主要原因是LiDAR数据可以提供植被冠层的三维结构信息,而高光谱数据可以提供植被的互补光谱特征。

Dalponte等^[23]基于复杂林分提出利用高光谱与LiDAR数据进行综合分析,研究表明,不同激光雷达回波和通道对高光谱图像分类精度有较大提高。Rudjord等^[24]提出一种判别挪威森林中云杉、松树和桦树等树种的新方法,该研究利用LiDAR数据对高光谱数据中低植被或无植被的像素进行掩模,从特异性光谱中确定了544 nm(绿色)、674 nm(红色)和710 nm(红边)3种波长用于树种鉴别。最后基于决策树的像素分类方法获得83%~86%的树种分类精度。Shoot^[25]基于高光谱与LiDAR数据的多种分类指标测试了5种不同算法(朴素贝叶斯分类器、k近邻、多项式逻辑回归、支持向量机和随机森林)的分类精度,其中随机森林算法总体分类准确率最高,达77.53%。陶江玥等^[26]基于融合后的冠层高度模型与高光谱数据,引入植被指数能有效区分混合像元并提高分类精度,根据树木结构和高度差异,采用基于高度分层的训练样本不仅提高了样本选取精度与速度,也在一定程度上解决了“同物异谱、异物同谱”的问题。

综上所述,在森林覆盖率高、树种与林分结构复杂的情况下,引入光谱信息扩大了参数估计时特征变量的数量,从而在一定程度上提高了森林结构参数的提取精度。另外,高光谱数据在进行森林树种识别分类时具有独特的优势,但其分类精度受限于较低的空间分辨率。总之,高光谱数据与高精度的LiDAR数据协同作业,可大大提高分类精度。

4 激光雷达与遥感卫星协同作业

随着遥感卫星技术的不断发展,借助遥感卫星进行大尺度森林信息提取已成为林业应用研究的重要手段。常见的遥感卫星有美国Landsat系列、中国GF系列、欧洲SPOT系列及一些环境小卫星,多应用于森林资源动态监测和管理。星载激光雷达不同于上述遥感卫星,其优势在于发射的激光对森林冠层

具有一定的穿透能力,通过回波波形数据获取森林冠层三维结构和冠层下的地形信息,并能够估算冠幅、树高及生物量等森林结构参数^[27]。但星载激光雷达难以获取森林水平结构参数,且由于数据的离散性和大光斑属性,导致森林信息获取不全^[28]。

王蕊等^[29]以 GLAS 波形数据和 TM 遥感影像为数据源,分别采用多元线性回归和 BP 神经网络算法建立模型对森林郁闭度进行估测,2 种模型的估测精度分别为 0.841 和 0.851,明显优于 García 等^[30]仅使用 GLAS 数据对森林郁闭度的估测精度(0.576)。为克服星载激光雷达光斑离散性而导致的估测误差,邱赛等^[31]联合 GLAS 波形数据与 HJ-1A 高光谱数据,借助高光谱数据提供的连续高分辨率光谱信息,建立区域“森林冠层高度—支持向量机”估测模型,生成森林冠层高度分布图。结果表明,在研究区 0~35° 坡度范围内,建模精度和验证精度分别可以达到 0.70 和 0.67,与野外实测数据对比有很高的可靠性。Saatchi 等^[32]通过 GLAS 数据、MODIS 和 QuikSCAT 等光学数据联合估测全球热带国家及地区的森林生物量,同时生成森林生物量的不确定性分析图。池泓等^[33]在联合 GLAS 和 Landsat/ETM+ 数据估算森林地上生物量时发现, GLAS 数据的波形参数与林分平均冠层高度具有很好的相关性。因此,将 GLAS 光斑中的波形信息和实测数据相结合建立模型,能将小范围内的野外采样点信息外推到更多的 GLAS 光斑中去,以提供大量地面观测数据作为参考。

因此,以星载激光雷达为代表的卫星遥感技术通过相互之间的协同作业,克服了 GLAS 数据的离散性和光学遥感数据的低分辨率问题,可实现森林结构参数的精确估算。目前大部分研究都是基于经验模型进行反演,未来可基于不同遥感数据的特征变量发展定量模型来反演森林结构参数更具潜力。

5 讨论与研究展望

本文以激光雷达为核心,联合摄影测量、高光谱及卫星遥感等多种遥感技术进行多源数据协同作业方式的探讨与研究,旨在结合不同遥感技术优势,取长补短,提高作业效率,同时进一步提高森林信息获取的精度。然而,在多源数据协同作业中,依然存在不少问题:

1) 部分研究结果是基于内部结构简单的林分,然而森林内部结构的复杂程度是林业研究不可避免

的问题。例如,在高郁闭度林分中树冠之间遮挡现象严重,极易出现“过分割”和“欠分割”现象;星载激光雷达的波形数据与地形坡度间存在很强的线性关系,研究区地形的起伏势必会影响到波形数据的精度等。随着遥感技术的成熟,如何实现对复杂林分的大尺度、高精度观测将是今后研究的方向之一。

2) 激光雷达作为新兴的遥感技术,其配套的识别算法、软件以及处理系统尚不成熟,大大降低了协同作业的效率。此外,由于算法识别精度不高、经验模型时空移植性差、作业流程多以半自动化为主,不仅增加了时间成本,而且容易受到人为误差的影响,往往导致在某一研究区内得到的结论难以大范围推广使用。因此,需要对多源数据处理的算法及软件系统进行深入的研究。

3) 不同的遥感技术获取数据的结构不同。例如,激光雷达获取的是高精度点云数据,而高光谱遥感和卫星遥感多以像元级图像为主,这无疑增加了多源数据融合时树木位置、树冠顶端以及同名点等配准的难度,造成匹配精度低、数据冗余等一系列问题。多源数据融合作为协同作业的主要方法之一,其技术与方法的改进将推动协同作业方式的自动化进程。

随着多源数据融合技术的不断成熟,森林资源调查也呈现多元化、自动化、高效化的发展趋势。未来可加强遥感观测技术之间相互配合的研究,协调不同遥感数据源之间的差异性;结合不同区域的森林属性,采用机器学习方法建立多特征变量的训练样本,寻找最优模型和算法,满足森林信息获取的自动化和精准化需求,并实现大尺度推广;通过联合地面平台、航空平台与航天平台的多种遥感技术,构建“天—空—地”三位一体的森林资源监测体系。

参 考 文 献

- [1] 邓成,梁志斌. 国内外森林资源调查对比分析[J]. 林业资源管理,2012(5):12-17.
- [2] 梁欣廉,张继贤,李海涛,等. 激光雷达数据特点[J]. 遥感信息,2005(3):71-76.
- [3] 王臣立. 雷达与光学遥感结合在森林净初级生产力研究中的应用[D]. 北京:中国科学院研究生院,2006.
- [4] 王小明. 卫星遥感技术在我国林业中的应用与展望[C]. 第十五届全国遥感技术学术交流会,贵阳,2005.
- [5] 刘鲁霞,庞勇. 机载激光雷达和地基激光雷达林业应用现状[J]. 世界林业研究,2014,27(1):49-56.
- [6] LINDBERG E, HOLMGREN J, OLOFSSON K, et al. Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser

- scanning[J]. *European Journal of Forest Research*, 2012, 131(6): 1917–1931.
- [7] HOPKINSON C, LOVELL J, CHASMER L, et al. Integrating terrestrial and airborne lidar to calibrate a 3D canopy model of effective leaf area index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136: 301–314.
- [8] YANG X, SCHAAF C, STRAHLER A, et al. Studying canopy structure through 3-D reconstruction of point clouds from full-waveform terrestrial lidar[C]. 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS, Melbourne, Australia, 2013: 3375–3378.
- [9] FRITZ A, WEINACKER H, KOCH B. A method for linking TLS- and ALS-derived trees[C]. *SilviLaser 2011*, Hobart, Australia, 2011.
- [10] PARIS C, KELBE D, VAN AARDT J, et al. A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS lidar data for robust assessment of tree crown structure[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(7): 3679–3693.
- [11] FRANCESCA G, NICOLA P, VALERIO Q, et al. Integrating terrestrial and airborne laser scanning for the assessment of single-tree attributes in Mediterranean forest stands[J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2018, 51(1): 795–807.
- [12] 刘鲁霞. 机载和地基激光雷达森林垂直结构参数提取研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [13] 金瑞云. 谈森林航空摄影测量技术在森林测绘中应用[J]. *企业家天地*, 2009(6): 166–167.
- [14] 徐勇, 裴海龙. 基于特征的机载激光点云与影像数据的融合[J]. *计算机测量与控制*, 2014, 22(2): 607–610.
- [15] BALTSAVIAS E P. A comparison between photogrammetry and laser scanning[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1999, 54(2/3): 83–94.
- [16] AICARDI I, DABOVE P, LINGUA A M, et al. Integration between TLS and UAV photogrammetry techniques for forestry applications[J]. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2016, 10(1): 41–47.
- [17] ZHANG W, ZHAO J, CHEN M, et al. Registration of optical imagery and LiDAR data using an inherent geometrical constraint[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7694–7770.
- [18] 张吴明, 李丹, 陈一铭, 等. 联合地基激光雷达与无人机摄影测量技术提取树高研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(6): 764–771.
- [19] 谭炳香. 高光谱遥感森林应用研究探讨[J]. *世界林业研究*, 2003, 16(2): 33–37.
- [20] 刘丽娟. 基于机载 LiDAR 和高光谱融合的森林参数反演研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [21] DALPONTE M, BRUZZONE L, GIANELLE D. Fusion of hyperspectral and LiDAR remote sensing data for the estimation of tree stem diameters[C]. 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009.
- [22] LUO S, WANG C, XI X, et al. Fusion of airborne LiDAR data and hyperspectral imagery for aboveground and belowground forest biomass estimation[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 378–387.
- [23] DALPONTE M, BRUZZONE L, GIANELLE D. Fusion of hyperspectral and LiDAR remote sensing data for classification of complex forest areas[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(5): 1416–1427.
- [24] RUDJORD Ø, TRIER Ø D. Tree species classification with hyperspectral imaging and lidar[C]. 2016 8th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), Los Angeles, USA, 2016: 1–4.
- [25] SHOOT C. Classifying FIA forest type from a fusion of hyperspectral and LiDAR data[D]. Seattle: University of Washington, 2018.
- [26] 陶江玥, 刘丽娟, 庞勇, 等. 基于机载激光雷达和高光谱数据的树种识别方法[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(2): 314–323.
- [27] 李然, 王成, 苏国中, 等. 星载激光雷达的发展与应用[J]. *科技导报*, 2007, 25(14): 58–63.
- [28] 胡凯龙. 不同空间尺度森林参数多源遥感反演方法[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- [29] 王蕊, 邢艳秋, 王立海, 等. 联合星载 ICESat-GLAS 波形与多光谱 Landsat-TM 影像的森林郁闭度估测[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1657–1664.
- [30] GARCÍA M, POPESCU S, RIAÑO D, et al. Characterization of canopy fuels using ICESat/GLAS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 81–89.
- [31] 邱赛, 邢艳秋, 田静, 等. 星载 LiDAR 与 HJ-1A/HSI 高光谱数据联合估测区域森林冠层高度[J]. *林业科学*, 2016, 52(5): 142–149.
- [32] SAATCHI S S, HARRIS N L, BROWN S, et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(24): 9899–9904.
- [33] 池泓, 黄进良, 邱娟, 等. GLAS 星载激光雷达和 Landsat/ETM+ 数据的森林生物量估算[J]. *测绘科学*, 2018, 43(4): 9–16.