

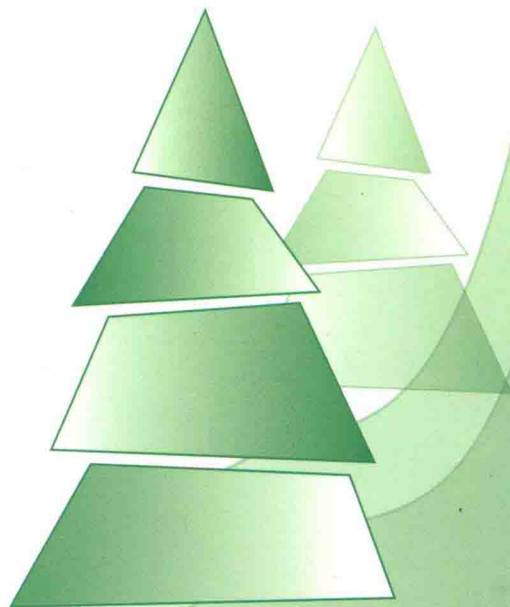
环境与资源博士文库 〔第3辑〕



遥感技术在自动化 森林资源清查中的 应用研究

柯樱海 李小娟 宫辉力 著

RESEARCH ON THE APPLICATION OF
REMOTE SENSING TECHNOLOGY IN
AUTOMATED INVENTORY OF FOREST RESOURCES



中国环境出版社

环境与资源博士文库（第3辑）

遥感技术在自动化森林资源清查中的应用研究

**Research on the Application of Remote Sensing Technology in
Automated Inventory of Forest Resources**

柯樱海 李小娟 宫辉力 著

中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

遥感技术在自动化森林资源清查中的应用研究/柯樱海, 李小娟, 宫辉力著. —北京: 中国环境出版社, 2015.3
(环境与资源博士文库. 第3辑)

ISBN 978-7-5111-2204-9

I. ①遥… II. ①柯…②李…③宫… III. ①遥感技术—应用—森林资源调查—研究 IV. ①S757.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 010623 号

出 版 人 王新程
责任编辑 沈 建
助理编辑 宾银平
责任校对 尹 芳
封面设计 彭 杉

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67113412 (教材图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2015 年 4 月第 1 版
印 次 2015 年 4 月第 1 次印刷
开 本 880×1230 1/32
印 张 6.25
字 数 134 千字
定 价 25.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载，侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换

前 言

森林资源在全球生态、环境以及社会经济中起着举足轻重的作用。森林资源清查致力于获取有关森林资源分布及森林质量的参数，包括森林分布、树木种类、冠幅以及树木健康状况等。现代遥感技术的快速发展为森林资源快速、准确、自动化的调查与分析提供了巨大的机会。本书旨在探讨利用遥感数据在森林林分层面及单株立木层面上实现森林资源的自动调查与分析的方法。

在森林林分尺度上，本书探讨了利用高空间分辨率多光谱遥感影像与激光雷达（LIDAR）数据的协同在森林树种分类中的应用。研究基于面向对象方法，利用机器学习决策树来建立分类规则集，从而实现对森林树种的分类。结果表明，协同利用光谱数据与 LIDAR 数据，无论在图像分割环节还是面向对象分类环节中，其分类结果都优于单一使用其中任何一种数据。

在单株立木尺度上，本书探讨了基于高分辨率遥感影像进行单株立木树冠自动提取和勾勒方法。基于对现有方法的综述，本书比较了其中较有代表性的三种方法——分水岭算法、区域生长算法和低谷跟踪算法。三种算法分别应用于航空真彩色正射影像以及入射角为 11° 的卫星遥感影像采集的阔叶林与针叶林林地影

像,以比较算法在不同森林树种条件下、不同遥感影像上的性能。同时,本书提出了单株立木树冠检测与勾勒的精度评估框架。基于对现有算法的比较和理解,本书提出了一个新的可适用于多种遥感成像条件的单株立木树冠自动检测和勾勒方法。这个新方法基于主动轮廓模型和爬山算法建立,综合考虑不同种图像的光谱和几何特征,并且利用森林林分的专家知识来提高树冠检测的精度。和现有算法相比,新方法在三种图像类型中对树冠提取的精度均有不同程度的提高,并能够提供准确的冠幅估测值,这可为进一步基于冠幅的林木蓄积量估算、林木种群分类和树木健康分析提供准确的输入参数。

本书由柯樱海主笔,李小娟、宫辉力为本书提供整体框架指导。研究生李丹、吴燕晨等参与部分工作,在此表示谢意。由于编写人员水平有限,书中难免会存在诸多不足,敬请专家、读者不吝指正。

目 录

第 1 章 绪 论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 基于遥感技术的森林资源清查与分析研究	3
1.3 研究目的和科学假设	7
1.4 本书大纲.....	8
参考文献.....	8
第 2 章 基于 QuickBird 影像与 LIDAR 数据协同的森林树种 面向对象分类研究	12
2.1 引言.....	13
2.2 数据收集.....	18
2.3 方法.....	22
2.4 结果与讨论.....	29
2.5 结论.....	52
参考文献.....	54

第3章 基于被动遥感的单株立木树冠自动检测与 勾勒方法综述	60
3.1 引言	61
3.2 影像预处理与增强	69
3.3 树冠检测与勾勒算法	72
3.4 精度评估方法	84
3.5 结论	88
参考文献	91
第4章 基于高分辨率遥感影像的树冠自动检测与 勾勒方法比较研究	99
4.1 引言	100
4.2 背景: 树冠检测与勾勒方法综述	104
4.3 数据和方法实现	108
4.4 结果和精度分析	112
4.5 讨论	126
4.6 结论	132
参考文献	133
第5章 基于主动轮廓模型和爬山算法的树冠检测和 勾勒方法	137
5.1 引言	138
5.2 数据收集	140
5.3 方法	144
5.4 结果和讨论	152
5.5 算法评价	163

5.6 结 论.....	166
参考文献.....	167
 第 6 章 结论和展望.....	 170
6.1 总 结.....	170
6.2 研究假设 1: 协同利用高分辨率光学影像和低点 云密度 LIDAR 数据, 相比较单独使用其中任意 一种数据, 可有效提高森林树种分类的精度	170
6.3 研究假设 2: 本研究提出的基于高分辨率遥感影 像的单株立木树冠检测和勾勒算法可以在不同 成像条件下提供精确的树木位置和冠幅信息	172
6.4 未来研究方向	173
参考文献.....	175

第1章 绪论

1.1 引言

森林是地球上分布最广的生态系统，在世界环境、经济和社会中扮演着重要的角色。森林资源是自然界最重要的资源之一，它们不仅为人类生产和经济生活提供多种木材和原材料，同时也为野生动物提供了赖以生存的栖息地，是生物多样性保护的基础。不仅如此，森林通过气候调节、水土保持、碳储存、将温室气体二氧化碳转换为氧气等方式影响着全球的环境。目前，随着森林滥伐、土地沙漠化、生物多样性的减少以及臭氧水平的抬升日趋严重，森林资源的可持续管理显得尤为必要（Davis et al., 2001）。有效的森林资源管理需要对森林参数进行及时、一致和准确的描述，这些参数包括：森林林分的位置、空间范围、物种组成和结构，单株立木的种类、健康状况和尺寸大小，以及与单株立木生长、死亡、采伐等相关的时序参数。

一般来说，森林资源的相关参数是由森林资源清查的方式来收集。传统的森林资源清查一般包括对预先设定好的样地中的

每棵树的相关参数进行周期性的实地测量采集。从 20 世纪早期开始, 航拍相片的目视解译已经用于森林资源清查和分析 (Hagan et al., 1987; Alemdag, 1986; Pitt et al., 1993)。然而, 实地测量和航片人工解译都耗费大量的人力、财力。自 20 世纪 50 年代以来, 随着遥感技术迅速发展, 航空遥感、卫星遥感数字影像的广泛应用为大区域范围森林参数的自动获取提供了机会。然而, 尽管基于遥感数据的森林资源参数自动提取已被广泛研究, 在应用层面, 遥感数据仍尚未有效地集成应用于森林资源清查和分析中。

美国的森林资源清查与分析 (FIA) 计划已实施了近 80 年, 其主要工作由农业部林务局承担。自 1999 年起, 由于意识到获取及时、准确和可靠的森林参数的必要性, FIA 计划对每个州的资源清查由定期调查转换为年度清查 (<http://www.fia.fs.fed.us/>)。年度清查由三个连续的阶段构成。第一阶段主要是使用遥感数据将土地分为林地和非林地两类。分类结果用于获取整个区域的空间度量值, 如森林片段化、区域的城市化和距离度量。该阶段的数据源最初仅限于航空影像, 但现在正逐渐偏重于应用卫星影像。第二阶段包括收集样地中森林生态系统数据, 如森林类型、林龄和存在的干扰等。在第三个阶段中, 第二阶段设置的样地中抽样出一些子样地, 在树木生长季节采集子样地内单株立木的位置、物种、树冠状况和健康情况等数据。与美国森林资源清查相似, 加拿大国家森林资源清查 (NFI) (<http://cfs.nrcan.gc.ca/subsite/canfi/home>) 同样使用航拍相片来估算森林面积, 在相片中抽样选择一些子样地, 通过对子样地的实地调查来估算物种多样性、材积和单株立木的参数。在加拿大北部, 由于野外实地调查难以实现, 航空影像难以获得, 因此主要利用卫星影像代替实地调查和航片进行森林资源

清查。

上述森林资源清查的实例表明,虽然遥感技术已被应用于北美森林调查,但其应用主要局限于较大尺度空间范围内航空相片的判读,以及林地和非林地的判别分类。基于样地的森林测量仍然是通过实地调查实现的。因此,十分有必要将更先进的遥感技术引入森林调查实践中,利用遥感技术提供自动、详细、准确的样地尺度上的参数,如森林树种及单株立木参数数据等。

1.2 基于遥感技术的森林资源清查与分析研究

在过去的几十年里,随着遥感技术的不断进步,遥感在森林监测和森林资源清查分析上有了更广泛的应用。遥感技术从机载传感器发展到卫星传感器;由被动光学传感器(如 Landsat 系统)到主动传感器(如 SAR, LIDAR);由提供低空间分辨率影像(如 MODIS, AVHRR)到中空间分辨率影像(如 Landsat 系列卫星, SPOT)、高空间分辨率影像(如 IKONOS, QuickBird);从多光谱传感器(如 Landsat 系列卫星)到高光谱传感器(如 AVIRIS)。这些传感器系统具有在不同的空间尺度上提供森林信息的能力,并可基于光谱信息来区分不同的森林结构,基于时间序列图像来提取森林变化信息。

低空间分辨率遥感影像(地面采样距离(GSD) $> 30\text{ m}$)用于获取在全球范围内植被生产力,比如初级生产总值(GPP)和年度净初级生产力(NPP),但不适合空间尺度更精细的森林资源清查分析(Running et al., 2004)。中等分辨率传感器(GSD 为 $4\sim 30\text{ m}$),例如 Landsat Thematic Mapper(TM)和 Enhanced Thematic Mapper Plus(ETM+)传感器以及 Systeme Pour

l'Observation de la Terre (SPOT) 传感器, 适用于景观尺度的森林属性表征。这些传感器的多光谱波段有利于区分不同的森林类型, 尤其是落叶林和针叶林区的分类。Bauer 等 (1994) 利用六幅不同时期的 Landsat TM 影像将土地覆盖划分为六种森林类型和五种非森林类型, 另外还估算出每种森林类型的占地面积。Wolter 等 (1995) 利用多个季节的 Landsat 卫星影像提高了森林树种的分类精度。除了森林组成分类外, 研究人员还综合了中等空间分辨率的多光谱影像与实地野外采样收集的森林资源清查数据来确定其他森林参数, 如平均断面积、平均高度、健康状况、生物量和木材材积等 (Trotter et al., 1997; Hall et al., 2006; Meng et al., 2009; Wolter et al., 2009)。其中大部分研究都涉及将实地收集的数据和卫星影像光谱响应之间建立经验模型, 然后利用该模型来预测非实地采集区的森林参数值。

近年来, 随着传感器技术的发展, 出现越来越多的高分辨率影像 ($GSD \leq 4 \text{ m}$), 并且影像价格也变得更加容易接受, 因此, 高分辨率遥感正越来越广泛地应用于精细尺度上的森林制图。传统的实地森林调查重点在于收集样地尺度或者单株立木尺度的森林参数, 而由于单株立木在高分辨率遥感影像中变得清晰可见, 近年来高分辨率遥感在森林资源清查中的应用成为研究热点。然而, 在高分辨率遥感影像中, 过于详细的信息也为森林信息的提取带来了挑战, 因为太阳光照的不均性和地形的影响会导致单个林分内像素之间反射率差异过大。这表明对于高分辨率多光谱影像, 若采用基于像素的影像分析, 无法有效地进行林分尺度上的参数提取, 因此, 许多学者引入了基于纹理和基于对象的影像分析方法。

纹理分析主要考虑到邻域光谱响应的空间变化。将纹理度量

值引入基于像素的影像分析中,已被证明可以提高森林树种的分类精度 (Franklin et al., 2000)、森林林龄的分类精度 (Franklin et al., 2001),有利于树冠郁闭度的估算 (St-Onge et al., 1997) 以及林被健康状况的分类 (Coops et al., 2006; Liu et al., 2006)。基于对象的分析方法认为一幅影像由许多相邻的对象组成。在中、低空间分辨率影像中,单个像素可能提供多个对象的平均光谱响应特性,与之不同的是在高空间分辨率影像中,单个对象(如一个林分)是由许多相邻的像素组成。因此,基于对象的影像处理是将影像划分为一些图斑,每个图斑里的像素都具有相似的光谱特征,使用这些图斑作为分类对象而不再使用像素作为分类单元。除了光谱响应值,每个对象中还可提取出纹理和几何信息。基于对象的方法已经成功地应用于利用高分辨率遥感影像估计林分参数 (Thomas et al., 2003),或者将高分辨率遥感影像结合地形数据估计林分参数 (Chubey et al., 2006; Yu et al., 2006)。

除了林分尺度森林结构的估计,高空间分辨率遥感影像还可应用于单株立木树冠信息的提取,尤其是当像素尺寸小于树冠尺寸时。目前,一些学者已对单株立木树冠检测与勾勒方法展开研究 (Gougeon, 1995; Culvenor, 2002; Wang et al., 2004),通过对树冠光谱响应规律的分析,可以检测到树顶,并估计出树冠的维度。通过这种方法,也可进行单株立木的树种识别和健康分析 (Gougeon, 1997; Leckie et al., 2005)。然而,当前单株立木树冠的识别方法大多只适用于针叶林,并且只适用于在垂直航拍影像中。在不同的成像条件下,单株立木的树冠检测和提取精度有可能会降低 (Wang et al., 2004)。

高光谱遥感影像也可被用于森林资源清查。尽管当前的高空间分辨率卫星传感器(如 IKONOS 和 QuickBird)无法提供高光

谱数据,但机载传感器可收集具有高空间分辨率的高光谱数据。由于在高光谱图像中可以识别微小的光谱差异,因此在树种识别中极为有效。Martin (1998) 利用 AVIRIS 图像将森林分为 11 种类型; Bunting (2006) 利用 CASI-2 影像区分出澳大利亚的混合树种。同样, Clark 等 (2005) 利用 Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment (HYDICE) 传感器对热带树种进行分类。

除了被动传感器,主动传感器如合成孔径雷达 (SAR) 和激光雷达 (LIDAR),也一直在提取森林参数方面不断探索。例如, Santoro 等 (2006) 利用 L 波段 SAR 影像的后向散射系数估算出林分尺度的树干材积; Rowland 等 (2008) 通过两个时相的 SAR 数据估算出树高和材积的变化。自从 20 世纪 90 年代末以来,激光探测与测距雷达,尤其是小光斑高密度数据 ($>4 \text{ points/m}^2$),已经在森林资源清查分析方面展现出巨大的潜力 (Hyypä et al., 2008)。由于这些数据可以为地面物体提供高分辨率的三维坐标,因此可提取树高、树木垂直结构、树冠维度等特征,另外还可以由该类数据推断出单株树的树种 (Brandtberg et al., 2003; Holmgren et al., 2004; Liang et al., 2007)。然而,由于小光斑高密度激光雷达数据成本较高,因此并未得到广泛应用。而低点云密度雷达数据,尽管成本较低,由于其无法获取单株立木结构信息,因此应用十分有限。

近年来,陆续出现一些研究利用多源数据的集成来提高森林参数的估算能力。例如, Wulder 等 (2003) 融合了激光雷达数据和 Landsat 影像来提高森林平均树高的估测精度; Hyde 等 (2006) 集成 LIDAR、SAR/InSAR、ETM+ 和 QuickBird 数据进行森林结构制图; Holmgren 等 (2008) 集成高分辨率激光雷达数据 (50 points/m^2) 和高空间分辨率航空影像进行单株立木树种分类。

近几十年来,随着遥感传感器在数量和功能上的迅速提升,可用的遥感数据相比以往种类更加繁多。如何选取适当的数据则需要考虑众多因素,其中包括:应用目的、研究的空间尺度和遥感影像空间分辨率、目标光谱特征和遥感影像光谱分辨率以及数据成本等(Wulder et al., 2004)。目前,林业遥感的应用研究已经逐渐将重点转移到利用高空间分辨率影像来获取更精确的森林参数,而利用激光雷达数据获取森林的垂直结构信息。这些研究都集中于怎样提供更加精准可靠的森林信息,只有达到此目的,遥感技术才会广泛应用于森林资源与分析。

1.3 研究目的和科学假设

本书在林分和单株立木两个层面上研究了遥感数据在森林资源自动化清查与分析中的应用。本书的研究目的包括:①探索高空间分辨率多光谱影像与低点云密度激光雷达数据(3 m)的协同在林分尺度上树种分类的应用;②提出基于高空间分辨率影像的单株立木树冠检测与勾勒的算法。

本书包括以下科学假设:①相对于单独使用某种数据,高空间分辨率多光谱影像和低点云密度激光雷达数据的协同使用有助于提高树种的分类精度;②基于高分辨率遥感影像,本书中提出的单株立木树冠检测和勾勒算法相比较前人的算法,可在不同的成像条件下提供准确的树木位置和树冠维度信息。

本书的第2章对假设1进行了探讨,第3、第4、第5章对假设2进行了探讨。

1.4 本书大纲

本书由 6 章组成。第 1 章对本书内容进行综述。第 2、第 3、第 4、第 5 章均以引言、数据、方法、结果和讨论、结论的形式撰写。第 2 章介绍了利用高空间分辨率遥感影像和激光雷达数据的协同进行森林树种的分类研究。第 3 章对当前利用高空分辨率影像进行单株立木树冠检测与勾勒的算法进行综述。第 4 章比较了现有的 3 种较具代表性的树冠检测和勾勒算法的性能和有效性,提出并论证了一个树冠检测与勾勒算法评价的标准框架。第 5 章提出了一种新的、能够适用于各种成像条件的树冠检测和勾勒算法。第 6 章对本书内容做了总结,同时提出了相关研究及未来潜在的发展方向。

参考文献

-
- [1] Alemdag I S. 1986. Estimating oven-dry mass of trembling aspen and white birch using measurements from aerial photographs[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 16: 163-165.
 - [2] Bauer M E, Burk T E, Ek A R, et al. 1994. Satellite inventory of Minnesota forest resources[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60: 287-298.
 - [3] Brandtberg T, Warner T, Landenberg R, et al. 2003. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America[J]. *Remote Sensing of Environment*, 85: 290-303.
 - [4] Bunting B, Lucas R M. 2006. The delineation of tree crowns in Australian mixed species forests using hyperspectral Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 101: 230-248.
 - [5] Chubey M S, Franklin S E, Wulder M A. 2006. Object-based analysis of IKONOS-2

imagery for extraction of forest inventory parameters[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72: 383-394.

- [6] Clark M L, Roberts D A, Clark D B. 2005. Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales[J]. *Remote Sensing of Environment*, 96: 375-398.
- [7] Coops N C, Johnson M, Wulder M A, et al. 2006. Assessment of QuickBird high spatial resolution imagery to detect red attack damage due to mountain pine beetle infestation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 103: 67-80
- [8] Culvenor D S. 2002. TIDA: an algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery[J]. *Computers & Geosciences*, 28: 33-44.
- [9] Davis L S, Johnson K N, Bettinger P S, et al. 2001. Forest Management - To sustain ecological Economic and Social values (Long Grove, Illinois: Wavelands Pr Inc.) .
- [10] Franklin S E, Hall R J, Moskal L M, et al. 2000. Incorporating texture into classification of forest species composition from airborne multispectral images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 61-79.
- [11] Franklin S E, Wulder M A, Gerylo G R. 2001. Texture analysis of IKONOS panchromatic data for Douglas-fir forest age class separability in British Columbia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 2627-2632.
- [12] Gougeon F A. 1995. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing Remote Sensing*, 21: 274-284.
- [13] Hagan G F, Smith J L. 1987. Predicting tree ground line diameter from crown measurements made on 35-mm aerial photography[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 52: 687-690.
- [14] Hall R J, Skakun R S, Arsenault E J, et al. 2006. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume[J]. *Forest Ecology and Management*, 225: 378-390.
- [15] Holmgren J, Persson A. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner[J]. *Remote Sensing of Environment*, 90: 415-423.
- [16] Holmgren J, Persson A, Soderman U. 2008. Species identification of individual trees by combining high resolution LIDAR data with multi-spectral images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 1537-1552.