



地理信息科学系列

激光雷达森林生态应用

——理论、方法及实例

LiDAR Principles, Processing and Applications in Forest Ecology

郭庆华 苏艳军 胡天宇 刘瑾 著



高等教育出版社



地理信息科学系列

激光雷达森林生态应用 ——理论、方法及实例

LiDAR Principles, Processing and Applications in Forest Ecology

郭庆华 苏艳军 胡天宇 刘瑾 著

高等教育出版社·北京

内容简介

本书系统介绍激光雷达技术及其在森林生态学研究中的应用和前沿发展,同时包括国内外相关领域的典型研究实例。全书分为基础原理、技术方法、应用与前沿展望三大部分,共15章。第一部分包括第1~3章,重点阐述激光雷达遥感技术的基本概念和类型、扫描测距原理、数据获取工作流程和误差来源;第二部分包括第4~10章,详细介绍激光雷达森林生态应用的技术基础,针对森林生态关键参数阐述了激光雷达遥感定量分析方法,并就具体的参数提取给出了应用程序代码;第三部分包括第11~15章,结合实例阐述了激光雷达在森林生态学研究中的应用热点,介绍了新兴起的移动激光雷达平台,力图反映激光雷达技术的未来发展方向及其森林生态应用前景。

本书从广阔的视角介绍激光雷达主动遥感技术在森林生态学多个分支领域的应用,对于遥感、生态、植被、气候、水文、环境、规划、气象和防灾减灾等专业的高校师生以及从事相关领域研究的科研人员具有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

激光雷达森林生态应用:理论、方法及实例/郭庆华等著. -- 北京:高等教育出版社,2018.2

ISBN 978-7-04-049301-6

I. ①激… II. ①郭… III. ①激光雷达-应用-森林生态学 IV. ①S718.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第011957号

策划编辑 关焱
插图绘制 于博

责任编辑 关焱
责任校对 刘娟娟

封面设计 张楠
责任印制 尤静

版式设计 于婕

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 北京佳信达欣艺术印刷有限公司
开本 787mm×1092mm 1/16
印张 22.25
字数 410千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2018年2月第1版
印 次 2018年2月第1次印刷
定 价 129.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 49301-00

审图号 GS(2017)3685号

JIGUANG LEIDA SENLIN SHENGTAI YINGYONG
LILUN FANGFA JI SHILI

《地理信息科学系列》编辑委员会

主 编：林 琿

副主编：施 迅

秘书长：叶信岳

编 委：（按姓氏拼音字母排序）

陈 旻 南京师范大学

龚健雅 武汉大学

关美宝 伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校

郭庆华 中国科学院植物研究所

李 杰 肯特州立大学

林 琿 香港中文大学

刘雪华 清华大学

柳 林 辛辛那提大学

孟立秋 慕尼黑工业大学

沈振江 金泽大学

施 迅 达特茅斯学院

隋殿志 俄亥俄州立大学

王法辉 路易斯安那州立大学

王野乔 罗得岛大学

叶嘉安 香港大学

叶信岳 肯特州立大学

丛 书 序

《地理信息科学系列》是国际华人地理信息科学协会(CPGIS)与高等教育出版社合作的重要成果。基于 CPGIS 全体会员的共同理想并通过大家二十余年的不懈努力,CPGIS 不仅在中国地理信息科学的发展中承担了光荣的历史责任,而且稳步走上国际地理信息科学的舞台。回望 1992 年的夏天,协会在美国布法罗大学成立的首届年会中就积极开展地理信息学和空间信息学的讨论,并于 1995 年在香港中文大学正式将 CPGIS 年会转型为地理信息学(GeoInformatics)国际会议系列。从 1993 年科学出版社出版 CPGIS 的第一部论文集《地理信息系统的发展与前景》开始,到 2009 年国际出版商 Taylor & Francis 出版集团正式邀请 CPGIS 的学术期刊加盟,CPGIS 逐步实现了协会成立时确定的重要目标之一,即依靠 CPGIS 凝聚的人才库,建设促进中国与国际地理信息科学界交流的知识库。

CPGIS 是一个不断壮大的人才库,会员中不仅有享誉国际的著名学者,也有初出茅庐的年轻学子。然而,推动 CPGIS 稳步前行的是一批活跃在国内外地理信息科学与技术前沿的中青年会员。他们勇于探索,思路开阔,积极实践,在科研、教学与技术开发中多有心得收获。能够分享到他们的学术心得,将有益于我国的地理信息科技事业,尤其是可以为青年学生的培养提供宝贵的参考资料。自 1993 年组团回国巡回讲学开始,CPGIS 会员们走进了我国所有的省、自治区和直辖市,在超过 100 所高等院校和科研机构举办了内容丰富的学术交流讲座,受到各地教师和学生的高度评价与欢迎。显然,这也是作为我国专业教育出版机构的高等教育出版社关注 CPGIS 这个人才库的原因。我相信,CPGIS 与高等教育出版社合作出版的这套丛书将会成为 CPGIS 参与我国地理信息科技发展的又一个里程碑。

《地理信息科学系列》是一个地理信息科技的知识库,主要面向高等院校的高年级本科生和研究生。本丛书将邀请在各国工作的CPGIS会员介绍国际地理信息科技的前沿理论、方法与技术以及在各领域的应用。我真诚地希望看到这套丛书能够成为一扇“窗”,让年轻的朋友们透过这扇“窗”看到地理信息科技发展的远景,看到正在他们脚下伸展的宽阔道路。



2015年5月26日

香港中文大学

序

激光雷达技术是遥感科学领域近年来发展最快的分支之一。该项技术发展日新月异,其在森林生态监测和研究中的应用为学科走向真实三维世界奠定了基础。作为一种新兴的主动遥感技术,它能够快速、精准地获取研究对象的三维空间结构参数,尤其在提取和反演森林信息(高度、盖度、叶面积指数、叶面积密度、生物量)等方面具有巨大优势,因此,在森林生态学领域具有广阔的应用前景。相比国外的发展和应用,这一技术在我国相关领域的应用严重滞后。虽然目前出现了快速发展的态势,但不少生态学工作者还不能很好地理解和掌握这一技术,亟需普及和提升。本书的出版对于推动激光雷达技术在生态学研究中的推广与应用具有重要意义。

本书从解决全球变化、生物多样性、可持续发展等前沿科学问题出发,以精确获取森林生态关键要素为线索贯穿全文,内容涵盖了激光雷达基础、森林生态关键参数的提取与反演、激光雷达技术应用与发展前景,全面系统地介绍了激光雷达技术的基本概念、理论以及数据获取和处理方法,并结合实例研究阐明了激光雷达生态遥感信息科学的未来发展方向以及广阔应用前景。国内关于激光雷达应用于森林生态学研究的图书缺乏,本书在这方面做了开创性工作,其中基于激光雷达技术开展的生态系统结构参数提取、功能参数反演、三维场景重建和模拟的研究成果,创新性、启发性、教育性强,对推动激光雷达技术在生态学领域的应用普及将起到相当重要的作用。而且,本书的另一大特点是将应用所需的程序代码完全公开共享,以方便广大师生学以致用,具有非常强的实用性。

我和郭庆华博士初识于北大燕园,他在学生时代就以深思、勤勉、笃行的行事风格给我留下深刻印象。虽然郭博士在海外留学、工作多

年,但为了把在国外所学的激光雷达这一高新前沿技术更快、更直接地传播和分享给国内的莘莘学子,他毅然辞去美国加利福尼亚大学终身教授职位,全职回国加入中国科学院植物研究所,组建数字生态研究组,带领着一群对激光雷达心怀澎湃激情的年轻学者和研究生,以森林生态学应用为突破口,积极推动和加强这项技术的研发和行业应用。他出于介绍和传播遥感学科最新进展的目的,系统总结了激光雷达技术的基本原理和国际前沿技术方法,并且融入了自己团队十余年的科研成果积累,撰成了体系完整、内容翔实、实用性强的《激光雷达森林生态应用——理论、方法及实例》一书,相信这对国内森林生态学乃至其他学科,如林学、生态学、地理学等学科的发展都是意义匪浅的。期待他和他所带领的团队,在激光雷达的理论及其应用研究中取得更多卓越的成果,在不久的将来带给大家更多的激光雷达知识。

中国科学院院士



2017年10月10日

前 言

2005年,我在美国加利福尼亚大学(默塞德分校)开始我的教职生涯。参与的第一个跨学科大项目是“Sierra Nevada Adaptive Management Project”(内华达山脉适应性管理项目)。受加利福尼亚州政府的委托,加利福尼亚大学作为独立第三方被邀请来全面评价美国联邦森林管理局的森林管理策略对加利福尼亚州内华达山脉森林的影响(包括森林健康、濒危物种、森林火灾、水资源、公众意识等)。项目涉及生态学、水文学、地学和社会科学等多个学科,加利福尼亚大学三个分校(伯克利、戴维斯、默塞德分校)6个团队的10多位教授共同主持该项目,我有幸作为空间分析团队的项目负责人加入该项目。由于该项目的成果会直接影响美国联邦森林管理局的森林管理政策,获取高精度的地形、森林植被以及物种分布信息是本项目执行成功的关键。我提出通过采用激光雷达技术提取精准森林结构参数和地形因子的技术方案,来评价森林疏伐对环境的影响。此外,我还作为美国自然科学基金会支持的美国地学关键带(Critical Zone Observatory, CZO)的项目负责人,负责收集和处理所有关键带的激光雷达数据。在美期间,我同时也完成多项美国自然科学基金会、联邦地质调查局、联邦国家公园管理局、加利福尼亚州水利局、摩尔基金会等超过千万美元的项目。全职回国以后,我和团队承担了中国科学院战略性科技先导专项(A类)、国家重点基础研究发展计划(973计划)、国家重点研发计划、中国科学院科研装备研制项目、国家自然科学基金等多项研究任务,继续开展激光雷达技术在农业育种、林业监测和生态保护研究等领域的应用和国内推广,并在林下地形提取、森林精细结构反演、生物多样性监测、作物表型参数提取、城市三维绿量 and 多源传感器集成等方面取得了重要成果。

执行这些项目过程中,我和团队突破了一系列数据获取和信息提

取的瓶颈,解决了生物物种三维空间的生态位需求与传统遥感技术只能获取二维平面生境信息的不对称问题,同时也深刻认识到激光雷达技术为生态学研究提供的全新三维视角,将促进生态学的定量描述从“二维”到“三维”的变革。激光雷达作为一种新兴技术,目前还缺乏一本全面讲述激光雷达在森林生态系统应用的入门书籍。撰写本书的目的是希望向读者系统地介绍激光雷达技术及其在森林生态研究中的应用和前沿发展。读者对象包括生态学和地学相关专业的高年级本科生和研究生,以及希望了解该领域的学者。由于激光雷达技术尚处于快速发展阶段,许多算法也还不够成熟,读者要深入了解激光雷达原理和应用,往往需要使用编程语言进行数据处理,所以本书在介绍相关内容时附有 Python 代码,相关数据和程序可以在我们团队网站下载(<http://www.3dEcology.org>)。

本书主要基于团队在激光雷达软硬件研发和森林生态应用方面十多年的研究成果撰写而成。非常感谢这些年来和我一起学习和成长的团队成员;特别感谢参与部分章节撰写和整理工作的团队成员,他们是:苏艳军、胡天宇、刘瑾、李文楷、薛宝林、吴芳芳、李玉美、赵晓倩、翟秋萍、庞树鑫、金时超、史跃、陈琳海、刘丹、陶胜利、高上、王永财、马勤、王瑞、徐可心、李静、徐光彩、杨炳伟和孙喜亮。

撰写本书的最初想法是我在美国加利福尼亚大学工作期间萌生的。当时,我作为国际华人地理信息科学协会(CPGIS)成员,参与“地理信息科学系列”著作的出版。回国后,非常荣幸受中国科学院大学邀请,担任“植被生态与遥感应用”的首席教授,优秀的学生们对于先进技术的求知若渴进一步敦促我完善思路并最终落笔成稿。在本书出版过程中得到了高等教育出版社关焱编辑的大力支持,我代表本书作者深表感谢。

本书成果得到了国家科技部(2017YFC0503905、2016YFC0500202)、国家自然科学基金委员会(41471363、31270563)、中国科学院(XDA08040107、条财字[2014]129号)和中组部“青年千人计划”项目的支持。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

郭庆华

2017年9月29日

于中国科学院大学雁栖湖校园

目 录

第一篇 基础原理

第 1 章 激光雷达主动遥感技术的起源与发展分化	3
1.1 激光雷达技术简介及发展历史	4
1.2 激光雷达分类	6
1.3 主要商业激光雷达设备简介	8
1.3.1 国外主要商业激光雷达设备	8
1.3.2 国内主要商业激光雷达设备	10
1.4 激光雷达数据专业处理软件简介	11
1.5 激光雷达在森林生态学中的应用价值	12
1.6 小结	15
参考文献	16
第 2 章 激光雷达工作原理	20
2.1 激光扫描仪的测距原理	20
2.1.1 脉冲式测距	20
2.1.2 相位式测距	21
2.1.3 测距精度	22
2.2 激光扫描仪的辐射原理	24
2.2.1 激光雷达方程	24
2.2.2 辐射回波信号	26
2.3 地基激光雷达工作原理	27
2.3.1 地基激光雷达系统组成	27
2.3.2 地基激光雷达系统的主要参数	29
2.4 机载激光雷达工作原理	30
2.4.1 机载激光雷达系统组成	30
2.4.2 机载激光雷达系统的主要参数	35
2.5 星载激光雷达工作原理	36
2.5.1 星载激光雷达系统组成	38

2.5.2 星载激光雷达系统的主要参数	39
2.6 小结	39
参考文献	40
第 3 章 激光雷达外业工作流程和系统误差来源	41
3.1 地基激光雷达扫描系统作业基本流程	41
3.1.1 扫描前期准备	41
3.1.2 扫描作业规划	43
3.1.3 数据采集作业	43
3.1.4 数据初期检验	44
3.2 机载激光雷达扫描系统作业基本流程	46
3.2.1 机载激光雷达作业流程概述	46
3.2.2 航测前期准备工作	47
3.2.3 航测方案规划设计	48
3.2.4 航测数据采集作业	50
3.3 地基激光雷达扫描系统误差来源	53
3.4 机载激光雷达扫描系统误差来源	53
3.4.1 飞行平台误差	54
3.4.2 POS 系统误差	54
3.4.3 激光传感器误差	55
3.4.4 系统集成误差	55
3.5 小结	56
参考文献	56

第二篇 技术方法

第 4 章 激光雷达点云数据格式	59
4.1 点云数据格式、组成和特点	59
4.1.1 点云数据格式和组成	59
4.1.2 点云数据特点	67
4.2 点云数据索引	68
4.3 点云数据的读取	71
4.3.1 为什么选用 Python 编程语言?	71
4.3.2 Python 的基本语法	72
4.3.3 Python 读取激光雷达数据及其索引	73
4.4 小结	75
参考文献	76

第 5 章 激光雷达数据滤波和数字高程模型生成	77
5.1 滤波简介	77
5.1.1 基本概念	77
5.1.2 滤波的难点	79
5.2 滤波方法概述	80
5.2.1 基于坡度的滤波方法	80
5.2.2 基于形态学的滤波方法	81
5.2.3 基于插值的滤波方法	88
5.2.4 基于渐进三角网加密的滤波方法	90
5.2.5 基于分割思想的滤波方法	92
5.2.6 混合滤波方法	93
5.3 滤波精度评价比较	95
5.4 DEM 的生成	97
5.4.1 DEM 插值方法与比较	97
5.4.2 DEM 误差分析	100
5.4.3 DEM 精度分析	102
5.5 小结	107
参考文献	107
第 6 章 地基激光雷达数据分析和特征提取	111
6.1 点云解算	111
6.2 点云配准	112
6.3 噪声去除	114
6.3.1 基于空间分布的去噪算法	114
6.3.2 基于聚类的去噪算法	116
6.3.3 基于密度的去噪算法	116
6.4 点云特征提取	118
6.4.1 颜色特征	118
6.4.2 局部几何特征	118
6.5 点云分类	121
6.5.1 基于模型拟合的点云分类	121
6.5.2 基于区域增长的点云分类	124
6.5.3 基于聚类的点云分类	126
6.6 小结	129
参考文献	129

第 7 章 机载激光雷达数据分析和特征提取	132
7.1 机载激光雷达数据处理流程	132
7.2 机载激光雷达数据解算	134
7.3 航带拼接与航带平差	137
7.4 点云数据的粗差探测	139
7.4.1 粗差定义和来源	139
7.4.2 粗差探测与剔除	140
7.5 机载激光雷达点云分类和目标提取	141
7.5.1 点云分类和目标提取方法简介	141
7.5.2 点云监督分类流程及精度分析	143
7.5.3 点云监督分类过程中的特征提取	144
7.6 小结	152
参考文献	152
第 8 章 星载激光雷达数据分析和特征提取	158
8.1 GLAS 简介	158
8.1.1 概述	158
8.1.2 GLAS 产品简介	160
8.1.3 GLAS 数据获取与数据类型	162
8.2 GLAS 波形数据处理与参数提取	163
8.2.1 GLAS 波形数据处理	163
8.2.2 GLAS 波形参数提取	165
8.3 GLAS 数据应用	170
8.3.1 大区域尺度树高估算	171
8.3.2 大区域尺度地上生物量估算	175
8.4 小结	180
参考文献	181
第 9 章 森林结构参数提取	184
9.1 群落水平林业结构参数	184
9.1.1 群落垂直结构剖面	184
9.1.2 群落结构参数及层片结构	185
9.2 单木水平林业结构参数提取	186
9.2.1 单木分割	186
9.2.2 结构参数批量提取	194
9.3 小结	201
参考文献	202

第 10 章 生态系统功能参数反演与大尺度模拟	206
10.1 冠盖度与郁闭度	206
10.2 叶面积指数	212
10.2.1 理论基础	213
10.2.2 地基激光雷达提取 LAI	214
10.2.3 机载激光雷达提取 LAI	218
10.2.4 星载激光雷达提取 LAI	221
10.3 地上生物量	223
10.3.1 基于大光斑激光雷达的森林地上生物量估算	223
10.3.2 基于小光斑激光雷达的森林地上生物量估算	225
10.4 小结	226
参考文献	226

第三篇 应用与前沿展望

第 11 章 激光雷达技术在森林生态系统动态监控中的应用	233
11.1 森林动态监控	233
11.1.1 基于激光雷达的森林动态监控	234
11.1.2 基于激光雷达的森林生长模型构建	237
11.2 林火监控和林火烈度评估	241
11.2.1 基于激光雷达的林火实时监控	242
11.2.2 基于激光雷达的林火烈度评估	244
11.2.3 基于激光雷达的森林可燃物载量估算	247
11.3 森林疏伐区检测	249
11.4 小结	251
参考文献	252
第 12 章 激光雷达技术在森林生物多样性、生态水文及生态模型中的应用	257
12.1 激光雷达技术在生物多样性研究中的应用	257
12.1.1 遥感技术在生物多样性研究进展	258
12.1.2 激光雷达技术在生物多样性研究中的应用实例	261
12.1.3 激光雷达技术在生物多样性监测网络中的发展前景	266
12.2 激光雷达技术在生态水文研究中的应用	267
12.3 激光雷达技术在生态模型中的应用	269
12.4 小结	271
参考文献	272

第 13 章 基于激光雷达技术的植被三维可视化重建	277
13.1 单木水平的三维重建	277
13.2 景观水平的三维可视化模拟	282
13.3 植被三维重建的应用领域	286
13.4 小结	287
参考文献	288
第 14 章 近地面移动激光雷达平台的兴起及其生态应用	291
14.1 背包激光雷达系统	291
14.1.1 背包激光雷达系统的硬件组成	292
14.1.2 背包激光雷达系统的工作原理	293
14.1.3 背包激光雷达数据示例	295
14.2 车载激光雷达系统	296
14.2.1 车载激光雷达系统的硬件组成	297
14.2.2 车载激光雷达系统的工作原理	297
14.2.3 车载激光雷达数据示例	301
14.3 无人机及其他近地面激光雷达系统	301
14.3.1 无人机激光雷达系统的硬件组成	303
14.3.2 无人机激光雷达系统的工作原理	305
14.3.3 无人机激光雷达数据示例	305
14.4 近地面移动激光雷达平台的生态应用	307
14.4.1 在城市生态系统中的应用	307
14.4.2 在湿地生态系统中的应用	309
14.4.3 在草地生态系统中的应用	310
14.4.4 在农田生态系统中的应用	311
14.5 小结	315
参考文献	315
第 15 章 激光雷达技术面临的挑战与应用展望	317
15.1 激光雷达的技术展望	317
15.1.1 传感器的研发和创新	317
15.1.2 多源异构数据融合	321
15.1.3 激光雷达在大数据时代的发展和机遇	325
15.2 激光雷达在森林生态系统的应用展望	328
15.3 小结	330
参考文献	331
索引	335

第一篇 基础原理