

机载激光雷达测量技术 理论与方法



武
汉
大
学
学
术
丛
书

Academic Library

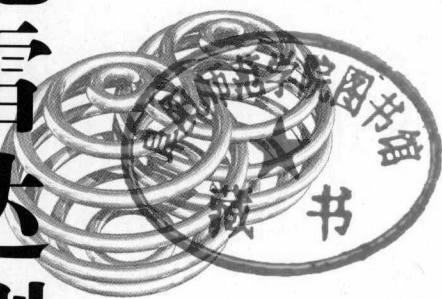
Wuhan University

张小红 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

国家自然科学基金资助项目 (40504001)
测绘遥感信息工程国家重点实验室重点资助项目



机载激光雷达测量技术 理论与方法

武
汉
大
学
学
术
丛
书

Academic Library

Wuhan University

张小红 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机载激光雷达测量技术理论与方法/张小红著. —武汉: 武汉大学出版社, 2007. 9

武汉大学学术丛书

ISBN 978-7-307-05655-8

I. 机… II. 张… III. 机载雷达: 激光雷达—测量 IV. TN958.98

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 084153 号

责任编辑: 任翔 责任校对: 王建 版式设计: 支笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 武汉大学出版社印刷总厂

开本: 720×980 1/16 印张: 14 字数: 195 千字 插页: 7

版次: 2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-05655-8/TN·24 定价: 30.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。



武汉大学学术丛书
自然科学类编审委员会

- 主任委员 ▶ 刘经南
- 副主任委员 ▶ 卓仁禧 李文鑫 周创兵
- 委员 ▶ (以姓氏笔画为序)
- | | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 文习山 | 石 兢 | 宁津生 | 刘经南 |
| 李文鑫 | 李德仁 | 吴庆鸣 | 何克清 |
| 杨弘远 | 陈 化 | 陈庆辉 | 卓仁禧 |
| 易 帆 | 周云峰 | 周创兵 | 庞代文 |
| 谈广鸣 | 蒋昌忠 | 樊明文 | |

武汉大学学术丛书
社会科学类编审委员会

- 主任委员 ▶ 顾海良
- 副主任委员 ▶ 胡德坤 黄 进 周茂荣
- 委员 ▶ (以姓氏笔画为序)
- | | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 丁俊萍 | 马费成 | 邓大松 | 冯天瑜 |
| 汪信砚 | 沈壮海 | 陈庆辉 | 陈传夫 |
| 尚永亮 | 罗以澄 | 罗国祥 | 周茂荣 |
| 於可训 | 胡德坤 | 郭齐勇 | 顾海良 |
| 黄 进 | 曾令良 | 谭力文 | |
- 秘书长 ▶ 陈庆辉



张小红

武汉大学教授，博士生导师。1975年8月出生于江西永丰。1993年考入武汉测绘科技大学大地系，就读于大地测量专业。1997年毕业于武汉测绘科技大学大地测量专业，2002年获武汉大学工学博士学位，2005年在丹麦国家空间研究中心从事博士后研究，2006年破格晋升为武汉大学教授。曾两次参加中国南极科学考察和一次北极科学考察。

主要从事全球卫星导航定位（GNSS）、组合导航以及机载激光雷达（LIDAR）测量数据处理等方面的教学和研究工作。先后在国内外重要学术刊期以及IUGG、ION等重要国际学术会议上发表论文60余篇，20余篇论文被国际三大检索系统检索收录；参编教材2部。主持国家863、国家自然科学基金（青年基金）等科研项目近10项，参加国家973、国家自然科学基金等科研项目20余项，获“湖北省科技进步一等奖”2项，“山东省科技进步三等奖”1项；率先在国内研发GNSS精密单点定位软件（TriP）并登记国家软件著作权，其定位精度和可靠性达到国际先进水平，已在全国推广使用。

第四届“武汉市五四青年奖章”、2004年湖北省优秀博士学位论文、中国全球定位系统技术应用协会十周年庆典青年优秀论文一等奖、测绘学会2005综合学术年会超图杯优秀论文二等奖等荣誉获得者。国家863计划专家库专家，国家自然科学基金通讯评审专家，中国惯性技术学会（西安分会）委员，中国测绘学会会员，CPGPS协会成员，《Geo-spatial Information Science》、《中北大学学报》等刊物通讯评审专家（审稿人）。

作者简介

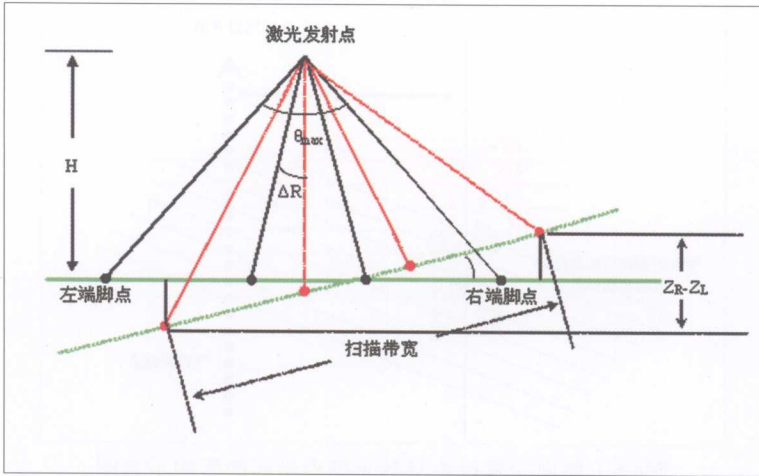


图4-5-1 侧滚向安置误差对激光雷达测量的影响
 (黑色脚点为理想情况下形成的激光脚点, 红色脚点为含有侧滚向安置误差后形成的激光脚点)

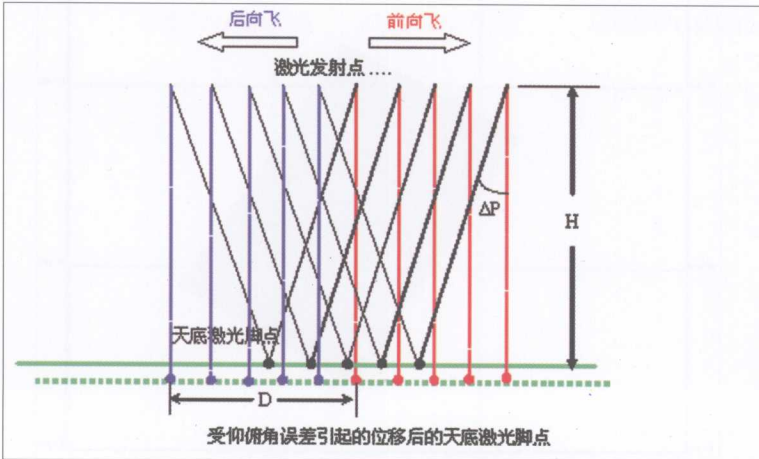


图4-5-2 俯仰向安置误差对激光脚点位置的影响

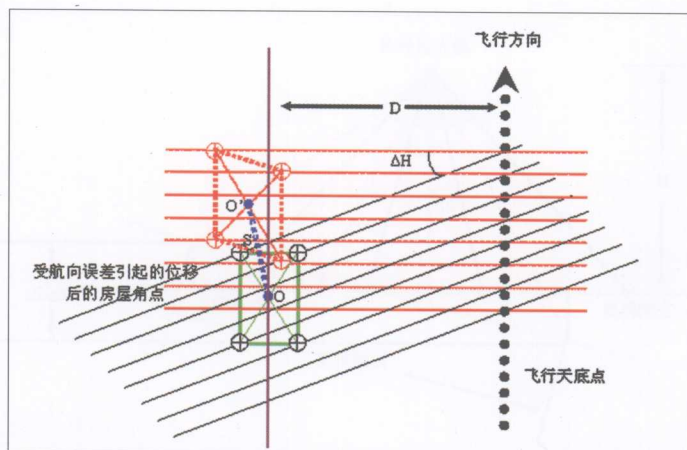


图4-5-3 航向安置误差对激光脚点坐标的影响示意图

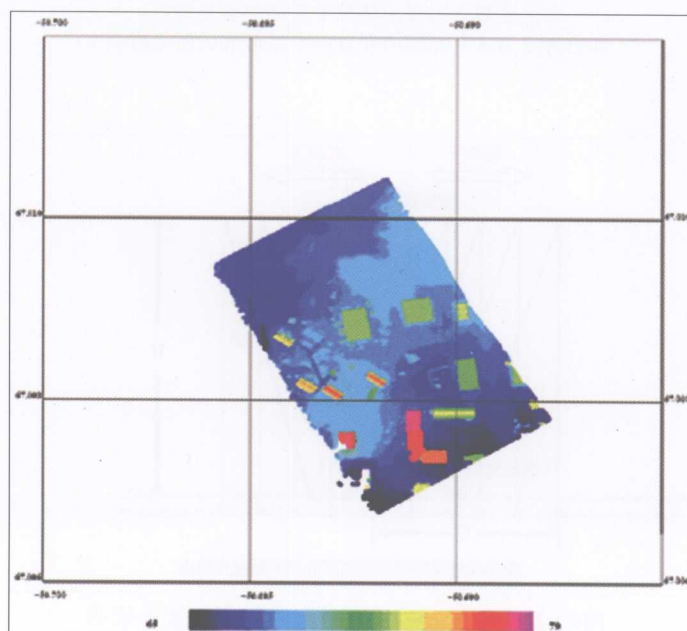
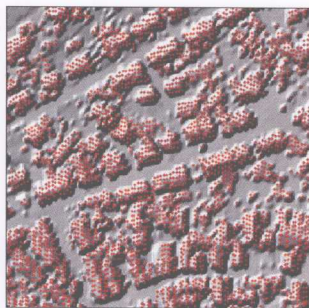
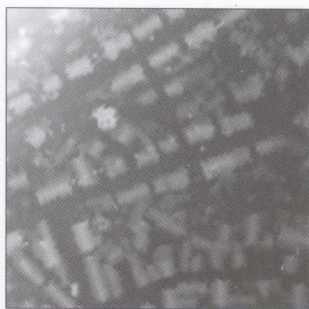


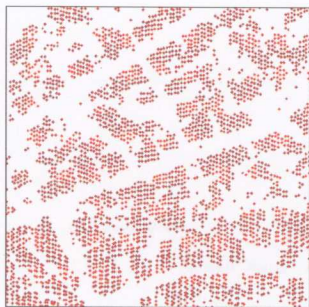
图4-5-6 Kangerlussuaq 机场激光脚点的距离图像



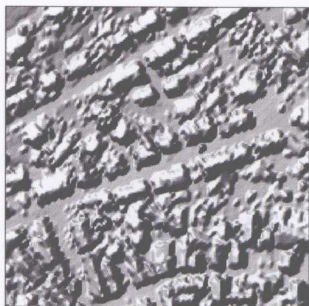
(a) 滤波前的浮雕图



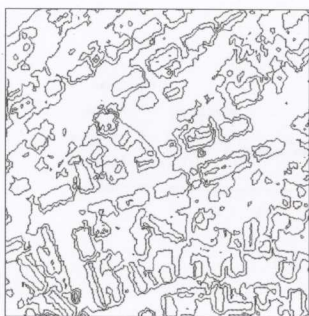
(b) 滤波前的距离图像



(c) 滤波后地物点在XY平面的投影



(d) 将图(c)叠加到图(a)上



(e) 滤波前的DSM



(f) 滤波后的DEM

图5-4-5 居民区滤波分类结果显示

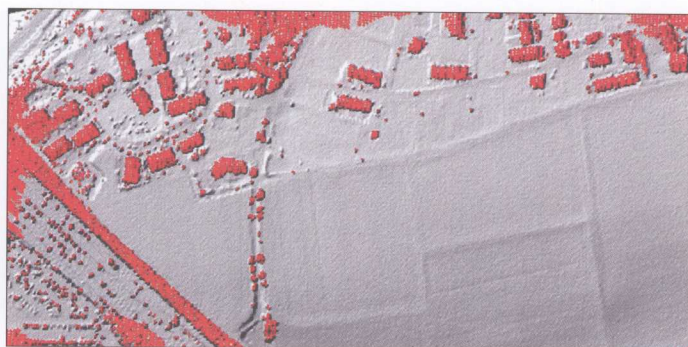


图5-4-7 滤波分类结果

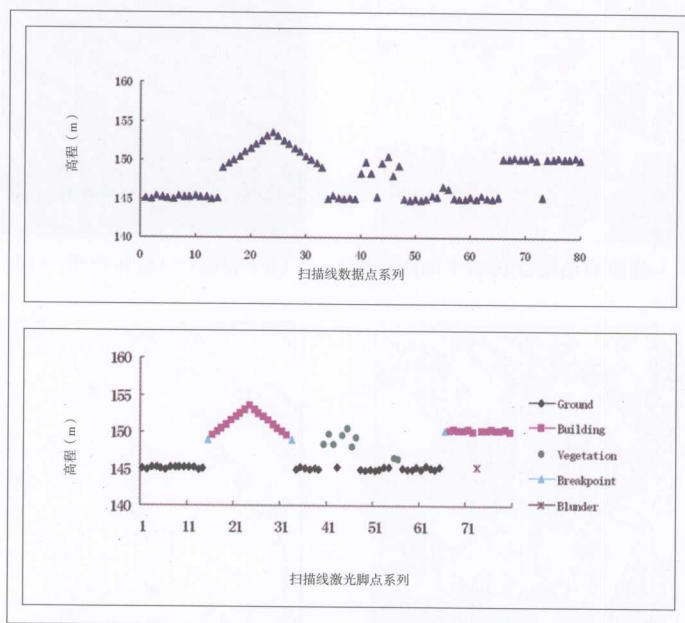


图5-5-1 激光扫描剖面分类示意图

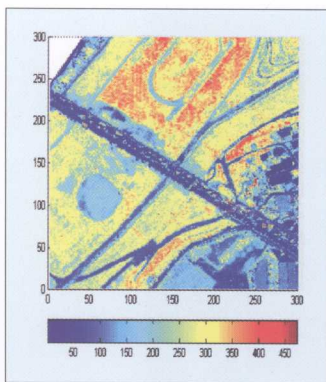


图5-6-2 激光回波强度标定结果显示



图5-6-3 对应区域真实相片

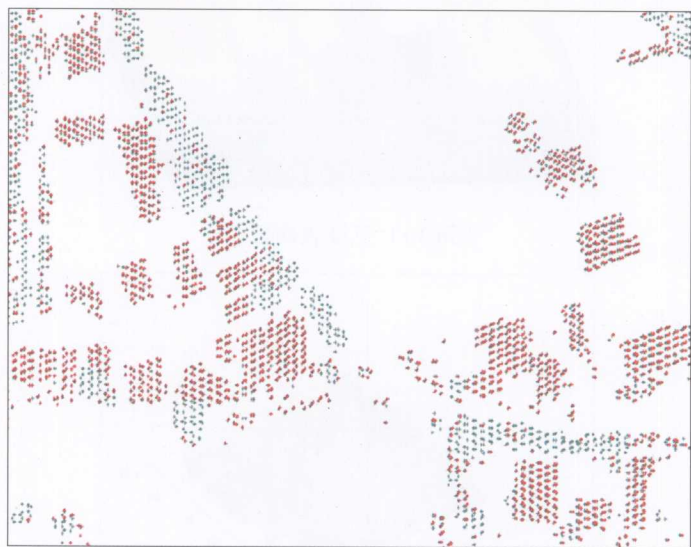


图5-7-3 对地物点进一步分类成房屋激光脚点和植被激光脚点



图5-7-4 对应区域的真实航片

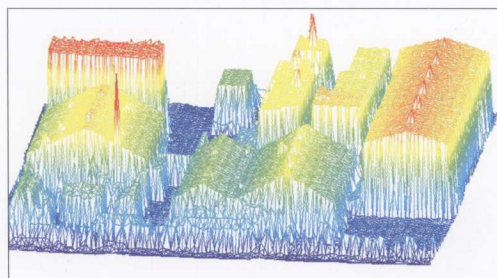


图6-3-11 三维表面建模

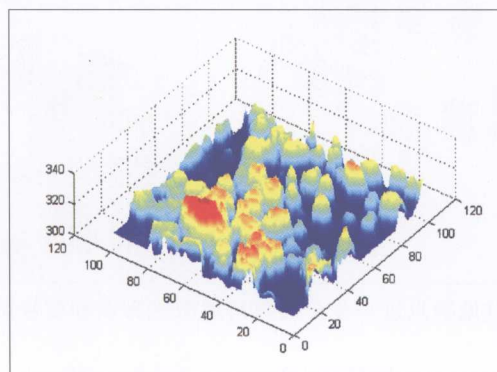


图6-4-3 Canopy 表面结构

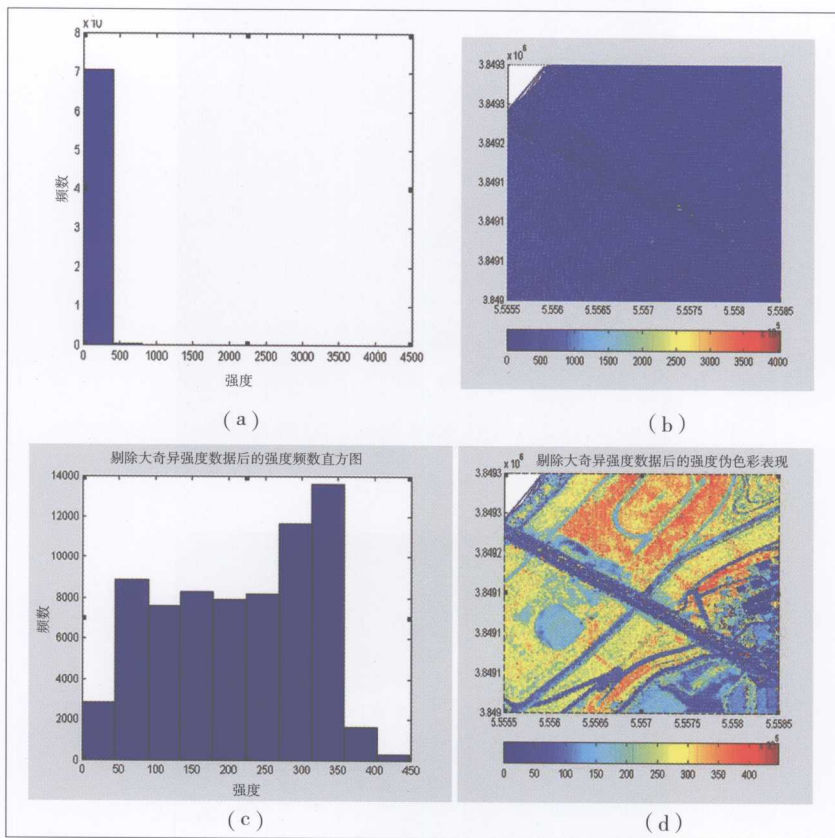
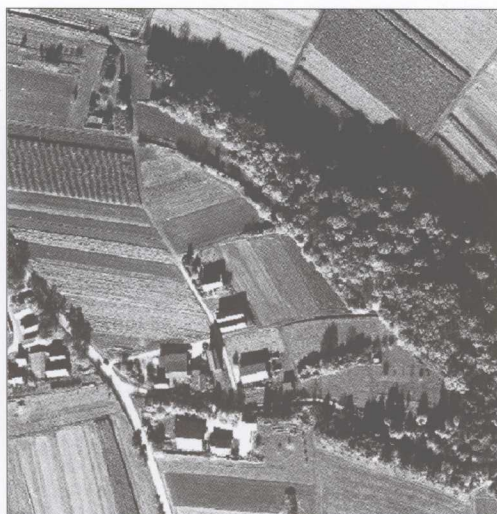
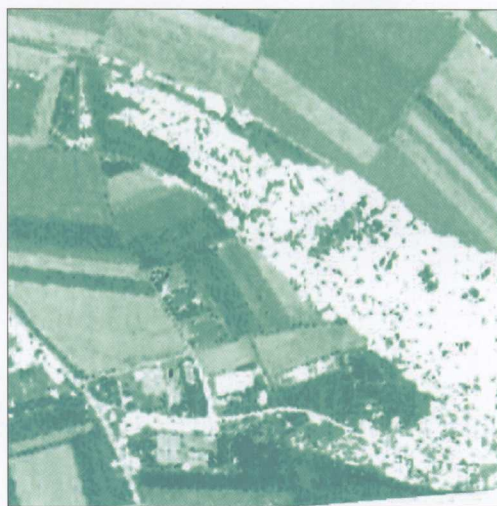


图7-1-1 强度成像



(a) 真实航片



(b) 激光回波强度影像

图7-1-3 真实航片和强度影像

内 容 简 介

本书着重论述了机载激光雷达（LIDAR）测量数据处理理论、方法及其应用。全书介绍了机载激光雷达测量技术发展的历史、发展现状及其在各领域的应用情况；介绍了机载激光雷达测高的工作原理、机载 LIDAR 系统的组成；推导了机载激光雷达测量的几何模型；分析了各种误差源的形成机制及影响规律，提出了分步几何法恢复安置误差角的方法以及削弱系统误差的方法和评定系统测高定位精度的方法；论述了机载激光雷达测量数据的滤波和分类的方法，并结合机载激光雷达测量数据的特点提出了基于离散激光脚点系列的“移动曲面拟合”滤波法，以及融合激光回波信号的强度信息和高程数据进行地物分类的方法；提出了基于离散激光雷达数据的建筑物提取并进行三维重建的方法和“扫描带法”的分割算法；介绍了 LIDAR 距离图像的处理方法；并对机载 LIDAR 技术的发展前景作了展望。

前 言

激光雷达 (LIDAR) 测量技术是从 20 世纪中后期逐步发展起来的一门高技术, 可用于地球科学和行星科学等许多领域。美国早在 20 世纪 70 年代阿波罗登月计划中就使用了激光测高技术。20 世纪 80 年代, 激光测高技术得到了迅速发展, 人们研制出了实用的、可靠的激光测高传感器, 其中包括航天飞机激光测高仪 (Shuttle Laser Altimeter, SLA)、火星观测激光测高仪 (Mars Observer Laser Altimeter, MOLA) 以及月球观测激光测高仪 (Lunar Observer Laser Altimeter, LOLA)。借助这些激光测高仪, 人们可以获取地球、火星及月球上高垂直分辨率的星体表面的地形信息, 这对于研究地球和火星等行星的真实形状有着重要的科学意义。上述这些激光测高仪的激光束的指向一般是固定的, 需依靠搭载激光测高仪的飞行器绕星体的周期运动来获得星体上大范围离散分布的激光脚点的高程数据。

20 世纪 90 年代前后, 随着 GPS 动态定位和高精度姿态确定等定位、定姿技术的发展成熟, 人们设计将激光测高仪安置在飞机上, 同时为了提高采点效率和带宽, 采用扫描的方式来改变激光束的发射方向, 将这些设备有机地集成在一起协同工作, 就构成了一

个机载激光雷达测量系统。随后几年，机载激光雷达测量技术蓬勃发展，欧美等发达国家先后研制出了多种机载激光雷达测量系统。

机载激光雷达测量技术的发展为我们获取高时空分辨率的地球空间信息提供了一种全新的技术手段，使我们从传统的人工单点数据获取变为连续自动数据获取，不仅提高了观测的精度和速度，而且使数据的获取和处理朝智能化和自动化的方向发展。机载激光雷达测量技术可广泛用于快速获取大面积三维地形数据、快速生成DEM等数字产品。机载激光雷达测量在灾害监测、环境监测、海岸侵蚀监测、资源勘察、森林调查、测绘和军事等方面的应用具有独特的优势和广泛的应用前景。机载激光雷达测量能直接获取真实地面的高精度三维地形信息，具有传统摄影测量方法无法取代的优越性。在一些特殊地区，如森林地区，机载激光雷达测量技术相对于传统测绘手段而言，又显示出了其独特的优越性。机载激光雷达测量技术在地球空间信息学科的许多领域具有广阔的发展前景和应用需求，有很强的市场竞争力。

虽然机载激光雷达测量技术的广阔应用前景引起了人们的极大关注，且硬件设备在国外已相当成熟，绝大部分属于硬件和系统集成方面的许多关键问题也已得到解决，诸多机构利用这种系统获得了大量的野外实测数据，并在很多领域得到具体的应用，但是机载激光雷达测量数据的后处理算法在国际上仍然处于研究发展阶段，还有许多问题没有得到很好的解决，主要包括：①系统误差的建模；②激光点云数据的滤波分类；③利用机载激光雷达测量数据进行地物提取，并重建建筑物的三维模型；④数据的稀疏化（thinning）。

随着机载激光雷达测量精度及其可靠性的不断提高，商用机载激光雷达测量系统的应用逐步地得到了越来越多人的认可。据统计，截至2001年7月，全球约有75个商业组织使用60多种类似的系统，且从1998年起，以每年25%的速度增长。相比而言，机载激光雷达测量技术的应用研究在我国起步较晚，中国科学院遥感应用研究所的李树楷教授等研制的机载激光扫描测距-成像系统于1996年完成了系统原理样机的研制，但系统离实用尚有距离。随

着发达国家对机载激光雷达测量技术的开放，我国国内已有少数公司购置了整套设备，并开展了机载激光雷达测量的实际应用，但目前国内还没有系统完整地论述机载激光雷达测量的书籍，这给广大从事机载激光雷达测量研究和应用的人带来了不便。

本书正是在上述背景下根据自己的研究成果，在结合国内外最近几年发表的有关文章，编写这本关于机载激光雷达测量的理论与方法的专著，希望对国内开展机载激光雷达测量的研究和应用有所帮助。本书主要以作者的博士论文为基础，补充了部分作者后续的研究成果和近几年国内外的相关研究成果。幸运的是，本书的出版得到了武汉大学学术丛书出版基金的资助以及国家自然科学基金项目的资助，使作者的愿望变为现实。

在撰写本书时，笔者力求使本书具有较高的学术水平，但又不失其系统性和实用性，本书大部分取材至 2004 年年底，因此取材具有先进性和较高的学术水平。此外，本书在机载激光雷达测量数据处理方面自成体系，从机载激光雷达测量原理入手，系统地介绍了机载激光雷达测量数据中遇到的几乎所有主要的理论和方法。同时，本书还着重介绍了机载激光雷达测量在相关领域的应用。本书理论与实际并重，不仅适用于从事机载激光雷达测量数据处理的读者，而且也适用于从事机载激光雷达数据应用研究的读者。

全书共分八章：第 1 章简要介绍了机载激光雷达测量技术发展的历史、发展现状及其在各领域的应用情况；第 2 章介绍了机载激光雷达测量的工作原理、机载 LIDAR 系统的组成，并同传统摄影测量以及 InSAR 进行了详细比较；第 3 章详细推导了机载激光雷达测量的几何模型；第 4 章全面细致地分析了各种误差源的形成机制及影响规律，给出了相应的误差模型，提出了削弱系统误差的方法，探讨了几种系统参数的测定方法，提出了分步几何法恢复安置误差角参数以及评定系统测高定位精度的方法；第 5 章全面系统地论述了机载激光雷达测量数据的滤波和分类的方法，对现有的各种方法进行了仔细的评价，在此基础上，结合机载激光雷达测量数据的特点提出了基于离散激光脚点系列的“移动曲面拟合”滤波法，以及融合激光回波信号的强度信息和高程数据进行地物分类的方