



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Theory and Methods of Error Processing for Airborne LiDAR Data

王丽英 著

机载LiDAR数据 误差处理理论与方法



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

机载 LiDAR 数据误差处理 理论与方法

Theory and Methods of Error Processing for
Airborne LiDAR Data

王丽英 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 王丽英 2013

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 提 要

本书较系统地研究了机载激光雷达(LiDAR)测量数据误差处理的理论与方法。介绍其技术的发展、主要应用领域及当前研究的热点和难点问题;详述其系统组成、对地定位原理及方程、测量作业的生产流程、数据特点及处理;分析影响其对地定位精度的各种误差源,并基于几何定位方程,利用误差传播定律定量分析了各项误差源对对地定位的影响规律;在其平差理论的基础上,提出基于无控制三维表面最小高程差和最小法向距离两种系统误差处理方法,航带区域网平差方法。

本书可供遥感和测绘领域的相关研究人员、教师和研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

机载 LiDAR 数据误差处理理论与方法/王丽英著. —北京:测绘出版社, 2013.12

ISBN 978-7-5030-2438-2

I. ①机… II. ①王… III. ①机载雷达—激光雷达—数据误差—数据处理 IV. ①TN958.98

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 316122 号

责任编辑	吴 芸	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍	责任印制	喻 迅
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010—68531563(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	三河市世纪兴源印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	12			字 数	235 千字		
版 次	2013 年 12 月第 1 版			印 次	2013 年 12 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1000			定 价	35.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-2438-2 /P·666

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)系统是目前最先进的实时获取地形表面三维空间信息和影像的航空遥感系统。近年来蓬勃发展,在欧美等发达国家中已有许多公司与科研机构投入了大量的人力物力进行相关技术与系统的研究,并先后研制出了多种机载激光雷达系统投入商业。与此同时,机载 LiDAR 系统在测绘市场所占的份额也在不断扩大,应用领域和深度也日益拓宽和加深。我国也有相当多的学者投入该项技术的研究,部分企事业单位已经引进了机载 LiDAR 系统,但由于设备原因和缺少足够的本土化技术支持,应用情况不很理想,技术体系还没有形成。总体来说国内对 LiDAR 技术的研究处于起步阶段,无论是在硬件研制、理论研究还是实际应用都落后于发达国家。为了使这项高新技术能够在我国的国民经济建设中发挥应有的作用,开展机载 LiDAR 技术的相关研究具有相当重要的理论价值和现实意义。

虽然机载 LiDAR 数据的处理技术伴随硬件的发展已经有几十年的历史,但由于系统获取的是离散的点云数据,其数据特征以及处理方式都与传统遥感传感器有较大的不同。对机载 LiDAR 数据的处理还没有一套很成熟的流程,基于点云数据的许多应用仍期待更满意的算法。因此,深入探讨机载 LiDAR 系统的相关原理,研究有效的数据处理技术和算法,对于推动机载 LiDAR 技术在地球空间信息学中的发展与应用具有十分重要的意义。

本书正是在上述研究背景下,在作者博士论文《面向航带平差的机载 LiDAR 系统误差处理方法研究》的基础上,补充了部分作者后续的研究成果以及从事本科生教学工作的研究成果和经验,进行扩充和总结完成的。

本书详细介绍了机载激光雷达技术的相关基础知识、系统原理、系统结构、系统测量作业的生产流程、数据组成、数据格式、数据特点和数据处理及应用,系统地归纳总结了机载 LiDAR 数据误差处理的理论和方法,重点对机载 LiDAR 数据中系统误差的处理理论和方法进行了深入的研究。希望本书能有助于机载激光雷达技术的学习和研究。本书还可以为从事遥感领域的科研院所的教师、科研人员、研究生和工程技术人员提供学习参考,以及用作遥感及相关专业的本科生教材。

在本书出版之际,感谢测绘地理信息科技出版资金、辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院、高等学校博士学科点专项科研项目(20122121120002)、辽宁省教育厅科学技术研究一般项目(12-1176)和对地观测技术国家测绘地理信息局重点实验室基础测绘经费资助项目(K201207)的资助,特别感谢辽宁工程技术大学

的宋伟东教授、中国测绘科学研究院的刘正军研究员、李海涛研究员、林祥国副研究员、沈晶博士后及李玉教授等人的指导和帮助,感谢辽宁工程技术大学徐爱功教授、测绘出版社为本书出版所做的工作,感谢潘莉莉、艾效夷、吴丽沙等研究生为本书校稿所做的工作,感谢为本书出版给予帮助的所有同志。

由于编写时间和作者水平之限,全书难免存在缺点甚至错误,欢迎批评和指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 引 言	1
§ 1.2 机载 LiDAR 的发展	3
§ 1.3 机载 LiDAR 的主要应用领域	7
§ 1.4 机载 LiDAR 的研究热点和难点	12
第 2 章 机载 LiDAR 系统	16
§ 2.1 机载 LiDAR 系统组成	16
§ 2.2 机载 LiDAR 系统对地定位原理及方程	26
§ 2.3 机载 LiDAR 测量作业生产流程	29
§ 2.4 机载 LiDAR 数据及其处理	41
§ 2.5 机载 LiDAR 数据的组织形式	66
§ 2.6 机载 LiDAR 技术特点及与其他技术的比较	69
§ 2.7 商用机载 LiDAR 系统	73
§ 2.8 机载 LiDAR 技术相关术语	75
第 3 章 机载 LiDAR 数据系统误差分析及消除	78
§ 3.1 机载 LiDAR 数据误差源分析	78
§ 3.2 机载 LiDAR 系统误差影响及系统定位精度分析	82
§ 3.3 机载 LiDAR 数据系统误差消除	94
第 4 章 面向航带平差的机载 LiDAR 系统误差处理方法研究	116
§ 4.1 航带平差理论基础	116
§ 4.2 基于无控制三维表面匹配的航带平差	125
§ 4.3 机载 LiDAR 数据航带法区域网平差方法研究	159
第 5 章 结论与展望	170
§ 5.1 结 论	170
§ 5.2 展 望	171
参考文献	173
附录 空间坐标转换	184

Contents

Chapter 1	Exordium	1
§ 1.1	Introduction	1
§ 1.2	Development of Airborne LiDAR	3
§ 1.3	Main Applications of Airborne LiDAR	7
§ 1.4	Hotspot and Difficulty of Research for Airborne LiDAR	12
Chapter 2	Airborne LiDAR System	16
§ 2.1	System Composition of Airborne LiDAR	16
§ 2.2	General Laser Equation	26
§ 2.3	Surveying Production Process of Airborne LiDAR System	29
§ 2.4	Airborne LiDAR Data and its Processing	41
§ 2.5	Representations of Airborne LiDAR Data	65
§ 2.6	Characteristics of Airborne LiDAR and its Comparison with Other Techniques	69
§ 2.7	Commercial Airborne LiDAR System	73
§ 2.8	Related Terms	75
Chapter 3	Analysis and Elimination of Systematic Errors in Airborne LiDAR Data	78
§ 3.1	Analysis of Systematic Error Sources in Airborne LiDAR Data	78
§ 3.2	Analysis of Systematic Error and Positioning Precision for Airborne LiDAR	82
§ 3.3	Elimination of Systematic Error	94
Chapter 4	Research on Processing Methods of Airborne LiDAR Systematic Error Oriented to Strip Adjustment	116
§ 4.1	Theoretical Basis for Strip Adjustment	116
§ 4.2	Strip Adjustment based on 3D Surface Matching Without Control	125
§ 4.3	Strip Block Adjustment for Airborne LiDAR Data	159
Chapter 5	Conclusion and Outlook	170
§ 5.1	Conclusion	170
§ 5.2	Outlook	171
References		173
Appendix	Space Coordinate Transformation	184

第1章 绪论

§ 1.1 引言

1.1.1 城市与城市管理

随着社会和经济的迅速发展,人类活动引起的全球变化日益成为人们关注的焦点。从最近几个世纪的历史看,人类活动对生态环境的影响主要是向变坏的方向发展。随着世界人口的急剧增加,造成资源大量消耗、生态环境恶化也成为有目共睹的事实。地球及其环境是一个复杂的巨系统,为了解决上述问题,要求以整体的观点认识地球。随着人类社会步入信息时代,有关地球科学问题的研究需要以信息科学为基础,并以现代信息技术为手段,建立地球信息的科学体系。地球空间信息科学,作为地球信息科学的一个重要分支学科,为地球科学问题的研究提供数学基础、空间信息框架和信息处理的技术方法。地球空间信息广义上指各种空载、星载、车载和地面测地遥感技术所获取的地球系统各圈层物质要素存在的空间分布和时序变化及其相互作用的信息的总体。地球空间信息科学,作为信息科学和地球科学的边缘交叉学科,与区域乃至全球变化研究紧密相连,是现代地球科学解决社会可持续发展问题的一个基础性环节。

空间定位技术、航空和航天遥感、地理信息系统和互联网等现代信息技术的发展及其相互间的渗透,逐渐形成了地球空间信息的集成化技术系统。近二三十年来,这些现代空间信息的综合应用有了飞速发展,使得人们能够快速及时和连续不断地获得有关地球表层及其环境的大量几何与物理信息,形成地球空间数据流和信息流,从而促成了地球空间信息科学的产生(李德仁等,1999)。

地球空间信息科学不仅包含现代测绘科学的所有内容,而且体现了多学科的交叉与渗透,并特别强调计算机技术的应用。地球空间信息科学不局限于数据的采集,而是强调对地球空间数据和信息从采集、处理、量测、分析、管理、存储,到显示和发布的全过程。这些特点标志着测绘学科从单一学科走向多学科的交叉,从利用地面测量仪器进行局部地面数据的采集走向利用各种星载、机载和车载传感器实现对地球表面及其环境的几何、物理等数据的采集,从单纯提供静态测量数据和资料走向实时或准实时地提供随时空变化的地球空间信息。地球空间信息科学将空间数据和其他专业数据进行综合分析,其应用已扩展到与空间分布有关的诸

多方面,如环境监测与分析、资源调查与开发、灾害监测与评估、现代化农业、城市发展、智能交通等。《自然》杂志在 2004 年 1 月刊登的一篇文章中指出:从经济社会发展和就业的角度来看,地学技术,确切地说是地球空间信息技术,与纳米技术、生物技术一样,构成了当今最为重要和最具发展前景的三大技术领域之一。

空间信息获取技术是地球空间信息技术研究的关键技术之一。空间数字信息的获取方式和技术手段多种多样,如统计技术、直接测量技术、模拟信息的数字化技术和遥感对地观测技术等。但以地球尺度、地区尺度、国家尺度并在一定时限内有可能获得大范围数字信息的技术,首推遥感对地观测技术。利用天基、空基、地基等多种传感器,可以多层次、多角度、高空间分辨率对地球进行全方位、立体式的观测。机载遥感相对于星载、车载和地基等探测方式,同时具有灵活机动和覆盖面积广的特点,能获取高分辨率的地面信息,成为地球空间信息获取有效的探测方式。在过去的几十年里,航空摄影测量是低空获取地球空间信息的重要手段之一,并发挥了重要的作用。尽管摄影测量技术目前较为成熟,在地球信息科学领域内扮演着不可或缺的角色,但是也有其不足和缺陷;尽管采用了现代高新技术手段,目前摄影测量的自动化程度仍然不是很高;由于影像匹配和自动识别技术发展的限制,国内摄影测量目前依然依靠繁重的人工立体测图来获取数字高程模型(digital elevation model, DEM),严重制约着摄影测量数据的生产速度;在森林、沙漠或者沿海滩涂地区,影像的纹理及对比度比较弱,会严重影响影像匹配精度,甚至造成无法进行摄影测量作业。这种局面已经日益滞后于国家经济建设发展对基础测绘地理信息数据的需要。而随着科学技术的不断发展,机载三线阵相机、机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)和机载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成为近代航空摄影测量的三种新兴的数据获取技术。

机载 LiDAR,在欧洲被称为机载激光扫描(airborne laser scanner, ALS)技术,是集激光测距技术、计算机技术、高精度动态载体姿态测量技术和高精度动态全球定位系统(Global Positioning System, GPS)差分定位技术于一身的摄影测量领域中的新兴技术。它通过测距测角及 GPS 动态差分定位能够获取精确的高分辨率数字地面模型及地面物体的三维坐标,通过随机携带的 CCD 相机获取对应地区的影像信息。这项技术是继 GPS 之后又一项测绘技术新突破,是一种崭新的革命性的测量工具(廖丽琼 等, 2004)。该技术的明显优势对传统摄影测量技术造成冲击,给测绘领域带来一场新的技术革命(李树楷, 2003)。机载 LiDAR 与摄影测量技术相比,激光脉冲为主动遥感方式,对天气的依赖性小,不易受阴影和太阳角度的影响;避免了投影(从三维到二维)带来的信息损失,高程精度优势明显;大量减少地面控制测量,航空飞行中可自动调节航带宽度;提高了自动化程度,大大缩短成图周期;在多等级三维空间信息的实时获取方面产生了重大突破,可以快速、主动、实时、直接地获得大范围地表及地物密集采样点的三维信息,为获取高时空

分辨率的地球空间信息提供了一种全新的技术手段;提高了观测的精度和速度,使人们从传统的前方交会的数据获取模式转变为连续自动的数据获取模式,使数据的获取和处理朝智能化和自动化的方向更进了一步。机载 LiDAR 的综合性价比要强于传统的遥感数据获取技术,具有一定的技术优势,正日益成为遥感数据采集技术的一种重要的方式。

随着 LiDAR 硬件系统的不断完善与成熟,关于 LiDAR 的数据处理和应用研究越来越受到专家学者的重视。我国“863”计划地球观测与导航技术领域 2006 年度专题之一也提出了激光雷达数据处理及应用的研究。其目标是研究 LiDAR 数据处理的关键技术,开发出国际领先并具有自主知识产权的 LiDAR 数据处理软件系统,具有飞行控制和数据收集、点云滤波分类、专业应用三大核心功能,开发出基础测绘、数字城市、森林资源等核心应用数据处理系统(曾齐红,2009)。因此,深入探讨机载 LiDAR 技术的相关理论,对于推动包括机载 LiDAR 技术在内的地球空间信息科学的发展与应用具有十分重要的意义。

§ 1.2 机载 LiDAR 的发展

机载 LiDAR(Flood,2001)将激光用于回波测距和定向,并通过位置、径向速度及物体反射特性等信息来识别目标。它体现了特殊的发射、扫描、接收和信号处理技术。机载 LiDAR 技术起源于传统的工程测量中的激光测距技术,是传统雷达技术与现代激光技术相结合的产物,是遥感测量领域的一门新兴技术。

利用激光作为遥感手段起源于宇宙航天的需要。在航天工程中,人们为得到星球之间的距离(地球与月球,卫星与星球等)而研究使用了激光测距设备和技术,并取得了较好的结果,从而显示了巨大的遥感应用潜力。20 世纪 70 年代,在美国的“阿波罗”登月计划中就成功地使用了激光测距装置。80 年代,以美国和德国为首的发达国家开始积极开展机载 LiDAR 技术的可行性研究,其标志性成果为 1990 年德国阿克曼(Ackermann F.)教授在斯图加特大学领衔研制的世界上第一个激光断面测量系统。

GPS 是 1973 年美国国防部批准建立的新一代卫星无线电导航系统,它的基本原理是通过测量出已知位置的卫星到用户接收机之间的距离,综合多颗卫星的数据并利用空间交会的方法得到接收机的具体位置。经过二十余年的研究实验,GPS 耗资 300 亿美元。截至 1994 年 3 月,全球覆盖率高达 98% 的 24 颗 GPS 卫星星座已布设完成,可向全球用户提供连续、实时、高精度的三维位置,三维速度和时间信息。近年来,基于载波相位差分的动态差分全球定位系统(difference Global Positioning System,DGPS)技术通过事后处理可达到厘米级精度,GPS 的成功应用使得激光扫描技术得到突破性发展。

惯性技术是根据牛顿惯性定理,利用陀螺、加速度计等惯性元件测量运动体的加速度,并通过积分运算得到运动体的位置与速度等导航参数的一种技术。惯性导航系统(inertial navigation system,INS)的发展源于 20 世纪初至 40 年代在军事武器上的惯性制导,此后广泛应用到各类航空、航海、车辆、导弹等武器装备,如 50 年代的战略弹道导弹、60 年代的“阿波罗”计划和 70 年代的军事飞机等。该技术与 DGPS 的结合实现了航空航天遥感中传感器位置和姿态的直接获取,更为 LiDAR 技术测量激光点云的空间坐标奠定了技术基础。

1998 年,加拿大卡尔加里(Calgary)大学将激光扫描仪与 GPS、INS 和数据通信设备进行集成,实现了第一个机载激光扫描系统。2003 年,搭载激光扫描仪的卫星 ICESat 升空。2004 年,第一个记录波形的商用激光扫描仪 RIEGL LMS-Q560 进行实验。近十多年来,机载 LiDAR 技术得到了蓬勃的发展,在硬件系统设计技术方面已经比较成熟,三维空间位置测量精度达到相当高的水平,其水平测量精度达到 20 cm,垂直测量精度达到 10 cm。欧美等发达国家先后研制出多种 LiDAR 测量系统,比较成熟的商业系统如加拿大 Optech 公司的 ALTM Gemini,荷兰 Fugro 公司的 FLI-MAP,瑞士 Leica 公司的 ALS50-II、ALS60,TopEye 公司的 TopEye Mk II,德国 TopSys 公司的 FALCON II、FALCON III,德国 IGI 公司的 LiteMapper 5600 和奥地利 RIEGL 公司的 LMS-Q560 等,另外,还有相当数量的系统正处于研发阶段。LiDAR 硬件系统的快速发展主要表现在:脉冲频率、扫描频率和点云密度不断提高,多脉冲技术已经开始引入系统中,越来越多的 LiDAR 系统集成了光学影像系统,波形数字化也得到普遍应用。2008 年,Leica 公司推出了第三代机载 LiDAR 系统 ALS60,该系统最大的特点是打破了传统设备必须在效率和精度上或者必须在设备体积和飞行高度上进行取舍的限制。ALS60 机载 LiDAR 系统的最大脉冲频率达到 200 kHz,最大扫描频率达到 100 Hz,为城市建模数据获取提供高密度三维点云数据;其数据精度不受脉冲频率影响,只受限于飞行相对高度,而相对航高从典型直升机飞行项目的 200 m 直至大面积制图项目的 5 000 m;空中内插多脉冲系统能在 5 000 m 高空作业时加倍地面点密度;集成了中像幅面数码相机 RCD105;飞行中能提供实时覆盖率分析,保证数据获取完整性。相比较而言,我国 LiDAR 技术起步较晚,对机载 LiDAR 系统的研究始于 20 世纪 70 年代,其间经历了理论探索、试验、完成原理样机等阶段,现有技术基础比较薄弱。目前,已研制成功的原理样机有中国科学院遥感应用研究所与上海技术物理研究所于 1996 年合作完成的机载激光扫描测距成像系统、海军海洋测绘研究所与上海光学精密机械研究所于 2004 年合作研制的机载激光测深系统、中国科学院光电研究院研制的 AOE-AL20 型机载三维成像 LiDAR 原理样机。但这距离实际应用还有一段距离并且在精度方面远不如国外的设备高。

机载 LiDAR 硬件方面的技术也在不断地发展与更新,绝大部分硬件方面存

在的技术与集成问题都已经得到了解决,但相比较而言,机载 LiDAR 数据的后处理就要滞后一些。目前,国际上用于处理 LiDAR 数据的软件相对较少,主要都是由各个硬件厂商提供的,如加拿大 Optech 公司的 REALM 软件、德国 TopSys 公司的 TopSys 软件等;这些软件都是各个硬件厂家根据自己的硬件特性以及相应的数据处理原理开发的,其中各个模块的具体原理都被视为各个硬件厂商的私有财产,对外保密。另外,还有第三方数据处理软件,如芬兰的 Terrasolid、美国的 LIDMAS、加拿大的 LiDAR XLR8R、美国的 LiDAR-M 3.2 和 LP360 等。国内现有的机载 LiDAR 数据处理软件比较少,只有武汉大学研发的 LiDAR-Pro 及广西桂能信息工程有限公司推出的国内第一套 LiDAR 数据的商用分类软件 LSC (LiDAR Studio Classification)。目前,国内广西桂能信息公司、山西亚太航空、太原通用航空、国家海洋局、北京星天地公司和南京测绘勘察设计院有限公司、中国测绘科学研究院等单位购买了 LiDAR 硬件,通常使用的软件为厂商提供或第三方软件,这些软件不同程度上都存在使用不便、维护成本高的问题。但随着 LiDAR 系统在各行各业的不断应用,其用户群日益扩大,对于 LiDAR 数据处理软件的需求极为迫切,已经有很多商业公司和各类科研机构对相关算法开展研究。

早期机载 LiDAR 获取的数据仅仅为数字表面模型(digital surface model, DSM)数据,也就是被测地物的三维坐标数据(深度距离图像),对机载 LiDAR 数据处理及应用大多集中在距离数据的直接处理及应用上(Kraus et al, 1998; Axelsson, 2000),即先利用某种算法将机载 LiDAR 数据点分割为地面点数据和地物数据(植被、建筑物、车辆等),然后依据不同的用途对地面数据建立 DEM 或对地物数据处理,如车辆鉴别(Rakusz et al, 2004)、建筑物三维建模(Maas, 1999)、树木参数获取(Heurich et al, 2004)、电力线监测(Ashdate, 2002)等。但是由于分辨率和处理算法不尽如人意,实践证明,仅依靠机载 LiDAR 数据的距离信息进行 DEM 生成和地物提取,分类的可靠性和准确性都不足以投入使用,这极大地限制了机载 LiDAR 技术的使用。为了解决这一难题,许多学者利用相关的信息(航空影像、二维地理信息系统数据等)结合机载 LiDAR 数据共同进行处理。例如,Matikainen 等人将航空像片与机载 LiDAR 数据相结合,实现对建筑物变化的自动检测,达到更新地形图的目的。但是,将其他来源的数据与机载 LiDAR 数据相结合使用时,由于数据获取不是同步的,处理时要进行配准和内插的处理,会影响结果的精度。目前,先进的机载 LiDAR 系统可以在获得距离信息的同时,记录多次目标回波的强度信息,以及红、绿、蓝等多波段的信息,由于这些数据是同一系统在同一时间获得的,它们具有像素级融合的优势,在处理时不用进行有损精度的配准处理。因此,近几年,对机载 LiDAR 的多波段信息的利用也逐渐增多。在 2004 年的国际摄影测量与遥感学会(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS)土耳其年会上,出现了一批利用机载 LiDAR 强度信息的

成果。例如,Jiang(2004)使用了机载 LiDAR 数据的距离和强度信息作为分向量,使用自组织映射(self-organizing maps,SOM)方法,对空间物体进行聚类分析,实现了从机载 LiDAR 数据中提取空间物体;Lovas 等(2004)在从激光脚点提取车辆时,考虑了各像素的强度值;Clode 等(2004)先利用距离信息生成了 DEM,再对 DEM 上的各点的强度值进行判断,凡强度值落在给定区间内的点作为道路点的候选点(即基于强度信息进行滤波操作),然后对距离图像按数字图像处理的方法提取道路边界。以上这些方法综合利用了机载 LiDAR 数据的多种信息,取得了较满意的结果。但是,这些处理方法还是先将距离信息转化为距离图像,然后引入强度信息作为辅助判决条件以对距离图像进行图像处理。目前机载 LiDAR 数据的处理方法都源自经典的数字图像处理方法,但是,经典数字图像处理针对的是灰度图像,而距离图像实际是多个点的测距值在二维平面上的分布,其像素值为距离,这显然和普通的强度或灰度图像是不一样的。这导致许多机载 LiDAR 数据的处理效果远远低于预期。国内机载 LiDAR 数据的处理技术同样由于 LiDAR 设备研制的不足而起步较晚,目前尚处于初步研究阶段。针对此,国家“863”计划已开始进行机载 LiDAR 数据后处理方面的相关研究,该研究致力于 LiDAR 数据后处理,希望能够研发出拥有自主知识产权并且国际领先的涵盖飞行控制和数据收集、点云滤波分类、专业应用这三个核心功能的 LiDAR 数据处理软件系统。其研究内容包括 LiDAR 数据预处理、LiDAR 波形数据处理与应用、LiDAR 点云数据处理与引用和 LiDAR 数据与其他数据的融合与应用。近年来关于 LiDAR 数据后处理的研究还有:中国科学院遥感应用研究所的尤红建(2006)、武汉大学的黄先锋(2006)以 LiDAR 点云数据为基础,深入地研究了建筑物检测、建筑物模型重建过程中所涉及的关键技术以及复杂结构的建筑物模型重建;张小红博士(2002)利用国外的机载 LiDAR 数据进行了一些机载 LiDAR 原理、数据处理流程、DEM 提取算法以及高程信息和强度信息融合处理的探索性研究;李树楷教授(2003)对机载 LiDAR 数据处理中的定位原理、数据解算、精度分析、分类等进行了探讨;天津海洋测绘研究所的黄谟涛等(2003)研究了机载激光测深中的一些数据处理技术,推导了条带式深度测量测点位置归算的严密计算公式及其相应的精度估算公式。此外,国内的众多学者还对机载 LiDAR 的成像原理、误差源、误差传播规律等进行了分析和探讨(刘少创 等,1999;张小红,2002;李树楷,2003)。武汉大学的赖旭东博士(2006)提出了一种融合 LiDAR 数据多种信息(强度信息与距离信息)的滤波方法,而邓非博士(2006)综合利用摄影测量、遥感和计算机视觉相关理论与处理手段,对融合 LiDAR 与影像的配准以及地物分类提取的策略、系统框架与实现算法进行了较深入的探索性研究。上海大学的曾齐红博士(2009)提出了一种根据几何数据与属性数据进行 LiDAR 数据滤波的方法。西南交通大学的殷飞等(2010)提出了一种自适应不规则三角网(triangulation irregular network,TIN)迭

代加密的滤波算法。

综上所述,目前针对机载 LiDAR 系统硬件以及数据后处理算法的研究正如火如荼地进行,许多 LiDAR 系统已经投入商业运作,并在部分领域和行业取得了一些成果。但是,总体而言,由于缺乏成熟的数据后处理技术,部分难题仍未取得突破性的进展,还没有发挥既定的全自动化、大规模数据生产的能力。特别是国内,虽已引进多台 LiDAR 系统,并生产了大量的原始点云和影像数据,但由于缺乏系统的数据处理流程和成熟的数据处理算法,这些数据一直没有得到有效的处理,造成了巨大的浪费。因此,对我国的测绘遥感界而言,加大 LiDAR 的硬件及数据处理算法的研究力度,研制出自主产权的实用机载 LiDAR 系统,是一项任务艰巨而又意义深远的事情。

§ 1.3 机载 LiDAR 的主要应用领域

机载 LiDAR 测量技术的发展为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,使人们从传统的人工单点数据获取变为连续自动数据获取,提高了观测的精度和速度,使数据的获取和处理朝智能化和自动化方向发展。机载 LiDAR 测量系统能够快速获取高精度、高空间分辨率的 DSM,进而获取地表物体的垂直结构形态,同时配合地物的视频或红外成像,增强了对地物的认知和识别能力,在三维地理空间信息的数据采集方面具有广阔的发展前景和应用需求;其传感器发射的激光脉冲能部分穿透树林遮挡,直接获取真实地面的高精度三维地形信息,在有些方面已经较传统摄影测量方法优越;不受日照和天气条件的限制,能全天候地对地观测。这些特点使机载 LiDAR 在许多场合能有效地弥补现有其他传感器的缺陷,是对现有航空传感器的一种有效补充,并在灾害监测、环境监测、资源勘查、森林调查、地形测绘等方面的应用具有独特的优势。机载 LiDAR 测量技术还可以同其他技术手段集成使用,如将 LiDAR 测量技术同传统的航空相机、CCD 相机以及红外遥感器等结合,可组成一套新的功能更强的遥感系统,为地球空间信息智能化的处理提供新的融合数据源。

1. 林业应用

最初,主要是利用 LiDAR 数据的地面回波进行地形制图,而植被回波被看作是“噪声”,从而忽略了 LiDAR 数据在林业上的应用潜力。直到近几年加拿大和欧洲的自然资源科学家才开始意识到 LiDAR 数据在研究生物空间、森林结构方面的应用价值。LiDAR 技术通过主动获取三维坐标信息来定量估测森林参数,尤其在估测森林高度及林木空间结构方面具有独特的优势。国外许多研究已经证明机载小光斑 LiDAR 数据在森林资源调查中的重要性,一些国家正在考虑用 LiDAR 技术进行森林资源调查。此外,机载 LiDAR 技术可极大地减少外业控制

点的布置量,从而减少外业人员在恶劣环境下的工作量,在生态脆弱地区的保护工作中具有得天独厚的优势。

传统的光学遥感技术仅能提供林木的二维信息,需要借助其他辅助信息才能获得其三维结构参数,而 LiDAR 数据可直接获取森林三维结构信息,其三维可视化可直接用于林木垂直分布参数的评估。通过激光扫描数据可以准确地估测林分特征(森林参数),如树高、胸高断面面积及林分蓄积量,还有研究将 LiDAR 数据和其他多光谱影像融合以获取高精度的森林参数,以及将 LiDAR 数据的三维信息和摄影测量技术相结合进行森林参数提取。

通过对机载 LiDAR 多重回波数据进行处理,生成 DSM 和 DEM,可准确分离出树木覆盖图,从而获得树冠结构模型和树下裸地模型。其成果可以被广泛应用于森林资源监测、荒漠化监测、野生动植物监测、林火监测、湿地监测、规划评估、林业总体工程设计、风景园林工程设计、自然保护规划设计、木材蓄积量、年度造林面积等方面,为林业现代化建设提供良好数据支持。

尽管如此,小光斑 LiDAR 系统的研究仍存在局限性,主要是因为研究的数据成本较高,而小光斑 LiDAR 数据的研究范围较小。LiDAR 遥感技术是一项应用逐步扩大的成熟技术,随着 LiDAR 传感器的不断进步、采集地表点密度的逐步提高以及单束激光可接收回波数目的增多, LiDAR 数据将提供更为丰富的地表和地物信息。就光斑大小和间隔而言,脉冲发射频率和分辨率将会继续提高,更加适应不同类型的地形。更高的飞行高度可以获得较大范围的覆盖面积, LiDAR 数据和摄影测量数据的自动校正将会提高数据融合质量。利用 LiDAR 数据构建的三维虚拟现实(virtual reality, VR)系统将具有更为理想的现实模拟表达能力,其可靠程度也进一步提高。在此基础上进行更为精细的森林参数分析,如树高、树干材积、胸高断面面积、生物量以及枝干密度等分析,并对其进行进一步的研究和应用,将可获得更为理想的结果。

2. 交通测量

随着交通建设的不断发展,道路、铁路的选线科学化、精确化的需求不断增大,而如何在复杂的地形条件下实现低成本、高效率的交通线路维护,预见并降低各种地质灾害对交通线路的损害,就成为各级交通设施维护部门面临的主要问题。机载 LiDAR 系统可以快速提供交通线路走廊范围内详细、直观的影像资料,微地貌数据以及植被覆盖数据;可基于上述数据建立起交通线路走廊数据库,为交通线路选线和维护提供详尽、完备的资料;极少的野外勘测工作可以进一步降低成本;可以在该数据库基础上结合 GIS 技术,提供包括剖面图制图、土方量等工程基础参数计算、交通线路走廊的选线分析、地质灾害分析与管理、交通设施维护、基础数据管理等内容的交通应用综合解决方案,从而提高交通线路管理和规划的现代化、科学化程度。如图 1-1 所示,机载 LiDAR 数据应用于高速公路测量时可用于监控高

速公路及其周围的环境、利用影像数据检测周围的地物、利用高程数据评估高速公路的质量,以及展示重要细节以计划重建和修复任务。



图 1-1 机载 LiDAR 数据应用于高速公路测量

3. 带状目标地形图测制

机载 LiDAR 测制带状目标地形图主要可用于工程建设中,包括测绘铁路与公路线路图、输油管道图和电力线图等。

以电力线图的绘制为例,机载 LiDAR 系统具备独有的多重回波特点,并能同时记录地物反射回波强度,进而可以迅速准确地提取电力线。通过回波分类和回波强度处理技术,可生产三维电力线模型、植被模型和裸地三维模型等,基于上述模型还可实现悬挂线的弯曲度计算、下垂度测算、净高评估、电塔位置制图、电力选线等应用。相对于传统的摄影测量,机载 LiDAR 系统弥补了其对电力线测量无能为力的空白,节省了大量的外业勘测时间和人力投入,缩短了提供数据的时间,节约了成本,数据精度却大大提高。

电力输送项目极大地方便了电网布设与维护管理工程,在进行电力线路设计时,通过 LiDAR 数据可以了解整个线路设计区域内的地形和地物要素的情况。尤其是在树木密集处,可以估算出需要砍伐树木的面积和木材量。在进行电力线抢修和维护时,根据电力线路上的 LiDAR 数据点和相应的地面裸露点的高程可以测算出任意一处线路距离地面的高度,这样就可以便于抢修和维护。如图 1-2 所示,可以很清楚地看到电力线的走向及与植被的高度关系,便于设计;实时提供的高精度断面,大大减少了外业工作量;准实时提供的高精度三维数据,可以精确测量线路走廊内危险点的距离。

4. 城市三维建模

城市是 GIS 运用和研究领域的一个重要方面。而三维城市模型作为 GIS 研究的一个重要方向已引起 GIS 学术界和应用部门的广泛关注,不仅是近年来提出

的“数字地球”的一个重要组成部分,还被许多应用领域迫切需要,已广泛运用于城市规划、建筑设计、无线通信等领域。

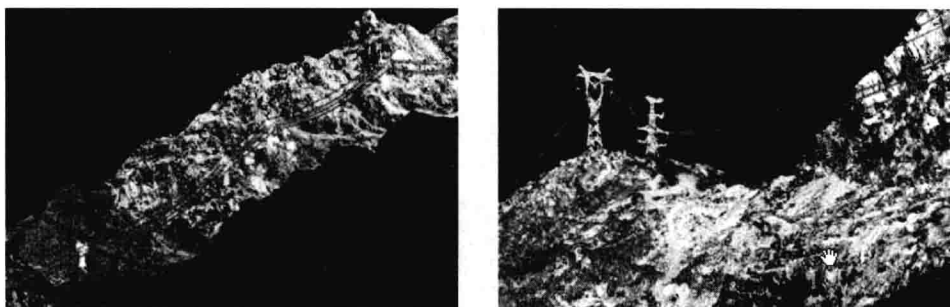


图 1-2 电力线路勘测设计

高密集的机载 LiDAR 数据在三维城市模型领域有着广泛的应用前景,如城市规划中的建筑物景观模拟、地下管线的三维显示等,有望彻底解决利用摄影测量手段建立三维城市模型的瓶颈问题。结合高密集的激光扫描数据和地面二维平面数据建立三维城市模型的技术已有研究:机载 LiDAR 测高可提供高密度和高精度的观测值,根据这些高程数据的集合变化纹理特性,能探测、重建三维建筑物模型。建筑物的三维重建比通过影像匹配更容易,比采用手工处理更快,具有很广阔的应用前景。图 1-3 所示即为通过机载 LiDAR 建立的三维城市模型。



图 1-3 三维数字城市模型

5. 灾害调查与环境监测

机载 LiDAR 测量主要可应用于自然灾害(如飓风、地震、洪水等)的灾后评估和响应(图 1-4)。利用机载 LiDAR 测量的快速、全天候和高精度的特点,不仅可以快速、及时、准确地服务于自然灾害的监测管理,还可以在灾害发生后迅速获得灾害现场的具体情况,从而快速提供可靠的灾害损失数据,用于制定救灾方案和评价灾害损失。LiDAR 技术对于河流监控与治理也有着极其重要的意义。例如,由