



湖北省学术著作

Hubei Special Funds for
Academic Publications 出版专项资金

“十三五”湖北省重点图书出版规划项目

地球空间信息学前沿丛书 丛书主编 宁津生

面阵激光雷达成像 原理、技术及应用

周国清 周祥 著

非
外
借



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



湖北省学术著作

Hubei Special Funds for Academic Publications 出版专项资金

“十三五”湖北省重点图书出版规划项目

地球空间信息学前沿丛书 丛书主编 宁津生

面阵激光雷达成像 原理、技术及应用

周国清 周祥 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

面阵激光雷达成像原理、技术及应用/周国清,周祥著. —武汉:武汉大学出版社,2018. 1

地球空间信息学前沿丛书/宁津生主编

湖北省学术著作出版专项资金资助项目 “十三五”湖北省重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-307-19683-4

I. 面… II. ①周… ②周… III. 激光成像雷达—雷达成像—研究
IV. TN958.98

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 222247 号

责任编辑:王金龙

责任校对:汪欣怡

版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:373千字 插页:2

版次:2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷

ISBN 978-7-307-19683-4 定价:60.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

周国清

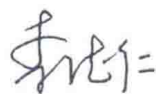


教授，博士生导师，现任桂林理工大学副校长。1994年获武汉测绘科技大学（现为武汉大学）摄影测量与遥感专业博士学位，先后在清华大学计算机科学与技术系、北京交通大学信息科学研究所、德国柏林工业大学（德国洪堡学者 Alexander von Humboldt-Foundation）和美国俄亥俄州立大学从事科学研究。自2000年起，在美国老道明大学任教并担任空间制图和信息研究中心主任，相继破格晋升为副教授（2005年）和正教授（2010年）。2011年，入选第六批国家“千人计划”学者，并担任“十二五”国家863计划对地观测与导航技术领域专家。

序

我很高兴看到周国清教授撰写的《面阵激光雷达成像原理、技术及应用》一书的出版。本书是他根据自己近十年来，在面阵激光雷达研究成果的基础上撰写的一本较为全面、系统的专业书籍。书中对面阵激光雷达成像原理、面阵激光雷达激光器、面阵激光雷达光机系统、面阵激光雷达阵列探测处理、多通道高精度时间测量、面阵激光雷达几何成像模型、面阵激光雷达成像仪误差校准、面阵激光雷达数据预处理及三维可视化、面阵激光雷达的应用等内容分别进行了描述。

全书内容丰富、结构严谨，具有一定的深度和广度。目前国内尚未见到全面介绍面阵激光雷达成像的同类书籍，因此本书填补了国内空白。我相信该书的出版对我国面阵式激光雷达的研究和应用将起到积极的推动作用，对相关研究人员学习和掌握该技术有一定裨益。



2017年3月19日于武昌珞珈山

前 言

现有传统的机载激光雷达成像仪(Light Detection And Ranging, LiDAR)都是采用单点发射、单点接收的模式,这种模式需要配合扫描装置才能实现三维激光成像,但这种类型的激光成像系统存在很多问题。首先,单点扫描式激光雷达测量系统在工作时是以扫描方式来快速获取数据的,它自身系统带有一个机械扫描装置,使得整个系统设计比较复杂,体积大,重量比较重,系统获取数据的稳定性差。对于民用小型无人机搭载平台来说,单点扫描式激光雷达测量系统的体积和重量难以满足要求。其次,单点扫描式激光雷达是以单点发射模式来发射激光的,对激光发射频率要求很高,这样一来,对整个激光发射硬件要求很高。最后,单点扫描式激光雷达测量系统是以Z字形或圆锥形对地物距激光发射点的距离进行测量的,其产生的地面激光脚点之间的距离比较大,整个点云数据密度小,一般要通过内插方法来获得周围的点云数据,导致其数据精度降低。

自2003年笔者在美国首次接触面阵激光成像系统,一直潜心研究该激光成像模式已经十多年。面阵激光雷达成像系统由于是采用泛光或点阵方式照射到地面,然后通过APD面阵接收器接收地面不同地物反射回去的激光脉冲信号来确定地面目标的三维坐标信息,且每次处理地面上一个面的激光脚点信息,因此相比点阵激光雷达来说,它能够快速大面积地获取目标三维信息,具有测量精度高、轻小型、系统结构紧凑、适合无人机平台搭载进行低空快速作业等优点。在信息化的今天,无论是军用还是民用方面,如对地观测、目标探测、精确制导等领域,面阵激光雷达相比单点扫描激光雷达将具有更加广阔的应用前景。

本书面向当前国际面阵激光雷达遥感技术发展的前沿,系统地总结了作者所在课题组近年来在面阵激光雷达成像仪研究方面的成果,从成像原理、激光器、光机系统、探测处理及应用等方面,进行了较为全面的、系统的介绍和总结。全书共分11章,第1章是绪论,简单地回顾了激光雷达在国内外发展的现状;第2章重点阐述了面阵激光雷达成像原理;第3章讲述了面阵激光雷达的激光器;第4章重点描述了面阵激光雷达光机系统;第5章描述了面阵激光雷达阵列探测处理系统;第6章描述了面阵激光雷达高精度时间间隔测量系统;第7章介绍了面阵激光雷达成像三维数学模型及模拟研究;第8章介绍了5×5面阵激光雷达成像仪误差校准;第9章介绍了面阵激光雷达数据预处理及三维可视化系统;第10章介绍了GPS和电子罗盘组合的低价面阵激光雷达POS系统;第11章简单地介绍了激光雷达的应用,尤其是在森林地区的应用。附录A对本书中出现的英文简写进行了列举和全称对照;附录B对课题组研发的面阵激光雷达产品样机进行了描述。

本书的部分章节是在相关研究生的研究基础上整理完成的,这些研究生包括:周祥、杨波、杨春桃、黎明焱、马云栋。衷心感谢他们为本书所做的研究工作和提供的宝贵资

料。书中还有部分章节是来自课题组农学勤高级工程师、马建军工程师等提供的实验材料，在此对他们表示衷心感谢！

本书中的部分成果已经在国内外刊物上发表。本书在撰写过程中，参考了国内外大量著作、学位论文、期刊文献、会议学术论文和相关网站的资料，在此表示衷心的感谢！虽然笔者努力把这些参考文献都列出并在文中标明出处，但难免有疏漏之处，诚挚地希望得到读者和同行的谅解！

本书可作为遥感科学与技术、测绘科学与工程、光电信息工程、电子信息工程、机械工程、精密仪器工程、仪器科学与技术等专业的教师和科研工作者的参考资料，也可以作为这些专业的研究生的教材和参考资料，还可以为地理学、地质学、地貌学、地震学、林业、考古学、大气物理等激光雷达数据应用专业的教师和科研工作者提供参考。

本书的出版得到“广西壮族自治区主席科技基金项目——民用小型无人机激光探测和测距(LiDAR)航空遥感系统的研究”、“广西科学研究与技术开发计划课题——单频高功率面阵 LiDAR 系统关键技术的研究”、“广西自然科学基金重点项目——面阵 LiDAR 机载遥感传感器的研究”等项目的资助。

由于笔者知识水平有限，本书难免存在不妥之处，敬请各位专家、读者不吝批评指正。任何批评、建议和意见请发送到笔者邮箱：gzhou@glut.edu.cn。

作 者

2016年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 激光雷达成像技术的发展与现状	3
1.3 单点激光雷达成像系统的缺点	7
1.4 面阵激光雷达发展现状	7
1.5 激光成像仪的基本组成部分.....	10
1.6 三种典型激光雷达成像模式与比较.....	11
第 2 章 面阵激光雷达成像原理	19
2.1 面阵激光雷达成像系统组成.....	19
2.2 非相干探测的激光雷达测距原理.....	23
2.3 光电探测器工作原理及 APD 接收性能分析	26
2.4 时间间隔测量原理和方法.....	30
2.5 面阵激光雷达测距原理.....	34
第 3 章 面阵激光雷达的激光器	39
3.1 激光器类型.....	39
3.2 半导体激光器.....	39
3.3 半导体激光器驱动原理.....	42
3.4 半导体激光器 RC 驱动电路	43
3.5 驱动电路的仿真与实验分析.....	44
3.6 半导体激光模块试验与测试.....	48
第 4 章 面阵激光雷达光机系统	55
4.1 光学系统分析.....	55
4.2 光学系统组成及功能.....	55
4.3 5×5 面阵激光雷达发射光学系统设计	56
4.4 5×5 面阵激光雷达接收光学系统设计	60
4.5 5×5 面阵激光雷达光学系统调试及测试	65
4.6 面阵激光雷达系统结构设计.....	67

第 5 章	面阵激光雷达阵列探测处理	70
5.1	APD 探测器功能与选择	70
5.2	探测处理电路分析	72
5.3	并行探测处理电路	73
5.4	抗干扰处理	79
5.5	阵列探测处理电路实现及测试分析	80
第 6 章	多通道高精度时间间隔测量	84
6.1	多通道时间间隔测量的实现方式	84
6.2	基于 TDC-GPX 多通道时间间隔测量	85
6.3	基于 TDC-GPX 软件设计	90
6.4	时间间隔测量系统测试及 32 通道测时仪	94
第 7 章	面阵激光雷达仪三维几何成像数学模型及模拟	96
7.1	面阵激光雷达仪几何成像模型	96
7.2	面阵激光三维(3D)坐标数学模型	98
7.3	理想飞行状态下面阵激光雷达成像模拟	104
7.4	非理想飞行状态下面阵激光雷达成像模拟	109
7.5	点阵扫描激光雷达数据精度分析	125
7.6	面阵激光雷达数据与单点扫描激光雷达 3D 数据精度对比分析	126
第 8 章	面阵激光雷达成像仪初始误差校准及系统评价	127
8.1	面阵激光雷达成像仪误差来源	127
8.2	误差校正方法	128
8.3	面阵激光雷达测距性能验证试验	131
8.4	绝对精度评估	137
第 9 章	面阵激光雷达数据预处理及三维可视化系统	141
9.1	面阵激光测距点云异常数据分类	141
9.2	点云异常数据补偿方法	143
9.3	点云异常数据预处理	145
9.4	点云异常数据处理程序设计及测试结果	146
9.5	面阵激光多幅点云配准及拼接	148
9.6	面阵激光雷达三维数据处理软件	152
9.7	数据预处理及精度分析	159
第 10 章	GPS 和电子罗盘组合的低价 POS 系统	161
10.1	POS 系统的功能与组成	161

10.2	POS 系统常用坐标系及相互关系	162
10.3	GPS/电子罗盘组合的低价 POS 系统设计	164
10.4	低价 POS 系统误差分析及误差模型	179
10.5	低价 POS 系统测试及精度分析	181
第 11 章	机载激光雷达的应用	185
11.1	典型机载 LiDAR 数据应用领域	185
11.2	几种典型点云数据滤波算法	188
11.3	点云滤波算法的评价	194
11.4	点云数据应用实例——森林地区多回波滤波	197
11.5	结论	216
11.6	点云数据后处理的展望	216
附录 A	英文简写和中英文对照	218
附录 B	面阵激光雷达成像仪样机简介	220
	参考文献	229

第1章 绪 论

本章首先介绍了激光雷达成像仪的背景及其意义，然后介绍国内外面阵激光雷达成像系统、激光雷达点云数据处理的发展现状，接着描述激光雷达成像系统的基本结构和框架，最后重点描述了三种典型激光雷达成像模式和几何成像原理以及它们之间的差异和优缺点。

1.1 引言

获取地球表面三维空间信息是地理空间信息学的重要任务之一(张小红, 2007; 李清泉等, 2000)。遥感科学与技术是获取地理空间数据, 尤其是地表三维数据的主要技术和方法之一。在 20 世纪的几十年的发展过程中, 摄影测量作为获取三维地理空间信息的主要技术手段, 取得了长足的发展, 并发挥了重要作用。然而, 由于全球各种灾害频发、环境日益恶化, 人们越来越需要实时获取准确的地表三维变化, 也就是能实时掌握地表的数字地形模型(Digital Terrain Model, DTM)或数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)。众所周知, 传统的数字摄影测量技术一直被限制在摄影测量的基本框架之内, 其生产周期长、价格贵、全自动化程度低等缺点与社会需求的矛盾日益突出, 使得人们不得不重新寻找和研究如何高效、实时、准确、可靠地获取三维空间数据。激光雷达测量(Light Detection and Ranging, LiDAR)技术很快引起了人们的关注, 尤其是机载激光雷达探测技术, 成为 20 世纪 90 年代地理空间信息领域发展和研究的主要任务之一。

激光雷达测量(LiDAR)是通过激光发射到目标物体, 然后探测反射回的激光信号与发射激光的时间间隔来计算目标物的距离(Denny, 2007)。机载激光雷达探测技术相对于星载探测技术来说, 具有灵活性高、主动性强、实时性好、获取的 DEM 数据精度高等特点; 相对于车载探测技术来说, 具有获取 DEM 数据快、覆盖面积广等特点。因此, 机载激光雷达探测技术成为获取空间信息的有效方式。20 世纪 80 年代末, 激光雷达测量技术开始应用于 DEM 测量, 在随后的几年中, 随着各项硬件的逐步发展完善, 一种集成了 GPS、IMU(Inertial Measurement Unit)和激光扫描仪的机载激光雷达测量系统被开发出来, 并迅猛发展。机载激光雷达测量技术作为新兴的空间对地观测技术, 相对于传统摄影测量, 在实时获取地面三维空间数据方面具有巨大的优势。它能够快速获取高精度、高密度的地面三维数据, 被称做“点云数据”(刘经南, 张小红, 2003)。

LiDAR 这种产品一经进入市场, 立即发挥了巨大的作为。反过来, 在市场和用户需求的推动下, 这种仪器可以以有人飞机、无人飞机或飞艇为搭载平台, 并准确地获得地表目标的三维坐标(蔡喜平等, 2007)。目前, 国际市场上主要 LiDAR 系统的产品和性能见

表 1-1。

表 1-1 国际市场上主要 LiDAR 系统的产品和性能

产品型号	ALTM Gemini	ALS60	LMS-Q680i	FALCONIII	LiteMapper560
厂商	Optech	Leica	REIGL	TopoSys	IGI
激光波长/nm	1064	1064	1500	1550	1550
扫描频率/Hz	70	100	10~160	415	5~160
脉冲频率/kHz	33~167	最大 200	25~200	50~125	40~200
脉冲宽度/ns	7	小于 9	小于 4	5	3.5
最大回波次数	4	4+3	全波形	8 次或者全 波形记录	全波形
测距精度/cm	3	小于 10 (行高 1000m 时)	2	1	2
高程精度/cm	小于 10	小于 14 (含 GPS 误差)	小于 15 (由 DGPS 确定)	7	0.06 (不含 GPS 误差)
平面精度/cm	$\frac{1}{5500} \times \text{海拔}$	小于 24 (含 GPS 误差)	小于 10 (由 DGPS 确定)	10	0.3 (不含 GPS 误差)

随着 LiDAR 系统硬件技术的快速发展, 所获取的数据精度和数据量得到巨大提升, 使机载 LiDAR 数据后处理的研究与应用也成为研究者们研究热点。目前, 世界上可以进行机载激光雷达数据处理的专业软件主要包括 TerraScan、TopPIT、REALM 等。在这些软件中, 很多数据处理的环节上需要研究人员干预(李清泉等, 2000)。目前, 国际上主要 LiDAR 数据处理软件产品和性能见表 1-2。随着机载激光雷达测量系统应用的不断深入, 机载激光雷达数据的后处理的发展已成为研究人员的主要研究方向之一。

表 1-2 国际市场上主要 LiDAR 数据处理软件产品和性能

激光雷达数据处理软件名称	生产厂家	国家
TerraSolid	TerraSolid 公司	芬兰
LIDAR XLR8R 3.0	Airborne 公司	美国
TopSys	TopoSys 公司	德国
REALM	Optech 公司	加拿大
LID-MAS	美国政府和陆军测绘局	美国
LidarStation	中国测绘科学研究院	中国

因机载激光雷达抗干扰性好、高精度、高效灵活等优点, 机载(Airborne)激光雷达探

测技术已经广泛应用于测绘学、考古学、地理学、地质学、地貌学、地震学、林业、遥感、大气物理、城市道路规划、城市环境监测、城市三维重建、铁路、电力选线、海岸线监测等领域。由于一个窄的激光束可以对一个地物目标的物理特性进行成像,因此,如果LiDAR激光光源使用紫外、可见光或近红外光源对目标物进行成像,可成像的目标能被极大地扩大,包括非金属物体、岩石、雨、化合物、气溶胶、云甚至单分子(Cracknell and Hayes, 2007)。LiDAR成像技术还广泛应用于对大气和气象的研究。此外,激光雷达成像技术还被美国宇航局(NASA)作为关键技术应用于机器人和载人登月车的安全着陆等相关领域(Amzajerdia et al., 2011)。

1.2 激光雷达成像技术的发展与现状

1.2.1 单点激光雷达成像技术的发展

激光雷达是雷达技术和激光技术相结合的产物,它起源于20世纪60年代,发展于20世纪70年代,实用化研究开始于20世纪90年代,到目前已有五十多年的发展历程(孙莉丹, 2015)。

激光雷达从一开始就和航天技术紧密结合在一起,最早公开报道的星载激光雷达由美国国际电话和电报公司研制,用于航天飞行器交会对接,并于1967年研制了激光雷达样机。通过空间飞行试验证明了星载激光雷达的可行性。1978年美国国家航天局的马歇尔航天中心研制了用于航天飞行器交会对接的CO₂相干激光雷达,并于1984年取得阶段性成果(贺嘉, 2008)。

最早对成像激光雷达展开研究的是美国的林肯实验室,他们于20世纪70年代末首先研制成功了CO₂成像激光雷达,主要用于导弹制导、地形侦察等领域(韩绍坤, 2006)。到20世纪80年代末,以机载激光雷达测高技术为代表的空间对地观测技术在多等级三维空间信息的实时获取方面产生了重大突破,激光雷达探测得到了迅速发展。德国斯图加特大学于1988—1993年将激光扫描技术与即时定位定姿系统结合,形成机载激光扫描仪(Ackermann, 1999; 曾齐红, 2009)。

随着技术的不断发展和成熟,成像激光雷达已从单纯的航空航天或者军事领域走向商业化。20世纪90年代末该技术在国际上已发展得较为成熟,商业化的LiDAR系统研制出了一百多种,并成功应用到各个领域(孙莉丹, 2015)。典型的有加拿大Optech公司、瑞士Leica公司、奥地利RiegI公司、德国IGI公司和Topo Sys公司、瑞典Top Eye公司等,这些公司各自的产品在激光安全等级、激光波长、脉冲宽度、测量精度、测程范围、扫描视场等指标性能上有所不同,客户根据应用需求可以有多种不同的选择(徐祖舰等, 2009; Baltsavias, 1999)。能够提供机载激光雷达测量设备的厂商主要有加拿大的Optech公司、瑞士的Leica公司、奥地利的Rigel公司等。随着世界各国对海洋资源开发和对领海主权的重视,一种可以实现浅海测量的机载海陆双频激光雷达系统受到各国的欢迎,这主要得益于双频激光对于海水的穿透性差异(1064nm红外激光和532nm蓝绿激光),从而使得该系统可以同时对海底地形和海面进行同步测量。通常采用532nm蓝绿激光进行海

洋浅水海底地形测深,同时采用无法穿透海水的1064nm红外激光实现海面高度测量。双频机载激光扫描系统通过一次扫描即可完成海面、海底、海水高度数据的获取,目前国外的双频测深激光雷达系统一般采用双频点激光同步扫描,一次获取海面和海底测距数据,譬如加拿大Optech公司研发的SHOALS-1000T高精度机载激光雷达,就是采用这种扫描方式以实现海洋测深模式(双频同步测量海底地形和海水表面距离)和地形测绘模式(常规陆域地形测绘)测量(黎明焱,2016)。

国内方面,从事激光雷达测量技术研究的单位主要有:中国科学院遥感应用研究所、浙江大学、华中科技大学、电子部27所、电子科技大学、哈尔滨工业大学等单位。1996年,李树楷教授等人成功试验了扫描式激光雷达测距原理样机,但由于国内目前还无法生产高精度的IMU姿态测量传感器以及高精度的扫描装置,导致该测量系统的激光脚点密度低,高程和平面精度都没法达到人们满意的结果(李树楷等,2000)。武汉大学李清泉教授等人研制了一套地面激光扫描测量系统,但只有测距功能,还没有将GPS定位以及IMU姿态传感器定向等集成到一起,目前主要用来进行堆积测量(李清泉等,2000)。在“八五”期间,华中科技大学成功研制出我国第一套机载激光雷达海洋测量试验系统(昌彦君等,2001)。中国科学院上海光机所研制了我国新一代机载激光雷达测深系统,最大测深能力达到50m(陈卫标,2004)。2007年,我国的嫦娥一号卫星也搭载了由自主研制的激光高度计,获得了精确的月球表面三维数字高程信息,得到了清晰的月球立体图像和月球两极地区的表面特征(叶培建等,2007)。2011年12月,中国电子科技集团27研究所研制的激光雷达探测系统用于神舟八号与天宫一号交会对接,并取得圆满成功,这表明了我国在激光雷达方面的技术取得了长足的进步。但从整体上来看,我国机载激光雷达扫描测量系统还不够成熟。

1.2.2 激光雷达点云数据处理的发展

通过激光三维扫描系统可以快速获取大量的距离点数据,被称为点云数据。对点云数据的处理方法很多,典型的处理方法有:

(1) 滤波

由于激光雷达点云中既含有地面点又含有非地面点,从中提取数字地面/高程模型(DTM/DEM),就需要将其中的非地面点去除,这个过程叫做激光雷达点云数据的滤波(龚亮,2011;肖贝,2011;王扶,2011;曹飞飞,2014)。

(2) 去噪

去噪是为了去除在真实数据点中混有的不合理的噪声点,以避免重构的曲线、曲面不光滑(冯义从等,2015;张新磊,2009;董明晓等,2004)。

(3) 配准

配准是将两个或者两个以上坐标系中的大容量的三维空间数据点集转换到统一坐标系下的数学计算过程(董秀军,2007;李彩林等,2015;王伟辰,2015;袁夏,2006;李贝贝,2013;吕琼琼,2009)。

(4) 拼接

由于测量结果是多块具有不同系统参数且存在冗余的点云数据,不能为许多三维重构

系统接受,因而必须进行坐标归一化和消除冗余数据的处理。这一过程称为测量数据的重定位,也就是三维数据拼接(吕琼琼,2009;雷家勇,2005;雷玉珍,2013;卿慧玲,2005;赵庆阳,2008)。

(5) 三维目标重建

三维目标重建是指对三维物体建立适合计算机表示和处理的数学模型,是在计算机环境下对其进行处理、操作和分析其性质的基础,也是在计算机中建立表达客观世界的虚拟现实的关键技术(熊邦书,2001;焦宏伟,2006,2012;T. T. Nguyen et al., 2011;王晓南,2014)。

在激光三维扫描技术广泛应用的今天,人们对目标的三维高精度数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)提出了更高的要求。针对采用不同的点云数据后处理方法得到的目标 DSM 有极大区别,越来越多的科研学者投入到对点云数据后处理算法的研究工作中。

1. 国外发展现状

在国际上,激光雷达点云数据处理的发展一直受到重视,发展了大量的算法和方法,概括起来,主要分为以下几个方面。

在目标识别方面:Fehr 等(2016)采用点云顶点、目标 RGB 值协方差变化相结合的方法,实现对被测量物体的外形检测和识别;Ochmann 等(2016)利用室内点云数据,实现建筑物内外部之间的关系研究,例如房屋墙壁厚度、房屋面积等;Buscombe(2016)运用光谱信息与高分辨率点云相结合,实现地理空间数据的识别分类处理;Riquelme 等(2015)更是通过对岩体三维点云进行坡度分级(Slope Mass Rating, SMR)处理分析获取三维目标表面坡度大小,并以此实现岩体分类和岩体稳定性预测;Mendez 等(2014)针对落叶乔木点云数据,采用柱面拟合算法进行树木表面三维重建,以此实现区分植被中树叶面积、树冠面积或者从大量点云中辨别森林面积;Gomes 等(2013)提出一种移动中心点云快速识别的方法,该方法使机器人视觉系统模拟人眼视角范围寻找视网膜最中心位置,实现投影点云数据进行目标识别,且通过实验证明该方法较全点云数据识别时间缩减为1/7,正确识别率达到91.6%;Yan 等(2016)针对车载点云在道路三维重建中辨识问题,提出一种算法提取道路两边的路灯或灯塔,首先设置阈值利用自动滤波区初步分地面点和非地面点,然后采用聚类提取出精确非地面点集合,最后根据对提取的路灯区域路面进行填充去除路面空洞,在加拿大多伦多市实验表明,对于5类路灯和灯塔的正确识别率可达91%。

在数据配准方面:Ge 和 Wunderlich(2016)采用非线性高斯-赫尔默特模型(Gauss-Helmert Model)避免出现二次约束最小二乘问题,该模型可以实现不同时刻、不同传感器的数据进行点云配准;Yun 等(2015)对多视角球体点云提出一种改进型数据配准算法,首先在每一个视角点云中找出球体目标的重心位置,然后将多视角间点云相对重心位置做初配准,最后以更加细微的几何形状进行配准和数据拼接;Torabi 等(2015)通过迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)算法进行点云特征点获取,然后利用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)算法获取点云目标正切面,并建立点到正切面之间的一个关系变量,将点云配准问题转换为最优解问题。同时他们将该配准方法用于两不同视角下火车

车轮点云数据的配准, 然后与经典 ICP 算法点云特征点配准进行比较, 实验结果表明基于主成分分析的迭代就近点算法有更小的误差及更快的配准速度; Takimoto 等(2015)提出一种改进的三维表面重建算法, 主要是利用被测物体遵循的尺度不变特征变换 (Scale-invariant Feature Transform, SIFT), 对经典 ICP 算法进行动态修正, 避免陷入局部最优解问题; Bosché(2012)提出一种基于机载三维激光点云半自动快速配准算法, 将三维点云坐标数据转换为同一视角距离信息, 然后当用户在一个视角下点击到任意一配准时, 系统自动提取出所有同等距离点集合, 以此来减少配准点云数量, 加快速点云配准速度。

数据压缩及传输优化方面: Masuda 和 He(2015)针对点云的应用提出一种基于线扫描点云的压缩优化算法, 同时针对不规则三角网 (Triangulated Irregular Network, TIN) 数据占用空间较大的问题 (占用空间约为点云数据的 2~3 倍), 提出一种基于车载三维激光扫描点云的即时转换方法, 以此减少数据应用传输; Vo(2015)针对点云数据分割, 提出一种八叉树区域增长算法, 先将点云数据进行最小块粗划分, 再对未处理点云根据距离阈值判断是插值还是去除处理, 这也是用于点云数据压缩。

误差分析方面: Fana 等(2015)针对目前各厂家对地面三维激光扫描系统 (Terrestrial Laser Scanning, TLS) 测量误差数据进行实验分析, 建立目标测量误差 (Target Measurement Error, TME)、配准前目标差异 (Post-registration Target Difference, PTD)、目标配准误差 (Target Registration Error, TRE) 之间关系, 并以此计算建立新的配准误差 (Object Registration Error, ORE) 标准; Polat 等(2015)针对机载、车载三维激光点云原始数据合成数字高程模型中不同点云密度、精度问题提出利用倒数加权法 (Inverse Distance Weighted, IDW) 结合邻近点插值法 (Natural Neighbor, NN) 生成光滑数字高程模型。

2. 国内发展现状

在国内, 尽管我们对激光雷达点云数据处理的研究比较晚, 但发展很快, 也出了大量的算法和方法, 概括为以下几个方面。

在数据处理方面: 代世威(2013)利用模糊 C 均值聚类算法提取目标点云特征, 用于点云切割、去噪、标记配准中心点位; 徐文学(2011)则提出根据三维激光扫描数据的结构和目标物的几何特点, 提出一种基于反射值影像的地面三维激光扫描数据分割方法; 焦宏伟(2012)针对激光雷达成像和双电荷耦合原件 (Double Charge Coupled Device, DCCD) 立体成像的不足, 提出将两种三维测量技术进行融合, 从而获得高分辨率、高测距精度的三维可视化图像数据; 惠增宏(2002)对于常见的点云残缺、漏洞问题提出径向基函数 (Radial Basis Function, RBF) 人工神经网络算法, 对残缺数据进行修复, 在对秦始皇兵马俑点云模型修复实验效果较好。

在数据配准方面: 彭博(2011)针对不同被测目标提出刚性配准和柔性配准两种模型, 以实现多幅点云数据之间配准, 经验证该方法对于畸变情况下点云具有较好的配准效果; 李彩林等(2015)针对当前多种 ICP 配准优化算法的局限性, 提出针对多视点、无序点云配准处理算法, 不过该算法需要根据经验估计两两重叠区域分布, 目前处理效率略低; 赵煦(2010)提出一种基于邻域平均度量计算网格定点曲率的配准算法, 该算法假设配准点云网格面曲率变化在一定范围进行, 以实现点云配准自动迭代; 王炜辰(2015)则对点云两两配准点中, 加入权重数据避免进入局部最优解。

在数据压缩及传输优化方面：卢波(2006)、龚亮(2011)提出一种粒子仿真-随机采样压缩点云简化算法，随机采样减少点云数据量，以粒子仿真确保被测物体外形特征数据点，实现点云特征点无损压缩；张会霞(2010)采用二叉树、四叉树、八叉树建立点云数据索引，实现点云的高效存储，并加快点云读取、处理、可视化速度。

在三维目标重建方面：周华伟(2011)提出采用 NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) 曲面重构算法，处理基于 ScanStation2 全站式三维激光扫描仪获取的点云，并以此探讨地面三维激光扫描技术对物质文化遗产的数字化和现代化保护解决新思路；熊邦书(2001)在三维激光点云数据的表面重构方面，提出一种新的三角片法重构表面模型，用相邻两三角边长之差的平方和最小值来确定是否是最优三角片划分。

在数据去噪方面：严剑锋(2014)在假设目标面为曲面的前提下，采用曲面拟合迭代算法实现点云去噪，以实现点云快速噪声处理；曹飞飞(2014)提出一种各向异性且自适应的点云滤波算法，先设定一个邻域集合要求该邻域内的点都是一个投影方向，若不是一个投影方向则缩小邻域区域继续迭代。

除了激光雷达成像仪硬件发展外，LiDAR 点云数据处理得到了迅速地发展，但在一系列的点云数据后处理过程中，还有许多难点尚未得到解决。点云数据滤波是机载激光雷达点云数据处理中最重要的处理过程，是数据后处理的基础步骤。滤波后的结果对点云的分类、分割都是至关重要的，它对后续地物识别以及建筑物三维重建存在很大的影响。点云数据滤波算法现已成为机载激光雷达数据后处理的热点，对点云滤波算法的研究具有很大的应用价值。

1.3 单点激光雷达成像系统的缺点

现有传统的机载激光雷达成像仪(Light Detection And Ranging Scanning, LiDARS)都是采用单点发射单点接收的方式。这种方式需要配合扫描装置才能成像，但这种类型的系统存在很多问题。首先，单点扫描式激光雷达测量系统在工作时是以扫描方式来快速获取数据的，它自身系统带有一个机械扫描装置，使得整个系统设计比较复杂，体积大，重量比较重，系统获取数据的稳定性差。对于民用小型无人机搭载平台来说，单点扫描式激光雷达测量系统的体积和重量难以满足要求。其次，点阵扫描式激光雷达是以单点发射模式来发射激光的，对激光发射频率要求很高，这样一来，对整个激光发射硬件要求很高。最后，单点扫描式激光雷达测量系统是以 Z 字形或圆锥形对地物距激光发射点的距离进行测量的，其产生的地面激光脚点之间的距离比较大，整个点云数据密度小，一般要通过内插处理来得到点云数据周围的点，因此大大降低了其数据精度。

1.4 面阵激光雷达发展现状

随着人们对机载雷达探测的数据精度以及低成本的要求越来越高，相应的点阵扫描激光雷达测量已经不能满足人们的要求，人们开始寻找测距精度更高，经济成本更低的测量系统。最近几年，国际上已经开始研究面阵激光雷达测量系统。面阵激光雷达成像系统是