

地球空间信息理论与应用丛书

车载激光扫描 数据处理技术

Vehicle-Borne Laser Scanning
Data Processing Technology

李永强 刘会云 著



测绘出版社

车载激光扫描数据处理技术

Vehicle-Borne Laser Scanning Data Processing Technology

李永强 刘会云 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 李永强 刘会云 2015

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 简 介

车载激光扫描技术(车载 LiDAR)是当今测绘领域最前沿科技之一,其中数据后处理的理论与方法是其最核心内容。本书由 12 章组成:第 1 章介绍了车载 LiDAR 技术的起源与发展;第 2、3 章介绍了车载 LiDAR 的数据预处理及航迹解算精度提高方法;第 4~8 章介绍了基于车载 LiDAR 技术的地物信息提取与建模方法,包括行道树、带状地物建模理论、公路信息提取与建模、街道场景信息提取与建模、建筑物三维建模等方面的研究;第 9 章是车载 LiDAR 技术的一个延伸,探索了将车载 LiDAR 技术应用于建筑物灾情应急测量的理论与方法;第 10 章是车载 LiDAR 技术的另外一个延伸,将车载 LiDAR 技术应用于地下空间三维信息提取与建模,包括系统集成、信息获取以及三维建模的理论与方法;第 11 章介绍了车载 LiDAR 数据后处理系统的研发;第 12 章介绍了车载 LiDAR 技术的几种典型应用。

图书在版编目(CIP)数据

车载激光扫描数据处理技术/李永强,刘会云著. —北京:测绘出版社,2015. 10

(地球空间信息理论与应用丛书)

ISBN 978-7-5030-3809-9

I. ①车… II. ①李… ②刘… III. ①汽车—激光扫描—
数据处理 IV. ①U463. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 235917 号

责任编辑 贾晓林 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—68531363(编辑部)
电子邮箱	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	15.5	字 数	300 千字
版 次	2015 年 10 月第 1 版	印 次	2015 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—1200	定 价	58.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-3809-9/P·817

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

对车载激光扫描的渊源,始于2004年7月,我刚硕士毕业离校到南京师范大学读博士,由于还没有开学,导师也没有安排研究方向,我无意中读到了Christian Frueh先生的博士论文“Automated 3D Model Generation for Urban Environments”,对所描述的车载激光扫描技术深感震撼,在接下来的两周里,我对这篇博士论文连续通读了三遍,从此结下了与车载激光扫描技术的不解之缘。

当时由于种种原因,南京师范大学与武汉大学联合研发的车载激光扫描系统还没有到位,我被安排到虚拟地理环境科研组,从事虚拟地理环境的研究工作,整整一年时间,无论如何也摆脱不了车载激光扫描的影响,时不时就搜索相关的文献资料阅读。直到2005年8月的一天,一台“阵容豪华”的车载激光扫描系统停在了南师大地科院楼西门口,我和妻子刘会云硕士绕着车转了好几圈,然后义无反顾地把我的电脑从虚拟地理环境组所在的房间搬到了隔壁房间里,当时虚拟地理环境组组长温永宁博士向我的导师盛业华汇报了情况。盛老师找我了解情况,我清楚地记得我站在学院西门口,看着车载系统向盛老师保证:“我一定能做好!”。感谢盛老师对我的理解和支持,从此我和妻子刘会云硕士就开始了车载激光扫描的探索研究工作。在接下来的一年多时间里,是我感觉最为充实的一段时光,每天只有两件事情:查资料、写代码。由于当时车载激光扫描的研究大多是高校的一些探索工作,国内山东科大、武大、中科院测绘院虽然也开始了相关工作,但能查到的资料着实很少,95%以上的信息需要通过网络,从外文文献中获得,这也锻炼了我从外文网站搜索资料的能力和技巧,我也自嘲在搜索资料时是“惯偷”。2007年6月,我终于顺利完成博士学位论文“基于车载激光扫描的地物三维信息提取与表面快速重建”,和妻子一起来到了河南理工大学测绘学院,开始了另外一种与车载激光扫描的相伴旅程。在刚参加工作的一年时间里,竟然迷茫起来,出现了找不到方向的感觉。有幸在2008年末,我进入了北京师范大学减灾院从事博士后研究工作,二次拜吴立新教授学艺。在吴老师的指点下,结合防灾减灾应用,我成功申请到自然科学基金青年基金项目“基于车载LIDAR数据的建筑物灾情应急测量关键技术研究(41001304)”,这也重新唤起了我对车载激光扫描技术的热情,随着岁月的流逝,这种感觉竟然更加强烈,注定了此生的相伴。

在这10年的研究过程中,也得到了多项科研基金的支持,先后主持或参与的科研项目有:江苏省高校自然科学研究计划“移动三维空间数据采集与处理方法研

究(07KJA42005)”;国家自然科学基金青年基金“基于车载 LIDAR 数据的建筑物灾情应急测量关键技术研究(41001304)”;国家十二五科技支撑项目“测绘装备国产化及应用示范(2012BAH34B00)”;测绘地理信息公益性行业科研专项经费项目“新一代多平台多波段移动信息采集系统研制(201412020)”;河南理工大学博士基金“基于车载激光扫描系统的公路数据采集与处理方法研究(B2009-33)”等。来河南理工大学的 8 年多时间里,我和妻子刘会云共同努力,使河南理工大学车载激光扫描研究团队不断壮大,带领我的硕士生刘宁、苏蕾、郑艳慧、王文越、孙鹏、曹鸿、杨莎莎、牛路标、毛杰、闫阳阳、张西童、李立雪、吴珍珍、李友鹏、黄腾达等,开展了大量的试验工作,取得了一批有价值是算法和应用成果。

本书是对前 10 年工作的系统综合和相关工作的梳理,一则希望能通过本书的写作提炼自身的认识,进一步明确今后的工作方向;二则希望通过本书来传播我们的研究成果,期望更多的学者步入车载激光扫描领域,并对相关的应用和发展有所促进。本书主要由李永强和刘会云共同完成,其中李永强执笔第 1、5、6、10、11、12 章,以及第 4 章的 5-8 节;刘会云执笔第 2、3、7、8、9 章;第 4 章 1-4 节由我的硕士毕业生、目前贵州省测绘二院工作的杨莎莎执笔,硕士生牛路标、毛杰、闫阳阳、张西童、李立雪、吴珍珍等参与了书稿的整理。

从技术发展的规律看,车载激光扫描技术尚处于茁壮成长阶段,无论是硬件、软件、理论研究、技术应用都有极大的发展空间,尤其是数据处理的技术和方法

距离我们的期望还非常遥远。我在给学生上课时这样形容“外业数据采集时,仪器工作我们听音乐;内业数据处理时,电脑工作我们喝咖啡”。梦想总能变为现实,但愿用我们不懈的追求和努力,这个梦早日实现。

李永强

2015 年 8 月 23 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 激光扫描技术	1
1.3 车载激光扫描技术发展	3
1.4 本章小结	10
扩展阅读资料	11
第 2 章 车载 LiDAR 数据预处理	18
2.1 车载 LiDAR 系统工作原理	18
2.2 车载 LiDAR 系统标定	19
2.3 车载 LiDAR 数据预处理	22
2.4 车载 LiDAR 点云的有序化处理	27
2.5 前景层与背景层的交互分离	28
2.6 本章小结	32
扩展阅读资料	32
第 3 章 车载 LiDAR 航迹解算精度提高方法研究	34
3.1 车载 LiDAR 测量主要误差分析	34
3.2 实验分析车载 LiDAR 的测量精度	36
3.3 车载 LiDAR 在不同环境中失锁情况分析	39
3.4 GPS 失锁时系统在不同长度隧道中测量精度分析	44
3.5 利用航迹控制点提高系统在隧道中航迹解算精度	49
3.6 系统在复杂环境中航迹异常判断	54
3.7 本章小结	57
扩展阅读资料	57
第 4 章 车载 LiDAR 点云中行道树信息提取	60
4.1 不同扫描方式下地物特征分析	60
4.2 行道树点云分割	64
4.3 相连杆状地物数目及位置确定	74

4.4	行道树与路灯的分割	75
4.5	相连行道树树冠点云分割	78
4.6	行道树属性参数提取	84
4.7	行道树动态变化信息提取	90
4.8	本章小结	94
	扩展阅读资料	94
第5章	车载 LiDAR 点云中带状地物表面模型构建方法	98
5.1	三维表面模型相关研究	98
5.2	车载 LiDAR 点云中带状地物表面模型构建方法	101
5.3	车载 LiDAR 点云中带状地物表面模型 LOD 技术	112
5.4	本章小结	113
	扩展阅读资料	114
第6章	车载 LiDAR 点云中公路信息提取与三维建模	117
6.1	引言	117
6.2	公路信息提取研究状况分析	117
6.3	基于车载激光扫描的公路信息提取与三维表面重建	122
6.4	基于车载激光扫描的公路隧道信息提取与三维重建	130
6.5	本章小结	
	扩展阅读资料	138
第7章	车载 LiDAR 点云中街道场景信息提取与三维建模	143
7.1	引言	143
7.2	基础设施信息提取	144
7.3	城市地面与地形信息提取	149
7.4	建筑物立面信息提取	156
7.5	城市表面模型构建	160
7.6	试验分析	161
7.7	本章小结	163
	扩展阅读资料	164
第8章	车载 LiDAR 点云中建筑物精细三维重建研究	166
8.1	引言	166
8.2	车载 LiDAR 点云中建筑物立面自动分割	166

8.3 基于车载 LiDAR 数据的建筑物三维重建	170
8.4 基于空-地多源数据融合的建筑物精细建模研究	174
8.5 本章小结	183
扩展阅读资料	183
第 9 章 车载 LiDAR 应用于建筑物灾情应急测量	186
9.1 引言	188
9.2 车载 LiDAR 点云中灾损建筑物分割	188
9.3 灾损建筑物立面特征信息提取	190
9.4 建筑物灾情应急测量方法	193
9.5 模拟灾损条件下建筑物灾害测量研究	198
9.6 总结与讨论	207
扩展阅读资料	207
第 10 章 地下空间移动 LiDAR 测量技术研究	210
10.1 引言	210
10.2 硬件系统设计	211
10.3 合作标靶	216
10.4 软件系统开发	218
10.5 试验分析	223
10.6 本章小结	225
扩展阅读资料	226
第 11 章 车载 LiDAR 信息处理系统	228
11.1 系统目标	228
11.2 系统设计	228
11.3 系统实现	229
11.4 系统应用	230
11.5 辅助系统的开发	231
11.6 本章小结	231
扩展阅读资料	231
第 12 章 车载 LiDAR 技术应用	232
12.1 道路测量	232
12.2 城市部件测量	233
12.3 三维城市建模	234

12.4	街景建设·····	235
12.5	大比例尺地形图测绘·····	236
12.6	地籍测量·····	236
12.7	地下车库测量·····	237
12.8	水上测量·····	238
12.9	其它应用·····	238
	扩展阅读资料·····	239

第1章 绪 论

1.1 引 言

2014年5月28日Code Conference科技大会上,Google推出了没有方向盘没有刹车的“无人驾驶汽车”,给汽车驾驶带来了全新的理念。2015年2月,英国第一辆无人驾驶汽车Lutz Pathfinder亮相,而在2015年5月在上海举办的亚洲消费电子展上,无人驾驶技术可谓出尽了风头,沃尔沃、BBA、福特、丰田、谷歌等都推出了自己的无人驾驶技术。与此同时,法国、德国、日本、中国等国家在该领域的研究和应用也取得了很大的进展,仿佛一夜之间进入了无人驾驶汽车的“战国时代”。以最为熟知的Google无人驾驶汽车为例,其成功的关键有二:一是利用车载传感器来感知车辆周围环境,并根据感知所获得的道路、车辆位置和障碍物信息,控制车辆的转向和速度,从而使车辆能够安全、可靠地在道路上行驶;二是预先绘制了详细的虚拟地图,这种虚拟地图不是普通的地图,也不是详尽的消费者版谷歌地图,它是描绘现实路况的极其精确的数字化地图,它精确到了每一个人行道镶边的位置和高度,将路况精确到了英寸。上述两种关键技术的实现,都与当前测绘领域的一项前沿技术密切相关——移动激光扫描技术。移动激光扫描是在移动载体上集成多种传感器系统,在动态移动过程中快速获取道路及两侧地物三维空间信息,以密集激光点云为主导信息源的前沿测绘技术。近几年快速发展的“街景地图”能更好地帮助我们理解该技术,我们在浏览街景地图的时候,不但能感受真实的街道场景,还能感知方向、量测距离,3D街景更是将真实的3D城市装进了电脑中,人眼看到的是全景相机的二维影像,而三维效果则是通过隐藏在二维影像背后的三维激光点云来实现。“无人驾驶汽车”和“街景地图”是移动激光扫描技术的两个典型应用,移动激光扫描技术在地理空间信息获取、数字产品生产方面表现出更大的潜力,本书主要以移动激光点云为研究对象,总结作者及其研究团队近十年的研究成果,系统阐述车载激光点云中地物的识别、分类提取及地物三维建模的理论和方法。

1.2 激光扫描技术

激光扫描技术(Laser Scanning Technology)也称激光LiDAR(Light Detec-

ting And Ranging)技术,是上世纪九十年代逐步发展并投入商业化应用的一种非接触主动式空间信息获取新技术,以激光扫描仪(Laser Scanner)为主导传感器,融合定位定姿、影像处理等技术的综合测绘技术。激光扫描仪在伺服马达的支持下,由激光器以极高的速度等角度发射并接收激光束,通过计算飞行时间(或相位差)获得扫描仪中心到地物表面的距离,再通过一系列坐标转换获得地物高精度密集点云。具有数据获取速度快、精度高、不受光线影响以及直接获取地物密集三维点云等诸多优势,被誉为“继 GPS 之后测绘领域又一场技术革命”。激光扫描技术是当前测量领域最热门的研究内容之一,并且随着激光扫描测量装备模式的多样化,以及在测量精度、测量速度、易操作性、抗干扰性能等方面的不断提升以和价格的逐步下降,激光扫描技术的应用领域也得到了很大的拓展,成为当前三维空间信息获取的主要手段之一。经过数十年的发展,激光扫描技术已经发展成为一个相对完善的技术体系,有多种分类方法:

按工作原理来分,主要分为脉冲式和相位式。脉冲式也称为飞行模式,是计算激光脉冲从发射到返回的飞行时间,再乘以空气中的光速从而计算激光器中心到地物表面的往返距离,进而计算地物三维坐标,其优点是扫描距离远(可达数公里),但精度相比相位式略差。相位式是用无线电波段的频率,对激光束进行幅度调制并测定调制光往返测线一次所产生的相位延迟,再根据调制光的波长换算该相位延迟所代表的距离,进而计算地物三维坐标。相位式则采用相位差来实现精密测距,其优点是频率和精度都很高,但扫描距离相对较近。

按维数来分,主要分为线阵激光扫描仪和面阵激光扫描仪,线阵激光扫描仪所发射的激光束限制在一条扫描线内,只有与地物保持相对运动的状态才能获取必要的三维信息,其使用方法主要分为两类:一类是固定传感器,对动态目标进行探测;另一种是搭载在移动平台上,在行进过程中获得地物的三维坐标。面阵三维激光扫描仪借助水平和竖直两个伺服马达的等角度运动,能在保持自身静止的情况下,获得周围地物密集点云,也可搭载在移动载体上,在运动过程中获取周围地物三维点云。

按扫描距离来分,主要分为近程、中程、远程和超远程。一般认为,近程激光扫描仪的作用距离小于 300 米,中程激光扫描仪的作用距离为 300~1 500 米,远程激光扫描仪的作用距离为 1 500~6 000 米,超过 6 000 米则为超远程激光扫描仪。当前激光扫描仪都采用单一激光发射器,而激光束的飞行速度是固定的,扫描距离和扫描频率之间构成矛盾,扫描距离远则扫描频率相对较低。当前,近程激光扫描仪点频通常超过 10 万点/秒,甚至可达 100 万点/秒,远程激光扫描仪点频通常为几万至十几万点每秒。

按承载平台来分,主要分为星载、空载、地面和移动几种模式。星载激光扫描(Satellite-borne Laser Scanning, SLS)以卫星为承载平台,运行轨道高,观测视野

广,可以触及世界的每一个角落,为境外地区三维控制点和 DEM 的获取提供了新的途径,对国防和科学研究具有重大意义,探月和火星等探测计划中都包含了星载激光扫描传感器,星载激光扫描在植被垂直分布测量、海面高度测量、云层和气溶胶垂直分布测量以及特殊气候现象监测方法也可以发挥重要作用。空载激光扫描(Air-borne Laser Scanning, ALS)以空中飞行器(飞机、气球、滑翔机、无人机、飞艇等)为搭载平台,从空中俯视获取地物表面密集点云,空载激光扫描起步较早,其研究也相对比较深入,应用领域也得到了很大的拓展,在地形测绘、数字城市、电力巡线、灾害监测、海岸工程、林业应用等方面得到了广泛应用。地面激光扫描(Terrestrial Laser Scanning, TLS),通常也叫地面三维激光扫描或地形三维激光扫描,是把仪器放置在地面上,通过仪器内部在水平和竖直两个方向的伺服马达的驱动,来获得周围地物密集点云坐标。地面三维激光扫描仪作业模式灵活,价格相对较低,近些年来得到了非常广泛的应用,在文物保护、建筑物三维重建、地形测绘、工业测量、地下工程、灾害测量、大型制造等领域得到了非常广泛的研究和应用。移动激光扫描(Mobile Laser Scanning, MLS)是将激光扫描仪等传感器安装在地面移动平台上(汽车、摩托车、三轮车、船只、人力等),在移动过程中动态获取地物详尽的三维信息。由于地面移动测量系统需要集成多种传感器系统,其重量相对较重,并且为了能在公路上快速行进时采集数据,通常选用机动车为承载平台,所以通常也称为车载激光扫描(Vehicle-borne Laser Scanning, VLS),或车载 LiDAR。车载激光扫描在公路改扩建、道路资产管理、数字城市建设、工程应用、三维测绘、应急救援、城市街景等领域得到了较为广泛的应用。

1.3 车载激光扫描技术发展

1.3.1 车载激光扫描系统定义

车载激光扫描作为激光扫描领域的一个重要分支,也是激光扫描技术家族中相对年轻的成员,其在硬件系统研发、数据后处理、关键问题研究以及应用领域的拓展等方面都经历了一个从无到有、逐步深入、不断完善的过程。从称谓上来讲,车载激光扫描系统有不同的描述,通常情况下,有以下几种常见的称呼:车载激光扫描系统(Vehicle-borne Laser Scanning System)、车载激光测量系统(Vehicle-borne Laser Surveying System)、车载 LiDAR(Vehicle-borne LiDAR)或移动 LiDAR(Mobile LiDAR),其中“车载激光扫描系统”和“车载 LiDAR”的称呼最为普遍,在本上中,对两者也往往进行了混用。从定义上讲,车载激光扫描系统也随着搭载传感器系统的变化以及集成模式的改变而有所变化,目前阶段的定义可以描述为:车载激光扫描系统是把激光扫描仪系统、CCD 相机系统、POS 系统、控制系

统等高度集成在一起并固定在车辆上,在车辆移动过程中快速获取道路两侧地物详尽的位置和属性信息,并在配套数据后处理软件系统支持下为测绘工作者提供多种解决方案的信息采集系统。其中激光扫描系统是主导传感器,在车辆行进过程中快速获得道路两侧地物详细的三维点云信息,通常使用线阵激光扫描仪,不同车载激光扫描系统所选用的激光扫描仪差异较大,组合模式也各有不同;CCD相机系统是获取纹理信息的主要传感器,CCD相机系统可以为独立相机,也可以是全景相机或双目相机;POS系统通常为GPS/IMU和里程计的组合系统,为整个车载系统实时提供高精度位置和姿态信息;控制系统是整个车载激光扫描系统的中枢,负责对各传感器的各种控制指令以及协调不同传感器系统之间的协同工作。

1.3.2 车载移动测量系统的发展

车载激光扫描系统的发展得益于车载移动测量系统的发展,其理论研究最早可以追溯到二十世纪八十年代中期,加拿大和美国一些政府部门提出移动式公路设施维护系统(Mobile Highway Inventory System, MHIS),加拿大Calgary大学研发了Alberta MHIS系统,该系统采用航位推算传感器(陀螺仪、加速度计和里程计等)实现定位定姿,在车辆上安装模拟相机;拍摄公路设施现状,及时为公路维护单位提供信息。尽管当时MHIS系统定位精度较差,但其应用前景则吸引了大量科研和工程技术人员。随着GPS技术的发展,GPS能为移动平台提供绝对的定位精度,1988年,Alberta MHIS系统首次采用差分GPS定位技术(Differential Global Positioning System, DGPS),用于解算车载移动系统中相机投影中心的位置参数,并引入惯性导航INS系统用于确定相机的姿态参数。起步阶段的车载移动系统的研究集中在理论研究和原型设计方面,未能形成有效的商业产品,车载移动测图的概念刚刚建立雏形。1989年,美国俄亥俄州立大学(The Ohio State University, OSU)制图中心CFM提出了将GPS应用于智能交通计划的建议,并于1990年成功设计了GPSVan移动测量系统,系统使用GPS、里程计和直接地理定位来提高导航参数,装配两台能连续拍摄的模拟相机,自动获取影像数据,并以立体相对方式求取地面点的三维空间坐标。在随后的2~3年间,OSU进行了第二、第三代GPSVan原型系统的设计,并将双频差分DGPS应用到车载系统中,系统实现了商业化,GPSVan系统被称为第一台移动车载测图系统。从1994年开始,加拿大Calgary大学成功地将GPS/INS组合系统装载到Alberta MHIS系统中,研发出第一代车载移动测量VISAT系统。随后将GPS/INS、里程计、彩色数码CCD相机、摄像机等传感器进行组合,发展为第二代VISAT系统,定位精度可达0.1~1.0米;在第二代VISAT系统的基础上,对软硬件进行升级改造,发展为第三代VISAT系统。在美国俄亥俄州立大学OSU和加拿大Calgary大学的技术创下,国外各大研究机构、院校、商业公司纷纷对车载测量系的技术也进行了广泛

和深入的研究。移动测量系统经历了前期 10 年左右的发展,在定位定姿精度和数据获取效率方面都有了很大的改善,由于这个时期主要以相机为数据获取传感器,激光扫描系统尚没有应用到系统中,因此还不能称为车载激光扫描系统,但前期的技术积累为车载激光扫描系统的出现和发展打下了一定的基础。

1.3.3 车载激光扫描技术的发展

随着激光 LiDAR 的出现、惯性测量器件 IMU 测量精度的提高以及 GNSS/INS 组合技术更加先进,车载移动测量系统支持激光 LiDAR 成为现实。特别是国际上几家知名激光扫描仪制造商(如奥地利的 Riegl、加拿大 Optech 和德国的 Sick 等)所制造的精密测距的激光扫描仪,使得各个研究机构、商家将激光扫描仪与移动车载平台相互集成,并逐步取代相机等传感器,成为最主要的测量传感器,这也促成了车载激光扫描系统(Vehicle-borne Laser Scanning System, VLSS;或 Mobile Laser Scanning System, MLSS)的出现。车载激光扫描技术的发展,从上世纪 90 年代中期到现在 20 年左右的时间,总结起来可以分为探索阶段、初步发展阶段、快速发展阶段,在今后的数年到更长一段时间,激光扫描技术会进入一个相对成熟阶段,各阶段描述如下。

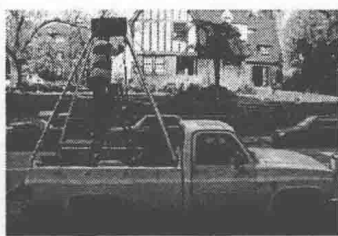
1. 探索阶段(1996—2002 年)

1996 年,美国 JECA 公司研制出 TruckMap 车载系统,该系统将激光扫描仪作为车载摄影相机的辅助传感器,作用是获得传感器到目标的距离,由于 TruckMap 系统中的激光扫描仪所获得的点云有限,还不能真正有效地从车载激光点云中达到对地物目标测量和提取的目的,但作为车载激光扫描的前期探索,可以认为 TruckMap 系统是车载激光扫描技术发展的开端。在随后的数年内,激光扫描仪作为车载移动测量系统的传感器,逐步得到了科研工作者的认识和响应,其中影响最大的是加利福尼亚大学(University of California)视频与影像处理实验室(Video and Image Processing Lab)的 Christian Fröh 和日本东京大学(Shibasaki & Zhao Lab Center for Spatial Information Science University of Tokyo)的赵卉菁、Dinesh。他们均以固定车辆顶端的 SICK 线阵激光扫描仪为主要数据获取传感器,以 CCD 相机为辅助传感器,研究从车载激光点云中地物提取的方法,研究重点集中在点状地物提取、道路边界提取、空洞填补、噪声滤除、建筑物立面建模等方面,如图 1.1 所示。虽然前期的研究所使用的理论方法不多,技术方法也不成熟,但这些有益的探索工作对其后数年的研究产生了很大程度的影响。前期的车载激光扫描仪均垂直于车辆行进方向,在车辆行进过程中,只能获取朝向于街道一侧的建筑物立面数据,这是前期车载激光扫描系统的一个主要特征。东京大学的车载激光扫描系统在后期进行了完善,安装了多台激光扫描仪,分别朝向不同的方向,能够获得建筑物三个立面的点云数据。2002 年,Christian Fröh 完成了博士论文

“Automated 3D Model Generation for Urban Environments”,成为车载激光扫描技术前期探索研究的一个代表性成果。



JECA车载系统



加利福尼亚大学车载系统



东京大学车载系统

图 1.1 前期车载激光扫描系统

2. 初步发展阶段(2003—2008 年)

经历了前期的探索阶段,在车载 LiDAR 领域,更多的研究机构开始了相关的研究工作,但仍然以高校科研院所为主体,代表性的大学除加利福尼亚大学和日本东京大学外,还有早稻田大学、日本先端科技学院、田纳西州大学、巴黎矿业大学、卡内基梅隆大学等(如图 1.2 所示)。所开展的研究工作主要集中的车载激光扫描系统原型系统的研发和数据处理的方法,研究工作者取得了一系列的研究成果,也引起了更多的学者和研究机构关注这项前沿技术。同时,一些科研机构也将激光扫描系统集成安装在机器人平台上,如 Robotics Research Lab, Computer Science Dep. University of Southern California, Department of Computer Science Hunter College and the Graduate Center of The City University of New York, Oxford University Robotics Research Group Department of Engineering Science University of Oxford, Knowledge-Based Systems Research Group, Institute of Computer Science University of Osnabruck 等。与车载激光扫描相比,虽然承载平台有差异,但数据获取和研究内容存在共性,这也进一步促进了车载激光扫描技术的发展。我国科研工作者也紧跟科技发展前沿,国内的知名学者,包括李德仁、刘先林、李清泉、史文中等都给以了充分的关注。武汉大学与山东科技大学联合进行了第一代 3Dsurs 车载激光扫描系统的研发,南京师范大学与武汉大学长恒公司联合研制了载激光扫描系统 3DRM,随后中国测绘科学研究院、首都师范大学、华东师范大学等也开始了车载激光扫描系统的自主研发工作。在这个阶段内,国家也加大车载激光扫描方面的基金支持力度,各高校所开展的研究工作大多是在基金的支持下开展的,研究的范围和深度得到了进一步深入,初步的理论方法体系产生雏形,在硬件集成方面积累了丰富的试验经验。等多科研人员参与到相关研究中,其中山东科技大学王健于 2006 年完成博士论文“移动激光扫描数据处理与应用研究”,南师大范大学李永强于 2007 年完成博士论文“基于车载激光扫描的地物三维信息提取与表面快速重建”是该时期国内有代表性的系统性成果。随着车载激光

扫描技术在软、硬件研究的逐步开展,以及一些有实力公司的资助,车载激光扫描技术开始走向商业化,步入批量生产阶段。前期代表性商业化车载激光扫描系统有:加拿大 Optech 公司的 LYNX 系统、英国 3DLM 公司的 StreetMapper 系统、日本 TOPCON 公司的 IP-S2 系统。StreetMapper 系统在仪器性能和集成化程度方面具有优势,在全世界范围内采购的范围最广,基于该系统开展的数据处理的研究也最多;IP-S2 系统使用价格相对低廉的传感器,系统价格比较低,由于 Google 街景的面世,采购了数量众多的 IP-S2 系统,在全世界范围内为其采集数据。LYNX 系统虽然在全球有一定数量的销售,但与其他两款系统相比,其推广程度相对较小。商业装备也开始逐步走入国内,如有中翰公司代理的 LYNX 系统就获得两个客户,分别为天津星际空间公司和中科院深圳先进技术研究院。车载激光扫描技术在 Google Earth、Google 街景中的成功应用,给人们现实世界的认识产生很大的冲击,一些研究工作者开始将兴趣投入到街景研究上,从事高科技的公司也从中看到了巨大的商机,商业化驱动开始将车载激光扫描技术带入一个新的发展阶段。

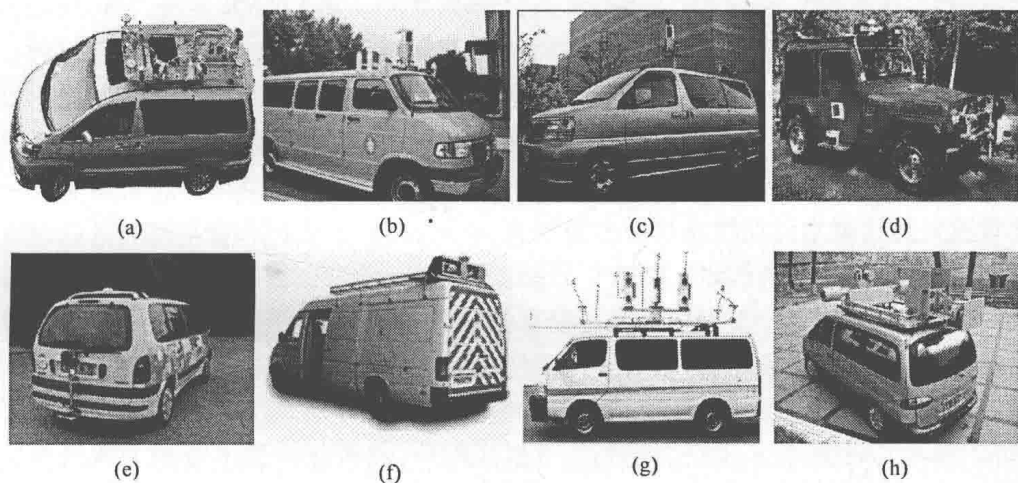


图 1.2 初步发展阶段主要车载激光扫描系统

(设备归属单位:(a)Waseda University;(b) University of Tennessee;(c) Nara Institute of Science and Technology;(d) Carnegie Mellon University;(e) Ecole des Mines de Paris;(f) 3D Laser Mapping Ltd;(g) 山东科技大学;(h) 南京师范大学)

3. 快速发展阶段(2009—现在)

在这个时期,车载激光扫描技术开始迈入了快速发展阶段,其中以硬件系统的发展最为突出,车载激光扫描技术发展状况如下:(1)在市场驱动下,更多的机构投入到车载激光扫描系统的研发和销售中,客户也有了更大的选择空间。目前,国际上主流车载激光扫描系统有:加拿大 Optech 公司的 LYNX 系统、美国 Applanix

公司的 LandMark 系统、英国 3D Laser Mapping 公司的 StreetMapper 系统、Riegl 公司的 VMX450 系统等。在国内市场上,主要的车载激光扫描系统主要有:北京四维远见的 SSW 系统、立德空间的 MMS 系统、中海达的 iScan 系统、天宝的 VMX-450 系统、中翰公司的 LYNX 系统等,其它一些公司,也研发了车载激光扫描系统,如北科天绘、武汉滨湖、四维图新等,如图 1.3 所示。(2)车载激光扫描系统综合性能进一步提高,大多数厂家都在原有系统基础上进行了升级换代,第二代、第三代产品成为市场主体,每个型号的车载激光扫描系统都具有自身的特色。以车载激光扫描系统最重要的传感器车载激光扫描仪为例,其性能要求越来越高,目前车载激光扫描系统所使用的激光扫描仪,都需要满足以下基本指标:扫描距离 ≥ 200 米),点频 ≥ 10 万点/秒,扫描精度 ≤ 2 cm/100 米。曾经被广泛的 SICK 激光扫描仪,虽然在价格上有优势,但受到自身性能的限制,逐渐退出了竞争行列。在特色方面,如北京四维远见的 SSW 系统,其特色是安装了可升降 3—10 米的升降杆,能在升起一定高度后实现转扫,并且为了适应复杂的作业环境,SSW 系统还采用了“子母车”的模式,能实现大车和小车的同时联合数据采集。(3)生产工艺也相对稳定,大多数厂家都能实现量产,或订单化量产。如 LYNX 系统、StreetMapper 系统、VMX450、iScan 系统、SSW 系统等都实现了量产或订单化量产。(4)车载激光扫描技术的应用也更加广泛,在很多领域都取得了成功的应用,如道路测量、部件测量、地籍测量、三维城市建模、水上测量、高清街景、地下车库测量、地理国情监测等。(5)基础研究的支持得到进一步重视。基础理论和方法研究是推动车载激光扫描技术向纵深发展的重要因素,各国政府、企业都非常重视对基础理论方法的研究,以我国为例,从 2000 年开始,通过 973 项目、863 项目、国家科技支撑项目、测绘地理信息公益专项以及国家自然科学基金项目等形式资助的科研项目超过数十项,累计金额超亿元,对硬件系统、软件系统研发、基础理论研究以及国产装备的推广起到了极大的促进作用。(6)专业人才培养呈现快速增长趋势。人才培养是科学研究和技术推广应用的重要组成部分,高校作为最主要的人才培养基地,近年来,国内已有数十家高校或科研院所培养出了车载激光扫描方面的硕士生或博士生。综合数量和质量,目前最主要的单位有:武汉大学、山东科技大学、首都师范大学、厦门大学、河南理工大学、解放军信息工程大学等。到目前为止,在车载激光扫描领域,国内高校培养出的博士毕业生已近 20 人,硕士毕业生接近 100 人,在读博士生和硕士生规模超过 100 人,无论从数量和质量上来讲,都在逐年提高。近几年来,从国外留学归来一定数量的高层次人才,充实到科研队伍中,从而保证了我国与国外基本处于相近的研究层次。(7)街景成为当前车载激光扫描技术应用的领域。随着 Google 街景在全球范围内的快速扩展,以及其带来的巨大的商机,我国街景也紧随其后,成为地理信息行业一个快速崛起的领域,当前能提供街景服务的代表商家有城市吧、谷歌、腾讯地图、我秀中国、百度地图、高德地图等,