

“十三五”国家重点图书出版规划项目  
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护

**3** D LiDAR Survey and Design in  
Highway Engineering

公路工程

三维激光扫描



勘测设计

陈楚江 明 洋 著  
余绍淮 王丽园



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

“十三五”国家重点图书出版规划项目  
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护

# 公路工程三维激光扫描勘测设计

## 3D LiDAR Survey and Design in Highway Engineering

陈楚江 明 洋 余绍淮 王丽园 著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书主要介绍了公路工程三维激光扫描勘测和设计技术与方法。全书共分为5章,详细介绍了激光扫描测量技术发展与前景、激光扫描测量原理与平台系统、新建公路激光扫描测量技术、改扩建公路激光扫描测量技术、激光扫描测量与公路CAD协同设计等内容。

本书可供公路勘测设计人员学习使用,也可供相关专业的师生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

公路工程三维激光扫描勘测设计 / 陈楚江等著. —

北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.4

(交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护)

“十三五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-114-12919-3

I. ①公… II. ①陈… III. ①激光扫描—应用—道路  
测量 IV. ①U412.24

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第068787号

“十三五”国家重点图书出版规划项目

交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护

书 名:公路工程三维激光扫描勘测设计

著 者:陈楚江 明 洋 余绍淮 王丽园

责任编辑:李 喆 李 晴

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:10.75

字 数:247千

版 次:2016年7月 第1版

印 次:2016年7月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12919-3

定 价:40.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 交通运输科技丛书编审委员会

(委员排名不分先后)

顾 问：赵冲久 周 伟 成 平

主 任：庞 松

副主任：洪晓枫 袁 鹏

委 员：石宝林 张劲泉 赵之忠 关昌余 张华庆

郑健龙 沙爱民 唐伯明 孙玉清 费维军

王 炜 孙立军 蒋树屏 韩 敏 张喜刚

吴 澎 刘怀汉 唐树名 汪双杰 廖朝华

金 凌 李爱民 曹 迪 田俊峰 苏权科

严云福

# 总 序

科技是国家强盛之基,创新是民族进步之魂。中华民族正处在全面建成小康社会的决胜阶段,比以往任何时候都更加需要强大的科技创新力量。党的十八大以来,以习近平同志为总书记的党中央作出了实施创新驱动发展战略的重大部署。党的十八届五中全会提出必须牢固树立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,进一步发挥科技创新在全面创新中的引领作用。在最近召开的全国科技创新大会上,习近平总书记指出要在我国发展新的历史起点上,把科技创新摆在更加重要的位置,吹响了建设世界科技强国的号角。大会强调,实现“两个一百年”奋斗目标,实现中华民族伟大复兴的中国梦,必须坚持走中国特色自主创新道路,面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求。这是党中央综合分析国内外大势、立足我国发展全局提出的重大战略目标和战略部署,为加快推进我国科技创新指明了战略方向。

科技创新为我国交通运输事业发展提供了不竭的动力。交通运输部党组坚决贯彻落实中央战略部署,将科技创新摆在交通运输现代化建设全局的突出位置,坚持面向需求、面向世界、面向未来,把智慧交通建设作为主战场,深入实施创新驱动发展战略,以科技创新引领交通运输的全面创新。通过全行业广大科研工作者长期不懈的努力,交通运输科技创新取得了重大进展与突出成效,在黄金水道能力提升、跨海集群工程建设、沥青路面新材料、智能化水面溢油处置、饱和潜水成套技术等方面取得了一系列具有国际领先水平的重大成果,培养了一批高素质的科技创新人才,支撑了行业持续快速发展。同时,通过科技示范工程、科技成果推广计划、专项行动计划、科技成果推广目录等,推广应用了千余项科研成果,有力促进了科研向现实生产力转化。组织出版《交通运输建设科技丛书》,是推进科技成果公开、加强科技成果推广应用的一项重要举措。“十二五”期间,该丛书共出版72册,全部列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,其中12册获得国家出版基金支持,6册获中华优秀出版物奖图书提名奖,行业影响力和社会知名度不断扩大,逐渐成为交通运输高端学术交流和科技成果公开的重要平台。

“十三五”时期,交通运输改革发展任务更加艰巨繁重,政策制定、基础设施建

设、运输管理等领域更加迫切需要科技创新提供有力支撑。为适应形势变化的需要,在以往工作的基础上,我们将组织出版《交通运输科技丛书》,其覆盖内容由建设技术扩展到交通运输科学技术各领域,汇集交通运输行业高水平的学术专著,及时集中展示交通运输重大科技成果,将对提升交通运输决策管理水平、促进高层次学术交流、技术传播和专业人才培养发挥积极作用。

当前,全党全国各族人民正在为全面建成小康社会、实现中华民族伟大复兴的中国梦而团结奋斗。交通运输肩负着经济社会发展先行官的政治使命和重大任务,并力争在第二个百年目标实现之前建成世界交通强国,我们迫切需要以科技创新推动转型升级。创新的事业呼唤创新的人才。希望广大科技工作者牢牢抓住科技创新的重要历史机遇,紧密结合交通运输发展的中心任务,锐意进取、锐意创新,以科技创新的丰硕成果为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通贡献新的更大的力量!

交通运输部部长: 

2016年6月24日

# 前 言

公路工程三维激光扫描勘测设计,是一种三维激光扫描测量与公路 CAD 协同和集成的技术。三维激光扫描测量,具有可穿透植被、高精度、高密度等技术优势,可快速、高精度地扫描线路走廊及其环境设施,高效、准确、大范围地获取涵盖影像数据、矢量数据和数字地面模型数据等多尺度、多类别、高精度的数字测绘产品。通过激光扫描测量与公路 CAD 的协同与集成,实现公路三维动态设计,可自动生成公路工程所需的地面线数据,替代人工野外作业,显著提高公路勘测设计的效率和水平,确保工程数量准确、造价可控,不仅有利于路线方案的比选和优化,更为重要的是,确保设计出优质的公路工程方案。

交通运输是国民经济社会发展的重要基础和战略支柱产业。随着“五纵七横”国家主干道、“7918”国家高速公路网计划的实施,我国公路建设逐渐呈现出“改扩建与新建并存、两种建设并重”的局面。新建公路工程多位于地形、地质条件复杂的中西部地区,快速获取公路勘察设计所需的高精度、现势性强的三维地形信息,成为工程建设首要的技术难题;而公路改扩建工程对路面测量的精度提出了更为苛刻要求,不干扰正常交通流的既有道路信息的快速、可靠、精确获取,成为工程亟待解决的瓶颈问题。

交通行业一直高度重视先进空间对地观测技术与交通建设的集成应用研究。中交第二公路勘察设计研究院有限公司,紧紧跟踪空间对地观测技术的发展,继成功研究高分辨率卫星图像测量技术后,再次率先将激光扫描测量技术引入到公路新建、改扩建工程项目中,并深度拓展应用到定测与施工图设计阶段。2007年,首次将激光扫描测量技术应用于江西省赣州至大余高速公路新建公路工程;2010年,创新性地将机载激光扫描测量技术应用于京港澳高速公路京石段改扩建公路工程。先后承担了西部交通建设科技项目“桥隧 1:500 机载激光雷达数字三维测量技术研究”、“机载激光雷达技术在公路勘察设计中的应用研究”,以及“道路改扩建激光扫描勘察设计关键技术与应用示范”等多个省部级科技项目的研究工作,取得了多项国际领先的创新性成果。自 2007 年至 2015 年,已将激光扫描测量技术广泛应用于多条国家高速公路的新建、改扩建重点工程中,累积设计里程超过

2 000公里,为我国新时期公路勘察设计面临的诸多技术难题提供了综合系统的工程解决方案。

本书针对公路交通建设,特别是地形地质条件困难和复杂地区的高精度三维地形信息,以及不干扰正常交通流的既有道路高精度信息的获取难题,围绕公路工程建设三维数字化、智能化勘察设计,系统阐述了公路工程激光扫描测量与设计的方法及工程实践。全书共分5章,由陈楚江组织撰写。第1章绪论,主要介绍激光扫描测量技术的发展、应用现状以及发展趋势与前景,由陈楚江撰写;第2章激光扫描测量原理与平台系统,介绍激光扫描测量的定位原理、误差源分析以及常用的激光扫描测量平台,由王丽园撰写;第3章新建公路激光扫描测量技术,针对新建公路工程,从数据采集、数据处理、3D产品生产方面介绍激光扫描测量技术,最后给出工程应用实例,由余绍淮撰写;第4章改扩建公路激光扫描测量技术,针对改扩建精度要求高的特点,分别从改扩建公路高精度数据采集、测量控制模式、激光数据精化处理以及既有道路特征快速提取方面进行介绍,最后给出工程应用实例,由明洋撰写;第5章激光扫描测量与公路CAD协同设计,从激光点云数据组织管理、任意点高程插值、地面线快速自动生成、公路路线与互通立交CAD协同设计4个主要方面介绍,并展示了实际工程案例,由陈楚江、张霄、余飞共同撰写。全书由陈楚江统稿和定稿。

在本书即将付梓之际,首先要感谢交通运输部对高层次科技人才培养项目的大力支持,感谢中交第二公路勘察设计研究院有限公司为本书的完成提供资金支持和人力保障,还要由衷地感谢公司同仁为本书的工程应用案例提供大量的验证和对比分析数据,对本书的撰写提供了有益的帮助。

限于成书时间仓促和作者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请读者不吝赐教!

作者  
2016年3月



# 目 录

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第1章 绪论               | 001 |
| 1.1 引言               | 001 |
| 1.2 激光扫描测量技术的发展      | 002 |
| 1.2.1 激光扫描测量系统的发展    | 002 |
| 1.2.2 激光扫描数据处理技术的发展  | 006 |
| 1.2.3 激光扫描测量技术的应用    | 012 |
| 1.3 公路激光扫描测量的应用现状    | 015 |
| 1.4 公路激光扫描测量的发展趋势与前景 | 018 |
| 第2章 激光扫描测量原理与平台系统    | 021 |
| 2.1 引言               | 021 |
| 2.2 激光扫描测量的定位原理      | 021 |
| 2.2.1 坐标系统           | 023 |
| 2.2.2 激光扫描测距         | 025 |
| 2.2.3 激光扫描测量的几何模型    | 029 |
| 2.3 激光扫描测量误差源分析      | 032 |
| 2.3.1 GNSS 定位误差      | 033 |
| 2.3.2 测距误差           | 033 |
| 2.3.3 测角误差           | 034 |
| 2.3.4 集成误差           | 035 |
| 2.3.5 其他误差           | 035 |
| 2.4 激光扫描测量平台         | 036 |
| 2.4.1 机载测量平台         | 037 |
| 2.4.2 车载测量平台         | 039 |
| 2.4.3 地面测量平台         | 040 |
| 2.4.4 其他测量平台         | 040 |
| 2.5 激光扫描测量系统         | 041 |
| 2.5.1 机载测量系统         | 041 |
| 2.5.2 车载测量系统         | 046 |
| 2.5.3 地面测量系统         | 050 |
| 2.5.4 手持激光扫描仪        | 055 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第3章 新建公路激光扫描测量技术        | 056 |
| 3.1 引言                  | 056 |
| 3.2 激光扫描数据采集            | 057 |
| 3.2.1 激光扫描系统和平台选择       | 057 |
| 3.2.2 数据采集设计            | 059 |
| 3.2.3 地面控制测量            | 061 |
| 3.2.4 航飞数据采集实施          | 064 |
| 3.3 激光扫描数据处理            | 065 |
| 3.3.1 数据预处理             | 065 |
| 3.3.2 激光点云数据分类          | 066 |
| 3.3.3 坐标系统转换            | 068 |
| 3.3.4 全波形数据分解           | 069 |
| 3.4 3D 数字产品生产           | 073 |
| 3.4.1 数字高程模型建立          | 073 |
| 3.4.2 数字正射影像图制作         | 074 |
| 3.4.3 数字线划地形图生产         | 076 |
| 3.5 工程应用                | 080 |
| 3.5.1 工程概况              | 080 |
| 3.5.2 工程技术应用            | 081 |
| 第4章 改扩建公路激光扫描测量技术       | 085 |
| 4.1 引言                  | 085 |
| 4.2 改扩建公路高精度数据采集        | 086 |
| 4.2.1 机载激光扫描测量的数据采集     | 087 |
| 4.2.2 车载激光扫描测量的数据采集     | 090 |
| 4.3 改扩建公路激光扫描测量控制模式     | 092 |
| 4.3.1 控制模式              | 092 |
| 4.3.2 路面控制点布设与测量        | 093 |
| 4.4 改扩建公路激光数据精化处理       | 098 |
| 4.4.1 平面坐标修正            | 098 |
| 4.4.2 高程坐标修正            | 099 |
| 4.4.3 试验与结果分析           | 099 |
| 4.5 既有道路特征快速提取          | 105 |
| 4.5.1 基于点云强度信息的车道标线特征提取 | 105 |
| 4.5.2 基于断面剖分的道路特征提取     | 106 |
| 4.6 工程应用                | 108 |
| 4.6.1 工程概况              | 108 |
| 4.6.2 工程技术应用            | 110 |
| 第5章 激光扫描测量与公路 CAD 协同设计  | 117 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 5.1 引言 .....                          | 117 |
| 5.2 激光点云数据组织和管理 .....                 | 117 |
| 5.2.1 基于规则格网索引的点云动态管理 .....           | 118 |
| 5.2.2 基于路线方案索引的点云动态管理 .....           | 119 |
| 5.3 任意点高程插值 .....                     | 121 |
| 5.3.1 不规则三角网 .....                    | 121 |
| 5.3.2 插值函数模型 .....                    | 123 |
| 5.4 地面线快速自动生成 .....                   | 125 |
| 5.4.1 点云提取 .....                      | 126 |
| 5.4.2 断面地面线生成 .....                   | 127 |
| 5.4.3 检查和编辑 .....                     | 129 |
| 5.4.4 地面线自动生成软件 .....                 | 130 |
| 5.5 公路路线与互通立交 CAD 协同设计 .....          | 131 |
| 5.5.1 三维激光扫描同公路路线与互通立交 CAD 系统集成 ..... | 131 |
| 5.5.2 公路 CAD 系统平、纵、横数据交互 .....        | 132 |
| 5.5.3 路线方案设计与比选 .....                 | 136 |
| 5.5.4 墙址地形线的采集 .....                  | 136 |
| 5.5.5 征地图的生成 .....                    | 140 |
| 5.6 工程应用 .....                        | 141 |
| 5.6.1 工程概况 .....                      | 141 |
| 5.6.2 工程技术应用 .....                    | 142 |
| 参考文献 .....                            | 152 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

公路,作为交通中最为基本的要素,是其他所有交通形式的连接纽带。公路交通,牵涉各行各业的发展和社会大众的日常生活,是交通业务中的重中之重。

自1988年10月31日我国大陆第一条高速公路——沪嘉高速公路(全长18.5km)建成通车以来,我国公路交通建设取得了令世人瞩目的巨大成就。根据交通运输部《2015年交通运输行业发展统计公报》数据显示,截至2015年年底,我国公路总里程达457.73万公里,公路密度为47.68公里/百平方公里,全国高速公路里程达12.35万公里。目前,我国高速公路里程已经稳居世界第一位,“7射、9纵、18横”国家高速公路网已经基本建成。

公路交通的快速发展,有效地缓解了我国交通运输的紧张状况,显著提升了国家的综合国力和竞争力。随着经济社会的发展,我国公路建设事业已经由过去的“大规模新建高速公路”转变为“改扩建与新建并存、两种建设并重”的局面。一方面,国家加快实施区域发展总体战略和主体功能区战略,继续加大对革命老区、民族地区、边疆地区、贫困地区的扶持力度,新建公路的重心逐步向中西部地区转移;另一方面,国家推进新型工业化、信息化、城镇化和农业现代化加快发展,经济结构加快转型,交通运输总量将保持较快增长态势,各项事业发展要求加快重要通道的扩容改造,提高国家公路网的服务能力和水平;此外,交通科技进入21世纪大发展的新时期,对我国交通运输数字化、信息化建设提出了更高的要求。

然而,目前我国的公路勘测,主要采用航空摄影测量辅之于人工测量的方式,存在外业工作量大、易受天气影响、工期无法保证等缺点。近年来,IKONOS、QuickBird、WorldView等高分辨率卫星遥感作为有益补充手段,越来越多地用于公路勘测设计,但是受卫星影像空间分辨率和定位精度的限制,其主要用于工程可行性研究和初步设计阶段的方案比选。对于植被茂密地区以及公路改扩建路面测量,航空摄影测量与卫星图像测量手段无法获取所需的精确地表地形信息,仍需要大量的人工外业测量工作。快速获取能满足新建公路、改扩建公路中定测与施工图设计的高精度基础数据,成为公路建设工作者关心的重点问题。

激光扫描测量技术,是近年来新兴的高新测绘技术。它集成了激光测距、惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)、高精度动态GPS差分定位(Differential Global Position System, DGPS)等先进技术,通过测量激光脉冲的往返时间,结合INS/DGPS提供的定位姿态数据,直接获取高精度的地面三维坐标,即三维激光点云(Point Cloud)。同时,配合高分辨率数码相机获取的真彩色或红外数字影像,增强了对地物的认知能力,弥补了点云数据的不足。在公路勘测设计过程中,利用激光扫描测量技术可以测量线路走廊,这些高精度数据成果在前期的测量设计过程中应用,不仅可以使设计更为准确、尽可能地缩短建设周期、提高效率 and 节省



工程造价,也可以在工程建设完成后的运营管理中进行可视化管理应用,实现交通数字化管理。

公路工程三维激光扫描勘测设计,代表了公路勘测设计的前沿方向,已逐渐被重视和大规模地实践应用。下面,将首先介绍激光扫描测量技术的发展,然后介绍该项新技术在公路工程中的应用现状,并对其发展趋势和前景进行展望。

## 1.2 激光扫描测量技术的发展

激光探测与测距技术(Light Detection and Ranging, LiDAR),通常称为激光扫描或激光扫描测量技术,早在20世纪60年代就开始应用,包括激光测月和卫星激光测距。到了80年代,激光测高技术取得了突破性的进步,开始发展具有实用性的系统,有加拿大的LARSEN-500、瑞典的FLASH-1等,同期前苏联、法国均进行了同类系统的研究和试验(Brooks等,1998;Lillycrop等,1993;Larocque等,1999)。激光扫描测量技术,被认为是获取被测对象三维空间坐标的最有效方法之一。

根据承载激光扫描硬件系统的平台类型,可以将激光扫描硬件系统分为地面(包括固定式和车载式)激光扫描系统、机载(包括飞机、飞艇、无人机等载体)激光扫描系统和星载激光扫描系统。

星载激光扫描系统,主要用于地理科学研究,如植被垂直分布测量、海面高度测量、云层与气溶胶垂直分布测量以及特殊气候现象监测等方面,不在本书讨论范围。通常,车载地面激光扫描系统被简称车载激光扫描系统,为简便起见,如无特殊说明,后文中出现的地面激光扫描系统指的是固定式地面激光扫描系统。

### 1.2.1 激光扫描测量系统的发展

欧美国家在激光扫描测量技术行业中的起步较早,始于20世纪60年代。1960年,美国加利福尼亚休斯实验室的科学家梅曼研制成功了世界上第一台红宝石激光器。1965年,英国国防部使用砷化镓半导体实验性激光测高仪测量了空中飞机距离地面的高度,当时的飞行高度为300m,激光测距精度达到1.5m;通过示波器显示的激光脉冲振幅可以很容易地区分出地面和建筑物屋顶。不久之后,首个航空激光剖面测绘仪被引入到商业地形制图作业中,它采用了氩氟气体激光器,发出波长为632.8nm的连续波,利用KDP晶体使得连续波分成1MHz、5MHz和25MHz 3种不同频率,由地面反射回的每种回波信号与参考信号对比后得到各自的相位差,从而计算出实际的距离,这便是最早的相位式激光器。1969年,美国阿波罗11号飞船宇航员在月球“宁静海”登陆后,安置激光反射镜,当来自地球的激光脉冲被反射后就准确地测量出了地球与月球之间的距离。1979年,美国马萨诸塞州的Avco Everett公司采用钕铝石榴石晶体固体式激光测图系统和双轴式陀螺仪测定了飞机的飞行姿态,并用来辅助确定地面激光点的位置。1980年,美国出现了名为PRAM III的激光剖面绘图仪,它的波长为904nm,脉冲重复频率达到4kHz,当时像Honeywell、Litton等著名公司的IMU开始集成到这个系统中,并且一些公司开始提供商业化的地形剖面绘图服务。

1985年,NASA下属的兰利研究中心执行了它的机载激光测量任务,目的是研究大气中存

在的水蒸气和气溶胶密度。1973~1994年,美国国防部成功建立起全球定位系统GNSS,通过4颗以上的GNSS卫星就可以准确地测定地物三维坐标。随着GNSS的成功应用,机载激光断面测量系统开始了大范围的应用。20世纪90年代初,机载断面测量系统开始被激光扫描系统所代替。1988年,德国斯图加特大学的Ackermann教授进行了机载动态GNSS的测量试验,以少量地面控制点成功实现了GNSS辅助空中三角测量,同一年,Ackermann教授展示了利用机载激光测量技术测绘森林地区地形的潜在用途。1989年,SAAB公司受瑞典海军的委托开发了一套用于追踪潜艇的测海机载LiDAR系统。1992年,斯图加特大学的Peter Frieß和Joachim Lindenberger两位博士成立了TopScan公司,1989~1993年,他们将GNSS接收机、惯性测量系统IMU以及激光扫描仪集成在一起,并完成了一系列的测量试验,当时的系统就成为现代LiDAR系统的雏形(Zhao等,1997,1999)。

1993年,加拿大的Optech公司推出了第一套真正意义上的商业化激光扫描仪ALTM1020,随后,由TopScan公司采集数据对系统进行了评估。激光技术的不断成熟,使机载激光扫描技术得到了蓬勃发展,欧美等发达地区和国家先后研制出多种机载激光扫描系统。现在,有许多国家的公司在从事这方面的工作。这些公司主要包括:德国的TopScan公司、TopoSys公司、加拿大的Optech公司、南非的ALS公司等(Baltsavias,1999)。全球著名的测绘仪器生产厂家Leica公司也推出了机载激光扫描测高仪Leica ALS40、ALS50等。

1998年,NASA开始使用波形数字化激光扫描仪LVIS采集数据;2004年,奥地利的Riegl公司生产出了商业化的全波形激光扫描仪Riegl LMS-Q560,并与其合作伙伴——德国的IGI公司联合推出了LiteMapper5600机载LiDAR系统。激光扫描系统Riegl CP560、TopoSys Harrier560也相继推出,激光扫描已经开始由模拟信号时代进入数字化信号时代。

2006年,Optech推出了自己的全数字化激光扫描系统ALTM3100EA。Leica公司随后推出了Leica WDM65模块,可以集成到Leica ALS50-II和ALS60系统中,实现全波形数据的获取。2009年,IGI公司在LiteMapper5600的基础上,对机载激光扫描系统进一步升级,基于Riegl公司的高精度激光扫描仪LMS-Q680,并集成CCNS/AEROcontrol系统,形成了完整的高精度机载激光扫描系统LiteMapper6800。2010年,Riegl公司在CP560的基础上推出了更加先进的CP680机载激光扫描系统。同年,Leica公司推出了其最新的第四代激光扫描系统ALS70。

近几年,激光扫描系统开始向更高数据采集效率、更大采集密度以及多样化平台发展,如Riegl公司先后推出了高精度激光扫描系统LMS-Q780和LMS-Q1560,以及无人机激光扫描系统VUX-1。LMS-Q780系统最高激光发射频率可达400kHz,采用了多周期回波(Multiple Time Around, MTA)技术,在空中可以同时识别高达10个MTA分区,可有效提高高空作业时的激光点采集密度。LMS-Q1560则在集成LMS-Q780原有技术优势的基础上,采用了双通道的激光扫描仪,每个激光扫描通道都提供平行扫描线,同时两个通道扫描平行线彼此倾斜 $28^\circ$ ,从而有效消除了扫描盲区。其最高激光发射频率可达800kHz,并以每秒530000点的速度获取扫描数据,所支持的工作海拔高度可达5800m,使得用户可在不同的飞行高度进行高密度数据采集工作,非常适用于高空高效率大面积激光扫描数据获取以及复杂的数字城市高密度点云采集工作。VUX-1系统充分考虑了无人飞行器特殊的硬件特点和飞行特性,轻便小巧、功耗低,采用超高速旋转镜扫描,产生完全线性、单向、平行的扫描线,进而可获得均匀分布的点

云数据。

总的说来,国外机载激光扫描技术的重大发展历程,如表 1-1 所示。

机载激光扫描技术重大发展历程

表 1-1

| 时 间           | 重 要 事 件   |
|---------------|---|
| 1963 ~ 1972 年 | 研发 Airborne Profile Record( APR) 和联合平差技术                              |
| 1980 ~ 1988 年 | 开展机载激光扫描技术的可行性研究(美国、德国)   |
| 1989 ~ 1990 年 | 斯图加特大学成功研发首个机载激光测量系统  |
| 1993 年        | 德国首次出现商用机载激光扫描系统 TopScan ( ALTM1020)                                  |
| 1999 年        | 全球约有 30 多个商用机载激光扫描系统  |
| 2001 年        | 全球约有 60 多个商用机载激光扫描系统  |
| 2004 年        | RiegI 公司率先研发出数字化全波形技术(LiteMapper5600 和 CP560)<br>激光扫描从模拟信号时代进入数字化信息时代 |
| 2006 ~ 2010 年 | 机载扫描系统 LiteMapper6800( IGI) 、CP680( RiegI) 、ALS70( Leica) 等问世         |
| 2010 年至今      | 激光扫描系统 LMS-Q780、LMS-1560、VUX-1 等问世                                    |

相比国外,我国的机载激光扫描测量技术的研究起步较晚。20 世纪 90 年代初,中国科学院上海技术物理研究所成功研发了我国首台机载激光扫描测距成像组合遥感器(陈育伟,2003)。北京遥感应用研究所李树楷教授等研发的机载激光扫描测距成像系统原理样机于 1996 年完成,在总计 1 000km<sup>2</sup> 的几个试验区开展了试验应用工作,取得了初步成功(李树楷,2003)。这一集成系统主要包含光机扫描多波段成像装置、GNSS 接收机、INS/GNSS 复合姿态测量装置、光机扫描激光测距仪、实时监测数据记录及集成技术和数据处理软件。系统通过一个刚性平台将激光测距装置、多光谱扫描成像装置与 GNSS 和姿态测量装置紧密连接在一起,以同步控制技术确保数据时空同步性,但是该系统离实际应用还有一段距离。华中科技大学在“八五”期间成功地研制出了我国第一套机载激光海洋探测试验系统(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测深系统,目标最大测深能力 50m(陈卫标,2004)。在 21 世纪早期,由于我国还没有高精度的 INS 系统以及性能可靠的激光扫描测距装置,机载激光扫描测距系统还不够成熟(刘经南等,2003)。近年来,我国一些空间信息公司,通过核心硬件集成和自主研发相结合的方式,逐步推出了自己的机载扫描系统,如北京北科天绘科技有限公司在 2012 年推出了全系统激光扫描产品,型号有 AP0500、AP1500 和 AP3500,并取得了成功应用。

相比机载激光扫描测量系统,车载激光扫描测量系统的研发相对落后,其技术难度也更大。20 世纪 80 年代,相关学者已经开展了车载移动测量技术的理论研究。加拿大的一些省政府及美国州政府提出了移动式高速公路设施维护系统(Mobile Highway Inventory System, MHIS),加拿大的卡尔加里大学研发了 Alberta MHIS 系统。最早的移动车载系统使用航位推算传感器来获取位置和姿态信息,包括陀螺仪、加速度计和里程计等设备,利用相对定位原理求解点的坐标,汽车上架设相机,拍摄公路设施的现状,及时为公路维护单位提供信息。不过,当时的 MHIS 定位精度较差,但是其技术前景吸引了大量的学者和工程技术人员。

随着全球定位系统 GNSS 技术的发展,GNSS 能为移动平台提供绝对的位置坐标。1988

年,加拿大 Alberta MHIS 系统首先采用了差分 GNSS 定位技术,并引入惯性导航 INS 系统,但停滞于理论研究和原型设计阶段,未能形成有效的商业产品。1991 年,美国俄亥俄州立大学成功研制完成了第一个现代意义的车载移动测量系统——GPSVan(Bessler 等,1991)。GPSVan 的原型设计是使用 GNSS、里程计和直接地理定位来提供导航参数,装配 2 台能连续拍摄的模拟相机,自动快速地获取影像数据,经数据处理与分析,以立体像对的方式采用近景摄影测量原理求解地面点的三维空间坐标。1992 年,第二代的 GPSVan 车载测量系统研制成功,并迈出了将移动测量技术商业化的第一步(He 等,1994)。1994 年起,加拿大卡尔加里大学成功地将 INS/GNSS 组合系统装载到 Alberta MHIS 系统中(EL-Sheimy 等,1995),发展成为第一代的车载移动测量系统 VISAT。在美国俄亥俄州立大学和加拿大卡尔加里大学的技术创导下,国外各大科研机构、院校、商业公司也纷纷对车载测量系统的技术进行了广泛和深入的研究。

此外,随着硬件技术的不断进步,出现了 CCD、LiDAR 等新传感器,特别是奥地利的 Riegel、加拿大的 Optech 和德国的 Sick 等激光扫描仪器公司研发的新产品使得获取精密激光扫描仪越来越方便,促使各个科研机构、商家将激光扫描仪与移动车载平台相互集成,形成了车载激光扫描测量系统。

20 世纪 90 年代以来,众多车载移动测量系统相继出现(麦照秋等,2010)。典型的代表有:日本 Topcon 公司的 IP-S2 系统、美国 Trimble 公司的 Trimble MX 系列车载激光扫描系统、奥地利 Riegel 公司的 VMX-250 车载激光扫描系统、加拿大 Optech 公司的 Lynx 车载激光扫描系统、英国 3DLM 公司和德国 IGI 公司联合推出的商业化的移动测图系统 StreetMapper(Huntner 等,2006)。

国内许多高校、科研院所及空间信息公司,对车载移动测量系统的研发开展了大量工作。相关产品主要包括武汉大学研发的 WUMMS(Wuhan University Mobile Mapping System)(李德仁,2006),武汉立德测控技术股份有限公司的 LD-2000™(李德仁等,2008),山东科技大学、武汉大学、中国测绘科学研究院和同济大学研发的 3Dsurs(3D Survey System)(卢秀山等,2003;韩友美,2011),首都师范大学和中国测绘科学研究院联合研发的 SSW(Shoushi Si Wei)(叶泽田等,2011),南京师范大学和武汉大学合作研发的 3DRMS(3D Road Mapping System)(张卡等,2008)。广州中海达卫星导航技术股份有限公司于 2013 年推出了 iScan 一体化三维激光扫描测量系统,该系统已成功应用于矢量地图数据建库、三维地理数据制作和街景数据生产。目前,国内研发的这些车载激光扫描系统,已经广泛应用于三维数字城市建设、街景地图服务、城管部件普查、交通基础设施测量、矿山三维测量、航道堤岸测量、海岛礁岸线三维测量等领域。

地面三维激光扫描技术经过几十年的发展,硬件技术已经比较成熟,国外公司生产了许多商用的地面激光扫描测量系统和数据处理软件。这些三维激光扫描仪的扫描距离近到 0.8m(如 Mensi 公司出产的 S25 型三维激光扫描仪),远达 6 000m(如 Riegel 公司出产的 LPM-321 型三维激光扫描仪),部分仪器还内置了数码相机,在获取目标物体空间坐标与反射率的同时,还可获得颜色信息。

目前,地面激光扫描测量系统的生产商主要有 Leica 公司、Trimble 公司、Riegel 公司和 Optech 公司等。其中,Leica 公司在 2001 年收购了 Cyra 公司,开发了 HDS(High Definition Sur-



veying)系列的地面激光扫描测量系统,以及 ScanStation 系列产品。产品型号有早期的 HDS2500、HDS3000、HDS4500、HDS6200、ScanStation、ScanStation2 等,以及现在的 ScanStation C5、ScanStation C10 和 HDS8800 等,各项指标均在不断提高,以满足不同行业的需要。美国的 Trimble 公司于 2003 年收购 Mensi 公司,通过收购形式进入了地面三维激光测量系统领域,在 Mensi 公司的技术支持下,推出了 S 系列激光扫描仪、G 系列激光扫描仪和远距激光扫描仪 Trimble GS100/GS200、GX200、Trimble VX、FX 等。奥地利 RiegI 公司是专门的机载、车载和地面激光扫描设备研究制造商,以生产激光测量设备闻名。其推出的地面激光扫描测量系统有 LMS 系列、LPM 系列和 VZ 系列。早期生产的三维激光扫描仪有 LMS-Z210i、LMS-Z420i、LMS-Z620i 等型号,近几年生产的型号有 VZ-4000、VZ-1000、VZ-400、LPM-321。加拿大 Optech 公司以生产机载激光扫描仪闻名,其生产的地面激光扫描测量系统的型号主要有 ILRIS-36D、ILRIS-HD、ILRIS-LR。其中,ILRIS-36D 是一台完整、完全便携式的激光影像与数字化测图系统,ILRIS-LR 的测距长度能达到 3 000m。此外,生产地面三维激光扫描仪的厂家还有美国的 Faro 公司、德国的 Z + F 公司、英国的 3D Laser Mapping 和澳大利亚的 I-SITE 等。

在国内,2007 年,在中国科学院知识创新工程重要方向项目的支持下,中科院光电研究院研制了一套地面三维激光扫描仪原理样机。2011 年年底,中科院上海光学精密机械研究所与杭州中科天维有限公司联合推出了“地基全视景三维成像激光扫描仪”,并进行了多次扫描试验。然而,这些样机距离用户需要的、具备全套技术解决方案的地面三维激光扫描仪还有较长的路要走。加快具有自主知识产权的硬件设备的商业化和产业化进程,是改变国外产品在国内市场垄断地位、降低其高昂价格的重要途径。随着扫描技术的发展,国内的厂家也会逐渐加入到三维激光扫描仪生产和市场竞争的行列。

### 1.2.2 激光扫描数据处理技术的发展

随着 CCD、激光器以及计算机硬件技术的不断发展,多种传感器硬件技术和系统集成的问题已经解决,成熟的商用系统不断在市场上涌现,激光扫描数据的获取已经日益便利。但是,由于激光扫描数据处理的复杂性,涉及多传感器系统集成、多传感器几何标定与空间配准、POS 数据处理、激光点云数据处理等带来的一系列问题,激光扫描的数据处理方法相对于硬件技术的飞速发展而言,略显滞后。

激光扫描数据的处理,主要可分为数据预处理和数据后处理两个阶段。数据预处理,主要是将激光扫描测量获得的数据准确地纳入到所需的坐标系中,包括激光数据的定位定向、系统检校、坐标转换以及影像外方位元素解算等步骤,其中系统检校是重要环节。数据后处理,则主要是在预处理的基础上,进行激光点云的管理、滤波、分类、地物提取以及三维建模等。

#### 1) 激光扫描数据预处理方法

系统检校主要包括对每个部件的检校以及确定它们之间的空间位置和姿态关系,其最终目标是确定所有的系统误差,并对原始数据进行改正,使得最终数据中只包含随机误差。近 10 年来,国内外学者对系统误差对定位的影响进行了广泛深入的研究,并对系统检校方法进行了深入研究(Huising, 1998; Baltasvias, 1999; Schenk 2001; 黄先锋, 2007; Habib, 2009)。

激光扫描仪,是激光扫描测量系统的核心设备,其检校问题是影响系统整体性能的关键。国外较早开展三维激光扫描仪检校的是德国的 Boehler,他从工程应用的角度探讨了地面激光