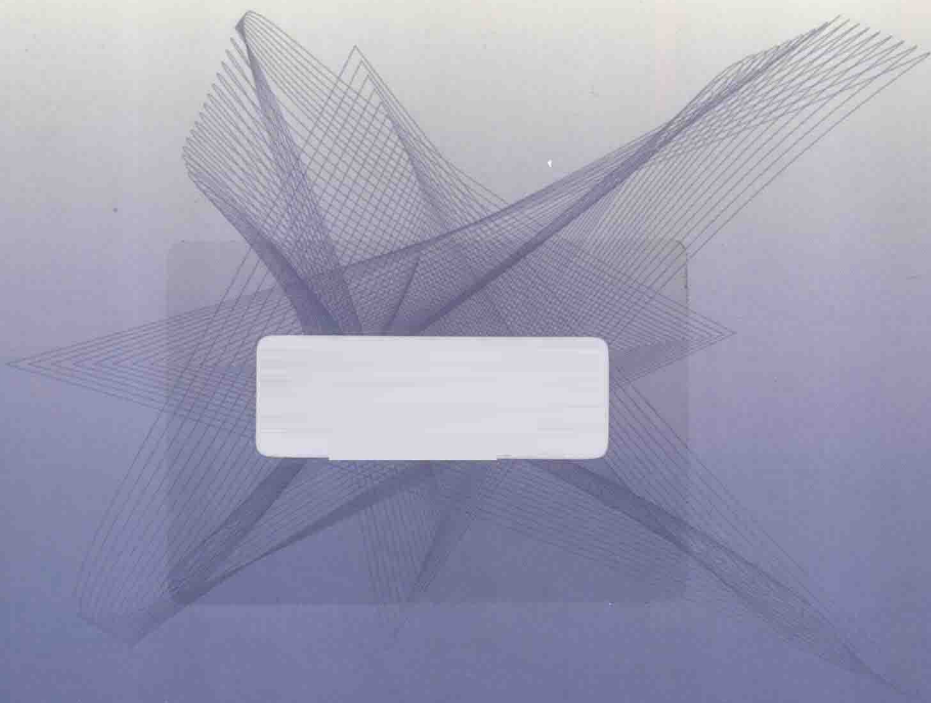

地面三维激光扫描技术 与工程应用

谢宏全 侯坤 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

江苏省一级重点建设学科测绘科学与技术资助

地面三维激光扫描技术 与工程应用

谢宏全 侯坤 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地面三维激光扫描技术与工程应用/谢宏全,侯坤著. —武汉:武汉大学出版社,2013.12

ISBN 978-7-307-12353-3

I. 地… II. ①谢… ②侯… III. 三维—激光扫描 IV. TN27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 312939 号

责任编辑:鲍 玲

责任校对:鄢春梅

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: 武汉中远印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 17.875 字数: 253 千字 插页: 9

版次: 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-12353-3 定价: 48.00 元

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

序

三维激光扫描技术是国际上近期发展的一项高新技术，为空间信息的获取提供了全新的技术手段。随着人们认识世界、改造世界的能力不断增强，各行各业对空间数据的需求日益增长，常规的数据获取方式已远远不能满足信息化需要。三维激光扫描技术的出现将现实世界的实体信息快速地转换为计算机可以识别处理的数据的梦想变为现实，它使人们从传统的人工单点数据获取转变为连续自动批量的数据获取，以“点云”的方式来表达空间信息，不仅内容丰富、翔实，更便于数据的存档。

三维激光扫描系统可以深入到任何复杂的现场环境及空间，通过扫描直接将各种大型的、复杂的、不规则的实体或实景的三维数据完整地采集到电脑中，能够最大限度地描绘物体表面的细部特征，为后期的数据处理提供基础或平台，获取的三维数据也可以转化为三维模型。这些精确的三维模型不仅能够提供场景可视化和虚拟漫游等方面的功能，而且可以满足量测、分析、生成二维线划图等更高层次的需求。

三维激光扫描技术在国外起步较早，始于 20 世纪 60 年代，到目前应用已经相对比较成熟。仪器性能，如扫描速度、距离、视场角等方面也得到了很大提升。而在我国三维激光扫描技术的应用还处于初级阶段，仪器及软件主要依靠进口，但是由于这项技术在效率、精度、操作等方面的优势，一经引入国内就引起工程科学界的广泛关注，很多高等院校、科研院所及高新科技企业都纷纷采购仪器，并不断扩展其应用领域。如今在文物保护与修复、地面景观形体测定、城市三维可视化、数字化工厂、变形监测、地质调查、灾害防控治理、道路隧道及矿山测量等领域均取得了一些应用成果。

尽管三维激光扫描技术优势凸显，但它毕竟是一个新兴产业，仍存在很多不足，有待完善。三维空间数据获取要向着集成化、实时化、动态化和智能化的方向发展。为此，对三维激光扫描技术还有许多理论和实践问题需要继续深入研究。

这本由淮海工学院谢宏全教授和北京则泰集团公司侯坤总裁等合著的《地面三维激光扫描技术与工程应用》一书，是他们将教学、科研和工程实践中对三维激光扫描技术应用研究所获得的一些成果和经验，并参考了国内外现有研究成果，汇集编著而成的一部有关这一新技术的专著。全书内容除对三维激光扫描技术的概念、原理、数据获取和三维建模方法等作了简要清晰的介绍之外，主要详细叙述了作者参与的这项技术在经济社会发展中各相关领域的应用实践中所获得的众多应用成果和经验，因此我想此书可为三维激光扫描技术在中国的普及和推广起到推动的作用，同时有助于推进三维激光扫描技术在我国测绘教育、科研和生产中的教学、研究和应用诸方面的进步。

二位作者在出版之前曾向我详细介绍了此书的内容及其编著过程，我作为他们二位的老朋友答应为此书作序。但由于本人的研究方向并不是这一方面的，对此新技术仅有皮毛了解。我也借此作序之机，学到不少有关这方面的知识。因此，我在序中只能谈一点肤浅的体会和看法。有误之处，恳请读者指正。



中国工程院院士

2013年11月

前 言

地面三维激光扫描技术是一门新兴的测绘技术，是测绘领域继 GPS 技术之后的又一次技术革命，目前已经逐渐成为广大科研人员和工程技术人员全新的解决问题的手段，并逐渐取代一些传统的测绘手段，为工程与科学研究提供了更准确的数据。随着三维激光扫描设备在性能方面的不断提升，而在价格方面的逐步下降，性价比越来越高，20 世纪末期，测绘领域掀起了三维激光扫描技术的研究热潮，扫描对象越来越多，应用领域越来越宽，三维激光扫描技术在高效获取三维信息应用中逐渐占据了主要地位。

三维激光扫描技术与全站仪测量技术、近景摄影测量技术相比有其自身的优势，主要特点有非接触测量、数据采样率高、高分辨率、高精度、全景化的扫描等。10 多年来，扫描仪硬件与数据后处理软件都有了明显的进步。应用领域日益扩大，逐步从科学研究进入到人们的日常生活。目前应用领域主要有文物古迹保护、建筑、规划、土木工程、工厂改造、室内设计、建筑监测、交通事故处理、法律证据收集、灾害评估、船舶设计、数字城市、军事分析等。三维激光扫描技术目前已经成功应用的领域包括遗产与文物保护；工业设计与检测；工厂改扩建及数字化管理；建筑、桥梁、基础设施测绘；地形测绘和地质研究。

三维激光扫描仪在国内的应用还处于起步阶段。虽然在国内对三维激光扫描仪的应用研究取得了一定的成果，但是目前还存在许多问题，主要问题包括：国外仪器产品价格比较昂贵，难以满足普通用户需求，而国内仪器刚投入市场，认可度不够；国内也没有有效的检定手段和公认的检定机构；工程应用技术标准和规范

还未出台；扫描的野外作业相对简单，而点云数据的后处理费时费力等。

虽然地面三维激光扫描技术在国内的应用研究水平总体上还处于初级阶段，但还是取得了一定的科研成果。2001年以来，有关三维激光扫描技术的期刊论文发表400多篇，硕士学位论文50多篇，博士学位论文5篇左右，出版专著5部左右。

为推动地面三维激光扫描技术能够得到广泛应用，相关技术人才的培养非常重要。目前公开出版的中文技术资料非常短缺，特别是针对行业应用的数据处理方法(三维建模技术)。因此，作者将近年来应用研究的成果撰写成书，内容主要以淮海工学院与北京则泰集团公司应用研究成果和发表论文为基础，在简要介绍相关内容的基础上，重点突出在相关领域的工程应用实践。

全书共8章，第1章简要介绍三维激光扫描技术的概念与原理、分类与特点、研究现状与应用领域；第2章简要介绍点云数据获取方法与精度分析；第3章简要介绍数据处理的主要流程；第4章介绍基于点云三维建模方法与应用；第5章简要介绍地面三维激光扫描技术在传统测绘中的应用；第6章介绍地面三维激光扫描技术在文物保护领域中的应用；第7章介绍地面三维激光扫描技术在地质工程中的应用；第8章介绍地面三维激光扫描技术在其他领域中的应用。

本书由谢宏全与侯坤等合著。其中第1章、第2章、第3章、第5章、第7章由谢宏全撰写；第4章由谷风云撰写；第6章与第8章由侯坤撰写。全书由谢宏全统稿。

在本书撰写过程中，感谢淮海工学院周立教授的大力支持；感谢北京则泰集团公司对全书整体框架提出修改建议；还要感谢徕卡测量系统贸易公司技术人员提供的研究成果；最后感谢武汉大学出版社王金龙先生在本书出版过程中提供的帮助，并对引用文献的作者表示感谢。

由于地面三维激光扫描技术应用还处在初级阶段，涉及内容十

分广泛，相关技术发展迅速，加之作者水平和时间有限，错误与不当之处在所难免，恳切期望专家、学者和所有读者批评指正。

作者

2013年10月

目 录

1	绪论	1
1.1	三维激光扫描技术概念与原理	1
1.1.1	概念	1
1.1.2	基本原理	3
1.2	三维激光扫描系统分类与特点	6
1.2.1	分类	6
1.2.2	特点	8
1.3	三维激光扫描技术研究现状与发展趋势	11
1.3.1	研究现状	11
1.3.2	存在的主要问题与发展趋势	15
1.4	地面三维激光扫描技术应用领域	17
2	点云数据获取与精度分析	21
2.1	主要仪器产品简介	21
2.1.1	国外品牌公司产品简介	21
2.1.2	国内仪器产品简介	39
2.2	野外扫描方案设计	42
2.2.1	制定扫描方案的作用	42
2.2.2	制定扫描方案的主要过程	43
2.3	野外获取点云数据	49
2.3.1	扫描的基本步骤	49
2.3.2	扫描中主要注意事项	50
2.3.3	扫描仪全站化实现方案	51
2.4	点云数据的误差来源与精度影响分析	54

2.4.1	点云数据的误差来源	55
2.4.2	误差对精度影响分析	56
2.4.3	仪器精度影响的研究现状	60
2.5	扫描仪检校研究现状与展望	61
2.5.1	扫描仪检校研究现状	61
2.5.2	存在的主要问题与展望	64
2.6	扫描仪检定试验研究	65
2.6.1	水平角精度检定试验研究	65
2.6.2	测距精度检定试验研究	69
2.6.3	目标颜色与粗糙度对点云精度影响的试验研究	75
3	点云数据处理	83
3.1	数据处理软件	83
3.2	数据处理流程	83
3.3	数据配准	84
3.3.1	概述	84
3.3.2	研究现状	85
3.3.3	配准方法分类	87
3.4	地理参考	90
3.5	数据缩减	90
3.5.1	概述	90
3.5.2	研究现状	91
3.6	数据滤波	92
3.6.1	概述	92
3.6.2	研究现状	93
3.7	数据分割与数据分类	94
4	三维模型构建	99
4.1	三维建模的目的与意义	99
4.2	三维建模软件简介	100
4.3	三维建模方法	105

4.4	三维建模研究现状	106
4.5	Cyclone 软件建模应用实例	108
4.5.1	毓秀花园物管楼的三维建模	108
4.5.2	海油平台的三维建模	117
4.6	Geomagic 软件建模应用实例	118
4.6.1	雕刻石三维建模	118
4.6.2	“一滴血”纪念碑重建	128
4.7	SketchUp 软件建模应用实例	130
4.8	Imageware 软件建模应用实例	138
5	地面三维激光扫描技术在传统测绘中的应用	144
5.1	大比例尺地形图测绘	144
5.1.1	应用研究现状	144
5.1.2	存在主要问题	147
5.2	土方和体积测量	147
5.2.1	土方测量应用研究现状	148
5.2.2	体积测量应用研究现状	149
5.3	监理测量	150
5.3.1	应用研究现状	151
5.3.2	监理测量应用实例	151
5.4	变形监测	157
5.4.1	应用研究现状	158
5.4.2	变形监测应用实例	161
5.5	工程测量	168
6	地面三维激光扫描技术在文物保护领域中的应用	175
6.1	文物保护的意义	175
6.2	主要成果形式	176
6.3	应用研究现状与文物保护项目简介	178
6.3.1	应用研究现状	178
6.3.2	文物保护项目简介	181

6.4	将军崖岩画保护应用实例	183
6.5	花山岩画保护应用实例	186
6.6	北京历代帝王庙应用实例	191
6.7	存在的主要问题与展望	192
7	地面三维激光扫描技术在地质工程中的应用	196
7.1	地质研究	196
7.1.1	应用研究现状	196
7.1.2	应用方向简介	198
7.1.3	应用研究实例简介	199
7.2	地质滑坡与灾害治理	203
7.2.1	地质滑坡	203
7.2.2	舟曲地质灾害治理应用实例	207
7.3	工程地质编录	209
7.3.1	应用研究现状	209
7.3.2	开挖边坡地质编录应用实例	211
7.4	油气勘探应用实例	215
7.4.1	项目概述	215
7.4.2	主要技术流程	215
8	地面三维激光扫描技术在其他领域中的应用	222
8.1	在矿业领域中的应用	222
8.1.1	应用研究现状	222
8.1.2	露天矿应用实例	228
8.2	在林业领域中的应用	233
8.2.1	应用研究现状	233
8.2.2	林木测量应用实例	236
8.3	在石化领域中的应用	240
8.3.1	应用研究现状	240
8.3.2	应用方向简介	241
8.3.3	工业三维 GIS 应用实例	243

8.4 在数字城市三维建模领域中的应用	248
8.4.1 应用研究现状	248
8.4.2 数字昆明应用实例简介	249
8.5 厂区土地规划应用实例	250
8.5.1 项目概述	250
8.5.2 土地空间数据的获取	250
8.5.3 空间数据建模	250
8.5.4 土地数据分析	251
8.6 在海洋工程领域中的应用	252

附录：部分彩图

图 2-15 图 4-2	259
图 4-3 图 4-13 图 4-19	260
图 4-21 图 4-22 图 4-23	261
图 4-24 图 4-38 图 4-41 图 4-46	262
图 4-58 图 4-63 图 5-3 图 5-4 图 5-7	263
图 5-11 图 5-12 图 5-13	264
图 5-16 图 5-17 图 5-20 图 5-21	265
图 6-2 图 6-4 图 6-5 图 6-9 图 6-13	266
图 6-15 图 6-16 图 6-17 图 7-1	267
图 7-4 图 7-6 图 7-7	268
图 7-10 图 7-11 图 7-13 图 7-14	269
图 7-16 图 7-17 图 7-18 图 7-20	270
图 7-26 图 7-29 图 7-30 图 8-1	271
图 8-3 图 8-5 图 8-6	272
图 8-9 图 8-14 图 8-16	273
图 8-19 图 8-21 图 8-22	274

1 绪 论

1.1 三维激光扫描技术概念与原理

1.1.1 概念

激光的英文 Laser 是 Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation “受激辐射光放大”的缩写，它是 20 世纪最重大的一项科学发现。激光又被称为神奇之光，因为它的四大特性(方向性好、亮度高、单色性好、相干性好)是其他普通光所无法匹及的。激光技术是探索开发产生激光的方法以及研究应用激光的这些特性为人类造福的技术总称。自激光产生以来，激光技术得到了迅猛的发展，不仅研制出不同特色的各种各样的激光器，而且激光应用的领域也在不断拓展(王红霞，2012)。

物理学家爱因斯坦在 1916 年首次发现激光的原理。1960 年，世界上第一台红宝石激光器在美国诞生，激光才第一次被制造出来。之后，激光技术在世界各国的重视下和科学家们辛勤努力下得到了飞速发展。与传统光源不同，激光具有相干性、高亮度、颜色极纯、定向发光和能量密度极大等特点，并且需要用激光器产生。

激光器是用来发射激光的装置。1954 年，科学家研制成功了世界上第一台微波量子放大器，在随后的几年里，科研人员又先后研制出红宝石激光器、氦氖激光器、砷化镓半导体激光器。之后，激光器的研制技术得到了蓬勃而快速的发展，激光器的种类也越来越多。激光器按工作介质大体上可分为固体激光器、气体激光器、

染料激光器和半导体激光器 4 大类。

激光以其高亮度和能量密度极大的特性现已广泛用于医疗保健领域。在光学加工工业和精密机械制造工业中，精密测量长度是关键技术之一。随着传感器技术和激光技术的发展，激光位移传感器出现了。它常被用于振动、速度、长度、方位、距离等物理量的测量，还被用于无损探伤和对大气污染物的监测等。在机械行业中，常使用激光传感器来测量长度。

伴随着激光技术和电子技术的发展，激光测量也已经从静态的点测量发展到动态的跟踪测量和三维测量领域。20 世纪末，美国的 CYRA 公司和法国的 MENSİ 公司已率先将激光技术运用到三维测量领域。三维激光测量技术的产生为测量领域提供了全新的测量手段。

三维激光扫描技术又称为高清晰测量 (High Definition Surveying, HDS)，它是利用激光测距的原理，通过记录被测物体表面大量密集点的三维坐标信息和反射率信息，将各种大实体或实景的三维数据完整地采集到电脑中，进而快速复建出被测目标的三维模型及线、面、体等各种图件数据。结合其他各领域的专业应用软件，所采集的点云数据还可进行各种后处理应用(李滨, 2008)。

随着三维激光扫描设备在性能方面(主要包括扫描精度、扫描速度、易操作性、易携带性、抗干扰能力)的不断提升，而在价格方面的逐步下降，性价比越来越高，20 世纪末，测绘领域也掀起了三维激光扫描技术的研究热潮，扫描对象越来越多，应用领域越来越广，在高效获取三维信息应用中逐渐占据了主要地位。

传统的测量方式是单点测量，获取单点的三维空间坐标，而三维激光扫描则自动、连续、快速地获取目标物体表面的密集采样点数据，即点云；实现由传统的点测量跨越到了面测量，实现了质的飞跃；同时，获取信息量也从点的空间位置信息扩展到了目标物的纹理信息和色彩信息。

按照三维激光扫描系统设备依据承载平台划分，可分为机载三维激光扫描系统、车载三维激光扫描系统、固定站式三维激光扫描系统和手持式三维激光扫描仪。

三维激光扫描技术已经成为空间数据获取的重要手段。基于地面的三维扫描系统目前正引起广泛的关注,是三维激光扫描发展的一个重要方向。固定站式三维激光扫描系统也称为地面三维激光扫描仪,是本书的重点研究内容。

1.1.2 基本原理

三维激光扫描系统主要由三维激光扫描仪、计算机、电源供应系统、支架以及系统配套软件构成。而三维激光扫描仪作为三维激光扫描系统主要组成部分之一,又由激光发射器、接收器、时间计数器、马达控制可旋转的滤光镜、控制电路板、微电脑、CCD相机以及软件等组成。

激光测距技术是三维激光扫描仪的主要技术之一,激光测距的原理主要有基于脉冲测距法、相位测距法、激光三角法、脉冲-相位式测距法四种类型。目前,测绘领域所使用的三维激光扫描仪主要是基于脉冲测距法,近距离的三维激光扫描仪主要采用相位干涉法测距和激光三角法。

脉冲测距法是一种高速激光测时测距技术。脉冲式扫描仪在扫描时激光器发射出单点的激光,记录激光的回波信号。通过计算激光的飞行时间,来计算目标点与扫描仪之间的距离(李滨,2008)。这种原理的测距系统测距范围可以达到几百米到上千米。激光测距系统主要由发射器、接收器、时间计数器、微电脑组成。

相位式扫描仪是发射出一束不间断的整数波长的激光,通过计算从物体反射回来的激光波的相位差,来计算和记录目标物体的距离。基于相位测量原理,相位式扫描仪主要用于进行中等距离的扫描测量系统中。扫描范围通常在100m内,它的精度可以达到毫米量级。

激光三角法是利用三角形几何关系求得距离。先由扫描仪发射激光到物体表面,利用在基线另一端的CCD相机接收物体反射信号,记录入射光与反射光的夹角,已知激光光源与CCD之间的基线长度,由三角形几何关系推求出扫描仪与物体之间的距离。为了保证扫描信息的完整性,许多扫描仪扫描范围只有几米到数十米。

这种类型的三维激光扫描系统主要应用于工业测量和逆向工程重建中。它可以达到亚毫米级的精度。

将脉冲式测距和相位式两种测距方法结合起来,就产生了一种新的测距方法——脉冲-相位式测距法,这种方法利用脉冲式测距实现对距离的粗测,利用相位式测距实现对距离的精测(吴少华,2011)。

三维激光扫描仪主要有测距系统和测角系统以及其他辅助功能系统构成,如内置相机以及双轴补偿器,等等。其工作原理是通过测距系统获取扫描仪到待测物体的距离,再通过测角系统获取扫描仪至待测物体的水平角和垂直角,进而计算出待测物体的三维坐标信息。在扫描的过程中再利用本身的垂直和水平马达等传动装置完成对物体的全方位扫描,这样连续地对空间以一定的取样密度进行扫描测量,就能得到被测目标物体密集的三维彩色散点数据,称作点云(戚万权,2013)。

三维激光扫描仪在记录激光点三维坐标的同时也会将激光点位置处物体的反射强度值记录,并称之为反射率。内置数码相机的扫描仪在扫描过程中可以方便、快速地获取外界物体真实的色彩信息,在扫描、拍照完成后,我们不仅可以得到点的三维坐标信息,也获取了物体表面的反射率信息和色彩信息。所以,包含在点云信息里的不仅有 X 、 Y 、 Z 、 $Intensity$, 还包含每个点的 RGB 数字信息(李超等,2011)。

三维激光扫描仪的原始观测数据主要包括:①根据两个连续转动的用来反射脉冲激光镜子的角度值得到激光束的水平方向值和竖直方向值;②根据激光传播的时间计算得到仪器到扫描点的距离,再根据激光束的水平方向角和垂直方向角,可以得到每一扫描点相对于仪器的空间相对坐标值;③扫描点的反射强度等(张会霞,2010)。

点云数据的空间排列形式根据测量传感器的类型分为阵列点云、线扫描点云、面扫描点云以及完全散乱点云。大部分三维激光扫描系统完成数据采集是基于线扫描方式,采用逐行(或列)的扫描方式,获得的三维激光扫描点云数据具有一定的结构关系。点云