



“十三五”江苏省高等学校重点教材

激光雷达 测绘技术与应用

谢宏全 韩友美 陆波 孙美萍 张世武 等 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

“十三五”江苏省高等学校重点教材(编号:2017-1-029)
江苏省海洋技术专业(PZY2015B116)资助出版



“十三五”江苏省高等学校重点教材

激光雷达 测绘技术与应用

谢宏全 韩友美 陆波 孙美萍 张世武 等 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

激光雷达测绘技术与应用/谢宏全等编著. —武汉: 武汉大学出版社, 2018.12

“十三五”江苏省高等学校重点教材

ISBN 978-7-307-18272-1

I. 激… II. 谢… III. 激光雷达—测绘雷达—高等学校—教材
IV. TN959.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 291102 号

责任编辑: 鲍 玲 责任校对: 李孟潇 版式设计: 马 佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

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

印刷: 湖北民政印刷厂

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.75 字数: 326 千字 插页: 9

版次: 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-18272-1 定价: 39.00 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。

前 言

激光雷达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。目前激光雷达技术已经成为广大科研和工程技术人员解决问题的新手段，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，而价格方面却在逐步下降，性价比越来越高，20 世纪末期，测绘领域也掀起了三维激光扫描技术的研究热潮，拓宽了三维激光扫描技术的应用领域，导致其在高效获取三维信息应用中逐渐占据主要地位。车载激光测量系统为地理空间信息数据采集开辟了新途径，是当今测绘界最前沿、最尖端的科技之一，代表着未来测绘领域的发展方向。因此，车载激光测量技术已成为国内外学者研究的热点。

三维激光扫描技术与全站仪测量技术相比具有非接触测量、数据采样率高、高分辨率、高精度、全景化扫描等特点。10 多年来，扫描仪硬件与数据后处理软件都有了长足的进步。三维激光扫描技术的应用领域正在日益扩大，逐步从科学研究领域进入到人们的日常生活中，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。

为推动激光雷达测绘技术的广泛应用，相关技术人才的培养非常重要。目前已公开出版的中文技术参考书非常稀少。本书是作者自 2012 年从事相关教学与研究工作的主要成果体现，特别是在出版《地面三维激光扫描技术与工程应用》(2013 年)、《基于激光点云数据的三维建模应用实践》(2014 年)、《车载激光雷达技术与应用实践》(2016 年)专著的基础上，参考相关文献资料编写而成的。本书重点介绍地面三维激光扫描技术原理与应用，同时对车载激光雷达与机载激光雷达技术做简要介绍。

本书由谢宏全、韩友美、陆波等共同编写。其中第 1、2、12 章由谢宏全编写，第 3、4、5、10 章由韩友美编写，第 7 章由韩友美与陆波编写，第 8 章由孙美萍与张世武编写，第 9 章由孙美萍编写，第 6 章由谷风云与张世武编写，第 11 章由孙美萍与陆波编写。全书由谢宏全统稿。

在本书编写的过程中，感谢淮海工学院的周立教授的大力支持。感谢国内外相关设备销售公司提供相关产品与应用资料，感谢上海赛华信息技术有限公司提供技术指导与应用案例，感谢上海奥研信息科技有限公司提供应用案例。感谢教材审定专家西安科技大学的陈秋计教授、太原理工大学的胡海峰教授、华北理工大学的刘亚静教授、吉林建筑大学的张文春教授、辽宁科技大学的李巍教授。

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，同时也对所有引用文献的作者表示感谢。

由于激光雷达测绘技术发展较快，加之编者知识水平和实践经验有限，错误与不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2018年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 基本概念	1
1.2 三维激光扫描系统基本原理	2
1.3 三维激光扫描系统分类	7
1.4 地面三维激光扫描技术特点	10
1.5 三维激光扫描技术发展概述	11
1.6 存在的问题与发展趋势	13
思考题	15
第 2 章 地面三维激光扫描设备	16
2.1 国外地面三维激光扫描仪简介	16
2.2 国内地面三维激光扫描仪简介	24
2.3 手持式三维激光扫描仪简介	28
2.4 拍照式三维激光扫描仪简介	30
2.5 特殊用途的三维激光扫描仪简介	31
思考题	33
第 3 章 地面三维激光扫描点云数据采集	34
3.1 野外扫描方案设计	34
3.2 点云数据采集方法概述	37
3.3 标靶法的点云数据采集流程	39
3.4 地物特征法的点云数据采集流程	43
3.5 全站仪法的点云数据采集流程	46
3.6 LiDAR 点云数据格式	49
3.7 点云数据缺失成因分析	51
思考题	54
第 4 章 地面三维激光扫描仪精度检测	55
4.1 仪器性能与检定相关术语	55
4.2 扫描仪检测研究概述	57
4.3 扫描仪主要性能参数定义	58

4.4	点云数据误差来源与精度影响分析	60
4.5	扫描仪测距精度检测试验	64
	思考题	68
第5章	点云数据预处理	70
5.1	数据处理流程	70
5.2	数据配准	71
5.3	数据滤波	75
5.4	数据缩减	78
5.5	数据分割与数据分类	80
5.6	点云数据漫游及发布	81
	思考题	85
第6章	三维模型构建	86
6.1	三维建模概述	86
6.2	三维建模软件简介	88
6.3	三维建模方法及主要流程	89
6.4	规则体建模应用实例	90
6.5	不规则体建模应用实例	96
	思考题	101
第7章	地面三维激光扫描技术在测绘领域中的应用	102
7.1	地形图与地籍测绘	102
7.2	土方和体积测量	104
7.3	监理测量	111
7.4	变形监测	114
7.5	工程测量	118
	思考题	122
第8章	三维激光扫描技术在文物保护领域中的应用	123
8.1	文物保护概述	123
8.2	文物保护数据成果形式与项目应用	125
8.3	文物三维建模应用案例	127
8.4	文物线划图绘制应用案例	129
8.5	文物变形监测应用案例	131
	思考题	133

第 9 章 地面三维激光扫描技术在其他领域中的应用	134
9.1 地质领域中的应用	134
9.2 矿业领域中的应用	137
9.3 林业领域中的应用	141
9.4 水利工程领域中的应用	144
思考题	149
第 10 章 移动激光测量技术与应用	150
10.1 车载 LiDAR 技术概述	150
10.2 车载 LiDAR 系统的构成与工作原理	154
10.3 车载 LiDAR 数据获取与处理	164
10.4 车载 LiDAR 技术应用与展望	167
10.5 SLAM 技术与应用	170
思考题	176
第 11 章 机载激光雷达测量技术与应用	177
11.1 机载激光雷达测量技术简介	177
11.2 机载激光雷达系统结构	179
11.3 机载激光雷达测量作业流程	181
11.4 机载激光雷达的应用领域	182
11.5 无人机载激光雷达技术与应用	190
思考题	193
第 12 章 激光雷达技术在海洋工程中的应用	194
12.1 技术应用概述	194
12.2 机载激光雷达技术应用	194
12.3 船载激光雷达技术应用	198
12.4 地面型三维激光雷达技术应用	200
思考题	203
参考文献	204
附录	215

第 1 章 绪 论

激光雷达测绘技术在我国的应用起源于 21 世纪初, 目前已经成为测绘领域的研究与应用热点, 但其相关基本概念还不太明晰。本章在介绍基本概念的基础上, 重点阐述三维激光扫描系统的基本原理与分类, 以地面三维激光扫描系统为例, 简要介绍其技术特点、发展概述、存在的问题与发展趋势。

1.1 基本概念

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 世纪重大的科学发现之一, 具有方向性好、亮度高、单色性好、相干性好的特性。自激光产生以来, 激光技术得到了迅猛的发展, 激光应用的领域也在不断拓展。物理学家爱因斯坦在 1916 年首次发现激光的原理, 1954 年科学家成功研制了世界上第一台微波量子放大器, 1960 年世界上第一台红宝石激光器在美国诞生。目前, 激光已广泛用于医疗保健、机械制造、大气污染物的监测等领域, 它常被用于振动、速度、长度、方位、距离等物理量的测量。

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。20 世纪末, 美国的 CYRA 公司和法国的 MENSI 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。

三维激光扫描测量, 常见的英文翻译有“Light Detection and Ranging”(LiDAR)、“Laser Scanning Technology”等。雷达是通过发射无线电信号, 在遇到物体后返回并接收信号, 从而对物体进行探查与测距的技术, 英文名称为“Radio Detection and Ranging”, 简称为“Radar”, 译成中文就是“雷达”。由于 LiDAR 和 Radar 的原理是一样的, 只是信号源不同, 又因为 LiDAR 的光源一般都采用激光, 所以一般都将 LiDAR 译为“激光雷达”, 也可称为激光扫描仪。

激光雷达具有一系列独特的优点: 极高的角分辨率、极高的距离分辨率、速度分辨率高、测速范围广、能获得目标的多种图像、抗干扰能力强、比微波雷达的体积和重量小等。但是, 激光雷达的技术难度很高, 至今尚未成熟。激光雷达仍是一项发展中的技术, 有的激光雷达系统已经处于试用阶段, 但许多激光雷达系统仍在研制或探索之中。

由国家测绘地理信息局发布的《地面三维激光扫描作业技术规程》(CH/Z 3017—2015)(以下简称《规程》), 于 2015 年 8 月 1 日开始实施, 对地面三维激光扫描技术(terrestrial three dimensional laser scanning technology)给出了定义: 基于地面固定站的一种通过发射激光获取被测物体表面三维坐标、反射光强度等多种信息的非接触式主动测量

技术。

三维激光扫描技术又称作高清晰测量(High Definition Surveying, HDS),也被称为“实景复制技术”,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计算机中,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,所采集点云数据还可进行各种后处理应用。

三维激光扫描技术是一项高新技术,把传统的单点式采集数据过程转变为了自动连续获取数据的过程,由逐点式、逐线式、立体线式扫描逐步发展成为三维激光扫描,由传统的点测量跨越到了面测量,实现了质的飞跃。同时,所获取信息量也从点的空间位置信息扩展到目标物的纹理信息和色彩信息。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,应用领域越来越广,在高效获取三维信息应用中逐渐占据了主要地位。

1.2 三维激光扫描系统基本原理

1.2.1 激光测距技术原理与类型

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脉冲测距法、相位测距法、激光三角测距法、脉冲-相位式四种类型。脉冲测距法与相位测距法对激光雷达的硬件要求高,多用于军事领域。激光三角测距法的硬件成本低,精度能够满足大部分工业与民用要求。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测距法。激光测距技术类型详细介绍如下:

(1) 脉冲测距法

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,激光器会发射出单点的激光,记录激光的回波信号(图1-1)。通过计算激光的飞行时间(Time of Flight, TOF),利用光速来计算目标点与扫描仪之间的距离。

设光速为 c ,待测距离为 S ,测得信号往返传播的时间差为 Δt ,具体计算公式如下:

$$S = \frac{1}{2}c \cdot \Delta t \quad (1-1)$$

这种原理的测距系统测距范围可以达到几百米到上千米的距离。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。此方法也称为脉冲飞行时间差测距,由于采用的是脉冲式的激光源,适用于超长距离的测量,但精度不高。测量精度主要受到脉冲计数器工作频率与激光源脉冲宽度的限制,精度可以达到米数量级,随着距离的增加,精度

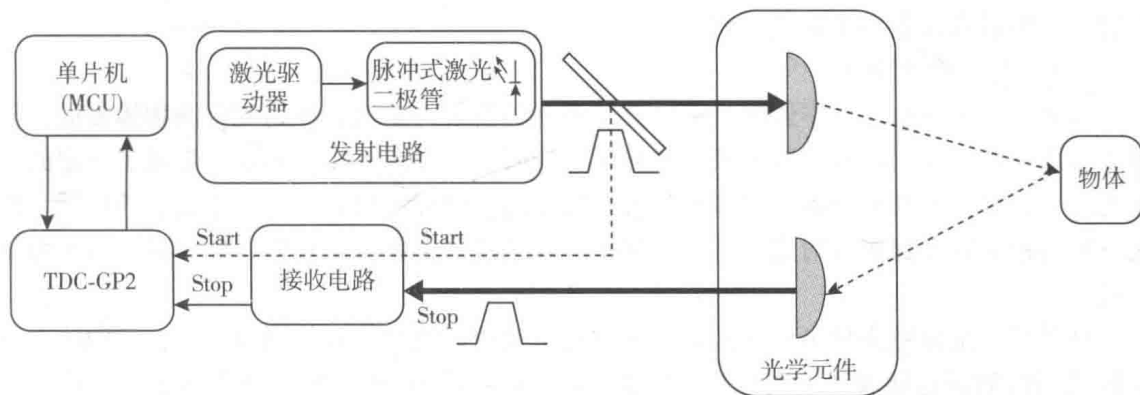


图 1-1 脉冲测距法原理示意图

呈现降低趋势。

(2) 相位测距法

相位测距法的具体过程是：相位式扫描仪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，如图 1-2 所示。

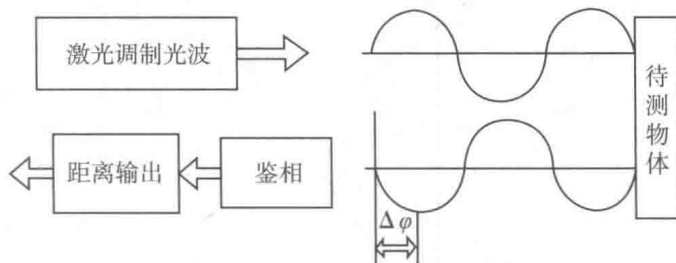


图 1-2 相位测距法原理示意图

根据“飞行时”原理，可推导出所测距离 D 为：

$$D = \frac{1}{2}ct_{2D} = \frac{c}{2f}\left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) = \frac{\lambda}{2}(N + \Delta N) \quad (1-2)$$

式中， $\lambda/2$ 代表一个测尺长 u ， u 的含义可以描述为：用长度为 u 的“测尺”去量测距离，量了 N 个整尺段加上不足一个 u 的长度就是所测距离 $D = u(N + \Delta N)$ ，由于测距仪中的相位计只能测相位值尾数 $\Delta\varphi$ 或 ΔN ，不能测其整数值，因此存在多值解。为了求单值解，采用两把光尺测定同一距离，这时 ΔN 可认为是短测尺（频率高的调制波，又称精测尺）用以保证测距精度， N 可认为是长测尺（频率低的调制波，又称粗测尺）用来保证测程，一般仪器的测相精度为 1‰。

基于相位测量原理主要用于进行中等距离的扫描测量系统中。扫描距离通常在 100m 内，它的精度可以达到毫米数量级。由于采用的是连续光源，功率一般较低，所以测量范围也较小，测量精度主要受相位比较器的精度和调制信号的频率限制，增大调制信号的频

率可以提高精度，但测量范围也随之变小，所以为了在不影响测量范围的前提下提高测量精度，一般需要设置多个调频频率。

(3) 激光三角测距法

激光三角测距法的基本原理是由仪器的激光器发射一束激光投射到待测物体表面，待测物体表面的漫反射经成像物镜成像在光电探测器上。光源、物点和像点形成了一定的三角关系，其中光源和传感器上的像点位置是已知的，由此可以计算出物点所在的位置。激光三角测距法的光路按入射光线与被测物体表面法线的关系分为直射式和斜射式两种测距方式。

直射式三角测距法是半导体激光器发射光束经透射镜会聚到待测物体上，经物体表面反射(散射)后通过接收透镜成像在光电探(感)测器(CCD)或(PSD)敏感面上。工作原理如图 1-3 所示，位移量(或变形量) x 计算公式为：

$$x = \frac{ax'}{b\sin\theta - x'\cos\theta} \tag{1-3}$$

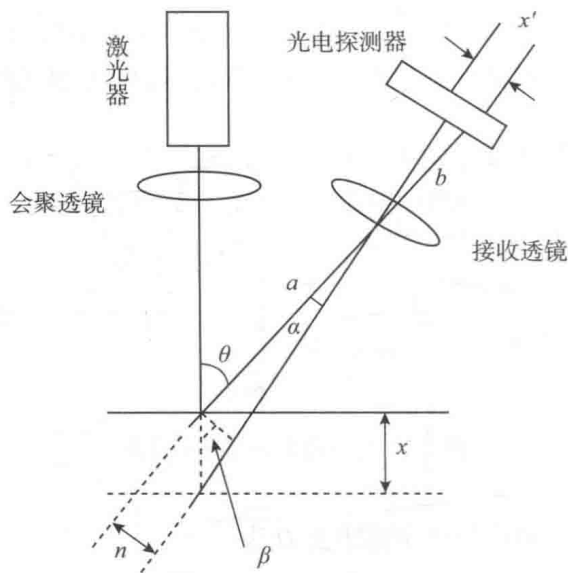


图 1-3 直射式三角测距法原理

斜射式三角测量法是半导体激光器发射光轴与待测物体表面法线成一定角度入射到被测物体表面上，被测量上的后向反射光或散射光通过接收透镜成像在光电探(感)测器敏感面上。工作原理如图 1-4 所示，位移量 x 的计算公式为：

$$x = \frac{ax'\cos\theta_2}{b\sin(\theta_1 + \theta_2) - x'\cos(\theta_1 + \theta_2)} \tag{1-4}$$

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，可以达到亚毫米级的精度。

(4) 脉冲-相位式

将脉冲式测距和相位式测距两种方法结合起来，就产生了一种新的测距方法——脉

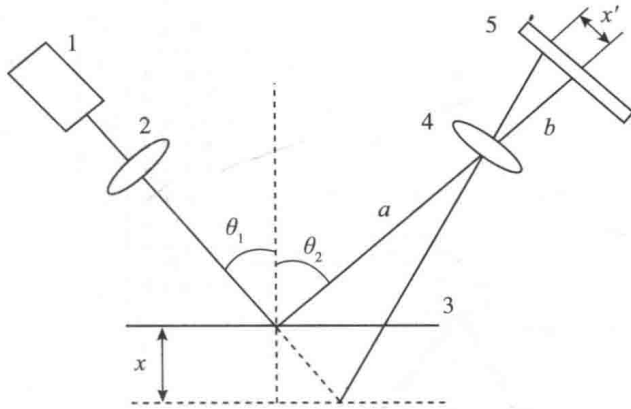


图 1-4 斜射式三角测距法原理

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。

1.2.2 三维激光扫描仪工作原理

三维激光扫描仪主要由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。三维激光扫描仪由激光测距仪、水平角编码器、垂直角编码器、水平及垂直方向伺服马达、倾斜补偿器和数据存储器组成。

三维激光扫描仪的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。假设三维激光扫描仪到被测对象的斜距为 D ，水平角为 φ ，垂直角为 θ ，如图 1-5 所示，则所测对象激光点的三维坐标 (x, y, z) 可计算为：

$$\begin{cases} x = D \cos \theta \cos \varphi \\ y = D \cos \theta \sin \varphi \\ z = D \sin \theta \end{cases} \quad (1-5)$$

三维激光扫描仪的扫描装置可分为振荡镜式、旋转多边形镜、章动镜和光纤式 4 种，扫描方向可以是单向的也可以是双向的。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。

1.2.3 点云数据的特点

地面三维激光扫描测量系统对物体进行扫描所采集到的空间位置信息是以特定的坐标系为基准的，这种特殊的坐标系称为仪器坐标系，不同仪器采用的坐标轴方向不尽相同，通常将其定义为：坐标原点位于激光束发射处， Z 轴位于仪器的竖向扫描面内，向上为正； X 轴位于仪器的横向扫描面内与 Z 轴垂直； Y 轴位于仪器的横向扫描面内与 X 轴垂直，同时， Y 轴正方向指向物体，且与 X 轴、 Z 轴一起构成右手坐标系。

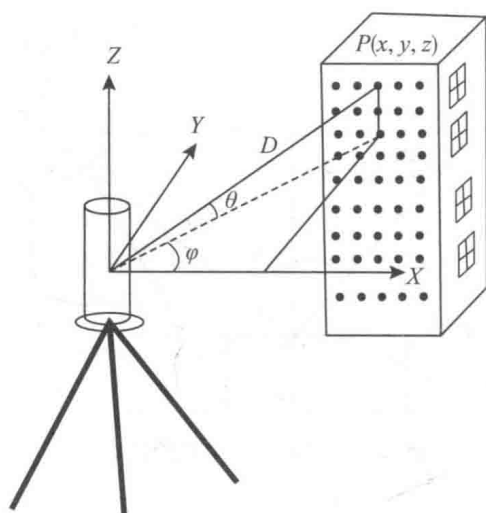


图 1-5 三维激光扫描仪工作原理

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，在扫描与拍照完成后，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。

依据 Helmut Cantzler 对深度图像的定义，三维激光扫描是深度图像的主要获取方式，因此激光雷达获取的三维点云数据就是深度图像，也可以称为距离影像、深度图、 xyz 图、表面轮廓、2.5 维图像等。

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出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。

《规程》中对点云 (point cloud) 给出了定义：三维激光扫描仪获取的以离散、不规则方式分布在三维空间中的点的集合。

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的，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。点云的主要特点如下：

①数据量大。三维激光扫描数据的点云量较大，一幅完整的扫描影像数据或一个站点的扫描数据中可以包含几十万至上百万个扫描点，甚至达到数亿个。

②密度高。扫描数据中点的平均间隔在测量时可通过仪器设置，一些仪器设置的间隔可达 1.0mm，为了便于建模，目标物的采样点通常都非常密。

③带有扫描物体光学特征信息。由于三维激光扫描系统可以接收反射光的强度，因

此, 三维激光扫描的点云一般具有反射强度信息, 即反射率。有些三维激光扫描系统还可以获得点的色彩信息。

④立体化。点云数据包含了物体表面每个采样点的三维空间坐标, 记录的信息全面, 因而可以测定目标物表面立体信息。由于激光的投射性有限, 无法穿透被测目标, 因此点云数据不能反映实体的内部结构、材质等情况。

⑤离散性。点与点之间相互独立, 没有任何拓扑关系, 不能表征目标体表面的连接关系。

⑥可量测性。地面三维激光扫描仪获取的点云数据可以直接量测每个点云的三维坐标、点云间距离、方位角、表面法向量等信息, 还可以通过计算得到点云数据所表达的目标实体的表面积、体积等信息。

⑦非规则性。激光扫描仪是按照一定的方向和角度进行数据采集的, 采集的点云数据随着距离的增大, 扫描角越大, 点云间距离也增大, 加上仪器系统误差和各种偶然误差的影响, 点云的空间分布没有一定的规则。

以上这些特点使得三维激光扫描数据得到十分广泛的应用, 同时也使得点云数据处理变得十分复杂和困难。

1.3 三维激光扫描系统分类

目前, 许多厂家提供了多种型号的扫描仪, 它们无论在功能还是在性能指标方面都不尽相同, 用户根据不同的应用目的, 从繁杂多样的激光扫描仪中进行正确和客观的选择, 就必须对三维激光扫描系统进行分类。

从实际工程和应用角度来说, 激光雷达的分类方式繁多, 主要有: 激光波段、激光器的工作介质、激光发射波形、功能用途、承载平台、激光雷达探测技术等。本书借鉴一些学者的研究成果, 从承载平台、扫描距离、扫描仪成像方式这几个方面进行分类, 下面做简要介绍。

1.3.1 依据承载平台划分

当前从三维激光扫描测绘系统的空间位置或系统运行平台来划分, 可分为如下五类:

(1) 星载激光扫描仪

星载激光扫描仪也称星载激光雷达, 是安装在卫星等航天飞行器上的激光雷达系统。星载激光雷达是 20 世纪 60 年代发展起来的一种高精度地球探测技术, 实验始于 20 世纪 90 年代初, 美国的星载激光雷达技术的应用与规模处于绝对领先地位。美国公开报道的典型星载激光雷达系统有 MOLA、MLA、LOLA、GLAS、ATLAS、LIST 等。

星载激光扫描仪的运行轨道高并且观测视野广, 可以触及世界的每一个角落, 提供高精度的全球探测数据, 在地球探测活动中起着越来越重要的作用, 对于国防和科学研究具有十分重大的意义。目前, 它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等方面可以发挥重要作用。主要应用于全球测绘、地球科学、大气探测、月球、火星和小行星探测、在轨服务、空间站等。

我国多家高校与科研机构开展了星载激光雷达技术研究。2007年我国发射的第1颗月球探测卫星“嫦娥一号”上搭载了1台激光高度计,实现了卫星星下点月表地形高度数据的获取,为月球表面三维影像的获取提供服务,是我国发射的首例实用型星载激光雷达。近年来,国内多家单位也开始进行星载激光雷达的研究。

星载高分辨率对地观测激光雷达在国际上仍属于非常前沿的工程研究方向。星载激光雷达在地形测绘、环境监测等方面的应用具有独特的优势,未来在典型的对地观测应用体现主要有:构建全球高程控制网、获取高精度 DSM/DEM、特殊区域精确测绘、极地地形测绘与冰川监测。

(2) 机载激光扫描系统

机载激光扫描系统(Airborne Laser Scanning System, ALSS; 或者 Laser Range Finder, LRF; 或者 Airborne Laser Terrain Mapper, ALTM), 也称机载 LiDAR 系统。

这类系统由激光扫描仪(LS)、惯性导航系统(INS)、DGPS 定位系统、成像装置(UI)、计算机以及数据采集器、记录器、处理软件和电源构成。DGPS 系统给出成像系统和扫描仪的精确空间三维坐标, INS 给出其空中的姿态参数, 由激光扫描仪进行空对地式的扫描, 以此来测定成像中心到地面采样点的精确距离, 再根据几何原理计算出采样点的三维坐标。

传统的机载 LiDAR 系统测量往往是通过安置在固定翼的载人飞行器上进行的, 作业成本高, 数据处理流程也较为复杂。随着近年来民用无人机的技术升级和广泛应用, 将小型化的 LiDAR 设备集成在无人机上进行快速高效的数据采集已经得到应用。LiDAR 系统能全天候高精度、高密度、快速和低成本地获取地面三维数字数据, 具有广泛的应用前景。

空中机载三维扫描系统的飞行高度最大可以达到 1km, 这使得机载激光扫描不仅能用于地形图绘制和更新方面, 还在大型工程的进展监测、现代城市规划和资源环境调查等诸多领域都有较广泛的应用。

关于机载激光扫描系统的详细介绍见本书第 11 章。

(3) 车载激光扫描系统

车载激光扫描系统, 即车载 LiDAR 系统, 在文献中用到的词语也不太一致, 总体表达的思想是大致相同的。车载的含义广泛, 不仅是汽车, 还包括轮船、火车、小型电动车、三轮车、便携式背包等。

车载 LiDAR 系统是集成了激光扫描仪、CCD 相机以及数字彩色相机的数据采集和记录系统, GPS 接收机, 基于车载平台, 由激光扫描仪和摄影测量获得原始数据作为三维建模的数据源。该系统的优点包括: 能够直接获取被测目标的三维点云数据坐标; 可连续快速扫描; 效率高, 速度快。但是, 不足之处就是目前市场上的车载地面三维激光扫描系统的价格比较昂贵(约 200 万~800 万元), 只有少数地区和部门使用。地面车载激光扫描系统一般能够扫描到路面和路面两侧各 50m 左右的范围, 它广泛应用于带状地形图测绘以及特殊现场的机动扫描。

关于车载 LiDAR 系统的详细介绍见本书第 10 章。

(4) 地面三维激光扫描系统

地面三维激光扫描系统(地面三维激光扫描仪),还可称为地面 LiDAR 系统。地面三维激光扫描系统类似于传统测量中的全站仪,它由一个激光扫描仪和一个内置或外置的数码相机,以及软件控制系统组成。激光扫描仪本身主要包括激光测距系统和激光扫描系统,同时也集成了 CCD 和仪器内部控制和校正系统等。二者的不同之处在于固定式扫描仪采集的不是离散的单点三维坐标,而是一系列的“点云”数据。点云数据可以直接用来进行三维建模,而数码相机的功能就是提供对应模型的纹理信息。

地面三维激光扫描系统是一种利用激光脉冲对目标物体进行扫描,可以大面积、大密度、快速度、高精度地获取地物的形态及坐标的一种测量设备。目前已经广泛应用于测绘、文物保护、地质、矿业等领域。

关于地面三维激光扫描仪的详细介绍见本书第 2~9 章。

(5)手持式激光扫描系统

手持式激光扫描系统(手持式三维扫描仪)是一种可以用手持扫描来获取物体表面三维数据的便携式三维激光扫描仪,是三维扫描仪中最常见的扫描仪。它被用来侦测并分析现实世界中物体或环境的形状(几何构造)与外观数据(如颜色、表面反照率等性质),搜集到的数据常被用来进行三维重建计算,在虚拟世界中创建实际物体的数字模型。它的优点是快速、简洁、精确,可以帮助用户在数秒内快速地测得精确、可靠的成果。

此类设备大多用于采集比较小型物体的三维数据,可以精确地给出物体的长度、面积、体积测量,一般配备有柔性的机械臂使用。大多应用于机械制造与开发、产品误差检测、影视动画制作以及医学等众多领域。此类型的仪器配有联机软件和反射片。

1.3.2 依据扫描距离划分

按三维激光扫描仪的有效扫描距离进行分类,目前国家无相应的分类技术标准,大概可分为以下三种类型:

①短距离激光扫描仪($<10\text{m}$)。这类扫描仪最长扫描距离只有几米,一般最佳扫描距离为 $0.6\sim 1.2\text{m}$,通常主要用于小型模具的量测。不仅扫描速度快而且精度较高,可以在短时间内精确地给出物体的长度、面积、体积等信息。手持式三维激光扫描仪都属于这类扫描仪。

②中距离激光扫描仪($10\sim 400\text{m}$)。最长扫描距离只有几十米的三维激光扫描仪属于中距离三维激光扫描仪,它主要用于室内空间和大型模具的测量。

③长距离激光扫描仪($>400\text{m}$)。扫描距离较长,最大扫描距离超过百米的三维激光扫描仪属于长距离三维激光扫描仪,它主要应用于建筑物、大型土木工程、煤矿、大坝、机场等的测量。

1.3.3 依据扫描仪成像方式划分

按照扫描仪成像方式可分为如下三种类型:

①全景扫描式。全景式激光扫描仪采用一个纵向旋转棱镜引导激光光束在垂直方向扫描,同时利用伺服马达驱动仪器绕其中心轴旋转。

②相机扫描式。它与摄影测量的相机类似。它适用于室外物体扫描,特别对长距离的