

# 三维激光扫描技术 工程应用实践

Engineering Application and Practice of  
3D Laser Scanning Technology

廉旭刚 胡海峰 蔡音飞 马宏兵 著



测绘出版社

# 三维激光扫描技术工程应用实践

Engineering Application and Practice of  
3D Laser Scanning Technology

廉旭刚 胡海峰 蔡音飞 马宏兵 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 廉旭刚 2017

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

本书概述了三维激光扫描技术的概念与原理、分类与特点、应用领域,简要阐述了点云获取与处理方法、点云的三维建模技术。从五个方面介绍了三维激光扫描技术的工程应用实践,主要包括复杂建筑物、大型构筑物、文物保护、变形监测及其他领域。详细介绍了太原理工大学梅花教室、翔源火炬、行远楼、清韵轩的三维激光扫描及三维建模流程;太原红灯笼体育馆、南中环桥等钢架结构的三维激光扫描及三维建模流程;蒙山大佛等文物的三维激光扫描及三维建模流程;采矿扰动的地面灾害、高压线塔变形、铁路隧道变形的三维激光监测方法。

本书可作为测绘、文物保护、地质、矿业等行业技术人员的参考书,也可作为大专院校相关专业学生的学习教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

三维激光扫描技术工程应用实践 / 廉旭刚等著. —北京:

测绘出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5030-4067-2

I. ①三… II. ①廉… III. ①三维—激光扫描—研究  
IV. ①TN249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 222035 号

责任编辑	王佳嘉	封面设计	李 伟	责任校对	石书贤	责任印制	陈 超
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)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	13.75	彩插	7 面	字 数	266 千字		
版 次	2017 年 9 月第 1 版			印 次	2017 年 9 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1000			定 价	58.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-4067-2

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

# 前 言

三维激光扫描技术(3D laser scanning technology)是一种先进的全自动高精度立体扫描技术,又称为“实景复制技术”。不同于单纯的测绘技术,它可以通过获取的密集点云进行三维建模、特征信息提取。利用三维激光扫描技术获取的空间点云数据,可快速建立结构复杂、不规则的场景的三维可视化模型,既省时又省力,这种能力是现行的三维建模软件不可比拟的。

三维激光扫描仪已经成功应用于文物保护、城市建筑测量、地形测绘、采矿、变形监测、工业厂房和大型结构施工、管道设计、飞机船舶制造、公路铁路建设、隧道工程测量、桥梁改建等领域。最近几年,三维激光扫描技术不断发展并日渐成熟,三维扫描设备也逐渐商业化。三维激光扫描仪的巨大优势就在于可以快速扫描被测物体,不需反射棱镜即可直接获得高精度的点云数据,可以高效地对真实世界进行三维建模和虚拟重现。因此,其已经成为当前研究的热点之一,并在文物数字化保护、土木工程、工业测量、自然灾害调查、数字城市地形可视化、城乡规划等领域有广泛的应用。

通过综合分析三年来积累的三维激光扫描技术应用及实验案例,主要形成了几个特色:复杂建(构)筑物的精密扫描建模;采用3D SLAM技术对建筑物进行快速建模;三维激光扫描技术应用于变形监测领域,尤其是采动地面灾害监测、采动高压线塔变形监测、采动铁路隧道变形监测、相似材料模型试验变形监测。

全书共6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、应用领域,以及点云获取与处理方法和点云的三维建模技术;第2章介绍三维激光扫描技术在建筑物领域的应用;第3章介绍三维激光扫描技术在大型构筑物领域的应用;第4章介绍三维激光扫描技术在文物保护领域的应用;第5章介绍三维激光扫描技术在变形监测领域的应用;第6章简要介绍三维激光扫描技术在工业测量、电力测量、交通事故等领域的应用。

本书由廉旭刚副教授、胡海峰教授、蔡音飞博士、马宏兵高级工程师共同撰写。其中,第1章至第3章由廉旭刚撰写,第4章由蔡音飞撰写,第5章由胡海峰撰写,第6章由马宏兵撰写。全书由廉旭刚统稿。

在本书撰写过程中,感谢太原理工大学矿业工程学院刘鸿福教授的大力支持,感谢山西迪奥普科技有限公司的大力支持,感谢太原中瑞世航科技有限公司的大力支持,感谢太原理工大学测绘科学与技术系测绘工程专业学生做的大量基础工作,感谢研究生白宇、张涛、陈鹏飞、焦晓双、张文静在数据获取及处理方面提供的

帮助。

由于三维激光扫描技术发展速度较快,尤其在一些特殊领域的应用还处于探索阶段,加之作者水平有限,错误与不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2017年7月

# 目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 三维激光扫描技术概念与原理	1
§ 1.2 三维激光扫描系统分类与特点	2
§ 1.3 三维激光扫描技术应用领域	5
§ 1.4 点云数据的获取及处理方法	6
§ 1.5 点云的三维建模技术	9
第 2 章 三维激光扫描技术在建筑物领域的应用	12
§ 2.1 太原理工大学梅花教室三维激光扫描及建模	12
§ 2.2 太原理工大学翔源火炬雕塑三维激光扫描及建模	37
§ 2.3 太原理工大学行远楼、清韵轩 3D SLAM 激光扫描及建模	53
第 3 章 三维激光扫描技术在大型构筑物领域的应用	70
§ 3.1 山西红灯笼体育馆三维激光扫描及建模	70
§ 3.2 太原南中环桥三维激光扫描及配准	81
§ 3.3 钢结构楼梯三维激光扫描及建模	95
第 4 章 三维激光扫描技术在文物保护领域的应用	102
§ 4.1 蒙山大佛三维激光扫描及建模	102
§ 4.2 金龙山观音像三维激光扫描及建模	120
§ 4.3 北魏陶牛车三维激光扫描及建模	132
第 5 章 三维激光扫描技术在变形监测领域的应用	145
§ 5.1 开采扰动地面灾害监测	145
§ 5.2 开采扰动高压线塔监测	154
§ 5.3 开采扰动隧道变形监测	156
§ 5.4 相似材料模型实验变形监测	166
§ 5.5 高耸化工塔倾斜监测	178

---

第 6 章 三维激光扫描技术在其他领域的应用·····	181
§ 6.1 工业测量·····	181
§ 6.2 电力测量·····	187
§ 6.3 交通事故处理·····	200
参考文献·····	213
附录 部分彩图·····	215

# 第1章 绪论

## § 1.1 三维激光扫描技术概念与原理

### 1.1.1 概念

三维激光扫描技术又称为高清晰测量(high definition surveying, HDS),是基于测绘技术发展起来的技术,但测绘方法不同于传统测绘技术。传统测绘技术是单点目标的高精度测量定位,它是对指定目标中的某一点位进行精确的三维坐标测量,进而得到一个单独的或一些离散的点坐标数据,应用此类技术的有三维坐标测量仪、全站仪、激光跟踪仪等。三维激光扫描则是对确定目标的整体或局部进行完整的三维坐标数据测量,得到完整的、全面的、连续的、关联的全景点坐标数据。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,将各种大型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(罗旭,2006)。三维激光扫描结合其他各领域的专业应用软件,还可以将所采集的点云数据进行各种后处理应用。

### 1.1.2 基本原理

三维激光扫描仪的工作原理是通过发射红外线光束到旋转式镜头的中心,旋转检测环境周围的激光,一旦接触到物体,光束立刻被反射回扫描仪,根据红外线的位移数据计算激光发射点与物体的距离,最后通过编码器来测量镜头旋转角度和水平角度,以获得每个点的 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 坐标。激光扫描仪采用自动的、实时的、自适应的激光束聚焦技术(在不同的视距中),以保证每个扫描点的测距精度及位置精度足够高(金雯,2007)。

三维激光扫描仪发射器发出一个激光脉冲信号,经物体表面漫反射后,沿几乎相同的路径反向传回到接收器,可以计算出目标点 $P$ 到扫描仪中心的距离 $S$ ,控制编码器同步测量每一个激光脉冲横向扫描角度观测值 $\alpha$ 和纵向扫描角度观测值 $\theta$ 。三维激光扫描测量一般使用仪器自定义坐标系, $X$ 轴在横向扫描面内, $Y$ 轴在横向扫描面内与 $X$ 轴垂直, $Z$ 轴与横向扫描面垂直,如图1.1所示(刘勃妮,2006)。假设任一点 $P$ ,则其原始测量数据为 $(S, \alpha, \theta)$ 。



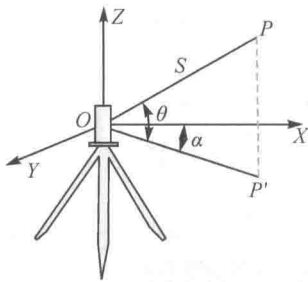


图 1.1 三维激光扫描仪自  
定义坐标系

由图 1.1 坐标系可以得到  $P$  点三维坐标为

$$\left. \begin{aligned} X &= S \cos \theta \cos \alpha \\ Y &= S \cos \theta \sin \alpha \\ Z &= S \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

然后,根据已知起算数据平移、旋转,将目标点位数据换算至用户坐标系,则有

$$\left. \begin{aligned} X_n &= X_0 + X \cos \beta \\ Y_n &= Y_0 + Y \sin \beta \\ Z_n &= Z_0 + Z \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

式中,  $X_n$ 、 $Y_n$ 、 $Z_n$  表示各点转换为用户坐标系后的坐标,  $X_0$ 、 $Y_0$ 、 $Z_0$  表示扫描仪中心点在用户坐标系中的坐标,  $\beta$  表示三维激光扫描仪初始方位与用户坐标系中北方向的夹角。

三维激光扫描系统经过近几年的发展,在测程范围、测距精度、测量速度、测量采样密度、激光安全等方面取得了较大的进步,在测量数据处理软件功能方面也趋于完善(金雯,2007)。

## § 1.2 三维激光扫描系统分类与特点

### 1.2.1 分类

根据三维激光扫描系统特性及技术指标的不同,可以将其划分为不同的类型。

#### 1. 依据承载平台划分

从当前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,可以分为以下三类(马立广,2005):

(1) 机载型激光扫描系统。此类系统由激光扫描仪(laser scanner, LS)、惯性导航系统(inertial navigation system, INS)、差分全球定位系统、成像装置、计算机及数据采集器、记录器、处理软件和电源构成。差分全球定位系统给出成像系统和激光扫描仪的精确空间三维坐标,惯性导航系统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来测定成像中心到地面采样点的精确距离,在根据几何原理计算出采样点的三维坐标。

(2) 地面型激光扫描系统。此类可划分为两类:一类是移动式扫描系统,另一类是固定式扫描系统。

移动式扫描系统是集成了激光扫描仪、CCD 相机及彩色数字照相机的数据采集和记录系统、全球定位系统接收机,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。移动式扫描系统具有如下优点(于辉,2016):

能够直接获取被测目标的三维点云数据;可连续快速扫描;效率高,速度快。但是,该系统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(500万元以上),只有少数地区和部门使用。

固定式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。二者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。这些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。

(3)手持型激光扫描系统。这是一种便携式的激光测距系统,可以精确地给出物体的长度、面积、体积测量,可以帮助用户在数秒内快速地测得精确、可靠的结果。应用范围包括古建筑重建、建筑测量、洞穴测量和液面测量等。此类型的仪器配有联机软件和反射片。

## 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,大概可分为以下四种类型:

(1)短距离激光扫描仪。此类扫描仪最长扫描距离只有几米,一般最佳扫描距离为0.6~1.2 m,通常主要用于小型模具的量测。不但扫描速度快且精确度较高,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均属于此类扫描仪(王勋,2015)。

(2)中距离激光扫描仪。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(张会霞,2010)。

(3)长距离激光扫描仪。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。

(4)机载(星载)激光扫描仪。最长扫描距离大于1 km,系统由激光扫描仪、差分全球定位系统、惯性导航系统、成像装置、计算及数据采集、记录设备、处理软件及电源构成。机载激光扫描系统一般采用直升机或固定翼飞机做平台,应用激光扫描仪实时动态全球定位系统对地面进行高精度、准确的实时测量。

## 3. 依据扫描仪成像方式划分

按照扫描仪成像方式分为以下三种类型(王勋,2015):

(1)全景式扫描。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竖直方向扫描,同时利用伺服马达驱动仪器绕其中心轴旋转。

(2)相机式扫描。它与摄影测量的相机类似,适用于室外物体扫描,特别是长距离的扫描。

(3)混合型扫描。它的水平轴系统旋转不受任何的限制,垂直旋转受镜面的局限,集成了上述两种类型的优点。

#### 4. 依据扫描仪测距原理划分

依据激光测距的原理,可以将扫描仪划分成脉冲式、相位式、激光三角式、脉冲-相位式四种类型。

#### 1.2.2 特点

传统的测量设备主要是采用单点测量获取三维坐标信息。与传统的测量技术手段相比,三维激光测量技术是现代测绘发展的新技术之一,也是一项新兴的获取空间数据的方式。它能够快速、连续和自动地采集物体表面的三维数据信息,即点云数据,并且拥有许多独特的优势。它的工作过程就是不断地采集和处理信息,并通过具有一定分辨率的三维数据点组成的点云图来表示物体表面的采样结果。三维激光扫描技术具有以下特点:

(1)非接触测量。三维激光扫描技术采用非接触扫描目标的方式进行测量,无须反射棱镜,对扫描目标物体不需要进行任何表面处理,直接采集物体表面的三维数据,所采集的数据完全真实可靠。可以用于解决危险目标、环境(或柔性目标)及人员难以企及的情况,具有传统测量方式难以完成的技术优势。

(2)数据采样率高。目前,三维激光扫描仪采样点速率可达到每秒百万点,可见采样速率是传统测量方式难以比拟的。

(3)主动发射扫描光源。三维激光扫描技术采用主动发射扫描光源(激光),通过探测自身发射的激光回波信号来获取目标物体的数据信息。因此,在扫描过程中,可以实现不受扫描环境的时间和空间约束,可以全天候作业,不受光线的影响。工作效率高,有效工作时间长。

(4)高分辨率、高精度。三维激光扫描技术可以快速、高精度获取海量点云数据,可以对扫描目标进行高密度的三维数据采集,从而达到高分辨率的目的。单点精度可达 2 mm,间隔最小 1 mm。

(5)数字化采集,兼容性好。三维激光扫描技术所采集的数据是直接获取的数字信号,具有全数字特征,易于后期处理及输出。用户界面友好的后处理软件能够与其他常用软件进行数据交换及共享。

(6)可与外置数码相机、全球定位系统(Global Positioning System,GPS)配合使用。这些功能大大扩展了三维激光扫描技术的使用范围,对信息的获取更加全面、准确。外置数码相机的使用,增强了彩色信息的采集,使扫描获取的目标信息更加全面。全球定位系统的应用,使得三维激光扫描技术的应用范围更加广泛,与工程的结合更加紧密,进一步提高了测量数据的准确性。

(7)结构紧凑、防护能力强,适合野外使用。目前常用的扫描设备一般具有体积小、重量轻、防水、防潮,对使用条件要求不高,环境适应能力强,适于野外使用等特点。

(8)可直接生成三维空间结果。生成的结果数据直观,在进行空间三维坐标测量的同时,获取目标表面的激光强度信号和真彩色信息,可以直接在点云上获取三维坐标、距离、方位角等,并且可应用于其他三维设计软件。

(9)全景化的扫描。目前水平扫描视场角可实现 $360^{\circ}$ ,垂直扫描视场角可达到 $320^{\circ}$ 。更加适合复杂的测量环境,提高扫描效率。

(10)激光的穿透性。激光的穿透特性使得地面三维激光扫描系统获取的采样点能描述目标表面不同层面的几何信息。它可以通过改变激光束的波长,穿透一些比较特殊的物质,如水、玻璃及低密度植被等,激光的这种特性使透过玻璃、水面,以及穿过低密度植被的采集成为可能。奥地利 Riegl 公司的 V 系列扫描仪基于独一无二的数字化回波和在线波形分析功能,实现超长测距能力。其中 VZ-4000 甚至可以在沙尘、雾天、雨天、雪天等能见度较低的情况下使用,并进行多重目标回波的识别,在矿山等困难环境下也可轻松使用。

### § 1.3 三维激光扫描技术应用领域

随着三维激光扫描测量技术、三维建模算法和软件的研究及扫描设备硬件环境的不断发展,三维激光扫描技术应用领域日益扩大,逐渐从科学研究进入人们的日常生活。目前,应用领域主要有建筑设计、城市规划、土木工程、工厂改造、室内设计、建筑监测、文物古迹保护、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(李智临,2012)。主要有以下几方面的应用:

(1)各种产品和项目的战略规划、虚拟现实、系统仿真、实效推演及相关的分析和评估工作。例如,工业领域内的模具设计和加工、汽车检测、质量监控及技术改进等;对时下流行的反恐领域,可以用于地形测绘、监视侦查、灾害评估;对犯罪现场或者交通事故现场进行相关反演,生成现场模拟图;动态监测高危现场,如森林火灾、核电站的灾害预警和现场监测等。

(2)实物原始结构形态及三维数据的现场采集、还原改进、三维逆向重构、体积计量、面积计量、距离计量、角度计量、结构分析、校验正向设计、逆向反求、结构性测试等。例如,考古测量中的文物修复、古迹保护、赝品成像、遗址测绘及建立虚拟模型、土石方计算、现场影像记录、城市环保评估,以及模拟三维城市框架等。

(3)工程规划、管道布线、评估方案、三维可视化操作、校验等工程改造项目。例如,河道、铁路、公路、地基、管道线路测绘,竣工测量,城市固定资产管理,城市环保影响研究,虚拟城市及建筑物模拟,实景制图等工程项目。

(4)变形监测、维修检测、强度分析、加载分析等监测项目。例如,地质领域的边坡稳定性监测、矿场勘测及发展分析、地表植被测绘、废料处置测量、回收监控测量等。

(5) 虚拟现实应用或可视化管理。如虚拟设计、制造、视图等应用。

(6) 工程项目的无纸化二维制图还原。如为老旧设施的重建提供城市大比例尺 GIS 数据源等。

(7) 森林和农业资源调查。三维激光扫描仪对森林进行扫描后,通过比较动态测量结果可以了解森林的局部和整体动态变化。

## § 1.4 点云数据的获取及处理方法

### 1.4.1 点云数据的获取

三维激光扫描仪的主要构造是一台高速精确的激光测距仪,配上一组可以引导激光并以均匀角速度扫描的反射棱镜,集成 CCD 和仪器内部控制和校正系统等。其工作原理是:激光脉冲发射器周期地驱动激光二极管发射激光脉冲,然后由接收透镜接收目标表面后向反射信号,产生接收信号;利用稳定的石英时钟对发射与接收时间差作计数,根据激光发射和返回的时间差计算被测点与扫描仪的距离;同时根据水平方向和垂直方向的偏转同步测量每个激光脉冲的横向扫描角度观测值和纵向扫描角度观测值,然后实时计算被测点的三维坐标(彭维吉等,2013)。表 1.1 为常见三维激光扫描仪及其参数,其中大部分扫描仪仅仅是该公司一系列产品中的某一个型号。

### 1.4.2 点云数据预处理

三维激光扫描仪测量所得的数据量非常庞大,这些密集而连续的点数据一般被称为点云(point-cloud)。由于测量环境、被测物体的表面质量和对比度等影响,测量过程中产生噪声点是不可避免的,噪声点的存在使几何造型的质量明显下降。另外,大量的数据点也使整个点处理过程变得非常耗时,效率低下(金雯,2007)。该因素给工程技术人员带来很大的不便,因此需要在重构曲面前对数据点进行预处理。

#### 1. 点云拼接

点云数据处理时,坐标纠正(又称为坐标配准、点云拼接)是最主要的数据处理之一。由于目标物的复杂性,通常需要从不同方位扫描多个测站,才能把目标物扫描完整,每一测站扫描数据都有自己的坐标系统,三维模型的重构要求把不同测站的扫描数据纠正到统一的坐标系统下(张会霞,2010)。

在扫描区域中设置控制点或标靶点,使得相邻区域的扫描点云图上有三个以上的同名控制点或标靶点,通过控制点的强制拟合,将相邻的扫描数据统一到同一个坐标系下,该过程称为坐标纠正。每一测站获得的扫描数据都以与本测站及扫

扫描仪的位置和姿态有关的仪器坐标系为基准,需要解决的坐标变换参数共有7个:3个平移参数、3个旋转参数、1个尺度参数。目前,国内外对于点云数据的坐标配准的研究都比较多,也已经有成熟的软件,如 Cyclone、PolyWorks 软件。

表 1.1 常见三维激光扫描仪及其参数

三维激光扫描仪	型号及技术参数
	法如 Focus3D X330: 测量范围:0.6~330 m 测量速率高达 976 000 点/秒 距离精度:2 mm 垂直/水平视野:300°/360°
	Z+F IMAGER 5006h: 测量距离可达 79 m 数据获取速率:1 016 727 点/秒 线性误差(50 m 处):1 mm 垂直/水平视野:310°/360°
	Optech ILRIS-3D: 测距精度:3 mm 测距范围可达 1 500 m 数据采集率:2 000 点/秒 垂直/水平视野:40°/40°
	徠卡 ScanStation C10: 单次测量精度:点位 6 mm,距离 4 mm 范围:300 m@90%,134 m@18%反射率(最短 0.1 m) 扫描速率可达 50 000 点/秒,最大即时扫描速率 L 视场角:水平 360°,垂直 270°
	RIEGL VZ-4000: 超远距离可达 4 000 m 扫描视场角:60°×360°(垂直×水平) 激光发射频率高达 200 000 点/秒 高精度:15 mm
	徠卡 Nova MS50: 扫描精度:0.6 mm 扫描速率:300 m 内 1 000 点/秒 免棱镜测量距离长达 2 000 m

点云拼接的方法有以下几种:①基于标靶拼接;②基于点云拼接;③基于控制点拼接;④基于特征点云的混合拼接。

## 2. 点云降噪

三维激光扫描仪在扫描工作时,由于被测物体的位置、亮度、颜色等各种因素的影响,在测量过程中会产生如图 1.2 所示的脉冲噪声点,这些噪声点在数据预处理过程中会影响模型的精度,应予以消除。

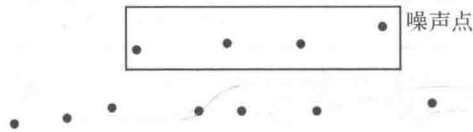


图 1.2 噪声点示意

在处理由随机误差产生的噪声点时,要充分考虑点云数据的分布特征,根据分布特征采用不同的噪声点处理方法。目前点云数据的分布特征主要有:①扫描线点云数据;②阵列式点云数据;③三角化点云数据;④散乱点云数据。第一种数据属于部分有序数据,第二种和第三种数据属于有序数据。这三种形式的点云数据的数据点之间存在拓扑关系,采用平滑滤波的方法就可以进行去噪处理。常用的滤波方法有高斯滤波、中值滤波、平均滤波。对于散乱点云数据,由于数据点之间没有建立拓扑关系,目前还没有一种快速、有效的方法。

## 3. 数据缩减

三维激光扫描仪测量的点云有时比较密,如零件扫描测量的点距一般为 1 mm 左右,即使是在平面上也同样会测得几兆的数据点。但事实上,特征点位于曲率变化较大的曲面上,1 条线只需要 2 个点确定,1 个平面仅需要 3 个点就够了。扫描得到的数据点远远超过重构几何模型所需的数据点,它不仅给空间带来极大的浪费,而且在时间上也花费了多余时间。因此,对于三维激光扫描得到的点云数据进行缩减是很有必要的。

数据缩减是对密集的点云数据进行缩减,从而实现点云数据量的缩小。通过数据缩减,可以极大地提高点云数据的处理效率。通常有两种方法进行数据缩减:

(1) 在数据获取时对点云数据进行简化。根据目标物体的形状以及分辨率的要求,设置不同的采样间隔来简化数据,同时使相邻测站没有太大的重叠。这种方法效果明显,但会大大降低分辨率。

(2) 在正常采集数据的基础上,利用一些算法进行缩减。常用的数据缩减算法有基于德洛奈(Delaunay)三角化的数据缩减算法、基于八叉树的数据缩减算法、点云数据的直接缩减算法。

## 4. 区域分割

在曲面重构中,实际的曲面模型往往含有多个曲面几何特征,即由多张曲面组成。如果对使用激光法测量的点云数据直接进行拟合,将会造成曲面模型的数学

表示和拟合算法处理的难度加大,甚至无法用较简单的数学表达式描述曲面模型。对曲面进行区域分割,可以保证每个区域几何特征单一,不仅在重构曲面或曲面局部修改时,能用简单的数学模型表示,而且还能提高曲面模型重构的效率(金雯,2007)。

区域分割的主要目的是检测出数据点中某一指标值变化较大的点,如 $Z$ 坐标值或曲率值。因为这些点可以按照指定的要求确定某一区域的边界,将点云数据分割成多个区域。由于每个区域具有单一的几何特征,可用较为简单的数学方程来建立模型,以此重构出单张曲面。

曲线的边晃点一般可分为阶跃边界、褶皱边界和光滑边界,如图 1.3 所示。

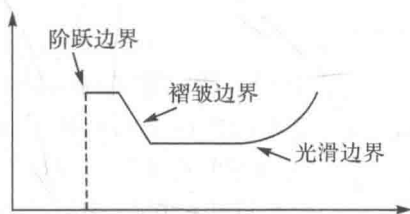


图 1.3 三类曲线边界点

## § 1.5 点云的三维建模技术

目前,国外的专业建模软件应用较多,国内的软件开发刚刚起步,数量较少并且市场占有率较低。下面简要介绍部分专业建模软件、相关插件软件与模型渲染软件。

### 1.5.1 Geomagic Studio

Geomagic Studio 是 Geomagic 公司产品的一款逆向软件,可根据任何实物零部件通过扫描点点云自动生成准确的数字模型。作为自动化逆向工程软件,Geomagic Studio 还为新兴应用提供了理想的选择,如定制设备大批量生产、即定即造的生产模式以及原始零部件的自动重造。Geomagic Studio 可以为 CAD、CAE 和 CAM 工具提供完美补充,可以输出行业标准格式,包括 STL、IGES、STEP 和 CAD 等众多文件格式。

Geomagic Studio 主要功能有:自动将点云数据转换为多边形;快速减少多边形数目;把多边形转换为 NURBS 曲面;曲面分析(公差分析等);输出与 CAD、CAM 和 CAE 匹配的档案格式(IGS、STL、DXF 等)(袁根华,2011)。

### 1.5.2 SketchUp

SketchUp 是一套直接面向设计方案创作过程的设计工具,其创作过程不仅能



够充分表达设计师的思想,而且完全满足与客户即时交流的需要。它使设计师可以直接在计算机上进行十分直观的构思,是三维建筑设计方案创作的优秀工具。

SketchUp 是一个极受欢迎且易于使用的三维设计软件,官方网站将它比作电子设计中的“铅笔”(黄检文,2016)。它的主要卖点就是使用简便,人人都可以快速上手。并且用户可以将使用 SketchUp 创建的三维模型直接输出至 Google Earth 里。@Last Software 公司成立于 2000 年,规模较小,却以 SketchUp 而闻名。SketchUp 软件有着丰富的组件资源,能让设计者更加直观地进行框架构思,操作风格简洁,命令简单易懂,是一款不错的三维建模软件,在建筑领域有着广泛的运用。

### 1.5.3 Imageware

Imageware 由美国 EDS 公司出品,后被德国 Siemens PLM Software 收购,现在并入旗下的 NX 产品线,是最著名的逆向工程软件。Imageware 因其强大的点云处理能力、曲面编辑能力和 A 级曲面的构建能力而被广泛应用于汽车、航空、航天、消费家电、模具、计算机零部件等设计与制造领域。

### 1.5.4 Pro/Engineer

Pro/Engineer 操作软件是美国参数技术公司(PTC)旗下的 CAD、CAM 和 CAE 一体化的三维软件。Pro/Engineer 软件以参数化著称,是参数化技术的最早应用者,在目前的三维造型软件领域中占有重要地位。Pro/Engineer 作为当今世界机械领域 CAD、CAE 和 CAM 的新标准而得到业界的认可和推广,是现今主流的 CAD、CAM 和 CAE 软件之一,特别是在国内产品设计领域占据重要位置(王治雄,2010)。

Pro/Engineer 首先提出了参数化设计的概念,并且采用了单一数据库来解决特征的相关性问题。另外,它采用模块化方式,用户可以根据自身的需要进行选择,而不必安装所有模块。Pro/Engineer 的基于特征方式,能够将设计至生产全过程集成到一起,实现并行工程设计。它不但可以应用于工作站,而且也可以应用到单机上。

### 1.5.5 Pointools

Pointools 软件是配合三维激光扫描仪进行后处理应用的产品,它实现了与 AutoCAD、SketchUp 等软件的无缝结合。用户能够利用它在 AutoCAD 和 SketchUp 等环境中输入海量的三维激光扫描数据和数码影像数据,并对其进行处理。利用软件功能,可以对点云进行隐藏或显示操作,为三维环境下的数据处理提供了方便。Pointools 软件支持点捕捉功能,甚至可以精确辨认三维坐标中的每个单独点。利用这些信息,通过标准的 AutoCAD 命令可直接提取扫描物体的精确几何特性。