

# 矿用三维激光数字 测量原理及其工程应用

Principle and Application of 3D Laser Digital  
Surveying Technology in Mine Engineering

赵兴东 徐帅 编著 ●



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

本书内容源自国家自然科学基金资助项目 (51174044) :

“基于三维激光扫描的地下金属矿采场顶板块体识别技术研究”

# 矿用三维激光数字测量 原理及其工程应用

赵兴东 徐 帅 编著

北 京

冶金工业出版社

2016

## 内 容 提 要

本书是在查阅大量国内外研究文献的基础上,结合作者近些年在不同地下岩体工程采集的大量点云数据进行预处理、曲面重构及其工程应用(三维地质建模、空区探测、采场验收、爆破效果分析、损失贫化统计、岩体结构面识别以及岩体稳定性分析等)最新研究成果编著而成,内容翔实、丰富,对包含地下金属矿床开采在内的诸多地下岩体工程等三维地质模型建立、开挖工程量统计、岩体结构面识别、岩体稳定性分析等具有重要的技术指导作用,同时也为地下金属矿床开采数字化信息采集提供基础硬件支持。

本书可作为三维激光数字测量软件、硬件开发人员的重要参考资料,也可作为采矿工程、地铁工程、铁路工程、隧道工程、水利工程、测绘工程等应用领域的工程技术人员、科研院所科技人员和高等院校采矿工程专业师生的教材和参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

矿用三维激光数字测量原理及其工程应用/赵兴东,  
徐帅编著. —北京:冶金工业出版社, 2016. 1  
ISBN 978-7-5024-7181-1

I. ①矿… II. ①赵… ②徐… III. ①矿山测量—  
数字式测量仪器—研究 IV. ①TD17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 021984 号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 刘小峰 李鑫雨 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7181-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 1 月第 1 版, 2016 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12.75 印张; 246 千字; 193 页

45.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

# 前 言

随着数字矿山建设及测绘技术的发展，如何有效快速地获取矿山数字化信息，并以此为基础建立矿山真实三维空间模型及其工程应用，是众多矿山工程技术人员急需解决的问题。随着激光测距技术的发展，目前许多国家针对不同工程应用领域已经研发了多种不同功能的三维激光扫描仪 (3D Laser Scanning)，国内外矿山主要将其用于采空区扫描及辅助采矿设计。编著者认为这仅仅是应用激光测量的单一测距、建模功能，而在所采集的海量点云数据库中，蕴含着丰富的岩体数字测量信息宝藏，尚未得到有效开发；随着激光测距精度的不断提高、数据采集方式的不断开发、步进电机及自控技术的不断进步，三维激光数字测量技术势必成为未来矿山工程及岩体工程非常重要的设计基础及工程灾害防控的“利器”。因此，本书将“三维激光扫描技术”定义为“三维激光数字测量技术 (3D Laser Digital Surveying Technique, LDST)”。

三维激光数字测量技术，是20世纪60年代中期在激光测距基础上发展起来的一项新兴测绘技术，是继GPS空间定位测量系统之后的又一项测绘技术新突破。三维激光数字测量技术具有快速性、非接触性、主动性，实时获取空间点云数据具有高密度、高精度等特点。应用三维激光数字测量技术，能够全方位、高分辨率地获取被量测对象表面每一个点云的三维空间坐标数据，并以此为基础，通过对点云数据预处理、点云数据三维空间曲面重构，为构建出被测对象的真实三维空间模型提供了一种全新的技术手段。在此基础上，通过对真实三维空间模型的数据挖掘与开发，全新地解决矿山真实三维模型建立、采场

验收、采空区探测、采矿方法设计、损失贫化估算、爆破效果评估、变形监测、岩体结构面识别、岩体稳定性分析等诸多采矿技术难题，能够满足不同专业矿山工程技术人员的生产需求，已经逐渐成为采矿工程技术人员、广大科研人员重要的研究工具，并逐渐取代一些传统的采矿测绘手段，为采矿工程设计与科学研究提供了更准确的数据基础。

本书系统地介绍了三维激光数字测量技术的发展现状和发展趋势、三维激光数字测量原理及工作方式、点云数据结构特征、预处理、三维可视化、曲面重构及其工程应用。本书权作抛砖引玉，期待未来三维激光数字测量技术的进一步应用和发展。

在成书过程中，参阅了大量的国内外有关三维激光测量仪器研发、点云数据处理、三维空间建模及其应用开发等方面的文献资料，在此表示由衷的感谢。同时，感谢硕士研究生赵子乔、万宏华、赵一凡等做的大量研发工作，为本书的成稿奠定基础。基金委为本书提供大量的帮助和支持，在此表示感谢。

由于作者对三维激光数字测量技术及其工程应用知识面所限，书中不足之处，恳请广大读者批评指正。

赵兴东 徐帅

2015年11月于沈阳东北大学

# 目 录

1 绪论 .....	1
1.1 三维激光数字测量技术发展现状 .....	1
1.2 点云数据预处理及其三维可视化研究进展 .....	3
1.3 矿用三维激光数字测量发展现状 .....	7
2 三维激光数字测量仪工作原理及工作方式 .....	8
2.1 三维激光数字测量仪简介 .....	8
2.2 三维激光数字测量仪工作方式 .....	9
2.2.1 钻孔量测 .....	9
2.2.2 手持式 .....	10
2.2.3 轨道式 .....	12
2.2.4 测站式 .....	13
2.2.5 车载式 .....	14
2.2.6 机载式 .....	16
2.3 三维激光数字测量仪工作原理 .....	18
2.4 三维激光数字测量仪检定方法 .....	19
2.5 误差来源分析 .....	21
2.5.1 角度测量 .....	22
2.5.2 距离测量加常数 .....	22
2.5.3 外界气象环境条件引起的误差 .....	23
2.5.4 反射面不同特性对测距结果的影响 .....	23
3 点云数据结构特征及分类 .....	25
3.1 三维激光测量点云数据结构 .....	25
3.2 常用点云数据格式 .....	26
3.2.1 PTX 文件 .....	26
3.2.2 PTC 文件 .....	26
3.2.3 PCD 文件 .....	27
3.2.4 DXF 文件 .....	30

3.2.5	PLY 文件	33
3.3	点云数据结构特征	34
3.4	点云数据结构分类	34
4	点云数据预处理	36
4.1	点云噪声	36
4.1.1	点云数据噪声来源	36
4.1.2	常用的点云去噪算法	37
4.1.3	离群点移除	38
4.2	点云精简	39
4.2.1	点云精简方法	39
4.2.2	常用的散乱点云精简方法	39
4.2.3	点云精简算法评价	43
4.3	点云滤波	45
4.3.1	数学形态学滤波算法	45
4.3.2	移动窗口滤波算法	45
4.3.3	基于逐步加密 TIN 的滤波算法	46
4.3.4	基于坡度变化的滤波算法	46
4.3.5	移动曲面滤波算法	47
4.3.6	迭代最小二乘滤波算法	47
4.3.7	基于 kd-tree 的无序点云去噪算法	49
4.3.8	体素化滤波	51
4.3.9	点云精简滤波算例	53
4.4	滤波效果分析	54
4.4.1	定性分析	54
4.4.2	定量分析	54
4.5	小结	56
5	点云数据三维可视化及曲面重构	57
5.1	点云数据结构特征描述与提取	57
5.1.1	特征点提取	58
5.1.2	边界点的提取	61
5.1.3	特征线提取	63
5.1.4	特征线拟合	64
5.2	点云数据配准	67

5.2.1	计算机图形学图形变换基础 .....	68
5.2.2	基于 PCL 的点云配准 .....	69
5.2.3	ICP 算法 .....	72
5.2.4	基于 ICP 算法的精细配准 .....	75
5.2.5	利用标定物拼接 .....	77
5.2.6	点云配准示例 .....	78
5.3	点云数据三维可视化 .....	82
5.3.1	点云曲面三维重构 .....	82
5.3.2	NURBS 曲面拼接传统算法 .....	91
5.3.3	点云曲面三维重构示例 .....	97
6	点云三维曲面建模及其工程应用 .....	99
6.1	采空区探测及体积计算 .....	99
6.1.1	体积计算原理 .....	99
6.1.2	体积计算处理流程 .....	105
6.1.3	体积计算 .....	108
6.1.4	地下采空区探测及体积计算实例 .....	111
6.2	岩体结构面识别 .....	119
6.2.1	图像分割 .....	119
6.2.2	拓扑关系建立 .....	124
6.2.3	岩体结构面识别 .....	130
6.2.4	岩体结构面识别实例 .....	133
6.3	地下开采爆破效果分析 .....	151
6.3.1	工程背景 .....	151
6.3.2	测试方案 .....	151
6.3.3	测试数据 .....	155
6.3.4	测试结果 .....	155
6.4	空场法损失贫化统计分析 .....	158
6.4.1	工程背景 .....	158
6.4.2	测试方案 .....	159
6.4.3	测试数据 .....	161
6.4.4	测试结果 .....	162
6.5	地下工程岩体稳定性分析 .....	163
6.5.1	某地下储油库三维模型构建 .....	163
6.5.2	某地下储油库三维建模方法 .....	164



6.5.3	某地下储油库的岩体稳定性分级 .....	167
6.5.4	三维激光数字测量结果与设计尺寸对比 .....	172
6.5.5	三维激光数字测量结果与数值分析结果对比 .....	173
6.5.6	基于数据对比的稳定性分析 .....	173
7	结束语 .....	183
	参考文献 .....	185

# 1 绪 论

随着现代科学技术的发展，数字化、信息化、智能化技术在矿山生产技术管理中越来越发挥重要的作用。目前，我国数字化矿山建设数据采集，主要是利用传统测绘技术（如：经纬仪、水准仪、全站仪、陀螺仪等）量测矿山数据信息，导致其主要采用离散、不连续的导线坐标数据进行建模，进而难以得到真实、完整、全面、连续并且相互关联的三维空间坐标数据，所建立的矿山三维模型不能够全面反映出真实矿山工程的“实景”，无法满足矿山安全生产技术要求。因此，如何运用现代数字化、信息化技术对矿山的采准工程、开采设计、采场验收、损失贫化计算、空区探测、岩体稳定性分析、变形监测等进行精确空间量测，是广大采矿工程技术人员急需解决的问题。

三维激光数字测量技术（三维激光扫描技术、激光雷达）能够全方位、精确地获取空间数据信息的技术，又称“实景复制技术”，是一种新型全自动高精度空间数据测量技术，通过高速三维激光数字测量的方法，以点云的形式大面积、高分辨率地快速量测被测对象表面的三维坐标、颜色、反射率等信息。与传统测量方法相比，三维激光数字测量技术采集数据不需要合作目标，能快速、准确地获取被测目标体的空间三维数据，具有高采样率、高精度、非接触性等特点。可以对复杂环境空间进行量测，并将各种复杂空间的三维空间数据完整的采集到计算机中，进行数据存储，进而重构出被测目标的三维空间模型，以及点、线、面、体等各种制图数据。三维激光数字测量仪是集激光测距、机电自动化、大数据快速采集分析处理的非接触测量技术，其特点是非接触性、量测速度快、自动化程度高、分辨率高、精度高、主动性、空间信息多样性、数据用途广泛性。

## 1.1 三维激光数字测量技术发展现状

随着三维激光数字测量技术在基础测绘、数字城市、工程测量、文物保护、变形监测、矿业工程、航空航天、汽车工程、3D 打印、地震监测等领域开始得到广泛的应用，该技术已经引起了广大科研人员的关注，三维激光扫描仪已经成为测绘仪器发展的重要方向。拓展三维激光扫描仪的应用范围，采用三维激光扫描仪提高现有测量手段的能力和精度成为测量领域的重要研究内容。利用三维激光数字测量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

维可视化数字模型，还可以迅速得到任意的距离、面积、体积的测量结果，省时又省力。

到 20 世纪 90 年代，激光测量技术获得了极大的发展，在很多领域取得了成功，激光测距技术是三维激光数字测量仪主要技术之一，激光测距的原理主要有基于脉冲测距法、干涉测距法、激光三角法、脉冲—相位测距法四种类型。目前，测绘领域所使用的三维激光数字测量仪主要是基于脉冲测距法，如 Leica 公司生产的 ScanStation C10 的三维激光数字测量仪，奥地利 RiegI 公司生产的 VZ-4000，加拿大 Optech 公司生产的 ILRIS-3D，澳大利亚的 I-Site8820 等三维激光数字测量仪；近距离三维激光数字测量仪主要采用干涉测距和激光三角法测距，如 Leica 公司的 HDS6200 三维激光数字测量仪采用相位式测距技术。法国 Mensi 公司的 S10 和 S25 型三维激光数字测量仪都使用激光三角法测距系统。

通常扫描仪的量程越长测距精度越低。在所有脉冲式激光扫描仪中，RiegI 的 VZ-4000 发射频率最高，扫描速度最快，高精度全景扫描 2min 即可完成；Optech 的脉冲频率最低。相位式扫描仪的扫描精度普遍较高（平均可达  $\pm 2\text{mm}@25\text{m}$ ），其中美国的 Surphaser 是所有扫描仪中激光发射频率最高的，可达 120 万点/s，其次是 Faro 的 97.6 万点/s。无论哪种扫描方式的仪器，其扫描速度会随所设定的激光发射频率而变化，太阳光和室外光线对扫描点数和精度影响不大。

第一个现代意义的激光扫描系统为 20 世纪 90 年代美国俄亥俄州立大学制图中心（CPM）开发的 GPSVan，它是一个可以自动和快速采集直接数字影像的陆地测量系统；美国 CYRAX 公司的 3D 测量技术着重于中远距离（50~200m）目标的测量应用；荷兰测量部门自 1988 年进行了地面固定激光扫描测量技术提取地形信息的研究；日本东京大学 1999 年进行了地面固定激光扫描系统的集成与试验。与此同时，一些测量设备公司已经推出了商用的三维激光扫描仪，如 Leica 公司的 ScanStation2 三维激光扫描仪；法如（FARO）公司推出的三维激光扫描系统 Laser ScanArm；加拿大 Optech 公司推出的三维激光扫描仪；美国天宝公司等的三维激光扫描仪已经可以直接输出目标点的大地坐标；加拿大卡尔加里大学和 GEOFIT 公司为高速公路测量而设计开发了 VISAT 系统；澳大利亚 GP 公司开发的边坡稳定雷达开创了全新的地面监测方式，并在神华准格尔能源公司的黑岱沟露天煤矿边坡稳定雷达系统（SSR）。目前，国外产品价格昂贵、技术壁垒严重，依然很难在国内矿山行业普及应用。

在国内，北京矿冶研究总院已研制出 BLSS-PE 矿用三维激光扫描测量系统，并已经在国内多家矿山应用。北京北科天绘公司研制出了 TM 系列的三维激光扫描仪；东北大学研制了三维激光数字测量仪（Instrument for 3D Laser Digital Surveying, ITLDS），主要包括 ITLDS-150 和 ITLDS-500 两种类型。与三维激光数字测量仪相配套的软件系统——岩体三维激光数字测量系统（Rockmass 3D Laser

Digital Surveying System, LDS) (软著登记号: 2014SR214972), 是一款专业的三维激光数字测量仪控制、岩体数字测量分析处理软件, 界面设计简洁美观, 普通用户可在短时间内迅速掌握软件的操作使用方法。软件具有强大的三维建模功能可直观展示采场、露天边坡和井巷工程结构, 数据可存储, 并且对硬件环境要求较低, 对软件环境具有良好的兼容性。

目前与三维激光数字测量相配套的软件有: 美国 Imageware 公司的 Sufac-erl0.0、英国 DelCAM 公司的 CopyCAD、英国 MDTV 公司的 STRIM and Surface Reconstruction、英国 Renishaw 公司的 TRACE, 还有德国 Leica 公司的 Cyclone, 美国 Trimble 的 Realworks, Geomatics 等。另外, 在一些流行的 CAD/CAM 集成系统中也开始集成了类似模块, 如 Uni-graphics 中的 PointCloud 功能、Pro/Engineering 中的 Pro/SCAN 功能、Cimatron90 中的 Reverse Engineering 功能模块等。其他的还如 SolidWorks 公司的 SolidWorks、Autodesk 公司的 AMD、UGS 公司的 UG、PTC 公司的 Pro/E、SDRC 公司的 IDEAS, Intergraph 公司的 SolidEdge、3D/Eye 公司的 Tri-spectives。

国内在三维激光数字测量软件处理方面也取得了一些成果, 如浙江大学推出了 Re-Soft 软件系统, 西安交通大学的 JbRe 软件系统。成都理工大学董秀军与黄润秋 (2006) 应用加拿大 Optech 公司生产的 ILRIS3D 三维激光扫描仪及其配套软件进行岩体结构面信息的采集获取方法研究。刘宏和娄国川等利用三维激光扫描技术对高边坡岩体结构进行调查。中国水利水电科学研究院的何秉顺与丁留谦等人应用三维激光扫描技术测量岩体结构面产状, 并对点云数据的后处理进行了较深入的研究。

尽管目前国内对于三维激光数字测量技术研究取得了一些进展, 但还存在一些问题: (1) 我国自行研发的三维激光数字测量仪还处在低端阶段, 所应用的激光测距部分还有电机部分仍然依靠进口; (2) 三维激光数字测量仪的测量控制系统和数据处理软件, 还主要依靠国外成熟的软件系统, 完全国内科研院所研发的系统比较少, 且不十分成熟, 与国外商业处理软件相比还存在很大差距; (3) 对于海量点云数据的存储、管理以及可视化, 还需要大量的人机交互或人工操作, 工作量大、耗时耗力, 因此, 迫切需要开发高效的点云数据压缩、点云数据配准和自动构建模型等算法。因此, 国内亟待研制出自主知识产权的硬件设备, 同时建立规范化的仪器性能指标检测体系, 并开发通用的功能强大的点云数据管理与处理分析软件。

## 1.2 点云数据预处理及其三维可视化研究进展

地球空间信息科学是以全球定位系统 (GPS)、地理信息系统 (GIS)、遥感 (RS) 等空间信息技术为主要内容, 并以计算机、通信等为主要技术支撑, 用于

采集、量测、分析、存储、管理、显示、传播和应用与地球和空间分布有关数据的一门综合和集成的信息科学和技术。三维激光数字测量系统与地球空间信息科学属于同类。通过应用三维激光数字测量仪连续、实时的采集了海量点云数据,其单个文件在几十兆、几百兆,甚至几个 G,点云数据的点数大约为几十万、几百万,甚至几十个亿,称此为点云库(Point Cloud Library, PCL)。常用的三维点云数据格式有 XYZ、PTS、TXT、PTX 等,这些数据类型都是 ASCII 格式,它们的格式一般都是由两个部分组成的,第一部分是头文件,第二部分是具体的三维点信息。另外还有二进制的 PLY、OBJ、DXF 这些点云格式,这些格式所包含的信息更为丰富,比如像素信息、面片信息等。

随着三维激光数字测量技术的发展,每秒的数据采集量可以达到几万个数据点,且这些数据点具有点云数据离散性特点。因此,如何有效地高速度、高密度地处理三维物体采集的数据,并保证其对任何几何对象的描述在精度上能够满足工程建模计算需求。这需要通过大型跨平台开源 C++ 编程库,对获取的海量点云数据进行滤波、分割、配准、检索、特征提取、曲面重建、可视化等处理,支持多种操作系统平台,可在 Windows、Linux、Android、Mac OS X、部分嵌入式实时系统上运行。

在对散乱数据进行精简、滤波、特征提取等处理过程中,需要获取数据点在其型面对应点处的单位法矢、微切平面及曲率值等信息,这就需要搜索数据点的  $k$  近邻,即在数据点集中寻找  $k$  个与该点欧氏距离最近的点。通常采取自顶向下,逐级划分的方式对空间数据进行分割,最有代表性的空间索引有:规则格网、四叉树、八叉树、kd 树、kdb 树、BSP 树、R 树、R+ 树等。其中,规则格网类型索引虽然比较简单,但是有着广泛的应用。四叉树、八叉树、kd 树、kdb 树、BSP 树、R 树等都可采取基于外存的空间索引。

根据精简点云采样分布形成的方式,可将现有精简点云的方法分为三类:迭代最优剔除、层次聚类、曲面重采样。不同的方法分别侧重减少原始点云与精简后点云之间的距离、曲率自适应、分布质量等方面。在曲率精简方法中,洪军利用包围盒法构造分割面,然后利用分割面将点云处理成扫描线结构,再利用角度、弦高联合准则法逐线精简;周绿使用了抛物面拟合法求解局部曲率,再根据曲率偏差对点云进行精简。在均匀精简方法中,万军通过以某一点定义采样立方体,求立方体内其余点到该点的距离,再根据平均距离和用户指定保留点的百分比进行精简,该方法由于没有预先对点云数据划分空间邻域,在检索采样立方体过程中,需要对全部点云数据进行判断。Song 等首先识别出尖锐特征采样点并予以保留,其余采样点依次按照影响度排序迭代去除。层次聚类方法具有计算效率高的优点,其缺点是不容易控制采样点的分布与误差。Lee 等采用非均匀八叉树对点云进行聚类并以法向变动控制八叉树细分,效率较高,但精简点云分布不均

匀。Yu 等利用 k-means 算法对点云进行层次分割,采用局部协方差分析控制聚类过程,虽然分布质量提高但无法精确指定采样点数目。因此,处理海量数据时计算量较大,且不能根据指定的点距精简点云。

对于点云数据结构特征提取的研究,国内外学者近年来研究岩体结构面特征提取,岩体结构面主要由光滑平面构成,提取特征点、线、面,为构造岩体三维空间结构模型提供了条件。George Vosselman 等人,对机载和地面三维激光数字测量仪获取的点云数据做了大量研究工作,通过语义提取较高水平的要素,然后对激光测量数据进行分割,以便属于同一平面的点聚集在一起。然后,把每一分割面,与不同要素的约束条件相比较确定这一面表示哪种要素,然后自动提取岩体结构特征要素。

从几何空间的拓扑连续性角度来对点云分割问题进行研究。将数据点之间的空间几何关系作为确定分割边界的阈值判断标准,一般将空间域的点云分割算法划分为:基于边界的分割技术、基于区域生长的分割技术,以及混合边界和区域生长的技术。基于边界的算法是将点集空间域中相对距离、曲率、法向量不连续或者突变的点作为分割的边界点。建立拓扑结构关系通常是指建立点云的邻域关系,首先将数据进行空间划分,再在划分后候选点所在的子空间中划分新的子空间。通常由空间划分建立拓扑结构的方法有栅格法、八叉树 (Octree) 法、kd 树 (k-dimensional tree) 法等。空间栅格法对空间密度均匀的点云数据有很好的划分,计算速度很快,实现简单。但该法中的栅格尺寸不好确定,如果点云数据的空间密度不均匀,则会造成很多无数据的空栅格,造成空间冗余且大大降低计算速度。八叉树法将三维空间依次划分成 8 个子空间,若某个子空间中包含的数据点数大于给定阈值,则对该子空间继续下一轮的划分,重复上述划分过程直到最小立方体内数据点数小于某个特定阈值或者立方体边长小于特定值。八叉树法的最小粒度(即点数阈值)较难确定,粒度较大时,可能某些结点的数据量比较大,导致后续的搜索效率仍然比较低;粒度较小时,剖分的深度增加需要较大的存储空间,效率也会降低。kd 树法最早由 Bentley 通过将二叉查找树扩展到高维空间提出,它在每一层划分时沿某一维将空间分成两部分,依此类推,当一个子树中的点数少于给定的阈值时结束划分。由于是二分空间,kd 树在邻域查找上比八叉树灵活,对几何结构有较强适应性,而且存储更为紧凑,有较高的搜索与查询效率,具有较大优势。

在地下巷道的三维重建流程中,点云配准在数据处理中处于首要作业部分,其核心的计算内容是解算具有一定重叠度的两幅点云数据之间的最优坐标转换关系,所涉及的参数一般包括两个点云基站坐标系之间的旋转、平移和缩放,并要考虑到在计算效率、配准可靠性以及配准模型适用性等方面取得平衡。点云配准技术主要有两大方式:(1)通过高精度定标的仪器获取多视点云数据,根据它们

之间的原始变换关系,来进行点云数据间的配准计算;(2)利用点云数据中的变换信息(如相邻测区公共靶标的信息)或在点云数据获取的同时引入的其他信息(如由全站仪建立的控制坐标系),对三维数据进行配准计算。

点云配准通常是在相邻的2个测站公共区域安置3个或3个以上靶标进行扫描,按照摄影测量影像匹配的原理,对相邻区域中的同一靶标组成的同名点对,计算点云配准参数,完成相邻点云的配准。点云数据配准具有代表性的算法包括基于最近点迭代的ICP算法和基于表面几何特征的配准算法。ICP算法需要有较好的配准初始估计值,否则在迭代计算过程中容易陷入局部最优解,而影响配准结果的准确性;基于表面几何特征的算法配准效率较高,但如果几何特征条件不充分,会导致虚配准情况的产生,使得配准结果的可靠性降低。在实际应用中,为了保证配准结果的质量,通常将两种方法混合使用,以几何特征为预配准条件,然后再进行配准的迭代计算。

三维点云数据配准面临许多实际困难:(1)测站到扫描对象的距离越大,测距精度越低,而且采样分辨率低,产生噪声就大;(2)存在严重的遮挡和自遮挡;(3)场景构造复杂,有平面结构,也有复杂的曲面结构;(4)设站次数的增加,使得点云数据量相当庞大。其中,测距是影响扫描精度的重要原因,对点云配准精度的影响很大。

激光点云数据通常只能对地物进行可视化描述,数据中既包含了能突出地物表面特征的关键点,也包含了大量的冗余数据。为提高数据的使用效率,并清晰描述地物表面的几何结构和纹理特征,需要对点云数据进行几何重建,发点云模型化的后续应用软件,才能发挥三维激光资料的功效。目前,实现点云可视化的途径有两个,一个途径是直接使用现有软件,多数企业一般这样做,一般三维激光扫描仪器均自带控制软件及点云处理软件,控制软件大多有扫描预览功能,均可以实现可视化,另外还有商业软件例如Polywork、Geomagic等这些软件多用于点云的逆向工程产品建模方面;另一种途径是高校及研究院所喜欢的,通过软件开发实现点云可视化,例如北京矿冶研究总院就开发了三维激光扫描仪及相关软件。

几何重建是用高级的几何特征,如线、面、多边形网格和几何基元(体)来对点云数据进行表面模型或者实体模型的拟合。(1)基于特征线的方法:通过拟合所测巷道立面的边界点云数据,可以得到巷道外部特征的完整轮廓线,从而实现由点云数据描述巷道外部形态到轮廓线表达巷道外部特征的转换。(2)基于特征面的方法:是利用平面、多项次曲线或曲面来构造目标地物的表面模型或者实体模型。具有代表性的数学模型包括:贝塞尔曲面和非均匀有理B样条函数和径向基函数。(3)基于多边形网格(Polymesh Mesh)的方法。(4)基于几何基元的方法:利用几何实体对地物表面规则的几何结构点云数据进行拟合。



按照构造简化逼近模型的方式,简化算法可以分为细化提升(refinement)和抽取简化(decimation)两大类。细化提升算法从一个简单的初始逼近模型开始,逐渐向其中增加元素,直至该逼近模型达到逼近误差的要求;而抽取简化算法则是从原始模型开始,逐渐删除一些元素,直到逼近误差达到允许的上限,对于形状复杂的三维网格模型,构造它的初始逼近网格并不容易,因此,细化提升的方法应用得比较少。

### 1.3 矿用三维激光数字测量发展现状

金属矿床地下开采形成的采空区往往致使矿山开采条件恶化,相邻作业区采场和巷道维护困难,甚至引发井下大面积冒落、岩移和地表塌陷等灾害,对矿山安全生产构成严重威胁。准确获取采空区三维空间形态、位置及体积等空间信息,对实现采空区的灾变监控与治理具有重要意义。目前国内外对采空区的探测技术主要包括工程钻探、地球物理勘探、三维激光探测等技术。其中,三维激光探测技术能精确获取采空区边界的点云空间信息,利用其高精度的探测成果并借助第三方矿山建模软件可开展采空区的三维精确建模,采场回采贫化损失等指标可视化精确计算,开采爆破设计与控制以及采空区稳定性分析等方面的研究工作。尽管目前国内外有一些矿山建模软件具有一定的采空区三维建模功能,如SURPAC和DIMINE等,但集成采空区信息管理、三维建模及分析管理等功能的专门采空区建模及信息管理软件尚未研发,该领域研究具有广阔的应用前景。空区监测系统(cavity monitoring system, CMS)是一种可用于地下矿山采空区的激光扫描探测的设备。通过连接杆将激光扫描头伸入空区,扫描头中心坐标可通过连接杆的两个靶标坐标换算获得,探测时扫描头 $360^\circ$ 旋转并连续测量收集测点距离和角度。每扫描完一圈后,扫描头将自动抬高预设角度并进行新一圈扫描,直至完成全部的探测工作为止。通过扫描中心坐标、扫描角度和测量距离这三个参数精准控制,确保了探测的数据为精确的采空区边界点云空间信息。

本书以三维激光数字测量技术连续实时采集的采空区边界点云空间信息数据为基础,通过点云数据精简、滤波、分割、配准、检索、特征提取、曲面重建、可视化等处理研究采空区三维模型构建及三维可视化、采空区体积和顶板暴露面积计算,以及采空区信息管理等关键技术,以便为研制三维激光数字测量空间信息三维建模集成系统提供依据。



## 2 三维激光数字测量仪 工作原理及工作方式

### 2.1 三维激光数字测量仪简介

三维激光数字测量技术是一种集成了激光测距、自动控制等高新技术的新型测绘技术。三维激光数字测量仪作为三维激光测量系统主要组成部分之一，由激光发射器、接收器、时间计数器、角度编码器、倾斜补偿器、控制电路以及相关配套软件等组成。

三维激光测量仪是由目标激光测距仪和角度测量仪组合而成自动化快速测量系统，激光测距配合角度测量获得测点的极坐标，且可以配合相机获得被测对象的颜色信息。在三维激光数字测量仪器内部，数据测量控制模块调整并测量每个脉冲激光的角度，针对每一个测量点可测得测站至被测点的斜距，再配合测量得到的水平和垂直方向角度，可以得到每一个量测点与测站的空间相对坐标。如图 2-1 所示为三维激光数字测量仪的系统组成。

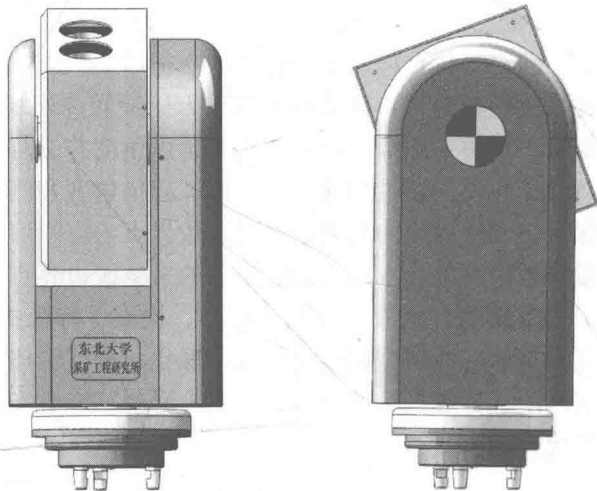


图 2-1 三维激光数字测量仪

在地下金属矿采场（巷道）架设三维激光数字测量仪，通过激光测距传感器和角度传感器连续采集到采场（巷道）表面岩体的量测空间距离数据信息称为点云（Point Cloud），是在同一空间坐标参考体系下表达目标空间分布和目标