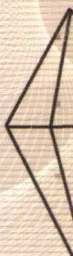
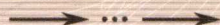
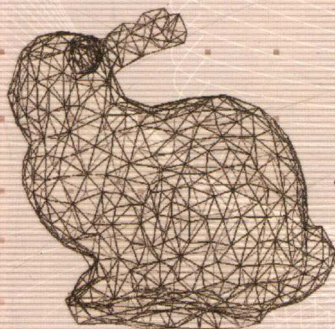
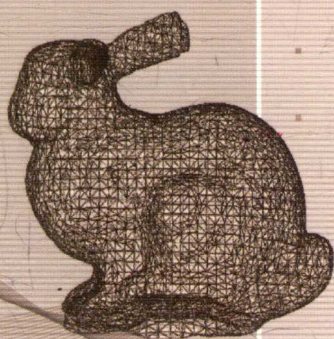


散乱数据点三维重构 关键问题研究

*Study on Key Issues of Scattered Data
Three-dimensional Reconstruction*

李晋江
董付国 编著
安志勇



<http://www.phei.com.cn>

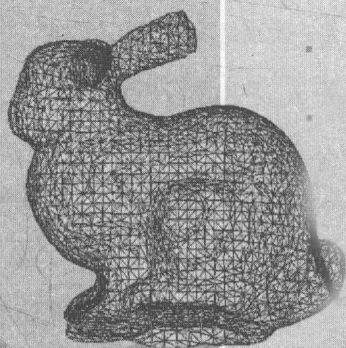


电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

散乱数据点三维重构 关键问题研究

*Study on Key Issues of Scattered Datas
Three-dimensional Reconstruction*

李晋江
董付国 编著
安志勇



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

三维重构是指对获取的散乱数据建立其拓扑结构,在此基础上对其进行曲面插值和曲面拟合,最后得到真实物体在计算机内的表示。目前,三维数据获取的能力和精度都有了很大的提高,这为实现物体的三维重构提供了坚实的基础。三维重构是逆向工程、人机交互可视化等的关键技术,在制造业、虚拟现实、科学计算可视化、文物保护等领域有广泛的应用。本书对实现物体高精度三维重构中的数据获取与去噪、数据的配准对齐、孔洞修复及数据压缩、表面建模等关键问题进行了论述。

本书适合从事三维重构、逆向工程等相关领域的科研人员阅读,也可作为高等学校相关专业研究生的教学用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

散乱数据点三维重构关键问题研究 / 李晋江,董付国,安志勇编著. —北京:电子工业出版社,2011.9

ISBN 978-7-121-14419-6

I. ①散… II. ①李… ②董… ③安… III. ①三维动画软件—研究 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第169254号

责任编辑:张 剑(zhang@phei.com.cn)

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:12.25 字数:188千字

印 次:2011年9月第1次印刷

定 价:58.00元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言



目前三维数据获取的能力和精度都有了很大的提高,这为实现物体的三维重构提供了坚实的基础。三维重构是指对获取的散乱数据建立其拓扑结构,在此基础上对其进行曲面插值和曲面拟合,最后得到真实物体在计算机内的表示。三维重构是逆向工程、人机交互可视化等的关键技术,在制造业、虚拟现实、科学计算可视化、文物保护等领域均有广泛的应用。在现实应用中,实现物体高精度的三维重构,需要进行数据获取与去噪、数据的配准对齐、孔洞修复及数据压缩、表面建模等关键处理,本书将对这些关键问题进行论述。

本书共分7章:第一章为绪论,第二章介绍相关几何知识,第三章论述了点云数据光顺去噪问题,第四章讨论了点云数据的对齐配准,第五章对点云数据中的孔洞修复问题进行了阐述,第六章讨论了网格的简化与压缩,第七章讨论了点云数据曲面重建中的一些相关技术。

本书由李晋江主持撰写,还有6位学者参加了写作和绘图整理工作。其中,董付国编写了本书的第二章;安志勇编写了本书的第三章;王金鹏编写了本书的第一章;李业伟编写了本书的第六章;王勇亮和李洪娟编写了本书的第七章;李晋江负责本书其余章节的编写,并对全书进行统稿。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(60970105)、山东省自然科学基金(ZR2009GQ005和ZR2010FM044)、山东省优秀中青年科学家奖励基金(2008BS01026和BS2009DX038)和山东省教育厅科技计

划（J08LJ06）的资助。

范辉教授、原达教授和华臻教授自始至终热情关心和积极支持本书的创作，并提出许多宝贵意见，在此谨向他们致以深切的谢意。

我个人深切地感谢我的父母、兄弟们，他们对我无私的关爱和鼓励为我在学业上的进步提供了可靠保证；感谢我的妻子和女儿，她们给了我极大的精神支持。

由于写作时间和作者水平有限，书中难免存在缺点和错误，敬请批评、指正和帮助。

李晋江

2011年6月5日于烟台

目 录



第一章 绪论	1
1.1 三维数据点的获取.....	1
1.2 三维重构关键技术.....	8
1.2.1 数据的去噪.....	8
1.2.2 数据的配准对齐.....	10
1.2.3 孔洞修复.....	12
1.2.4 数据的简化与压缩.....	13
1.2.5 表面重建.....	16
1.3 三维重构技术应用.....	18
1.4 本书的章节安排.....	22
第二章 相关几何知识	23
2.1 空间曲面的几何.....	23
2.1.1 参数曲线的切矢量、弧长、法矢量和曲率.....	24
2.1.2 参数曲面的切平面和法矢量.....	29
2.2 局部邻域的选取.....	36
2.2.1 K 邻域.....	36
2.2.2 BSP 邻域.....	38
2.2.3 Voronoi 邻域.....	38
2.3 DELAUNAY 三角化.....	39
2.3.1 平面点的三角化.....	41



2.3.2	三维点的三角化	45
2.4	离散点的法矢计算	47
2.5	离散点的曲率计算	51
第三章	数据点的光顺去噪	59
3.1	LAPLAEC 方法	60
3.2	平均曲率流方法	63
3.3	双边滤波方法	64
3.4	MLS 方法	66
3.5	MEANSHIFT 方法	68
3.6	基于顶点预测的方法	70
3.7	基于超小波的去噪方法	71
3.7.1	Curvelet 变换	72
3.7.2	Surfacelet 变换	73
3.7.3	基于 Curvelet 变换的去噪方法	75
3.7.4	基于 Surfacelet 变换的去噪方法	76
第四章	点云数据配准	78
4.1	基础知识	79
4.2	迭代最近点算法	82
4.2.1	基本 ICP 算法	82
4.2.2	SoftICP 算法	85
4.2.3	CICP 算法	86
4.3	基于几何特征的配准算法	87
4.4	基于 RANSAC 配准算法	89
4.5	基于遗传算法的配准	93
4.6	基于法矢的配准	97
4.7	基于曲率的配准	98

4.8	基于最小二乘法配准	99
第五章	孔洞修复	101
5.1	孔洞检测	102
5.2	三角剖分修复	103
5.3	基于偏微分方程的修复方法	103
5.4	基于径向基函数的修复方法	104
5.5	基于支持向量机的修复方法	105
5.6	基于遗传算法的修复方法	107
5.7	基于神经网络修复方法	108
第六章	数据点简化与压缩	110
6.1	网格简化常用方法	110
6.1.1	顶点聚类法 (Vertex Clustering)	111
6.1.2	顶点删除法 (Vertex Decimation)	113
6.1.3	边折叠法 (Edge Contraction)	114
6.1.4	重新布点法	115
6.1.5	小波方法 (Wavelet Methods)	116
6.2	基于二次误差的简化算法	116
6.3	基于局部多项式拟合的简化算法	120
6.4	网格压缩常用方法	122
6.4.1	非渐进压缩	123
6.4.2	渐进压缩	125
6.5	基于小波的压缩	129
6.5.1	小波变换非渐进压缩	130
6.5.2	小波变换渐进压缩	133
第七章	网格的曲面重建	136
7.1	曲面重建常用方法	136



7.1.1	参数曲面重建方法	137
7.1.2	隐式曲面重建方法	139
7.1.3	变形曲面重建方法	141
7.1.4	分片线性曲面重建方法	142
7.1.5	细分曲面重建方法	144
7.2	网格的细分曲面重建	145
7.2.1	基本概念	145
7.2.2	Catmull-Clark 细分	148
7.2.3	Loop 细分	151
7.2.4	Doo-Sabin 细分	154
7.2.5	$\sqrt{3}$ 细分	156
7.2.6	自适应细分	157
7.3	基于径向基函数的隐式曲面重建	159
7.4	基于水平集方法的曲面重建	162
7.4.1	水平集方法的数值计算	162
7.4.2	基于水平集的曲面重建	163
7.5	基于泊松 (POISSON) 方程的曲面重建	166
	参考文献	170

第一章



绪 论

目前,三维空间测量技术得到了快速发展和广泛应用,三维数据获取的能力和精度都有了很大的提高,这为实现物体的三维重构提供了坚实的基础。三维重构是指对实际存在的物体,获取其在计算机内表示的技术,这种外形表示是对三维物体进行处理、操作和分析其性质的基础。三维重构是将现实中的三维物体或场景在计算机中进行重建,是CAD/CAM领域的一个研究热点,属于多个学科交叉的课题(涉及计算机图形学、图像处理、信息处理、计算机视觉、计算机辅助设计及交互技术等),在制造业、虚拟现实、3D游戏、医学、文物保护、电影特技制作等领域有着广泛的应用。

在许多领域的实际应用中,需要对现实物体提供高精度的三维重构,例如,在已有模型(汽车模具、飞机涡轮、压缩机叶片等)基础上,建立高精度的数字化模型及设计新的模型;对基于海量数据点生成的数字化模型用现有的三维CAD系统对其进行力学和工艺等分析;在数字博物馆中建立古物的精细逼真模型,使用户可在互联网上看到精美的古代艺术珍品,并通过缩放操作看到珍品的奇妙的艺术细节。

1.1 三维数据点的获取

三维数据是使用各种三维数据采集仪采集得到的数据,它记录了有

限体表面在离散点上的各种物理参量。它包括的最基本的信息是物体各离散点的三维坐标,也可以包括物体表面的颜色、透明度、纹理特征等。

数据获取是指采用某种测量方法和设备测出实物各表面的若干组点的几何坐标,以获得实物的几何信息。快速、全面、完备地获取对象的表面信息,是数据获取所要实现的目标。逆向工程中的数据采集是指通过各种现代化的测量手段,对样件表面进行测量,将其表面实体信息转化成点坐标数据。因此,逆向工程中的数据采集又称为表面数字化。只有获得了样件的表面三维信息,才能实现复杂曲面的建模、评价、改进、制造。因而,高效、高精度地实现样件表面的数据采集,这是逆向工程的主要研究内容之一。

数据可以通过多种方式进行获取或采集。同一对象,采用不同的采集方法,经过处理后往往会得出不同的结果,这一问题对于复杂的自由曲面尤其突出。根据采集过程是否破坏工件,采集过程分为非破坏性采集和破坏性采集。非破坏性采集根据测量设备与测件之间的作用方式可分为接触式采集和非接触式采集。

1. 接触式数据采集方法

接触式数据采集方法通常是用机械探头直接接触物体表面,机械臂关节处的传感器确定相对坐标位置,通过探测头反馈回来的光电信号转换为数字面形信息,从而实现对物体面形的扫描和测量。常用的接触式测量工具有三坐标测量机、三坐标测量仪和接触式扫描仪等。根据测头的不同,接触式测量又可分为触发式和连续式,还有基于磁场、超声波的数据采集等。值得一提的是,目前接触式测头有新的发展,出现了软测头技术,而软测头又可分为开关发讯测头和扫描式测微测头。扫描式测头无论从精度还是速度上都优于发讯测头,使 CMM 技术提高到一个新水平。目前最先进的采用力—位移传感器的扫描测量头,该测头可以在物体表面滑动测量,其扫描速度最高可以达到 $8\text{mm}/\text{min}$,精度可以达到 $30\mu\text{m}$ 。由于接触式扫描方法具有精度高、可靠性好等优点,目前仍

有口腔 CAD/CAM 系统在使用这种扫描方式。

1) 触发式数据采集方法 触发式数据采集采用触发探头, 触发探头的探针由于接触到样件表面受力变形触发采样中的开关, 此时数据采集系统就会记录下探针尖(测球中心)的坐标, 逐点移动就能得到样件表面轮廓的整体坐标数据。在触发式数据采集过程中, 为防止探针受力过大而造成折断, 探针需要法向退出, 因此数据采集速度较低。

2) 连续式数据采集方法 连续式数据采集采用模拟量开关采样头。由于接触力较小, 扫描速度快, 连续式数据采集可以用于采集大规模的数据。

3) 磁场法 该方式需要将被测工件放在被磁场包围的工作台上, 通过手持触针在物体表面运动, 触针上的传感器就会感知磁场的变化, 从而检测出探针的位置, 进而获得样件表面的特征, 实现数字化。但该方式不适用于导磁的工件。

接触式数据采集的特点如下所述。

- 接触式数据采集具有较高的测量精度, 且不受物体表面颜色及光照的限制, 对物体的边界也能产生准确的测量结果。
- 由于接触式数据采集设备测头的限制, 数据采集的速度不可能太快, 测量的同时可能会丢失某些测头不可到达的工件细节数据。
- 不可测量某些测头不可触及的软材料。

由于接触式测量方法本身固有的局限性(如速度慢、对硬度较低的模型可能有较大的误差), 非接触式测量方法逐渐成为主流, 其中的光学测量种类很多, 由于其抗干扰能力强、结构简单, 因此得到广泛应用。近年来, 随着计算机机器视觉这一新兴学科的兴起和发展, 用非接触的光电方法对曲面的三维形貌进行快速测量已成为大趋势。这种非接触测量不仅避免了接触测量中需要对测头半径加以补偿所带来的麻烦, 而且可以实现对各类表面进行高速三维测量。

2. 非接触式数据采集方法

非接触式方法利用某种与物体表面发生相互作用的物理现象来获取其三维信息,如声、光、电磁等。非接触式按其原理不同,可分为光学式和非光学式,其中光学式包括三角法、结构光法、计算机视觉法和激光干涉法等;非光学式则包括CT测量法、MRI测量法、超声波法和层析法等。按测量过程的不同,非接触式测量又分为主动式测量和被动式测量。主动式测量系统中成像设备发出一束信号,通过接受物体表面反射回来或穿透物体的信号生成图像;被动式测量则没有信号发出。最常用的主动式测量有激光三角形测量法和光栅法。被动式非接触测量系统由物体辐射信号或物体表面反射信号生成图像,无特殊光源,因而设备简单、操作方便、成本低,但算法复杂,基于焦距测距法、全息法属于被动式测量系统。破坏性测量主要是自动断层扫描法,该技术采用逐层去除材料与逐层扫描相结合的方法。

1) 立体视觉法(被动三角法) 该方法三维信息获取是基于图像分析的方法,典型的被动三角立体视差法(Stereo Disparity)是通过固联在某一运动载体(如机器人)上处于不同位置的两台摄像机获取同一运动物体的图像,经过图像处理得到安装在目标体上几个特征标志点(大小、形状已知)像点的中心位置,在此基础上根据透视投影的几何原理,得到标志点的空间位置信息,然后通过两幅图像中的3D匹配点对,计算出物体的运动参数(位置、姿态信息)。常用的匹配算法有灰度相特征法。由于匹配精度的影响,所以较难精确地恢复复杂曲面物体的三维信息。近年来由于机器人技术的发展,计算机视觉技术日益受到重视,基于立体摄影的计算机视觉技术不仅可获得三维环境中物体的几何信息如形状、位置、姿态、运动等,而且能对它们进行描述、存储、识别与理解。

2) 层切法 层切法可用于测量物体截面轮廓的几何尺寸,其工作过程是,将待测物体用专用树脂材料(填充石墨粉或颜料)完全封装,

待树脂固化后,把它装夹到铣床上,进行微吃刀量平面铣削,结果得到包含有物体与树脂材料的截面,然后由数控铣床控制工作台移动到 CCD 摄像机下,位置传感器向计算机发出信号,计算机收到信号后,触发图像采集系统驱动 CCD 摄像机对当前截面进行采样、量化,从而得到二维离散数字图像。由于封装材料与物体截面存在明显边界,利用滤波、边缘提取、纹理分析、二值化等数字图像处理技术进行边界轮廓提取,就能得到边界轮廓图像。通过物—像坐标关系的标定,并对此轮廓图像进行边界跟踪,便可获得物体该截面上各轮廓点的坐标值。每次图像摄取与处理完成后,再使数控铣床把待测物体铣去很薄一层(如 0.01mm),又得到一个新的横截面,并完成前述的操作过程,就可以得到物体上相邻很小距离的每一截面轮廓的位置坐标。由逐层数据叠加重建三维图形。层析法的特点是可以采集体数据进行体重建,其缺点是速度较慢,CT、MRI 三维重建原理也与层切法类似(但是是非破坏性的),不过由于 CT 每层切片间距大,获得的数据量也少,重建后的数据精度达不到要求。

3) 相位法 相位测量法是以测量投影到物体上的变形光栅像的相位为基础,通过相位与高度的映射得到被测物体的三维轮廓,虽然在相位—高度的转换过程中也使用了三角法原理,但其核心技术还是相位的测量,与直接三角法有一定的区别。其基本原理为,将基准栅板投影至被测形体表面,形成被表面形状调制后的变形栅线图像,根据特定的光学投影与成像装置,利用光学函数分析法使得被测曲面高度值与调制栅线图像中的相位值之间建立起一一对应的函数关系。依据解调相位值的不同,相位法三维检测又可分为相移法、卷积技术以及傅里叶变换等,但其基本原理是相关的(其中莫尔云纹法较为特殊)。与直接三角法相比,相位测量法能满足全场的测量,测量精度比较高,测量速度比较快,但是这种方法对物体上的物理断点、阴影等使图样不连续的缺陷会造成较大的误差,往往要通过特定的算法识别并绕过缺陷才能完整而准确地

恢复物体的三维轮廓。

4) 激光全息测量法 这种方法本身不属于相位法,但它必须与相位法结合起来才能用于三维测量。全息图是利用光的相干性将物体发出的光的振幅和相位同时完全地记录下来所得的图样。当进行再现时,通过衍射或第二次傅里叶变换就可以得到宛如物体的三维像。激光全息只能在视觉上重现物体的三维图像,如需定量测量则需与莫尔云纹、光电检测、CCD 数据采集技术结合起来,目前的计算机全息干涉计量理论上是可以用于三维立体测量的,但由于全息技术对环境与设备要求高,这种技术远不如投影光栅技术简单实用。

5) 投影光栅法 其主要使用技术是相位法,技术最成熟,已投入商业使用,但需要拍摄多幅图像。空域相位测量与傅里叶变换只需一幅图像。这是一类主动式全场三角测量技术,通常采用普通白光将正弦光栅或矩形光栅投影于被测物表面上,由 CCD 摄取变形光栅图像,根据变形光栅图像中条纹像素的灰度值变化,可解算出被测物面的空间坐标。这类测量方法具有很高的测量速度和较高的测量精度。目前发展方向主要集中在投影方式、相位解包裹算法及提高精度上。

6) 主动三角法(三维激光扫描系统) 也称为激光位移计测器。主动三角法按投影到被测物体上光的图案形状不同,可以分为基于点的三角测量法(点结构光)、基于线的三角测量法(线结构光)和基于图案的三角测量法(图案编码法)。它们的工作原理如图 1-1 所示。激光束照射到待测物体表面,在其上形成漫反射光斑,光斑经成像物镜在 CCD 器件上成像。测点距参考平面的距离 d 决定了 CCD 器件上像点 P 的位置。这样,通过解读出 P 点的位置即可计算出待测距高度。激光位移计测器按传感器的多少可分为单眼式和复眼式两种。单眼式是指配有一个光学传感器(CCD,电荷耦合元件)的激光位移计测装置,而复眼式计测装置有两个或两个以上成对配置的 CCD,其测量时间较单眼式计测装置有所减少,而且可以减少扫描盲区。单眼法获得数据量一般较

双眼法减少约 25%。

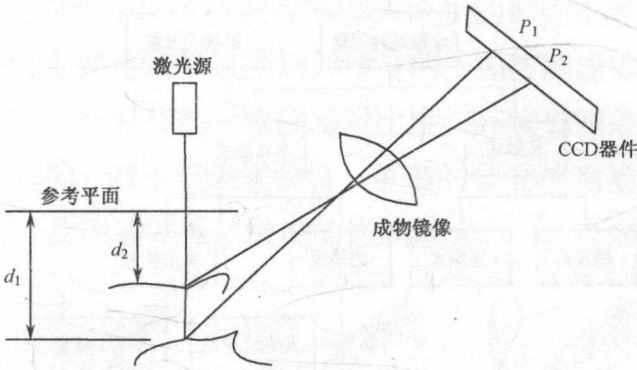


图 1-1 主动三角法工作原理

7) 激光三角测距法 激光三角测距法是逆向工程中曲面数据采集运用最广泛的方法，具有以下特点。

- (1) 探针不与样件接触，因而能对松软材料的表面进行数据采集，并能很好地测量到表面尖角、凹位等复杂轮廓。
 - (2) 数据采集速度很快，对大型表面可在 CMM 或数控机床上迅速完成数据采集。所采集的数据是表面上的实际数据，无须测头补偿。
 - (3) 价格较贵，杂散反射，对于垂直壁等表面特征会影响采样精度。
- 目前在技术上成熟的几种扫描方式如机械、激光、相位法、立体摄影和层切法各有其优势。机械式精度可以很高，并能获取倒凹区数据，但采集时间长，发展趋势是换用新型探头加快扫描速度。激光法发展最成熟，系统可靠性强，开发成本低，其缺点是依然有扫描盲区的问题，发展趋势是采用线扫描加快扫描速度，采用改变扫描轨迹以求最大限度地减少扫描盲区。采用相位法中的投影光栅法的系统目前有增多的趋势，其优点是全场、快速，缺点是要喷涂特制的反光层以改善反光性能，开发成本高，与激光扫描法一样也有扫描盲区问题。立体摄影法应用不多，主要是精度问题，但这种方法是最具有发展前景的数据采集方式。层析法是目前较完整地获得所有数据的扫描方式，但精度低，扫描时间较长，主要用于正畸模型数据采集。数据采集方法分类如图 1-2 所示。

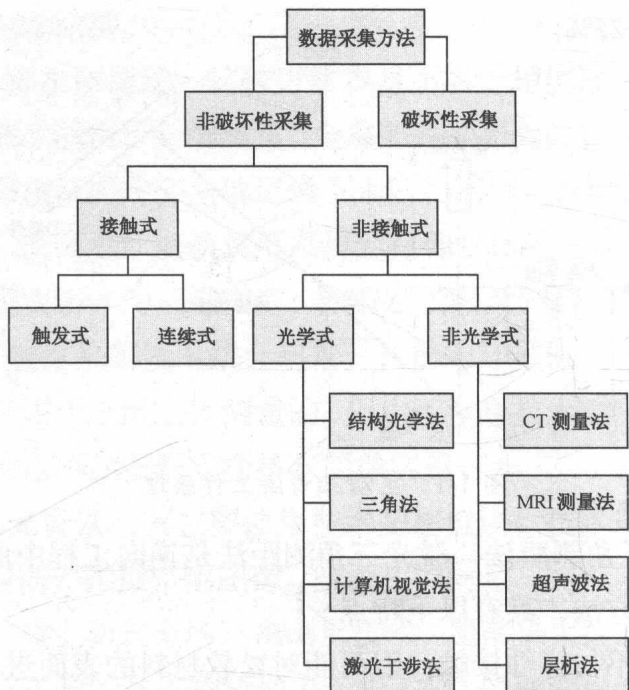


图 1-2 数据采集方法分类

1.2 三维重构关键技术

随着三维重构技术的不断发展，采用离散点云数据来表示物体表面特征的方式逐渐成为了学术研究的热点，点云模型可以很好地表示高复杂度和高度真实感的物体和场景。近年来，数据采集技术的发展使快速获取三维物体的外形数据成为可能，如何由扫描数据快速、高精度地表示出物体表面是一个重要的、极具挑战性的工作。在获得三维数据点后，主要的后处理工作包括点云去噪、点云配准、孔洞修复、数据简化和压缩、表面重建等，以下将对各个环节分别说明。

1.2.1 数据的去噪

测量中由于测量仪器、被测对象及其他方面的因素，不可避免地会引入一些噪声点，而噪声点对模型的重构会有很大的影响。为了更精确