

“十一五”国家重点图书

计算机科学与技术学科前沿丛书

计算机科学与技术学科研究生系列教材（中文版）

2011年度宁波市自然科学学术著作出版资金资助出版

---

# 数字几何处理的 若干问题研究进展

---

王仁芳 张三元 著

---



清华大学出版社

计算机科学与技术学科前沿丛书

计算机科学与技术学科研究生系列教材(中文版)

2011年度宁波市自然科学学术著作出版资金资助出版

# 数字几何处理的若干问题研究进展

王仁芳 张三元 著

清华大学出版社

北 京

## 内 容 提 要

本书针对数字几何处理研究领域中的若干研究方向,按照数字几何处理的流程,即 3D 模型数据获取与表示、预处理、建模和编辑等,对其技术方法进行了综述、分析和实例讲解。内容主要包括网格曲面重构、隐式曲面重构、网格模型与点模型微分属性求解、光顺去噪、配准、模型修复、曲面重采样、模型骨架提取、模型参数化、模型分片、模型变形、形状插值、变形传输和模型融合等。

通过本书对上述研究方向的深入剖析,以期使读者对 3D 数字几何处理的研究进展有较全面的了解,并对未来的研究工作有切实的帮助。本书对从事数字几何处理研究、应用与开发的科技人员具有较大的参考价值,也可作为高校计算机、应用数学、电子工程和机械工程等专业的研究生教材。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

数字几何处理的若干问题研究进展 / 王仁芳,张三元著. —北京:清华大学出版社,2012.12  
计算机科学与技术学科前沿丛书 计算机科学与技术学科研究生系列教材(中文版)  
ISBN 978-7-302-30053-3

I. ①数… II. ①王… ②张… III. ①计算机图形学—研究生—教材 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 212648 号

责任编辑:张民 谢琛 战晓雷

封面设计:常雪影

责任校对:李建庄

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17.25 字 数:434 千字

版 次:2012 年 12 月第 1 版 印 次:2012 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00 元

产品编号:044346-01

# 前 言

随着 3D 扫描获取技术的快速发展,3D 数字几何模型已成为继一维的声音数据、二维的图像数据与视频数据之后的一种新兴数字媒体。在逆向工程、工业产品创新设计、数字娱乐、影视动画、电子商务、通信、物理模拟、文物保护与修复等领域中,3D 数字几何模型有着广泛的应用,且产生了越来越深远的影响。面向 3D 几何数据的数字几何处理已成为计算机图形学、计算机视觉、数字信号处理、机械工程等学科的前沿研究领域和热门课题,在这一领域中,新概念、新理论、新算法、新技术和新标准正在不断涌现,取得惊人的成果。

本书是一本比较系统地介绍数字几何处理研究进展的专著。它是在作者及其课题组成员多年来从事数字几何处理研究与应用的基础上,综合了国内外在该领域的研究成果撰写而成的。本书针对数字几何处理研究领域的若干研究方向,按照数字几何处理的流程,即 3D 模型数据获取与表示、预处理、建模和编辑等,对其技术方法进行了综述、分析和实例讲解;以期使读者对 3D 数字几何处理的研究进展有较全面的了解,并对未来的研究工作有切实的帮助。

全书共分 6 章。第 1 章是绪论,按照数字几何处理的流程,对其技术方法进行综述。第 2 章介绍曲面重建和模型表面微分属性的求解。在网格曲面重构部分,着重介绍基于点邻域平坦度的网格重构算法和基于点邻域几何形态的网格重构算法;在隐式曲面重建部分,着重介绍 MLS 和 RBF 重构方法。基于重构的网格曲面,介绍了网格模型的微分属性求解方法;基于隐式曲面,介绍了点模型的微分属性求解方法。第 3 章介绍 3D 模型的预处理,着重介绍基于相似性的点模型去噪、基于 ICP 算法的点云配准、基于边扩展的网格复杂孔洞修补与基于顶点聚类的网格任意孔洞修补和基于纹理合成的点模型几何与纹理修复。第 4 章介绍 3D 数字模型的建模,在曲面重采样部分,着重介绍自适应分片点模型简化和基于相似性的点模型简化方法,同时简述点模型采样点加密方法;在模型骨架提取部分,着重介绍基于可见反力场的点模型骨架提取方法;在模型参数化部分,着重介绍应用边收缩的网格参数化;在模型分片部分,着重介绍基于参数化的网格分割、网格模型结构部件的分割、网格模型四边形区域的划分以及多分辨率层次点模型分片。第 5 章介绍 3D 数字模型的编辑,首先详细介绍模型变形的理论基础,然后着重介绍保持几何特征的均值骨架子空间网格变形、基于动态轮廓模型的微分域网格变形、特征保持的大规模点模型自由变形和骨架驱动的点模型皮肤局部变形方法;同时,详细介绍基于球面参数化的点模型渐变和基于顶点变形梯度的点模型形状插值方法;最后,着重介绍基于顶点变形梯度的点模型变形传输和拖曳式点模型融合方法。最后一章对全书前 5 章内容进行总结。

本书由张三元拟定编写大纲,初稿的第1、6章由张三元撰写,第2~5章由王仁芳撰写,全书由张三元最后修改定稿。在本书的撰写过程中,得到了张三元领导的课题组成员许秋儿、谭光华、邹万红、李根、钱江等博士的大力支持和帮助,在此向他们表示感谢!

本书的出版得到了国家自然科学基金(61073074)、浙江省自然科学基金(Y1090137)、浙江省科技计划项目(2012C21004)、浙江省科协育才工程资助项目和宁波市自然科学基金(2011A610196)的资助,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中的错误和疏漏在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2012年10月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 3D 数字几何处理.....	1
1.2 3D 模型数据获取.....	2
1.3 3D 数字模型的表示.....	3
1.3.1 三角网格模型.....	3
1.3.2 点模型.....	4
1.4 3D 数字模型的预处理.....	5
1.4.1 光顺去噪.....	5
1.4.2 模型配准.....	6
1.4.3 模型修复.....	6
1.5 3D 数字模型建模.....	7
1.5.1 曲面重构.....	7
1.5.2 表面几何属性分析.....	8
1.5.3 重采样.....	8
1.5.4 特征提取.....	9
1.5.5 骨架提取.....	10
1.5.6 模型分片.....	11
1.5.7 参数化.....	11
1.6 3D 数字模型编辑.....	12
1.6.1 几何造型.....	12
1.6.2 融合.....	13
1.6.3 变形.....	14
1.6.4 渐变.....	15
1.7 本书的组织结构.....	15
<b>第 2 章 曲面重建和微分属性求解</b> .....	17
2.1 网格曲面重构.....	17
2.1.1 基于点邻域平坦度的网格重构算法.....	18
2.1.2 基于点邻域几何形态的网格重构算法.....	25

2.2	隐式曲面重构	34
2.2.1	MLS 曲面重构	35
2.2.2	RBF 曲面重构	37
2.3	网格模型微分属性求解	39
2.3.1	法向量投票算法	40
2.3.2	基于简化网格的曲率计算	40
2.4	点模型微分属性求解	42
2.4.1	PCA 法	42
2.4.2	MLS 法	42
2.5	本章小结	45
<b>第 3 章</b>	<b>3D 数字模型的预处理</b>	<b>46</b>
3.1	光顺去噪	46
3.1.1	典型的光顺去噪方法	46
3.1.2	基于相似性的点模型去噪	47
3.2	配准	53
3.2.1	引言	54
3.2.2	基于 ICP 算法的点云配准	54
3.3	几何修复	59
3.3.1	引言	59
3.3.2	网格模型孔洞修补的基本算法	60
3.3.3	基于边扩展的网格复杂孔洞修补	61
3.3.4	基于顶点聚类的网格任意孔洞修补	64
3.3.5	点模型纹理和几何修复的统一方法	68
3.4	本章小结	75
<b>第 4 章</b>	<b>3D 数字模型建模</b>	<b>77</b>
4.1	曲面重采样	77
4.1.1	引言	77
4.1.2	自适应分片点模型简化	78
4.1.3	基于相似性的点模型简化	86
4.1.4	点模型的采样点加密	92
4.2	模型骨架提取	93
4.2.1	引言	93
4.2.2	基于可见反力场的点模型骨架提取	94
4.3	模型参数化	100
4.3.1	引言	100
4.3.2	应用边收缩的网格参数化	102

4.4	模型分片	112
4.4.1	引言	112
4.4.2	基于参数化的网格分割	112
4.4.3	网格模型结构部件的分割	119
4.4.4	网格模型四边形区域的划分	126
4.4.5	多分辨率层次点模型分片	136
4.5	本章小结	144
<b>第5章</b>	<b>3D数字模型编辑</b>	<b>146</b>
5.1	模型变形	146
5.1.1	引言	146
5.1.2	网格变形的理论基础	155
5.1.3	保持几何特征的均值骨架子空间网格变形	160
5.1.4	基于动态轮廓模型的微分域网格变形	166
5.1.5	特征保持的大规模点模型自由变形	173
5.1.6	骨架驱动的点模型皮肤局部变形	186
5.2	形状插值	194
5.2.1	引言	195
5.2.2	基于球面参数化的点模型渐变	196
5.2.3	基于顶点变形梯度的点模型形状插值	202
5.3	基于顶点变形梯度的点模型变形传输	213
5.3.1	引言	213
5.3.2	相关工作	215
5.3.3	变形传输的整体框架	216
5.3.4	点模型的变形传输	216
5.3.5	实验结果	221
5.4	拖曳式点模型融合	224
5.4.1	引言	224
5.4.2	点模型融合处理框架	225
5.4.3	两种交互方式	226
5.4.4	构建融合过渡区域	228
5.4.5	融合后处理	228
5.4.6	实验结果及讨论	229
5.5	本章小结	231
<b>第6章</b>	<b>数字几何处理技术方法总结</b>	<b>234</b>
6.1	数字几何处理	234
6.2	曲面重建和微分属性求解	235
6.2.1	网格曲面重构	235

6.2.2	隐式曲面重构	236
6.2.3	微分属性求解	236
6.3	3D 数字模型的预处理	237
6.3.1	光顺去噪	237
6.3.2	配准	237
6.3.3	模型修复	237
6.4	3D 数字模型建模	238
6.4.1	曲面重采样	238
6.4.2	骨架提取	239
6.4.3	参数化	239
6.4.4	模型分片	239
6.5	3D 数字模型编辑	240
6.5.1	模型变形	240
6.5.2	形状插值	241
6.5.3	变形传输	242
6.5.4	模型融合	242
6.6	发展趋势	242
	参考文献	244

# 第 1 章

## 绪 论

三维(3D)几何模型是继一维的声音数据、二维的图像数据以及视频数据之后的一种创新数字多媒体数据。与传统的多媒体数据相比,三维几何模型以其强烈的真实感更符合人们对自然世界的直观认识而受到了工业界和学术界的广泛关注。基于三维几何模型的产品设计以及物理模拟已经逐渐取代二维设计和常规的实验手段,在工业界获得广泛应用;以三维游戏为主体的数字娱乐近年来更是发展得如火如荼;电子商务方面,三维产品展示成为促进其发展的新动力;以三维数字扫描为基础的三维模型重建和修复技术可以帮助历史文物恢复原貌。总之,3D 数字媒体在逆向工程、工业产品创新设计、数字娱乐、影视动画、电子商务、通信、物理模拟、文物保护与修复等领域中有着广泛的应用,并产生越来越深远的影响。由于数据获取设备和计算机硬件的日新月异,且与计算机网络技术日益融合,面向 3D 几何数据的数字几何处理已成为计算机图形学、计算机视觉、数字信号处理和机械工程等学科的前沿研究领域和热门课题。在这一领域中,新概念、新理论、新算法、新技术和新标准正在不断涌现,已经取得惊人的成果,有理由相信 3D 几何模型将作为第四种数字化媒体改变现代数字多媒体和通信的基础结构,从而影响到国民经济和社会生活的各个方面。

### 1.1 3D 数字几何处理

3D 数字几何处理是指用计算机对获取到的 3D 几何数据进行处理,以达到不同应用所要求的数据转换、模型表示或场景绘制等目的,因此它包括几何数据的获取和几何模型的处理两部分。几何数据获取指从现实世界中的物体提取 3D 几何模型,随着 3D 数字扫描仪几何获取能力的不断增强,能够方便地将现实世界中高度复杂的物体数字化成 3D 几何模型。获得到的 3D 几何数据由于软硬件和应用等的原因,必须做进一步的处理才能应用到其他领域。广义的数字几何处理主要包括数据获取、几何表示、重网格化、曲面重建、几何属性分析、渲染绘制、光顺去噪、表面修复、特征提取、简化与重采样、参数化、纹理映射与合成、传输压缩、几何建模、动画与变形、模型检索和数字水印等。

3D 数字几何处理可采用两种基本途径:第一种是通过参数化 3D 数据,进行均匀规则重采样,然后扩展傅里叶分析、小波分析、球面调和函数分析等技术把 3D 数据转化为频域信号,进行数字信号处理以及纹理映射等应用。第二种则是基于微分几何理论,把 3D 数字模型视为连续曲面的离散化表示,对采样点进行离散微分几何分析,直接在 3D 空间中对模型进行处理。前者的关键技术在于 3D 模型的参数化,即如何寻求合适的参数域和参数化映射,把模型上的离散点一一映射到参数域上;后者的关键在于寻求理论上正确且数值上收敛的离散微分几何算子,快速估计点模型的局部内蕴几何量。

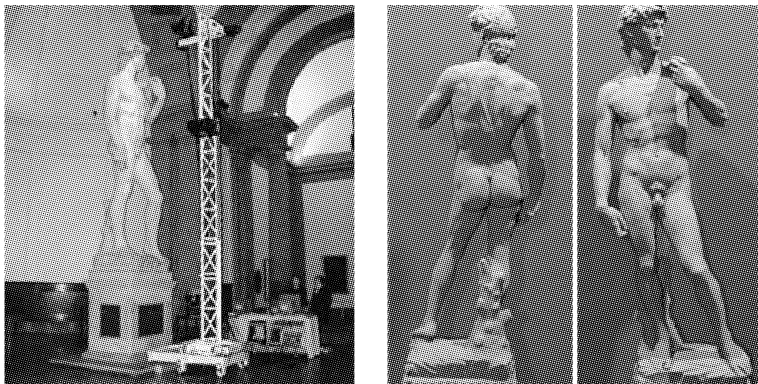
## 1.2 3D 模型数据获取

早期的三维数据获取主要是从二维图像出发,利用立体视觉技术完成三维重建工作。但由于二维图像在生成过程中不可避免地会丧失部分几何信息,因此,这种重建工作具有先天困难。在 CAD 系统中,由于其主要目的是为了完整表达所设想的三维物体的信息,因此三维建模方法常通过计算各种设计参数来描述物体的几何属性。

在医学、地形研究等特定专业领域,分别有具有专业特点的三维数据获取技术。例如在医学研究领域的可视化研究中,通过一系列的二维图像(计算机断层扫描(CT),核磁共振图像(MRT)等)重构出三维物体,从而使得待诊断图像更为直观清晰。地形作为自然界最复杂的景物之一,其三维可视化是地理信息系统、数字摄影测量和遥感的重要研究内容。依据不同的数据结构类型,矢量型和栅格型,数据获取分别采用不同的技术手段;其中 DEM (Digital Elevation Model)是地形三维现实中最重要数据,它可以通过野外测量或摄影测量获取,也可以从地形图中采集。

近几年来,得益于各种低档和高档三维扫描仪提供的三维几何获取能力的大大发展,使得对一般模型与场景的三维数据获取变得简单可靠。相对于其他的获取技术,不断发展的激光扫描和建模技术可以快速获取物体表面的精确几何信息。三维扫描仪的数据获取具有两个显著的特点:(1)数据量大且精度高,并且随着硬件的不断发展,可处理物体和场景的规模在不断增长,因此所获取三维数据的数据量增长是非常飞速的;(2)操作过程相对简单快捷。激光扫描所获取的物体表面的采样点集,可以直接记录物体表面的几何属性。当然,还可以通过体数据抽取,隐函数采样等多种方法获取模型对应的三维采样数据。在本书的讨论中,仅以三维扫描、体数据抽取和隐函数采样等技术获得的采样点集作为输入数据,对其他方式获取的三维数据不作考虑。

Stanford 大学的 Digital Michelangelo Project<sup>[1]</sup>项目(如图 1.1 所示)通过一整套三维扫描硬件和三维重建软件系统完成了一些大型雕塑的数字化过程,生成的最复杂的三维模型包括 20 亿个多边形和 7000 幅彩色图像。北京大学利用扫描仪 Cyrax2500 从两个不同视点进行数据采集获得的北京大学理科二号楼的激光扫描效果如图 1.2(a)所示,利用多种不



(a) 3D实物扫描示意图

(b) 计算机绘制的米开朗基罗的大卫雕像

图 1.1 Digital Michelangelo 项目

同扫描仪获得的云冈石窟某一剖面图如图 1.2(b)所示<sup>[2]</sup>。

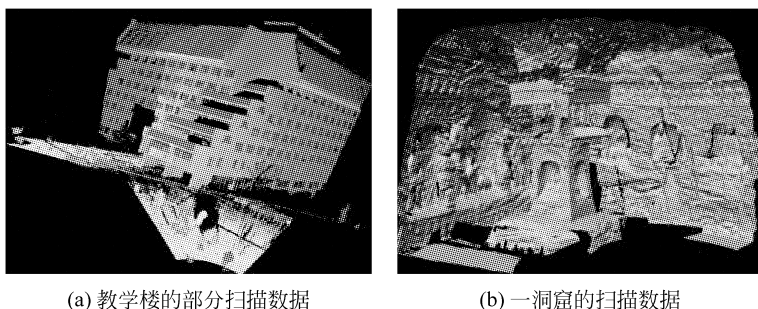


图 1.2 北京大学视觉与听觉信息处理国家重点实验室扫描数据效果

### 1.3 3D 数字模型的表示

选取合适的数学描述方式表示 3D 模型的表面是 3D 数字几何处理的一个核心问题。在过去数十年中,面向不同的应用领域,提出了多种不同的曲面表示方式。在 CAD 领域主要采用参数曲面,如 Bezier 曲面、NURBS 曲面和细分曲面等;在医学应用领域常采用隐式曲面,如水平集(Level Set)、径向基函数(Radial Basis Function, RBF)和距离场(Distance Field)等;在游戏、电影等娱乐业领域主要采用三角网格的表示方式以及在多种领域中最新采用的点模型表示方式。

近年来,由于三维扫描设备的普及和扫描技术所取得的重大进展,使得散乱点云数据模型已在工业设计、艺术、考古、文物复原和保护、电子商务等多个领域获得了广泛的关注和应用。对散乱点云而言,目前常采用网格和点模型两种表示方式(如图 1.3 所示);前者将散乱采样点(点元)网格化进而得到模型的网格表示(通常是三角网格,如图 1.3(b)所示),而后者则是直接将模型表示为点元集合的形式(如图 1.3(c)所示)。下面对这两种形式的模型进行简要的介绍。

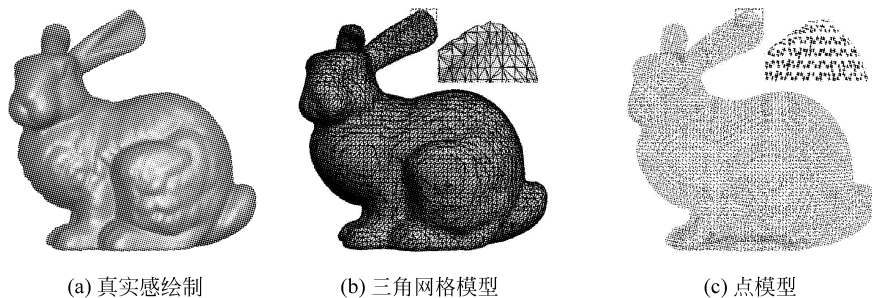


图 1.3 Bunny 的三角网格模型和点模型

#### 1.3.1 三角网格模型

目前在计算机图形学中,三角网格是 3D 模型的主流表示方式,它的主要优点在于:

(1) 三角网格具有强大的表面表达能力。任何拓扑和任意形状模型外表面都能用三

角网格进行表达,而且这种表达方式不需要满足复杂的片内光滑条件。

(2) 对三角面片的几何处理和绘制已得到高速图形硬件的支持。

尽管三角网格作为一种简单实用的曲面表示方式在几何造型等领域中表现出其特有的优势,然而,随着现在实际使用的三角网格模型数据量越来越大,所表现的几何模型越来越复杂,三角网格表示方法亦表现出它的局限性和不足:

(1) 三角网格模型是通过原始采样点云进行曲面重建而获得的。

由于采样曲面上包含有噪声点和裂缝,以及原始采样点数量巨大,所以现有的曲面网格重建算法难以取得满意的效果,且计算量巨大。

(2) 三角网格的几何处理算法大多需要维持二维流形表面的拓扑一致性。

拓扑信息的记录使得存储量加大;拓扑一致性的维持导致网格曲面的处理算法变得复杂,当拓扑改变时,在某些情况下可能需完全重建网格以维护模型的拓扑信息。

(3) 网格模型的网格数量与显示器的分辨率差异巨大。

从绘制的角度来看,数百万个三角形的模型投影到屏幕上后,一个屏幕像素可能含有多个待绘制的三角形,此时,采用传统的累加光栅化三角网格算法进行绘制已失去了意义,导致现有的高速网格图形硬件难以发挥其优势。因此对于高度复杂的几何模型,基于点的绘制将是一种更好的绘制算法。

### 1.3.2 点模型

近年来,点模型的数字几何处理引起了学术界的极大关注,并进行了相当多的研究工作。相关研究者之所以对点模型产生极大兴趣,主要原因如下:

(1) 庞大数量级网格模型拓扑关系的维持需要巨大的开销;

(2) 近年来,激光扫描技术取得了重大进展,3D 激光扫描设备的精度已达到亚毫米级<sup>[3]</sup>,因此扫描得到的点模型由巨大数量的 3D 采样点组成,于是期望能直接基于这些离散采样点元来表示复杂的几何模型;

(3) 点模型已拥有成熟的绘制技术,如 Qsplat 方法<sup>[4]</sup>和椭圆加权平均(EWA)<sup>[5]</sup>等。

点模型采用离散的采样点集来表示连续的模型外表面,即在连续的模型外表面上,按一定的规则采样,产生一系列表面采样点 $\{p_1, \dots, p_n\}$ ( $n$  为采样点数)。每个采样点通常包含几何信息(如 3D 坐标和法向)、表面外观属性(如纹理颜色)及其他材料属性(如反射率等)。与其他表示方式相比,点模型具有两个特点:

(1) 无拓扑连接信息,即每个采样点都是孤立存储的散乱点,这使得基于扫描数据的曲面容易重构;

(2) 非均匀采样,即模型的表面采样点是任意分布的,这使得点集曲面的重采样操作比较简单。

正是这两个特点促成了点模型数字几何处理这一研究领域。

与网格模型数字几何处理相比,点模型数字几何处理尚处在发展阶段,并且面临如下挑战:

(1) 点模型由一些缺乏拓扑连接关系的离散点所构成,在网格模型上容易定义的几何算子,例如曲率、梯度和散度等,难以在离散点上精确地定义;此外,点模型在形状编辑和变形过程中会出现裂缝,如何实时地进行重采样亦具有挑战性。

(2) 点模型数量大,如何快速有效地对其进行几何处理(存储、参数化、变形和绘制等)值得深入研究。点模型通常包括采样点位置、法向量、颜色和纹理坐标等多种属性,这些属性必须以一种统一的方式处理,以获得几何处理后这些属性的连续性。

本书以网格模型和点模型为主来讨论相应的数字几何处理理论、方法和技术。

## 1.4 3D 数字模型的预处理

三维扫描设备的普及和扫描技术取得的重大进展,使得实物模型的 3D 扫描数据的获取非常便利。然而,在扫描的过程中,由于各种因素使获得的点云数据主要存在着 3 种缺陷,即偏离于原始曲面的噪声、采样点间包含有重叠和模型曲面上出现孔洞。因此,必须对获得的点云数据进行光顺去噪、模型配准和模型修复等预处理操作<sup>[6]</sup>。

### 1.4.1 光顺去噪

在光顺去噪的过程中,一个重要的问题是:在剔除噪声获取离散曲面更高阶光滑性的同时,如何能够有效地保持曲面的固有几何特征,并尽量防止体积收缩和模型扭曲变形。

从算法复杂性的角度,3D 数字模型的光顺去噪可分为基于 Laplace 算子的光顺方法、简单的非迭代方法以及基于最优化的方法等。根据特征保持性和噪声在各个方向上的扩散方式,可分为各向同性算法和各向异性算法。根据去噪算子的连续与否,可分为两种算法:基于曲面拟合的去噪算法——通过选取光滑曲面对离散点进行拟合重建达到去噪的目的;第二种算法是对 3D 模型采样点进行离散几何分析,直接在三维空间对点数据进行估计处理,这类方法绕过了曲面拟合重建等复杂费时的过程,在算法复杂度和运算效率上均具有优势。

网格模型的光顺去噪算法已获得了广泛研究。Taubin<sup>[7]</sup>将图像处理中的 Laplace 算子扩展到三角网格模型中,提出了基于 Laplace 流的网格信号处理方法;此后出现了多种改进的 Laplace 网格光顺算法,如文献[8],以解决顶点漂移和过光顺的问题。然而,Laplace 滤波是各向同性的,因此光顺的同时不可避免地出现削弱几何特征和模型过光顺的问题。于是出现了多种各向异性的网格光顺算法<sup>[9,10,11]</sup>,尽管这些算法部分地解决了特征磨光的问题,但通常需要多次迭代地求解线性或非线性系统,故算法的复杂度较高。文献[12、13 和 14]将图像处理中双边滤波器的思想推广到三维网格模型,尽管在特征保持方面有所改善,但细微特征(如尖锐处)易被削弱。

Pauly 等<sup>[15]</sup>通过将采样点模型表面先分成块,然后对每一块通过局部高度场逼近进行重采样,进而将图像中基于 Fourier 的光谱分析方法应用于采样点几何。该方法通过对点模型进行光谱分析和滤波,达到去噪的目的。Alexa 等<sup>[16]</sup>采用 MLS(Moving Least-Squares)方法逼近原始点模型,然后将点移到其对应的曲面上来消除噪声,但由于求解 MLS 曲面需要解一个非线性优化问题,因此该方法的效率不高。Fleishman 等<sup>[12]</sup>提出的保持特征网格去噪算法由于不需拓扑连接关系,因此也适用于点模型的去噪,在去噪的同时能够有效地保持模型的特征。胡等<sup>[17]</sup>提出基于三维 Meanshift 过程的各向异性点模型去噪算法,该方法将顶点法向和曲率作为特征分量,顶点坐标值作为空间分量,通过 Meanshift 过程寻找其局部模式,并进行自适应聚类和邻域的自适应选取,在此基础上提出顶点估计的三

边滤波器,在获得去噪效果的同时有效地保持了特征。肖春霞等<sup>[18]</sup>提出基于动态平衡曲率流的去噪算法,该方法有效地保持了曲面特征和约束了模型变形,但由于引入了约束体积的强迫项,使得算法的复杂度较高。

### 1.4.2 模型配准

在扫描 3D 实体时,由于受到测量设备和环境的限制,物体表面完整测量数据的获得往往需要通过多次测量完成。由于每次测量得到的点云数据往往只覆盖物体部分表面,并且可能出现平移错位和旋转错位,因此为了得到实体完整表面的模型,需要对这些局部点云数据进行整合和配准<sup>[19,20]</sup>,如图 1.4 所示。

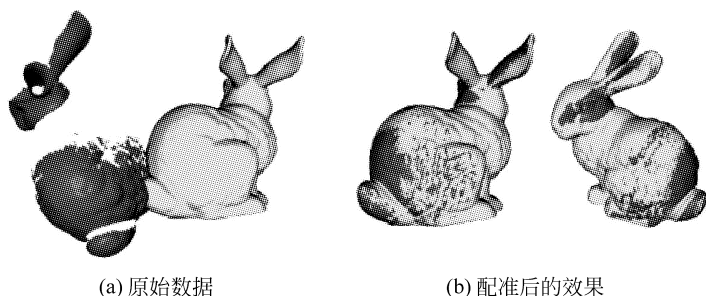


图 1.4 点模型配准示意图

常见的点云配准的方法有以下 3 种:

- (1) 标签法<sup>[21]</sup>,即在测量时人为地贴上一些特征点,然后使用这些特征点进行定位,这种方式仍然是依赖于测量和仪器的;
- (2) 提取特征法,如提取轮廓曲线<sup>[22]</sup>等,这种方式要求点云有比较明显的特征;
- (3) ICP(Iterative Closest Point)算法<sup>[23,24]</sup>,这种方式一般来说精度较高,但速度较慢。

### 1.4.3 模型修复

由于实体表面有可能存在各种缺陷,同时受到测量设备和测量方法自身的限制,在表面数据获取的过程中会产生洞和裂缝的情况;同样,在对点模型数据进行大规模形变的编辑处理时,模型亦会出现裂缝等现象,使模型修复成为三维数据获取或编辑之后的一个重要处理过程。模型修复的目标是:不仅要修复洞、裂缝等进行修复,同时对修复好的区域要尽可能复现类似于周围区域的细节。

Curless 等<sup>[25]</sup>从一系列具有深度信息的图像出发,建立物体的体素模型,从而重建三维物体;同时他们提出了基于体素模型的孔洞识别和修补的方法,该方法能修补几何形态比较复杂的孔洞,但存在体素采样密度参数设置的问题。Davis 等<sup>[26]</sup>通过建立网格模型的体素模型,根据孔洞周围区域的体素采用扩散的方式填充孔洞区域,最后通过提取等值曲面达到孔洞修补的目的;该方法对复杂几何形态和拓扑形态的孔洞具有较好的修补效果,但该方法需要设置较多的参数才能获得比较理想的孔洞修补效果,同时不能保证修补的网格与原网格自然拼接。Ju<sup>[27]</sup>采用八叉树建立物体的体素模型,通过追踪法完成孔洞修补;该方法需较少的内存,能高效地修补大规模数据中的孔洞。Pfeifle 等<sup>[28]</sup>直接对孔洞进行修补,然后在修补网格的基础上进行细分,不断生成并优化新的三角面片,从而使修补的三角网格与孔

洞周围三角网格形态相似。Levin<sup>[29]</sup>提出了一种基于细分曲面的孔洞修补算法,他首先根据边界曲线构造四边形网格,然后对生成四边形网格迭代细分,最后获得一张除奇异点处外的内部  $G^2$  连续,边界处与孔洞  $G^1$  连续的曲面,从而达到孔洞修补的目的;该方法能使修补的曲面与孔洞周围区域光滑拼接,但修补后的网格有时并不需要与周围区域光滑拼接。Liepa<sup>[30]</sup>反复选取面积或者二面角最小的三角形构造面积最小或者二面角最小的曲面,达到孔洞修补的目的,并通过细分和边交换等手段,使新生成网格的三角形形态与周围网格的三角形形态相似;该方法对相对平坦的孔洞有较好的修补效果,但对复杂边界形态的孔洞不能取得比较理想的效果。Pernot 等<sup>[31]</sup>首先对网格边界进行预处理,然后在孔洞内部生成拓扑网格,再通过变形的的方法使拓扑网格与孔洞周围网格的曲率偏差最小,从而完成孔洞的修补。Jun<sup>[32]</sup>将复杂孔洞剖分为简单孔洞,然后再采用平面三角化技术修补简单孔洞;该方法虽然能修补具有复杂形态的孔洞,但较少考虑孔洞周围网格的形态。

点模型修复的常规方法是基于隐式曲面的修复法,如 Carr 等<sup>[33]</sup>使用全局紧支撑的径向基函数拟合离散点集、Ahn 等<sup>[34]</sup>和 Wang 等<sup>[35]</sup>分别进行 MLS 曲面重建,以此实现孔洞的修复。尽管隐式曲面修复法相对简单,容易实现,但所构造的孔洞曲面是光滑的,故缺乏曲面的几何特征。Sharf 等<sup>[36]</sup>提出了一种基于上下文的点模型修复方法,该方法通过分析模型的几何特征,采用纹理合成的思想修复模型,获得了较好的修复效果,避免了因填充区域过分光滑而产生的表面失真。但该方法需要采用 MPU(Multi-level Partition of Unity)局部重建曲面,并对点集进行相似性匹配,因此计算量大且不稳定,难以做到实用。

对于有颜色纹理的表面模型,不仅需要修复其几何特征,还需要修复出模型表面的颜色纹理信息。Park 等<sup>[37]</sup>通过为待修复的区域构造一个局部参数化,然后将图像 Poisson 方程推广到点模型上,获得了几何和纹理颜色的修复结果。但该方法需要对点模型进行参数化,且需要解方程,因此效率不高。Xiao 等<sup>[38]</sup>基于纹理合成的思想实现了点模型的纹理和几何修复,该方法需要用户交互地在模型表面上指定纹理和几何样本,且几何修复时需要构建基曲面。

## 1.5 3D 数字模型建模

3D 数字模型经过预处理后,便可以进行建模和造型处理。模型的建模是指对模型的形状和几何属性进行分析和处理,主要包括模型的曲面重建、表面几何属性分析、曲面重采样、特征提取和参数化等。

### 1.5.1 曲面重构

散乱点云数据的曲面重构是数字几何处理的一个基本问题,它构造出物体的几何模型。几何模型(也称为曲面的数学模型)由表明物体形状信息的数学表达式来描述,是对物体进行分析、计算和绘制的依据和研究曲面性质的重要工具。根据重构曲面的表示形式,大致可将曲面重构分为 4 种方法,即参数曲面重构法、网格曲面重构法、隐式曲面重构法和细分曲面重构法。

参数曲面是通过连续的基函数表示曲面元,它是工业界采用的主要曲面造型技术,特别是在 20 世纪 80 年代后期形成了非均匀有理 B 样条曲面(NURBS),它将有理 Bezier、非有

理 Bezier 以及非有理 B 样条曲线曲面统一在 NURBS 框架之下,成为工业界产品数据交换的标准。于是,基于参数曲面就成为曲面重构中重用的方法。它具有计算简单、能精确描述物体形状和理论基础成熟等优点。但参数曲面是张量积曲面,单张参数曲面仅限于表示拓扑上等价于一张纸或一张圆柱面的曲面<sup>[39]</sup>。随着计算技术的发展,人们要求描述的物体越来越复杂。为描述复杂拓扑的实体,需要将实体分片造型,曲面片与曲面片之间需要裁剪或者先在物体表面划分四边形区域,再完成曲面之间的拼接,不管采用哪种方法都必须解决面片之间满足一定连续性的拼接问题。因此,散乱点云数据的区域划分和曲面片间的光滑拼接是该重构方法的关键。

在逆向工程、CAD 与数字娱乐等领域中,网格曲面是最为常见的一种曲面形式,它通过一些简单的几何元素点、线、平面来描述物体表面,再由若干多边形平面元围成模型。它是物体的一种离散曲面表示形式,能够表示具有复杂拓扑结构和丰富细节的物体,而且表示简单直观。由于它具有数学原理上的简单性、视觉直观、绘制容易、交互方便等优点,已经被广泛应用于三维多媒体,且网格曲面重建方法已得到研究者的极大关注<sup>[40]</sup>。由网格曲面重构技术获得的网格曲面一般存在面元过多、需要维护拓扑结构与存储冗余等问题。

随着散乱点云数据规模的日益庞大,传统的基于参数曲面和样条曲面的曲面重构方法已不能满足具有丰富表面细节的模型表面的重构要求,基于隐式曲面的重构是其曲面重构的较好方案。隐式曲面通过一个隐式函数来表示物体的表面,隐式函数的一般形式为  $f(x, y, z) = 0$ 。它适合光滑的封闭模型,而且由于两个隐式曲面相交的结果仍然为隐式曲面,因而易于处理两个实体相交的问题;但对于具有突出尖锐特征的物体,它并不是最佳的选择。

为了解决具有复杂拓扑形状的曲面重构问题,出现了细分曲面重构方法。细分曲面是一类采用组成曲面的多边形网格的点、线、面及拓扑信息完整地描述的曲面。该方法从初始多面体网格开始,按照某种规则,递归地计算新网格上的每个顶点,这些顶点都是原网格上相邻的几个顶点的加权平均。随着细分的不断进行,控制网格被逐渐磨光,在一定的细分规则下,无穷多次细分之后多边形网格将收敛到一张光滑曲面。其最大优点是算法简单,并且几乎可以描述任意复杂的曲面,在特征动画设计和复杂的雕塑曲面重建中得到了大量的应用。

### 1.5.2 表面几何属性分析

在数字几何处理中,模型表面几何属性常常起着非常重要的作用,各点处的几何属性,包括法向和曲率、主方向和主曲率,往往是必不可少的信息。比如在利用光线跟踪方法绘制点模型时,需要利用各点的法向来估计光线的传播方向<sup>[41]</sup>;在点模型的特征提取中,可以根据点采样曲面中各点曲率大小提取特征点或特征线<sup>[42]</sup>;在点模型的快速绘制中,可以先对点模型根据各点处的局部平坦度进行点模型的简化,从而达到加速绘制的目的<sup>[43]</sup>;为了得到高质量的点模型绘制效果,可以在离散的采样点上附加法向和曲率等局部微分几何属性,从而提高重建曲面和绘制曲面时的精确性,得到高质量的绘制效果<sup>[44]</sup>。这些几何属性通过离散的或连续的微分几何理论知识求出,比如通过协方差分析法<sup>[43]</sup>和 MLS 法<sup>[45]</sup>等求出。

### 1.5.3 重采样

因采样时需要尽可能捕捉物体表面的细节,故获取的散乱点云数据模型通常高度复杂。