

点云数据配准 及曲面细分技术



薛耀红 赵建平 蒋振刚 梁学章 编著

DIANYUN SHUJU PEIZHUN
JI QUMIAN XIFEN JISHU



國防工業出版社
National Defense Industry Press

点云数据配准及 曲面细分技术

薛耀红 赵建平 蒋振刚 梁学章 编著



国防工业出版社·北京·

National Defense Industry Press

内 容 简 介

反向工程是近年来迅速发展起来的一门新兴学科,本书详细介绍了反向工程中的若干关键技术。全书分五章:第1章阐述反向工程的基本概念,并概括介绍反向工程的主要环节;第2章、第3章着重介绍反向工程中的点云配准和细分曲面重建技术;第4章、第5章分别介绍了基于细分小波和细分小波紧框架的多分辨率造型技术。为便于广大读者理解和学习,本书在后四章每章均详细介绍了该领域的一种算法并给出具体应用算例。

本书不仅可作为高等院校的专业课程教材,对研究生和相关领域的专业工程技术人员也具有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

点云数据配准及曲面细分技术 / 薛耀红等编著. —北京:
国防工业出版社, 2011.9

ISBN 978-7-118-07666-0

I. ①点… II. ①薛… III. ①计算机辅助技术-高等
学校-教材 IV. ①TP391.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 193772 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 7 $\frac{1}{4}$ 字数 218 千字

2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

反向工程是近年来迅速发展起来的一门新兴学科。本书主要对反向工程中的点云配准和细分曲面重建两个关键技术进行了详细介绍,并在此基础上介绍了基于细分小波和细分小波紧框架的多分辨率造型技术。

全书共五章。第 1 章概述了反向工程的基本概念,并对反向工程中的数据采集、数据预处理以及曲面重建三个主要环节给予了概括介绍。通过这一章的学习,读者可以对反向工程这一领域有一个清晰的认识。

第 2 章~第 5 章主要就反向工程中的若干关键技术进行阐述。这四章撰写思路是:

每章的前几节主要分类概述该领域的背景知识,最后一节详细介绍一种具体算法和计算实例。通过前几节的学习,读者可以基本掌握该领域基础知识。在此基础上,在最后一节具体算法的学习和研究过程中,可对该领域有更深刻的了解。

第 2 章~第 5 章的具体研究内容是:

第 2 章对反向工程中数据预处理阶段的关键环节——点云数据的配准技术进行了深入研究。首先将已有的两视角配准方法分为初始配准和精细配准两大类进行总结概述,并详细介绍了一种综合出是配准和精细配准的扫描点云数据的自动配准方法。

第 3 章主要对反向工程中三维模型的细分曲面重建问题进行了深入研究。概括阐述了细分造型技术,并详细介绍了几种经典的细分格式;将反向工程中的曲面重建技术分为多面体网格重建、参数曲面

重建、隐式曲面重建以及细分曲面重建四大类,并分别进行了阐述,最后详细介绍了一种用 Loop 细分曲面插值点云数据的方法。

第 4 章研究了基于细分小波的多分辨率造型技术。综述了基于网格简化和基于小波分析的两类多分辨率造型技术;着重介绍了一类新的基于细分曲面的小波——细分小波,并详细阐述了这类小波的构造理论;以二进制 Loop 细分小波为例,着重介绍一种基于提升格式的细分小波构造方法;鉴于三进制细分格式的广泛研究与应用,本书介绍了一种基于提升格式的双正交三进制 Loop 细分小波的构造方法。

第 5 章主要研究了基于细分小波紧框架的多分辨率造型技术。概括介绍了不规则多分辨率分析的小波紧框架构造理论;以该理论为基础,着重介绍了含有不规则顶点的 Loop 细分曲面上小波紧框架的构造方法;具体介绍了 Loop 细分小波紧框架的分解和重构公式,并介绍了分解重构公式在解决三维网格图形的去噪、压缩等问题方面的应用。

本书的成书过程中,得到了梁学章教授的悉心指导,在此对先生表示深深的谢意。感谢长春理工大学赵建平老师、蒋振刚老师对本书的支持和关心。特别感谢长春理工大学杨华民教授积极指导本书的编写并促成本书的出版,没有他的支持,也就不会有本书的面市。

由于编著者水平有限,本书难免会有不少错漏及不足之处,殷切期望得到专家和读者的批评指正。

编著者
2011.8

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 反向工程的关键技术	2
1.2.1 数据采集技术	2
1.2.2 数据预处理技术	3
1.2.3 三维模型的曲面重建技术	4
1.3 本书的内容安排	6
第 2 章 点云数据的配准技术	8
2.1 初始配准	8
2.1.1 与测量设备相关的配准方法	8
2.1.2 人机交互的配准方法	9
2.1.3 基于对应量的配准方法	9
2.1.4 其他方法	10
2.2 精细配准	11
2.2.1 ICP 算法的提出	11
2.2.2 ICP 算法的改进与发展	14
2.3 扫描点云的一种自动配准方法	15
2.3.1 方法描述	16
2.3.2 计算实例	24
本章小结	29
第 3 章 细分曲面重建技术	31
3.1 细分曲面造型技术	31
3.1.1 基本概念	31
3.1.2 细分技术综述	32
3.1.3 经典细分格式介绍	34

3.2 曲面重建技术	41
3.2.1 多面体网格重建	42
3.2.2 参数曲面重建	42
3.2.3 隐式曲面重建	43
3.2.4 细分曲面重建	45
3.3 用 Loop 细分曲面插值拟合点云数据的方法	47
3.3.1 细分插值方程组的建立及性质	47
3.3.2 控制顶点的计算方法及步骤	52
3.3.3 计算实例	54
本章小结	56
第 4 章 基于细分小波的多分辨率造型技术	57
4.1 多分辨率造型技术综述	57
4.1.1 基于网格简化的多分辨率造型技术	58
4.1.2 基于小波分析的多分辨率造型技术	59
4.2 基于细分小波的多分辨率分析理论	60
4.2.1 多分辨率分析的基础知识	60
4.2.2 半正交小波的构造	65
4.2.3 双正交小波的构造	65
4.3 基于提升格式的细分小波构造方法	67
4.3.1 Lazy 小波的构造	67
4.3.2 双正交细分小波的构造	68
4.4 双正交三进制 Loop 细分小波的构造及应用	70
4.4.1 三进制 Loop 细分格式	71
4.4.2 半规则网格的构造	73
4.4.3 三进制 Loop 细分 Lazy 小波的推导	75
4.4.4 双正交三进制 Loop 细分小波的构造	77
4.4.5 三维图形处理的应用算例	80
本章小结	84
第 5 章 细分小波紧框架的构造及应用	86
5.1 不规则多分辨率分析的小波紧框架构造理论	86
5.2 基于 Loop 细分曲面的小波紧框架构造方法	89

5.3 Loop 细分小波紧框架对三维图形处理的应用	92
5.3.1 小波紧框架的分解重构算法	93
5.3.2 半规则网格的构造	95
5.3.3 三维图形的去噪	97
5.3.4 三维图形的压缩和渐进传输	99
本章小结	102
参考文献	104

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

随着计算机技术以及测量技术的迅猛发展, 三维模型的几何造型技术已经被广泛应用于产品和模具的设计、方案评审、自动化加工制造以及管理维护等制造业领域。为了提高新产品的研制与开发速度、缩短开发周期, 出现了许多先进的设计和制造技术, 如计算机辅助设计 (CAD)、计算机辅助制造 (CAM)、计算机辅助工程 (CAE)、反向工程 (RE)、并行工程 (CE)、虚拟制造 (VM)、快速原型 (RP)、企业需求计划 (ERP) 等。其中, 反向工程作为支持产品再创造工程的重要手段之一, 越来越受到人们的重视。

反向工程又称为反求工程或逆向工程, 它是在 20 世纪 80 年代末期发展起来的一项先进的制造技术。发展到现在, 反向工程已在娱乐、工业设计和加工、医学、仿真与虚拟现实及网络等领域得到了广泛的应用。一般来说, 新产品的开发过程是根据市场需要, 提出目标和技术指标, 进而进行功能设计, 由设计数据构造产品的 CAD 模型, 再经过数控加工等一系列的流程产生产品的过程。这是一个“从无到有”的产品设计过程, 称为正向工程或者顺向工程 (Forward Engineering, Sequential Engineering)。然而在许多情况下, 已有产品样件或实物模型, 却没有产品的原始图纸和技术文件。为了适应先进制造技术的发展, 需要将这些产品样件或实物模型再还原为 CAD 模型。这种从实物模型获取产品设计、制造工艺等相关信息的技术, 已发展为 CAD/CAM 中的一个相对独立的范畴, 统称为反向工程或逆向工程 (Reverse Engineering)。具体地说, 反向工程是将实物转化为 CAD 模型相关的数字化技术、几何模型重建技术和产品制造技术的总称。它是将已有产品或实物模型转化为工程设计模型和概念模型, 并在此基础上对已有产品或模型进行解剖、深化和再创造的过程。图 1.1 所示为反向工程的一般流程。

目前, 关于反向工程的研究主要集中在几何反求上, 即如何从样件或实物模型上准确高效地采集复杂三维表面数据, 并在此基础上快速地获取其 CAD 模型。

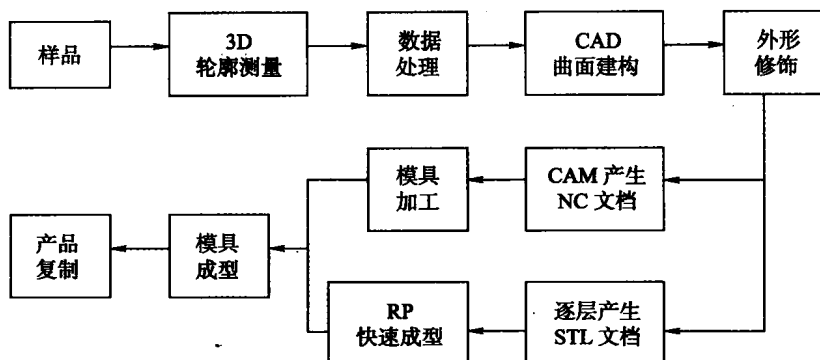


图 1.1 反向工程流程图

1.2 反向工程的关键技术

反向工程的关键技术主要包括数据采集、数据预处理、三维模型的曲面重建等。

1.2.1 数据采集技术

数据采集是通过特定的测量设备和测量方法获取实物模型表面离散点的几何坐标数据,即将实物模型的表面几何信息转化为 CAD/CAM 系统可以接受的数字信息,在此基础上进行后续复杂曲面的重建。作为反向工程的第一个环节,数据采集是反向工程的基础和关键技术之一。随着传感技术、控制技术和激光测量技术的快速发展,测量手段和测量技术也更加丰富和先进,同时实物模型表面的测量数据也呈海量趋势,研究学者们形象地称为点云数据或散乱数据。

现有的数据采集方法按其特性和应用,基本可分为接触式测量与非接触式测量两大类。接触式测量方法是通过传感测头与被测实物模型的物理接触来获取模型表面数据的方法,常见的接触式测量方法有坐标测量机法和机械手臂法两种。接触式测量方法的主要优点是它对物体表面的颜色和光照没有特别要求,能相对精确地测量物体的轮廓边缘,并且测量精度高;缺点是速度较慢,效率较低,而且不宜测量易变形、易碎、软质以及超薄形物体。非接触式测量方法主要是基于光学、声学、磁学等领域中的基本原理进行数据采集,将一定的物理模拟量通过适当的算法转换为被测实物模型表面的坐标点。基于光学的测量方法进一步细分为三角形法、测距法、干涉法、结构光法、图像分析法等。非接触式测量方法测量速度快,且能测量软质物体;缺点是基于光学的非接触式测量方法不

容易确定样件轮廓边缘,并且受光照条件和被测实物模型表面状况的影响较大。图 1.2 描述了数据测量方法的分类。

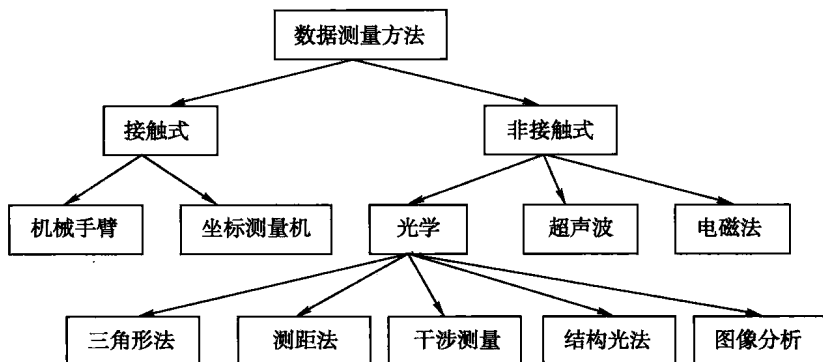


图 1.2 数据测量方法的分类

1.2.2 数据预处理技术

由于受测量设备的缺陷、测量方法和物体表面形状等因素的影响,测量所获得的数据通常不可避免地存在很多问题,包括噪声数据产生,模型表面数据的缺失,多视测量、数据失真和数据冗余等问题。此外,随着各种测量方法的速度和效率的不断提高,测量产生的数据量往往非常大,所以通常还需进行数据精简。因此,为了能更精确地从测量数据中重建曲面,需要对测量数据进行预处理,主要包括如下几个环节:

1. 数据的去噪

由于测量设备的外部震动以及被测样件表面粗糙或镜面反射等因素,测量数据中通常包含噪声。噪声严重影响着重建曲面的精确性和光顺性,所以在曲面重建前必须对数据进行去噪处理。对于具有扫描线结构的测量数据,一般采用通过对点列拟合曲线的光顺处理^[1,2]以及高斯滤波^[3]等方法去除噪声。对于离散的测量数据,通常首先进行三角化处理,然后应用基于网格光顺的方法去除噪声^[4]。

2. 数据的修补

在数据测量的过程中,由于被测实物本身的几何拓扑原因,或者是由于其他物体的遮挡,以及测量设备的限制,可能会造成部分数据的缺失。数据缺失使得测量数据出现孔洞、缺口或裂缝,从而增加了曲面重建的难度,并会影响曲面重建的精度。因此,为了尽可能地获得完整的实物模型信息,以便于算法的设计和

提高重建曲面精度,需要对测量数据进行必要的修补。数据修补的主要目标是:不仅要对孔洞、缺口和裂缝进行修补,同时还需要保证修补好的区域尽可能地复现出相似于周围区域的细节。目前应用于反向工程的数据修补方法主要有实物填充法、造型设计法和曲线、曲面插值补充法等方法。

3. 数据的简化

由于测量时需要尽可能地获得实物模型的表面细节,所以最终得到的测量数据通常规模较大,并且可能存在大量的冗余。为了提高后续曲面重建的效率和精度,需要按一定的要求减少测量数据的数量,即进行数据简化。不同类型的点云可以采用不同的精简方式。散乱数据点云可以通过随机采样的方法来简化;对于扫描线点云和多边形点云,可采用等间距简化、倍率简化、等量简化和弦偏差简化等方法;网格化点云可采用等分布密度法和最小包围区域法等进行数据简化。

4. 数据的配准

反向工程中,由于实物模型的尺寸、测量设备的测量范围或者遮挡等因素,一般不可能通过一次测量完成对整个实物模型的数字化。为了达到对整个实物模型测量的目的,通常需将实物模型表面分成多个局部相互重叠的子区域,然后从多个不同的角度分别对物体进行测量。由于每次测量都是在当前坐标系下进行的,所以必须把各个视角测量得到的点云数据统一到同一个坐标系下,这个过程称为数据的配准。点云数据配准技术可以大致分为初始配准和精细配准两类。初始配准方法可以大致分为与测量设备有关的配准方法,人机交互的配准方法,基于对应量的配准方法等。初始配准方法通常可以为精细配准提供初值。精细配准方法主要基于著名的最近点迭代算法 (Iterative Closest Point, ICP) [5,6],以及 ICP 算法的改进和变形 [7,8]。本书第 2 章详细介绍了点云数据的配准技术,并在此基础上提出了一种初始配准和精细配准相结合的扫描点云数据自动配准方法。

5. 数据分割

具有复杂拓扑结构的实物模型表面往往包含许多表面特征,为了满足重建曲面的拓扑结构要求,需要对测量数据进行数据分割。数据分割的目的就是把测量数据中具有相似几何特性的区域加以分割、组合,以便后续的曲面重建。目前,数据分割技术大体可以分为基于边的和基于面的以及基于边面混合的数据分割技术。

1.2.3 三维模型的曲面重建技术

获取了经过预处理的散乱数据后,三维模型的曲面重建即成为后续处理的

关键步骤。同时,三维模型的曲面重建也是几何造型和计算机几何中的一个重要研究领域。曲面重建的目的就是恢复实物模型的曲面形状,并使得重建曲面的形状尽可能地反映待建模型表面的形状特征。根据重建曲面的类型,可以将曲面重建方法分为多面体网格重建、参数曲面重建、隐式曲面重建和细分曲面重建等方法 [9,10]。

1. 多面体网格重建 (Polygonal Mesh Reconstruction)

分片线性曲面也称网格曲面,分片线性曲面可以表示复杂拓扑数据点集的结构,并且是其他曲面重建方法的基础。常用的从散乱数据点重建实物表面的网格模型的方法有基于雕刻的方法,区域增量构造方法,以及距离函数方法等。

2. 参数曲面重建 (Parametric Surface Reconstruction)

参数曲面重建主要是以 B 样条或非均匀有理 B 样条 (Non-Uniform Rational B-spline, NURBS) 曲面为基础的四边域曲面重建方法;或是以三角 Bézier 曲面为基础的三角域曲面重建方法。基于 B 样条或 NURBS 曲面的四边域曲面重构方法对拟合数据有较严格的要求,适用于汽车、飞机、轮船等的曲面零件;而基于三角 Bézier 曲面的三角域曲面重构方法适合表现无规则复杂型面的物体,对数据点预处理要求不高。此外,人们还提出了其他类型的参数曲面重建法。

3. 隐式曲面重建 (Implicit Surface Reconstruction)

近年来,隐式曲面由于其特有的优点,在反向工程等领域也得到了广泛的应用。常见的隐式曲面重建方法有径向基函数方法,MPU 方法,移动最小二乘法,以及 Poisson 曲面重建方法等。

4. 细分曲面重建 (Subdivision Surface Reconstruction)

细分曲面以其任意拓扑的适用性和能够分层编辑的优点在曲面重建方面引起越来越广泛的注意。细分曲面技术是从一个初始的控制多面体网格开始,按照某种规则递归地计算新网格表面上的顶点、边、面。随着细分过程的不断进行,控制网络的顶点、边、面的数目不断增加,控制网格被逐渐磨光。在一定的细分规则下,细分无穷多次之后多面体网格将会收敛到一张光滑的曲面。经典的网格细分格式有 Catmull-Clark 细分格式、Doo-Sabin 细分格式、Loop 细分格式、蝶形细分格式等。在此基础上,又不断涌现了大量新的细分格式,这为细分曲面重建技术奠定了基础。

三维模型的曲面重建技术是反向工程的重点和难点,第 3 章详细阐述了这几种三维模型的曲面重建方法,并着重介绍了细分曲面重建技术。在此基础上,本书详细介绍了一种用 Loop 细分曲面插值点云数据的方法。

1.3 本书的内容安排

本书主要对反向工程中的点云配准和细分曲面重建两个关键技术进行了详细介绍,并在此基础上介绍了基于细分小波和细分小波紧框架的多分辨率造型技术。具体内容安排及研究成果如下:

(1) 第1章概述了反向工程的基本概念,并对反向工程中的数据采集、数据预处理以及曲面重建三个主要环节给予了概括介绍。

(2) 第2章对反向工程中数据预处理阶段的关键环节——点云数据的配准技术进行了深入研究。本章首先将已有的两视角配准方法分为初始配准和精细配准两大类,分别在2.1节和2.2节中进行了概述。2.1节将初始配准方法进一步细分为与测量设备相关的配准方法、人机交互的配准方法、基于对应量的配准方法以及其他方法分别进行了介绍。2.2详细阐述了ICP算法的提出、改进和发展。在2.3节详细介绍了一种配准方法,通过引入新的匹配准则和改进ICP算法,实现了扫描点云数据的自动配准。该方法分为初始配准和精细配准两个阶段。在初始配准阶段,引入了一个新的基于点的邻域曲率相似度的匹配准则,并根据刚体变换的特点和不变量,引入了距离约束和超线段约束,得到了若干高精度的匹配点对。在精细配准阶段,该方法利用已得到的匹配点对信息对初始配准后的两片点云数据进行筛选,构造出了参与ICP算法的有效迭代初始点集,并改进了最近点的计算过程。

(3) 第3章主要对反向工程中三维模型的细分曲面重建问题进行了深入研究。其中,3.1节概括阐述了细分造型技术,并详细介绍了几种经典的细分格式。3.2节将反向工程中的曲面重建技术分为多面体网格重建、参数曲面重建、隐式曲面重建以及细分曲面重建四大类,并分别进行了阐述,且着重介绍了细分曲面重建技术。3.3节详细介绍了一种用Loop细分曲面插值点云数据的方法。该方法建立了求解插值细分曲面控制顶点的线性方程组,证明了系数矩阵的对称正定性,并给出了其特征值的界估计。在此基础上,给出了求解该方程组的两种迭代算法以及两个相应的盈亏修正公式。通过计算实例表明,这两种迭代算法具有收敛速度快,拟合精度高等优点。两个盈亏修正公式是便于工程应用的。

(4) 第4章研究了基于细分小波的多分辨率造型技术。其中,4.1节综述了基于网格简化和基于小波分析的两类多分辨率造型技术。4.2节着重介绍了Lounsbery等人提出的一类新的基于细分曲面的小波——细分小波,并详细阐述了这类小波的构造理论。4.3节以二进制Loop细分小波为例,着重介绍了Bertram的一种基于提升格式的细分小波构造方法。鉴于三进制细分格式的广泛研究与应用,在该节中,本书介绍了一种基于提升格式的双正交三进制Loop

细分小波的构造方法,并给出了相应的小波分解和重构公式。数值实验表明,该小波算法具有很好的应用效果。

(5) 第 5 章主要研究了基于细分小波紧框架的多分辨率造型技术。其中,5.1 节概括介绍了 Charina 等人提出的不规则多分辨率分析的小波紧框架构造理论。紧接着,以该理论为基础,5.2 节着重介绍了含有不规则顶点的 Loop 细分曲面上小波紧框架的构造方法。在 5.3 节中,具体介绍了 Loop 细分小波紧框架的分解和重构公式,并介绍了分解重构公式在解决三维网格图形的去噪、压缩等问题方面的应用。通过与已有的双正交 Loop 细分小波算法进行比较,表明这种 Loop 细分小波紧框架算法在某些方面具有较大的优势。

第 2 章 点云数据的配准技术

点云数据的配准是真实世界物体三维模型重建的一个很重要的环节,它在反向工程、形状检测、计算机视觉等领域均有广泛的应用。由于被测物体表面存在遮挡以及测量设备视域的限制,通常的测量设备一次只能获取物体的一个侧面的点云数据。要得到物体完整的形状信息,一般需采用多视角,即从多个角度对物体进行测量。由于在不同视角进行测量时的坐标系不同,所以必须将测量得到不同坐标系下的物体表面的三维数据进行配准,将其转换到一个统一的坐标系下,最终得到物体整个表面的完整形状数据。

根据输入点云数据的不同,现有的配准方法大致可以分为多视角配准法 (Multi-View Registration) 和两视角配准法 (Pair-Wise Registration)。多视角配准法对物体多个视角的点云数据同时进行配准,而两视角配准法每次只配准一对点云数据。由于多个视角的点云数据往往也可以通过两两配准的方式完成匹配,故两视角配准法是点云数据配准技术的研究重点。

现有的两视角配准方法根据是否需要初始估计可大致分为初始配准和精细配准两大类。一般来说,初始配准只能提供点云数据匹配的一个近似值,而精细配准通常需要一个配准参数初值估计,然后通过迭代进一步提高配准精度。

2.1 初始配准

目前主要的精细配准方法中,ICP 算法及其变化形式是主流算法。ICP 算法是一个迭代递减算法,故需要一个很好的初始估计才能收敛到全局最小值^[7,8,12]。而初始配准方法可以在没有任何关于两个视角点云数据相对位置的初值估计的前提下,求出两个视角点云数据的相对刚体运动参数。现有的初始配准方法大致可分为以下几类。

2.1.1 与测量设备相关的配准方法

这类方法通常与测量系统的硬件实现密切相关。通常利用数据采集设备的一些标定信息来计算不同视场点云数据间的相对运动参数,例如:扫描位置跟踪

算法以及扫描主轴计算等。此类方法中最常用的就是用一个具有六个自由度的精密移动设备来记录不同点云数据之间的相对移动和转动,但是高精度的机械运动和定位装置价格昂贵,而且在实际应用中需要反复调试,因此常常造成许多不便。另一个替代方法是限制物体的移动或转动,使其仅具有一个或两个自由度。也就是说,物体只能沿着一个方向平移或者是绕着一个固定的轴转动,例如把物体放在一个精确标定的转台上或者具有精确刻度的导轨上。但是,受到物体自身复杂几何形状的限制,这种限制自由度的硬件方法并不是在任何情况下都适用的,有时未必能够得到物体表面的全部形状信息。

2.1.2 人机交互的配准方法

依靠人机交互来获取点云数据配准的初值,是最简单且最直接的方法。著名的 PolyWorks 在其配准模块中就提供了人机交互的功能,方便用户随时参与点云数据配准的过程。人机交互的配准方法可以很大程度地降低系统和程序的复杂性,然而,由于被测物体千变万化的几何外形,这类方法也存在着操作繁冗费时、适用性有限等问题。

2.1.3 基于对应量的配准方法

基于对应量的配准方法一般通过直接利用一些欧几里得不变量,或通过提取不同视角点云数据的几何特征,来建立两片点云数据的对应量。这些对应量一般包括对应点、对应曲线以及对应曲面。Chua 等人^[13]于1997年提出了一个点签名(Point Signature)的概念,点签名实际上就是一个定义在点上的特征描述子。Chua 等人对点云中每个点计算点签名,然后通过比较点签名匹配对应点对,进而求解配准参数。该方法的缺点在于点签名的构造过程复杂,计算量大,而且噪声对该方法具有一定的影响。自旋图像(Spin Image)是曲面上一点的局部二维特征图像,最初应用于图像识别^[14],它实际上是一个具有刚体不变性的形状特征描述子。Johnson 和 Hebert^[15]提出了一种基于自旋图像的配准方法,通过比较旋转图像的相关性来确定对应的点对,从而求得初始刚体变换。该方法具有较好的鲁棒性和匹配效果,缺点是受顶点的分辨率影响较大,且边界点的处理存在欠缺,文献[16-19]在此基础上作了进一步改进。Stamos 和 Leordeanu^[20]提出了一种通过提取直线段进行配准的方法。方法首先在待配准点云数据中直接提取直线段特征,然后通过匹配直线段来完成点云数据的配准。随后,Chen 和 Stamos^[21]改进了计算直线段之间三维变换的方法。上述两种方法对于建筑高楼等存在明显直线特征的模型数据的配准具有较好的效果,但不适用于一般