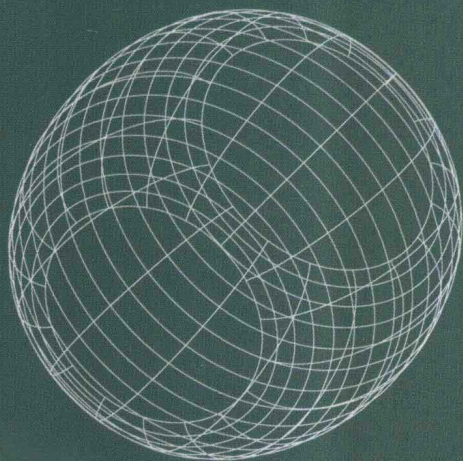


反求工程与建模

蔡 勇 著



科学出版社

反求工程与建模

蔡 勇 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

反求工程技术是测量技术、数据处理技术、图形处理技术和机械加工技术相结合的一门综合性技术。该项技术以点作为曲面绘制和造型的基本元素,在提高模型绘制与重建的速度、加强处理超大规模点云的能力和简化计算量等方面具有优势,目前已成为研究热点。

本书以作者多年的科研工作及研究成果为基础,重点阐述了反求工程理论基础,包括点云处理的数学方法与工程建模的基本步骤;介绍了反求工程中的曲面表达方式;论述了基于统计学习理论的支持向量机方法,包括基于支持向量机方法的点云空洞修复技术、图像修补技术、点云模型转换算法、点云表面建模技术与曲面重构方法等,可为该领域研究人员提供参考

图书在版编目(CIP)数据

反求工程与建模/蔡勇著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-033207-3

I. ①反… II. ①蔡… III. ①机械设计:计算机辅助设计-建立模型
IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 277353 号

责任编辑:余 江/责任校对:张小霞

责任印制:张克忠/封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏 主 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 12 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2011 年 12 月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:223 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

反求工程(反向工程、逆向工程)指的是针对已有产品原型,消化吸收和挖掘蕴含其中的涉及产品设计、制造和管理等各个方面的一系列分析方法、手段和技术的综合。作为先进制造技术的一个重要组成部分,反求工程已从最初的原型复制技术逐步发展成为支持产品创新设计和新产品开发的重要技术手段。

随着计算机技术的飞速发展,反求工程通过与计算机技术相结合,已广泛应用于航空航天、机械、建筑、模具设计、医疗器械、人体器官再造、复杂产品的精度检测等领域。与传统的正向工程设计相比,反求工程可以设计重构出传统设计不能完成的复杂自由曲面模型,并且能够对已有产品进行快速修复和重设计,效率更高。因此这项研究具有重要的理论意义和现实意义。

在反求工程中,基于点的点云处理技术是随着数据测量技术的进步而迅速发展起来的一门新兴技术。本书以点作为曲面绘制和造型的基本元素,主要研究点云优化子采样曲面表示、图像修补、点云建模、基于 SVM 的点云处理等内容。

全书共 7 章。第 1 章主要介绍了反求工程的理论基础,包括反求工程的基本内涵和工程建模的基本步骤,介绍了点云处理的数学方法,展望了反求工程的应用领域。第 2 章主要介绍反求工程中的曲面表达方式,如 BREP 和 CSG 实体表达式,研究了基于点云的优化子采样曲面表示方法。第 3 章阐述了支持向量机方法,分析了支持向量机的优缺点,对基于 SVM 的优化子采样曲面表示方法进行了研究,并且开展了相关的对比实验,分析了实验结果。第 4 章主要研究了点云空洞修复技术,提出了点云捕获技术、边界提取方法、基于 SVF 的修补技术和基于核分类器的图像修补技术。第 5 章主要研究点云结构拓扑与建模技术,提出了一种节省内存的点云 K 最近邻算法、基于 STEP 的 CAD 到 CSG 几何模型的自动转换算法、基于支持向量机的残缺区域修复技术,并对 SVR 算法进行了改进,最后还对算法进行了验证分析。第 6 章主要介绍基于纹理的点云建模技术,包括小波变换与加窗傅里叶变换、再生核 Hilbert 空间、连续小波变换与离散小波变换等,构建并证明了一种小波核,构建了基于纹理的点云建模技术,最后还给出了建模实例。第 7 章是基于切片的曲面重构技术,主要介绍了基于空间分割的局部 KD 树动态构建算法和基于 SVM 的切片与曲面重构方法,并编写了实现曲面重构的软件系统。

本书是作者多年科学研究的成果结晶。书中所介绍的技术和方法在提高模型绘制与重建的速度、加强处理超大规模点云的能力和简化计算量等方面体现了独



特的优势,可为该领域研究人员及工作人员提供参考。

由于时间仓促,作者知识水平有限,书中错误和不当之处在所难免,敬请广大读者和各位同行不吝赐教,谢谢!

作 者

2011 年 5 月于西南科技大学

目 录

前言

第 1 章 反求工程理论基础	1
1.1 反求工程的内涵	1
1.2 反求工程建模的基本步骤	3
1.3 点云处理的数学方法	6
1.3.1 基于网格和基于点的表达方法	7
1.3.2 基于点的表面几何表达	8
1.3.3 基于点的数据处理	13
1.3.4 基于点的曲面重建	16
1.3.5 基于点的模型绘制	17
1.3.6 基于点的加工轨迹生成	18
1.4 反求工程的应用展望	19
参考文献	20
第 2 章 曲面表达	21
2.1 CAD 系统几何造型技术	21
2.1.1 三维物体的几何表示	21
2.1.2 三维立体造型最常用的表示方法	22
2.1.3 正则集和正则集运算	24
2.2 BREP 和 CSG 实体表达法	25
2.2.1 AP203 扩展边界表达法	25
2.2.2 CSG 表达法	28
2.3 实体和曲面	28
2.3.1 实体	28
2.3.2 曲面	29
2.4 基于点云的优化子采样曲面表示研究	29
2.4.1 相关定义	30
2.4.2 算法描述	31
2.4.3 生成油彩	32
2.4.4 选择能覆盖整个表面 S 的子集	34



2.4.5 油彩整体松弛	35
参考文献	40
第3章 支持向量机方法	41
3.1 统计学习理论基础	41
3.1.1 一致性概念与函数集 VC 维	41
3.1.2 四种重要的归纳原则	43
3.1.3 模式识别与回归估计	47
3.1.4 函数集的熵与推广能力的界	48
3.2 支持向量机基础及其优缺点分析	51
3.2.1 最优分类超平面	51
3.2.2 支持向量分类机	52
3.2.3 支持向量回归机	54
3.2.4 支持向量方法的优缺点分析	56
3.3 基于 SVM 的优化子采样曲面表示研究	57
3.3.1 贪婪算法原理	58
3.3.2 求解曲面轮廓	58
3.3.3 曲面拟合研究	60
3.3.4 曲面表示研究	61
3.4 对比实验与结果分析	63
3.4.1 不同方法横向比较	63
3.4.2 不同核函数纵向比较	65
参考文献	67
第4章 点云空洞修复技术	68
4.1 点云捕获	68
4.1.1 点云分类	70
4.1.2 点云噪声	72
4.2 点云边界提取	73
4.2.1 单个边界点的判定	73
4.2.2 等价类的划分与边界追踪	79
4.3 基于 SVF 的修补技术研究	80
4.3.1 空洞边界的确定	82
4.3.2 提取特征	83
4.3.3 构建回归曲线求解色彩值	84
4.3.4 基于核的回归学习机	86
4.3.5 修补实例	87

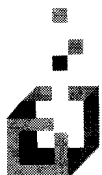


4.4 基于核分类机器的图像修补	93
4.4.1 基于核的模式识别机器	94
4.4.2 样本集的构建	95
4.4.3 特征提取	96
4.4.4 完成首次修补	97
4.4.5 最后的细补	97
4.4.6 对比实验	98
参考文献	99
第5章 点云结构拓扑与建模技术	100
5.1 一种节省内存的点云 K 最近邻算法	100
5.1.1 经典 KD 树实现与 K 最近邻问题定义	101
5.1.2 改进的 KD 树与 K 最近邻查询问题的实现	101
5.1.3 算法验证与比较	104
5.2 基于 STEP 的 CAD 到 CSG 几何模型的自动转换	105
5.2.1 STEP 格式半空间描述转换算法	106
5.2.2 半空间数据提取	107
5.2.3 BREP 到 CSG 几何模型的自动转换	109
5.2.4 CSG 到 MCNP 几何模型的自动转换	111
5.2.5 基于 UG 到 MCNP 几何模型的自动转换	113
5.2.6 MCNP 可视化建模与计算平台的设计与实现	116
5.3 基于支持向量机的残缺区域修复	118
5.3.1 基于支持向量回归的曲面拟合	118
5.3.2 核函数的选择	120
5.3.3 训练数据的获取与重采样位置的确定	120
5.4 SVR 算法的效率问题与改进	122
5.4.1 硬间隔支持向量数据描述	122
5.4.2 将核函数作为 MEB 处理	123
5.4.3 将支持向量回归问题作为 MEB 处理	123
5.4.4 改进的 SVR 算法	124
5.5 基于残缺区域的重采样	124
5.6 算法验证与分析	124
参考文献	126
第6章 基于纹理的点云建模技术	127
6.1 小波变换与加窗傅里叶变换	129
6.2 再生核 Hilbert 空间	132



6.3	连续小波变换与离散小波变换	132
6.4	一种小波核的构建与证明	135
6.4.1	满足 Mercer 条件的证明	135
6.4.2	在 Hilbert 空间满足再生性的证明	137
6.5	小波核机器的构建	138
6.6	基于纹理的点云建模	140
6.6.1	用强特征构建轮廓	140
6.6.2	用回归曲线构建封闭区域	143
6.6.3	用弱特征构建区域纹理	143
6.6.4	对比实验	145
6.7	建模实例	146
6.7.1	电机点云建模	146
6.7.2	发动机连接件表面重建	149
6.7.3	马模型点云建模	151
	参考文献	153
第 7 章	基于切片的曲面重构技术	154
7.1	基于空间分割的局部 KD 树动态构建算法	154
7.1.1	经典 KD 树实现与 K 最近邻问题定义	155
7.1.2	改进的 KD 树与 K 最近邻查询问题的实现	155
7.1.3	算法验证与比较	158
7.2	基于 SVM 的切片与曲面重构	159
7.2.1	点云切片分割	162
7.2.2	基于 SVM 的曲面拟合	162
7.2.3	参数及核函数的选择	163
7.2.4	基于 SVM 的点云模型识别	165
7.2.5	支持向量的迭代过程	167
7.3	曲面重构系统软件实现	169
7.3.1	系统架构与主要功能模块	169
7.3.2	渲染子系统	170
7.3.3	渲染数据源:几何实体定义与算法实现	170
7.3.4	软件系统功能	171
7.3.5	系统运行界面	172
	参考文献	174

第 1 章



反求工程理论基础

第二次世界大战中,几十个国家卷入战祸,饱受战争创伤。特别是战败国,在第二次世界大战结束后急于恢复和振兴经济。日本在 20 世纪 60 年代初提出了科技立国方针:“一代引进,二代国产化,三代改进出口,四代占领国际市场”,其中在汽车、电子、光学设备和家电等行业上最为突出。要实现国产化,迫切需要对别国产品进行消化、吸收和改进,这是反向设计(Inverse Design)或反求工程(Inverse Engineering)产生的技术背景。这两者是同一内涵,仅是不同国家的不同提法。发展到现在,已成为世界各国在发展经济中不可缺少的手段或重要对策,反求工程的大量采用为日本经济振兴、进而创造和开发各种新产品奠定了良好基础。

实际上,任何产品问世,包括创新、改进和仿制,都蕴含着对已有科学、技术的继承和借鉴,因而反求思维在工程中的应用源远流长,而提出这个术语作为一门学问去研究,则是 20 世纪 60 年代初出现的。市场经济竞争机制已渗透到各个领域,如何发展科技和经济,世界各国都在研究对策,从共性特征可概括为 4 个方面对策:①大力提倡创造性,包括新的思维方式、新原理、新理论、新方案、新结构、新技术、新材料、新工艺、新仪器等。对于发展一个国家的国民经济来说,创造性是永恒主题。②研究和应用新的设计理论、方法去改造和完善传统的方法,既快又好地设计出新型产品。③把计算机广泛地引入产品设计、开发的全过程(预测、决策、管理、设计制造、试验和销售服务等),达到一体化、智能化和自动化设计的目的。④研究和应用反求工程技术,在更高的起点去创造新产品。

1.1 反求工程的内涵

反求工程这一术语起源于 20 世纪 60 年代,但对它从工程的广泛性去研究、从反求的科学性进行深化是从 20 世纪 90 年代初开始的。反求工程类似于反向推理,属于逆向思维体系。它将数据采集设备获取的实物样件表面或内腔数据,输入专门的数据处理软件或带有数据处理能力的三维 CAD 软件进行处理和三维重构,在计算机上复现实物样件的几何形状,并在此基础上进行原样复制、修改或重



设计,该方法主要用于对难以精确表达的曲面形状或未知设计方法的构件形状进行三维重构和再设计。反求工程是综合性很强的术语,它是以设计方法学为指导,以现代设计理论、方法、技术为基础,运用各种专业人员的工程设计经验、知识和创新思维,对已有新产品进行解剖、深化和再创造,是对已有设计工作的再设计(或改进),这就是反求工程的含义,特别强调再创造是反求的灵魂。

反求工程技术是测量技术、数据处理技术、图形处理技术和加工技术相结合的一门结合性技术。随着计算机技术的飞速发展和上述单元技术的逐渐成熟,近年来在新产品设计开发中得到越来越多的应用,因为在新产品开发过程中需要以实物(样件)作为设计依据、参考模型或作为最终验证依据。汽车、摩托车的外形覆盖件和内饰件的设计、家电外形设计、艺术品复制等行业反求工程技术的需求尤为迫切。

反求工程技术的研究对象多种多样,所包含的内容也比较多,主要可以分为以下三大类:

- (1) 实物类。主要是指先进产品设备的实物本身。
- (2) 软件类。包括先进产品设备的图样、程序和技术文件等。
- (3) 影像类。包括先进产品设备的图片、照片或以影像形式出现的资料。

反求工程包含对产品的研究与发展、生产制造过程、管理和市场组成的完整系统的分析和研究。主要包括以下几个方面。

1) 探索原产品设计的指导思想

掌握原产品设计的指导思想是分析了解整个产品设计的前提。比如微型汽车的消费群体是普通老百姓,其设计的指导思想是在满足一般功能的前提下,尽可能降低成本,所以结构上通常是较简化的。

探索原产品原理方案的设计方法,因为各种产品都是按一定的使用要求设计的,而满足同样要求的产品可能有多种不同的形式,所以产品的功能目标是产品设计的核心问题。产品的功能概括而论是能量、物料信号的转换。例如,一般动力机构的功能通常是能量转换,工作机通常是物料转换,仪器仪表通常是信号转换。不同的功能目标可引出不同的原理方案。设计一个夹紧装置时,把功能目标定在机械手段上,则可能设计出斜楔夹紧、螺旋夹紧、偏心夹紧、定心夹紧或联动夹紧等原理方案;如果把功能目标扩大,则可设计出液动、气动或电磁夹紧等原理方案。探索原产品原理方案的设计,可以了解功能目标的确定原则,这对产品的改进设计有极大帮助。

2) 研究产品的结构设计

产品中零部件的具体结构是实现产品功能的保证,与产品的性能、工作能力、经济性、寿命和可靠性有着密切联系。产品的结构设计分析主要包括以下几个方面:



(1) 确定产品的零部件形体尺寸。分解产品实物,由外至内,由部件至零件,通过测绘与计算确定零部件形体尺寸,并用图样及技术文件方式表达出来,它是反求设计中工作量很大的一部分工作。为更好地进行形体尺寸的分析与测绘,应总结箱体类、轴类、盘套类、齿轮、弹簧、曲线曲面及其他特殊形体的测量方法,并合理标注尺寸。

(2) 确定产品中零件的精度。确定零件的精度(即公差设计),是反求设计中的难点之一。通过测量,只能得到零件的加工尺寸,而不能获得几何精度的分配。精度是衡量反求性能的重要指标,是评价反求设计产品质量的主要技术参数之一。科学合理地提出精度要求,对提高产品的装配精度和力学性能至关重要。

(3) 确定产品中零件的材料。通过零件的外观比较、重量测量、力学性能测定、化学分析/光谱分析和金相分析等试验方法,对材料的物理性能、化学成分和热处理等情况进行全面鉴定。在此基础上,遵循“立足国内”的方针,考虑资源及成本,选择合适的国产材料,或参照同类产品的材料牌号,选择满足力学性能及化学性能的国有材料代用。

(4) 确定产品的工作性能。主要针对产品的工作特点和机器性能进行试验测定、反向计算和深入分析,了解产品的设计准则和设计规范,并提出改进措施。

3) 确定产品的造型

对产品的外形构型、色彩设计等进行分析,从美学原则、顾客需求心理及商品价值等角度进行构型设计和色彩设计。

4) 确定产品的维护与管理

分析产品的维护和管理方式,了解重要零部件及易损零部件,有助于维修及设计的改进和创新。

1.2 反求工程建模的基本步骤

人们通称的设计,一般均指正向设计。它是对一个事物的真相事先并不知道,通过设计师的创造性劳动,变为人类需求与喜爱的产品。为此,首先要根据市场需求,提出目标和技术要求,进行功能设计,创造新方案,经过一系列的设计活动,变为产品。概括地说,正向设计是由未知到已知、由想象到现实的过程,如图 1.1 所示。

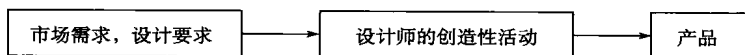


图 1.1 正向设计过程示意图



反向设计是从已知事物的有关信息(包括硬件、软件、照片、广告和情报等),去寻求这些信息的科学性、技术性、先进性、经济性、合理性及国产化的可能性等,要回溯这些信息的科学依据,即充分消化和吸收,更重要的是在此基础上要改进、挖掘,进行再创造。反求的目标如仅限于仿制,只是最原始、低级的模仿,其质量和生命周期不会有竞争力,更严重的是侵权行为,要受产权保护制裁。图 1.2 为反向设计过程示意图。

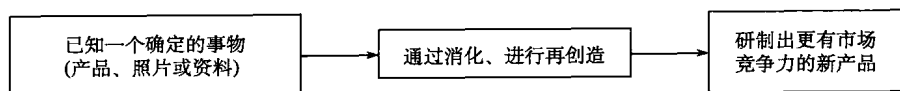


图 1.2 反向设计过程示意图

如果说正向设计的关键问题是要解答“怎么做”,即设计任务提出后,怎样实现和达到预定目标,那么反求的关键问题是要解答“为什么要这样做”,即已知目标后,要探索和掌握这种目标的设计者是如何一步一步实现的,反求别人头脑里是怎样想、怎样做的,要摸清设计意图、所用技术、关键点、设计理论与方法等。从这个意义上说,正设计是主动的创造,而反求是先被动后主动的创造。反求并非正设计的简单逆过程,因为一个先进的、成熟的产品,凝集着设计者的智慧和技木,要去吃透、消化,包含很多复杂内容。往往吃透别人的技术比自己创造还难,这是因为:①先进产品中总有“绝招”、“诀窍”和关键技术,别人并未掌握;②别人的思维不会告诉你,要想“钻进别人头脑里去挖出来”,需要艰苦劳动。多年来我国测绘仿制的产品,大多数达不到原产品的水平,说明发展反求工程的研究和应用是多么重要。

正设计和反设计既有区别又相辅相成,具有丰富正设计经验和水平的人,可以显著提高反求水平;反设计的成功经验可以促进正设计的水平。但缺乏正设计经验者,反设计中也不能充分消化吸收。作为一个国家来说,吃透别人的技术仅仅是第一步,在此基础上结合国情进行再创造,变成有自主权和竞争力的新产品,才是反求工程的完整意义和目的。

反求工程具有与传统设计制造过程截然不同的设计流程。在反求工程中,按照现有的零件原形进行设计生产,零件所具有几何特征与技术要求都包含在原形中;在传统的设计制造中,按照零件最终所要承担的功能以及各方面的影响因素,进行从无到有的设计。此外,从概念设计出发到最终形成 CAD 模型的传统设计是一个确定的明晰过程,而通过对现有零件原形数字化后再形成 CAD 模型的反求工程是一个推理、逼近的过程。



1. 反求工程的步骤

反求工程一般可分为以下4个步骤。

1) 零件原型的数字化

通常采用三坐标测量机(CMM)或激光扫描仪等测量装置来获取零件原型表面各点的三维坐标值。

2) 从测量数据中提取零件原型的几何特征

按测量数据的几何属性对其进行分割,采用几何特征匹配与识别的方法来获取零件原型所具有的设计与加工特征。

3) 零件原型 CAD 模型的重建

将分割后的三维数据在 CAD 系统中分别做表面模型的拟合,并通过各个表面的求交与拼接获取零件原型表面的 CAD 模型。

4) 重建 CAD 模型的检验与修正

采用根据获得的 CAD 模型重新测量和加工出样品的方法来检验重建的 CAD 模型是否满足精度或其他试验性能指标的要求,对不满足要求者重复以上过程,直至达到零件的逆向工程设计要求。

2. 反求工程中常用的测量方法

反求工程中的测量方法可分成两类:接触式与非接触式。

1) 接触式测量方法

(1) 坐标测量机。坐标测量机是一种大型、精密的三坐标测量仪器,可以对具有复杂形状的工件的空间尺寸进行逆向工程测量。坐标测量机一般采用触发式接触测量头,一次采样只能获取一个点的三维坐标值。20 世纪 90 年代初,英国 Renishaw 公司研制出一种三维力一位移传感的扫描测量头,该测头可以在工件上滑动测量,连续获取表面的坐标信息,扫描速度可达 8m/s,数字化速度最高可达 500 点/s,精度约为 0.03mm。这种测头价格昂贵,到目前为止尚未在坐标测量机上广泛采用。坐标测量机主要优点是测量精度高,适应性强,但一般接触式测头测量效率低,而且对一些软质表面无法进行逆向工程测量。

(2) 层析法。层析法是近年来发展的一种反求工程技术,将研究的零件原型填充后,采用逐层铣削和逐层光扫描相结合的方法获取零件原形不同位置截面的内外轮廓数据,并将其组合起来获得零件的三维数据。层析法的优点在于能对任意形状、任意结构零件的内外轮廓进行测量,但测量方式是破坏性的。

2) 非接触式逆向工程测量方法

根据测量原理的不同,非接触式测量大致有光学测量、超声波测量和电磁测量等几种方式。以下仅将在反求工程中最常用与较为成熟的光学测量方法(含数



字图像处理方法)作简要说明。

(1) 基于光学三角形原理的逆向工程扫描法。这种测量方法是根据光学三角形测量原理,以光作为光源(其结构模式可分为光点、单线条、多光条等),将其投射到被测物体表面,并采用光电敏感元件在另一位置接收激光的反射能量,根据光点或光条在物体上成像的偏移,通过被测物体基平面、像点、像距等之间的关系计算出物体的深度信息。

(2) 基于相位偏移测量原理的莫尔条纹法。这种测量方法是將光栅条纹投射到被测物体表面,光栅条纹受物体表面形状的调制,其条纹间的相位关系会发生变化,用数字图像处理的方法解析出光栅条纹图像的相位变化量来获取被测物体表面的三维信息。

(3) 基于工业 CT 断层扫描图像逆向工程法。这种测量方法是对被测物体进行断层截面扫描,以 X 射线的衰减系数为依据,经处理重建断层截面图像,根据不同位置的断层图像来建立物体的三维信息。该方法可以对被测物体内部的结构和形状进行无损测量。该方法造价高、测量系统的空间分辨率低、获取数据时间长、设备体积大。美国劳伦斯弗莫尔国家实验室研制的高分辨率 ICT 系统测量精度为 0.01mm。

(4) 立体视觉测量方法。立体视觉测量是根据同一个三维空间点在不同空间位置的两个(多个)摄像机拍摄的图像中的视差,以及摄像机之间位置的空间几何关系来获取该点的三维坐标值。立体视觉测量方法可以对处于两个(多个)摄像机共同视野内的目标特征点进行测量,而无须伺服机构等扫描装置。立体视觉测量面临的最大困难是空间特征点在多幅数字图像中提取与匹配的精度与准确性等问题。近年来出现了一种新的方法,把具有空间编码的特征的结构光投射到被测物体表面,从而制造测量特征,该方法有效解决了测量特征提取和匹配的问题,但在测量精度与测量点的数量上仍需改进。

1.3 点云处理的数学方法

通过激光三维扫描仪等信号采集设备,可以方便地获取物体表面信息,这些信息通过大量的点来表达,往往形成包含几百万个数据的大型数据包,通常称为点云(Point Cloud)。通过对点云的处理,可以得到物体的表面表达,与数控加工中心结合,能直接将处理结果用于加工生产,从而达到避免设计、修改图纸的繁琐过程的目的。此外,根据点云数据能直接实现三维建模,因此还能事先检测出机械部件的运行情况和机构运行时是否会发生干涉,在虚拟组装和虚拟加工中具有重要意义。



反求工程包含以下几个重要步骤:数据获取、数据预处理、模型重建和快速制造。数据获取非常关键,它是曲面重建和快速制造的基础,也是进行误差分析的前提。根据数据获取方式的不同可得不同的初始点集,相应的数据预处理和曲面重建方法也各不相同。目前主要采用激光三维扫描仪作为数据输入源或数据产生源,它一次可产生几百万个甚至上千万个点,这些点虽然能表达物体的一些特征,但并无明显的几何分布特性。

数据预处理与模型重建是产品反求的核心内容,预处理的效果和模型的选择将直接影响曲面重建的质量,并决定最终的 CAD 模型的优劣。点云的处理以点云数据作为输入,以曲面模型为输出,即解决根据点云构建物体的几何表达的问题。

点云表达的优点在于可以通过点的组合、曲线拟合、面元拟合和面元组合等方式,实现对任意曲面的无穷逼近。从表达方法上讲,大致可分为基于网格和基于点的表达这两个大类,基于网格的方法主要有传统的 NURBS 表面和三角形面片两种,它们在一些场合体现出较好的优势,但从目前的情况看,却以基于点的点云表达方法应用较为普遍,这是由于两个相邻的点云数据之间没有连接关系,在处理复杂的三维物体时显得特别灵活和方便,因此,以采样点元作为基本元素进行表面几何建模和绘制,受到越来越多的关注。

1.3.1 基于网格和基于点的表达方法

1. 基于网格的点云表达

基于网格的点云表达方法是一种传统方法,它以网格作为中介来表达离散点之间的依存关系,从而将点云组织成一个有机的整体,恢复出曲面原貌。在基于网格的方法中,三角形网格是目前最常用的物体外表面表达基元,在一些文献中,三角形网格也常被称为三角形面片或三角面片。特别是在有较高性能要求的场合,三角形面片已取代了传统 CAD 表面的表达形式,比如 NURBS 表面等,原因主要如下:

(1) 三角形面片具有强大的表面表达能力,任何拓扑和形状模型外表面都能用三角形面片进行表达,表面光滑度较高,并且这种表达方式不需要满足复杂的片内光滑条件。

(2) 对三角形面片的几何处理和绘制已得到高速图形硬件的支持。

(3) 和 NURBS 曲面片相比,三角形面片具有更简单的数学表达形式,从而使三角网格模型中的大部分可用来获取与 NURBS 相同的逼近程度。

(4) 光滑表面用分片线性的三角形面片来表达时,对三角形面片的边长减半可以使误差减小为原来的 $1/4$,这意味着三角形的数量与逼近误差成反比。因此,



根据表面曲率或形状复杂度等因素调节三角形面片顶点的密度可以更好地逼近原型的外表面。

基于网格的方法包括网格简化、特征提取及曲面重建等关键技术,它们都以网格节点或网格边为基础,通过网格显式地表达物体拓扑结构,具有简单、直观的优点,能表现形状任意复杂的物体,目前已得到广泛应用,这方面的研究工作较多,可为实际应用提供参考。

基于网格的方法有它独特的优势,但也存在一些缺陷,特别是随着数据获取技术的飞速发展,它的不足之处也日益明显,具体表现如下:

(1) 对包含上百万个数据的点云,网格的建立十分复杂,难以有效保证网格拓扑结构的正确性。拓扑结构修改困难是处理过程中将会遇到并且难以解决的难题,特别是随着网格的逐步细化,可能改变拓扑,导致网格的全部重建。

(2) 由于网格模型既要记录各个数据点的相关信息,同时还要记录点与点之间的连接关系的拓扑结构信息,因此对大数据量的点云来说,存储量大、处理时间长。

(3) 过分侧重于对离散点的分割处理,绘制曲面前要分解为三角面片,随着物体模型的复杂度不断提高,三角片的数量呈几何级数增长,计算量的增长将很快超出一般计算机的计算能力极限。

2. 基于点的点云表达

基于网格的表达方法由于具有较大的缺陷,在实际应用中显得力不从心。在这样的形势下,迫切地需要一种新的方法,最近几年发展起来的基于点的点云表达方法直接以点作为曲面绘制和造型的基本元素,无需建立网格,受到越来越广泛的关注,特别是在处理点采样数据时具有非常明显的优势。

大致说来,基于点的点云表达方法具有以下优点:

(1) 能有效解决网格方法的高度复杂性问题。

(2) 不用显式地存储点云数据的拓扑结构,对存储空间的需求少,能实现复杂物体的有效绘制,可以方便地修改曲面拓扑而不必重建整个拓扑关系。

(3) 具有高度的数据局部性,可并行处理,能快速实现物体曲面的粗糙表达。

但基于点的表达也存在一些不足,比如就目前的研究情况看,多数基于启发式方法,即根据工程应用的要求设计一些实用的技巧,带有经验性的成分。虽然通过这些技巧能解决实际中的一些问题,但缺乏坚实的理论基础。

1.3.2 基于点的表面几何表达

基于点的表达是利用离散采样点的集合来表达连续模型的外表面。在连续的模型外表面上,按一定的规则,如均匀采样法等进行采样,产生一系列称为采样点