

反求工程

数据处理与模型重建技术

神会存 著

陕西人民教育出版社



中原工学院学术专著出版基金资助

反求工程

数据处理与模型重建技术

神会存 著

陕西人民教育出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

反求工程数据处理与模型重建技术/神会存著, 一西安:
陕西人民教育出版社, 2006. 9
ISBN 7-5419-9667-X

I. 反... II. 神... III. ①机械设计: 计算机辅助
设计-数据处理②机械设计: 计算机辅助设计-建立模
型 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 084929 号

**反求工程
数据处理与模型重建技术
神会存 著**

陕西人民教育出版社出版发行

(西安长安南路 181 号)

各地新华书店经销 河南郑州电力印刷厂印刷

850×1168 32 开本 8.0 印张 250 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1-3000

ISBN 7-5419-9667-X/TH.1

定价: 28.00 元

前 言

针对反求工程中曲面重建存在的问题及坐标测量技术发展提出的实际需求,本书重点研究测量数据处理与模型重建问题。主要内容包括:海量测量数据简化技术、三角网格模型重建算法、三角网格模型光顺调整与孔洞修补技术、三角网格模型的数据分块技术、基于三角网格模型的四边域结构建立、基于三角网格模型的 C^1 与 C^2 连续 B 样条曲面重建及基于光照模型的重建曲面品质检查技术等。研究方法采用先根据测量数据建立三角网格模型,继而对三角网格模型进行光顺与优化调整、孔洞修补及自动分片等处理,然后基于处理后的三角网格模型进行 C^1 与 C^2 连续的 B 样条曲面重建,并对重建曲面进行品质检查。虽然当今许多测量设备(如 Atos)可以直接以三角网格模型的形式输出测量数据,但以 CMM 为代表的坐标测量设备仍在实际中广泛使用,这些设备输出的一般是海量散乱测量数据。对于海量散乱测量数据,先建立三角网格模型是为了充分利用三角网格模型对测量设备及模型拓扑结构适应性强的特点,可以使曲面重建方法适应不同的测量数据,并直接用于图形显示和快速原型制造。在三角网格面的基础上建立分片光滑的 B 样条曲面模型,可以实现模型的自动分片,从反向沟通三角网格曲面与样条曲面间的联系,满足其他不同的后续应用。对重建曲面进行基于光照模型的品质检查,可以真实地体现重建曲面的质量优劣,避免肉眼观察评判所固有的错觉与误差,为适应不同应用场合需要的曲面局部或全局光顺调整提供客观依据。

张丽艳博士与刘胜兰博士为作者提供了无私的支持与帮助，尹旺中硕士为本书的实例实现编写了大量程序，在此向他们表示深深的谢意！

作者

2006年5月于郑州

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 反求工程的应用	(3)
1.3 反求工程中的数据采集技术	(5)
1.4 反求工程中的模型重建	(10)
第二章 海量测量数据的简化技术	(16)
2.1 海量数据的空间划分	(16)
2.2 散乱测点间邻接关系的建立	(17)
2.3 按给定数据点个数简化	(20)
2.4 按给定数据点间的距离简化	(21)
2.5 按给定的法向精度简化	(22)
2.6 应用实例	(24)
2.7 本章小结	(27)
第三章 三角网格模型重建算法	(28)
3.1 引 言	(28)
3.2 相关定义	(30)
3.3 三角网格模型的描述	(30)
3.4 算法描述	(32)
3.5 空间划分与 K-邻近的计算	(33)
3.6 切平面计算	(33)
3.7 切平面法矢方向调整	(34)
3.7.1 问题的提出	(34)
3.7.2 算法描述	(35)

3.8 有向距离场函数的定义	(39)
3.9 三角网格面的生成	(40)
3.9.1 步进立方体算法	(40)
3.9.2 MC 算法存在的问题及改进措施	(43)
3.9.3 三角网格面的生成	(46)
3.10 算法讨论	(47)
3.10.1 关于 ρ -密度	(47)
3.10.2 关于 K-近邻	(48)
3.10.3 关于算法复杂性	(48)
3.11 应用实例	(49)
3.12 重建模型的误差分析	(54)
3.12.1 算法基本思想	(55)
3.12.2 测量点到三角片间的距离计算	(56)
3.12.3 误差分析结果的显示	(57)
3.12.4 误差分析实例	(59)
3.13 三角网格模型重建在快速原型制造 和数控加工中的应用	(60)
3.14 本章小结	(62)
第四章 三角网格模型优化调整与孔洞修补技术	(65)
4.1 三角网格模型的优化调整	(65)
4.2 三角网格模型简化算法	(68)
4.2.1 算法基本原理	(69)
4.2.2 顶点对合并的权值计算	(70)
4.2.3 顶点移动策略	(73)
4.2.4 顶点对合并操作的合法性检查	(74)
4.2.5 算法总结	(75)

4.3 三角网格模型简化的进一步推广	(76)
4.3.1 带属性的三角网格模型简化算法	(76)
4.3.2 多分辨网格模型生成	(80)
4.4 三角网格模型的孔洞修补	(82)
4.5 本章小结	(85)
第五章 三角网格模型微分几何特性估算与光顺	(88)
5.1 三角网格模型的微分几何特性估算	(88)
5.1.1 曲率估算的相关研究工作	(88)
5.1.2 网格顶点处的局部二次曲面表示	(89)
5.1.3 曲率计算	(92)
5.2 曲率显示	(94)
5.2.1 曲率的线性插值显示	(94)
5.2.2 曲率的分组显示	(95)
5.3 曲率估算应用实例	(96)
5.4 三角网格模型光顺算法研究	(100)
5.4.1 三角网格模型光顺算法的相关研究工作	(100)
5.4.2 几种典型光顺算法介绍	(102)
5.5 主曲率均匀的网格光顺	(105)
5.5.1 主曲率均匀的光顺原理	(105)
5.5.2 局部光顺	(108)
5.6 光顺算法应用实例	(110)
5.7 本章小结	(114)
5.8 附录	(115)
第六章 三角网格模型的数据分块技术	(119)
6.1 引言	(119)
6.2 三角网格模型的特征线自动提取	(121)

6.2.1 三角网格曲面上特征点的确定	(121)
6.2.2 特征线的连接	(122)
6.2.3 特征线提取应用实例	(123)
6.3 基于面的数据分块方法研究	(124)
6.3.1 曲面分类理论	(124)
6.3.2 三角片类型标示	(126)
6.3.3 区域生长	(127)
6.3.4 块优化	(130)
6.4 应用实例	(132)
6.5 本章小结	(137)
第七章 基于三角网格模型的四边域结构建立	(140)
7.1 引言	(140)
7.2 基于主动轮廓模型的特征线优化	(142)
7.2.1 问题的提出	(142)
7.2.2 主动轮廓模型	(143)
7.2.3 初始轮廓线确定	(145)
7.2.4 Snake 的能量方程	(147)
7.2.5 特征线优化	(150)
7.2.6 特征线优化应用实例	(152)
7.3 基于数据分块的 N 边界区域生成	(158)
7.3.1 N 边界区域数据结构定义	(158)
7.3.2 分块结构向 N 边界区域结构的转换	(160)
7.4 四边界区域交互生成	(161)
7.5 本章小结	(167)
第八章 基于三角网格模型的分片	
光滑 B 样条曲面重建	(171)

8.1 引言	(171)
8.2 基于矩形域的重新采样和参数化	(172)
8.2.1 初始均匀栅格采样	(172)
8.2.2 均匀采样的优化和参数化	(176)
8.3 光滑分片 B 样条曲面重建	(178)
8.3.1 B 样条曲线曲面基本理论	(178)
8.3.2 B 样条曲面重建基本理论	(179)
8.3.3 用两阶段曲线法重建双三次 B 样条曲面	(181)
8.4 应用实例	(183)
8.5 本章小结	(185)
第九章 基于三角网格模型的 C^2	
连续 B 样条曲面重建	(188)
9.1 两相邻 B 样条曲面片间的 C^2 连续混合	(188)
9.1.1 基本原理	(189)
9.1.2 扩展初始 B 样条曲面片	(192)
9.1.3 裁剪新拟合曲面片	(195)
9.1.4 混合参数域的参数转换	(195)
9.1.5 相邻曲面片边界处的混合	(201)
9.2 多曲面交汇处的混合	(206)
9.2.1 三边贝齐尔曲面片简介	(207)
9.2.2 交汇混合片的定义	(207)
9.2.3 多曲面交汇处 C^2 连续性分析	(208)
9.2.4 交汇混合函数的分析和计算	(210)
9.2.5 交汇混合参数域任一点计算的算法流程	(215)
9.3 应用实例	(216)
9.4 本章小结	(219)

第十章 曲面品质检查分析	(221)
10.1 相关研究工作	(221)
10.2 高光线检查方法简介	(223)
10.2.1 高光线定义	(223)
10.2.2 高光线性质	(226)
10.2.3 光线模型与光柱模型中高光线的生成原理	(227)
10.3 光片模型	(229)
10.3.1 基本原理	(229)
10.3.2 求取光片模型的高光线	(232)
10.4 应用实例	(239)
10.5 本章小结	(241)

第一章 绪 论

1.1 引 言

传统制造业的战略是规模效益第一。21 世纪,对制造业最具影响的技术有两个方面,一是快速响应制造,一是可持续发展。随着计算机、网络化的发展,信息高速公路加快了科技信息的传播速度,产品的生命周期越来越短,人们追求完美与个性化的消费需求使产品品种越来越多,批量越来越小,企业间的竞争不再只是质量与成本上的竞争,而更重要的是时间的竞争,这种趋势在 21 世纪将日趋强劲。以已有产品为基准点 (benchmarking) 进行设计已经成为当今的一条设计理念。如何博采众家之长,充分吸收利用先进的设计制造成果,使产品设计立于更高的起点,是世界各国都十分关注的问题。快速响应制造系统就是要以快速、经济的生产方式满足客户化、小批量或单件定制的市场需求。是否具备快速响应能力直接关系到制造业在世界经济日益全球化的 21 世纪是否具有竞争力的问题,直接关系到国家的综合实力问题。

21 世纪的设计和制造不但要面向集成化、智能化、标准化、柔性化,而且要实现并行化、分布化、网络化、虚拟化,而这一切的基础是信息的数字化。完成设计信息数字化建模的计算机辅助设计 (CAD) 作为一项重要单元技术发挥着基础与核心的作用。通常,产品信息数字化模型是基于产品的功能和性能要求,由设计师用 CAD 软件构造的,即为正向工程(Forward Engineering)或正向设计。随着参数化特征造型技术的发展,目前一般的用于正向设计的机械 CAD/CAM 得到了较好的解决。

但在许多特殊领域，如产品仿制、模具快速制造、三维服装设计、玩具设计、电影特技、动画制作、艺术品制作、动植物模拟、人体器官复制、地理地形测量与数字化再现等，利用普通的造型手段往往难以很好地解决问题，因而迫切需要造型方法、设计手段的丰富和发展。这一方面给设计和造型手段提出了新的课题和挑战，另一方面也提供了更广阔的发展空间。

反求工程(Reverse Engineering)是数字化与快速响应制造大趋势下的一项重要技术，是 CAD 领域中一个相对独立的范畴。从广义上讲，反求工程可定义为“针对消化吸收先进技术的一系列分析方法和应用技术的结合。它是以先进产品设备的实物、软件（包括图纸、程序、技术文件等）或影像（图像、照片等）作为研究对象，应用现代设计方法学原理、生产工程学、材料科学和有关专业知识进行系统深入地分析和研究，探索掌握其关键技术，进而开发出同类的更为先进的产品”^[1]。文献[2]将反求工程简单地定义为“理解原始的设计意图和机制”，包括形状、材料、工艺等诸多方面。目前有关反求工程的研究和应用大多数针对实物模型的几何形状的反求，在这个意义下，反求工程是根据已有实物模型的坐标测量数据，重新建立实物的数字化模型，而后进行分析、加工等处理。这里的实物模型可以是机械产品、人体、动植物、艺术品、地形地貌等等。通过实物模型产生其数字化模型，可以充分利用数字化的优势，提高设计、制造、分析的质量和效率，并适应智能化、集成化、并行化、网络化的产品设计制造过程中的信息存储与交换。反求工程将现代坐标测量设备作为产品设计的前置输入装置和原型或产品制造后的检测手段，与 RPM（快速原型制造）、CAD/CAM（计算机辅助设计与制造）相结合并形成产品设计制造的闭环系统，

将有效提高产品的快速响应能力，丰富几何造型方法和产品设计手段，其关键技术可用于其他许多领域，从而拓宽计算机辅助建模的应用领域。

反求工程并不限于样件复制，其目标是实现一种智能化的三维扫描识别重建系统。对于二维的情况，图文扫描识别系统不同于一般的复印机在于图文扫描识别系统允许对识别后的图文进行增加、删除、修改，可以输出文本文件和图形结构。类似地，三维扫描识别系统不仅要获得物体的基本数据，而且要对数据进行必要的处理，建立相应的计算机模型，允许对该模型进行分析、修改、体积和面积等物性计算等等。

1.2 反求工程的应用

反求工程是一个简单而朴素的概念，然而却有着十分广泛的应用，可归纳为以下几个方面：

(1) 由于种种原因，有时在只有样件，没有样件图形文档的情况下需要对样件进行有限元分析、备件加工、模具制造或者需对样件进行修改，考察修改后的样件与其他零件间的装配协调性等等，这都需要利用反求工程手段将实物模型转化为CAD模型从而提高设计制造的自动化程度。

(2) 反求工程的另一类重要应用是对外形美学要求较高的零部件的设计。例如在汽车工业，外形设计师仍然经常要制作全尺寸的木质或黏土模型，因为要在二维的尺寸大大缩小了的计算机屏幕上完成这样高要求的三维复杂外形设计是非常困难的。当实物模型制作好以后，就需要通过测量设备输入到计算机辅助设计系统中，以便进行设计和后续的各种操作。

(3) 反求工程在单件产品快速定制生产中也可以发挥其独

到的作用。例如，每一个人体都是不同的，采用先进的扫描设备和先进的模型重建软件，可以快速建立人体的数字化模型，从而可以设计制造诸如头盔、假发套、服装等产品，并使这些产品完全适合每一个不同的客户。世界短跑名将卡尔·刘易斯与日本 Mijuno 公司在 90 年代初期就曾进行了一项极具进取性的计划——用反求工程手段建立刘易斯的人体数字化模型，并在计算机中重现了刘易斯的脚足和肌肉的形状，结合其他分析软件，设计制作了与刘易斯脚形完全一致的钉鞋。刘易斯声称，这种钉鞋使他感到像在赤足奔跑一样。他正是穿着这双钉鞋在 1991 年世界田径锦标赛上创造了 9.86 秒的百米世界记录。这双钉鞋的价值已经远远超出了一双鞋子本身。由于当时技术并不成熟，刘易斯的一双钉鞋花了多位专家近一年的时间。目前，这方面的研究和应用仍处于初级阶段，但在当今这个追求完美与个性化的时代，可以预见此项研究将极具发展前景。人体计算机模型的建立对于人机工程学等领域也将起到非常重要的推动作用。

（4）在医学领域，利用层析 X 射线（Computerized Tomography, CT）及核磁共振（Magnetic Resonance Imaging, MRI）等设备采集病变部位的外形数据，然后进行三维数字化模型重建，可以为疾病的确定与诊断提供重要依据。另外，通过对患者骨骼、关节、牙床等的测量，建立相应的计算机模型，可以使假肢制造、牙齿镶复更加具有针对性，更符合具体患者的需求。

（5）在地理信息领域，利用现代的卫星遥感测量技术，对大地遥测数据进行特征识别和建模，可以建立三维数字化真实感地形图、快速生成导弹目标的自适应跟踪轨迹等。利用声呐

测量设备，可以获得海底及港口的地下形貌数据，利用几何模型重建技术，将十分有利于资源利用、海底作业、海上交通、港口建设等。

(6) 对于一些具有十分复杂外形的物体，如动物、植物、玩具、艺术品等，用目前普通的 CAD 软件，还很难满足形状设计的要求，常常要先制作手工模型，然后运用反求工程将实物模型转化为 CAD 模型。这一类计算机模型的建立在电影动画制作中有重要意义，美国动画片“玩具总动员”是反求工程应用于娱乐动画领域的最好例证。

(7) 将反求工程与快速原型制造 (RPM) 相结合，组成产品设计、制造、检测、修改的闭环系统，实现快速的测量、设计、制造、再测量修改的反复迭代，高效率完成产品的初始设计。将反求工程与快速原型制造 (RPM) 相结合，还可以将三维物体方便可靠地“读入”、“传输”，并在异地重新生成，即实现所谓的“三维传真”。

(8) 反求工程的另一重要应用领域是计算机辅助检测。成品的精度检验是企业进行质量控制的重要手段，然而复杂形状产品的检验往往非常困难，需要大量的时间和人力。利用自动测量设备，可以快速采集到零件的大量数字化点，将这些坐标点读入计算机，就可以通过软件自动分析测量到的数据点与理论模型间的误差。分析结果可用报告形式输出，也可以在理论模型上绘制误差彩色云图（即用不同的颜色标志不同的误差值），使零件各部位的制造精度一目了然。

1.3 反求工程中的数据采集技术

坐标数据采集是反求工程中的第一个环节，是数据处理、

模型重建的基础。高效率、高精度地采集样件的外形数据是反求工程的一个重要研究内容。随着科学技术的不断发展，测量技术也随着新的物理原理、新的技术成就的不断引入而获得长足发展，光波干涉技术特别是激光技术的实用化使得测量精度提高了 1.2 个数量级；数字显示技术在测量上得到了充分的应用，提高了读数精度和可靠性；光电摄像技术与计算技术的结合，使得对复杂零件的测量无论是精度还是效率都得到了极大的提高。目前，主要的坐标测量方法分类如图 1.1 所示。

由图 1.1 可见，坐标测量可分为接触式测量和非接触式测量两大类。接触式测量方法通过传感测量头与样件的接触而记录样件表面的坐标位置，可以细分为点触发式和连续式数据采集方法。接触式测量的精度一般较高，但测量效率很低。应用最广泛的接触式测量是坐标测量机（CMM）。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，将一定的物理模拟量通过适当的算法转化为样件表面的坐标点。例如：声呐测量仪利用声音遇到被测物体产生回声的时间计算点与声

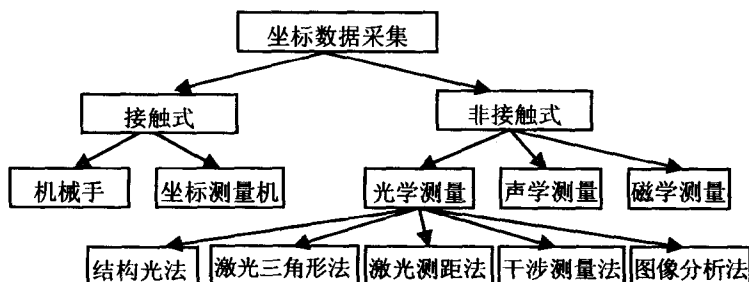


图 1.1 坐标测量方法分类

源间的距离；激光测距法是将激光束的飞行时间转化为被测点与参考平面间的距离；图像分析法是利用一点在多个图像中的