

# 面向自由曲面的反求工程研究综述

郑颖<sup>1</sup>, 李健<sup>2</sup>

(1 河南师范大学 计算机与信息技术学院, 河南 新乡 453007;

2 陕西科技大学 计算机与信息工程学院, 陕西 咸阳 712081)

**[摘要]** 反求工程是实现自由曲面零件数字化仿制和改进的一项重要技术, 其内容涉及自由曲面的测量、曲面重建、数控加工和精度检测等方面. 从自由曲面测量规划、测点数据曲面重建、测量加工一体化技术等方面综述了面向自由曲面的反求工程研究现状. 其中, 自由曲面的测量规划主要分析了曲面(包括已知曲面和未知曲面)测点的自适应布置、测量路径的优化研究当前存在的问题, 提出了相应的改进方法, 而曲面的重建则主要从复杂曲面的分区域测量建模和测量数据的直接加工方面作了研究. 另外, 为了实现对自由曲面反求工程所涉及的各项技术的集成, 还专门对自由曲面测量重建加工一体化技术的发展情况作了介绍, 最后分析了该项技术的发展趋势和下一步研究的重点.

**[关键词]** 自由曲面, 测量规划, 反求工程

**[中图分类号]** TM 930.1, **[文献标识码]** A, **[文章编号]** 1672-1292(2005)03-0045-05

## Review on Reverse Engineering of Freeform Surface

ZHENG Ying<sup>1</sup>, LI Jian<sup>2</sup>

(1 College of Computer and Information Technology, Henan Normal University, Henan Xinxiang 453007, China

2 College of Computer and Information Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Shaanxi Xianyang 712081, China)

**Abstract** Reverse engineering is an important technology in realizing the duplication and modifying of freeform surface parts which includes measuring, modeling, manufacturing and inspecting of freeform surface. The paper studies the current research status of measurement path planning, surface reconstruction of measured points and integrated technology oriented to the reverse engineering of freeform surface. Discusses the problems existed in the measurement path planning such as the adaptive layout of the measured points and the optimization of the measurement path, and proposes the method to solve the problems. It also studies the modeling and directly manufacturing of complicated surface based on the measured points respectively in the surface reconstruction, and in addition, introduces the development of the measuring modeling and manufacturing integrated technology to realize the integration of the above technology which included in the reverse engineering of the freeform surface, and finally analyzes the developing tendency and key problems of the technology.

**Key words** freeform surface; measure planning; reverse engineering

在与制造业密切相关的航空航天、汽车、造船及模具等工业领域, 为了追求对产品功能和外形等方面的日益严格的要求, 使得自由曲面零件在现代工业中得到了越来越广泛的应用. 而信息社会中制造业的产品具有信息模型和实物两种不同范畴的表现形式, 产品生产中最具创新和价值的部分包含在信息模型中, 对于自由曲面零件尤为如此. 所以, 对自由曲面零件进行三维几何形状测量、数学建模和数控加工及产品质量评定, 从而实现对自由曲面

零件的反求, 在现代制造业中具有重要的现实意义. 本文拟从自由曲面测量规划、测点数据曲面重建、测量加工一体化技术等方面对该领域的研究现状作以综述.

## 1 自由曲面的测量和模型重构

### 1.1 自由曲面测量规划

对自由曲面零件的测量是实现自由曲面零件设计制造与形状检测的关键步骤. 根据被测物的

收稿日期: 2004-09-28

作者简介: 郑颖(1965-), 女, 副教授, 主要从事计算机应用和数学建模等方面的教学与研究. E-mail: wanz@henannu.edu.cn

CAD 模型是否已知, 可将自由曲面的测量分为 CAD 模型已知的测量和 CAD 模型未知的测量. 这两种测量的目的不同, 测量的策略也有所不同. 前者主要是为了检验和保证产品的精度要求; 而后者主要是根据测量所获得的零件表面的测点数据实现曲面重建, 以便利用 CAD /CAM 技术进行模型修改、零件设计、数控加工指令的生成及误差分析等处理.

### 1.1.1 已知曲面测点自适应布置

对于 CAD 模型已知的自由曲面的测量, 其关键问题是如何高效、可靠、安全地获取待测曲面的几何形状信息. 对自由曲面进行测量时, 采用等间距测量是最简单易行的测量方法, 但为了保证测量准确度就必须缩小测量间距, 这使得测量效率显著降低, 并增加了后续的误差评定等工作的难度. 一种理想的方法就是使测点分布的疏密随曲面曲率变化而变化, 曲率越大, 测点应越密; 反之则越疏, 从而较好地反映待测曲面的几何形状信息, 实现测点的自适应分布.

对 CAD 模型已知曲面实现测点自适应分布的研究主要有: Kam<sup>[11]</sup>提出了几何分解方法完成曲面形状检测的思想, 采用“曲面-曲线-点集-测点集”的分解次序, 实现从曲面到测点集的分解和曲面评价工作. Pakk<sup>[12]</sup>等初步探讨了模具形面检测随曲率变化的布点方法. Koster<sup>[3]</sup>的布点准则是曲面的法线沿参数线以常速变化, 根据切线方向变化的速率实现了曲面采样点的自适应分布. Li<sup>[4]</sup>根据质心模型实现了参数域上依据曲率测度的采样网格规划, 可以自组织地形成拓扑网格. 来新民<sup>[5]</sup>则在 Li 的基础上, 以曲面上某一点处的主曲率的几何平均值为测度来对测点进行更具几何不变性的物理域上的规划, 并通过采用非线性规划方法来实现给定采样精度下自适应地选取最少的采样点. Vasilescu<sup>[6]</sup>等研究了基于运动方程的结点动态模型曲面网格自适应划分. Ahn<sup>[7]</sup>等利用 Kohonen 提出的神经网络自组织特征识别原理实现了曲面网格的均匀和非均匀网格划分. Menq C H<sup>[8]</sup>对自由曲面的检测点数确定进行了研究, 提出检测点数的计算公式, 认为检测点数和设计时给定的公差范围和加工因素有关. 高国军<sup>[9]</sup>在文献 [8] 的基础上, 提出了检测点按曲率分布的方法, 并采用实验方法给出了在一定的加工工艺能力和检测精度前提下不同曲率的加工曲面对应检测点数量的确定系数.

上述方法虽然有效地实现了测点的自适应布置, 但考虑到实际中设计坐标系和测量坐标系并不

统一, 要驱动测头对上述测点的测量, 需要将上述设计坐标系中的测点转换到测量坐标系. 为此, 作者提出了一种寻位自适应检测算法<sup>[10]</sup>来解决上述问题, 但寻位的鲁棒性还有待提高.

### 1.1.2 未知曲面测点自适应布置

对于 CAD 模型未知的自由曲面零件的测量, 应主要考虑如何根据已测点的信息来对自由曲面的测量作出预测和规划, 解决测头对被测曲面的运动跟随问题, 使测头运动能够密切跟随曲面形状的变化, 使得测量实现起来可行、安全、高效, 同时也要尽量使测点分布的疏密与曲面的弯曲程度保持一致, 并使测点数据便于后续的曲面重构或其它处理.

有关这方面的研究主要有: 王平江<sup>[11]</sup>等提出等弧长均匀网格划分技术, 并通过人机交互实现非均匀网格的划分, 该方法不仅要求已知曲面的边界曲线, 而且不能实现真正的等弧长; 文献 [12] 提出依据传感器的工作范围、入射角、采样弧长误差和最小曲率半径确定采样步长的方法, 该方法没有考虑到曲面倾斜的影响, 且由于以曲面最小曲率半径确定扫描步长, 难免使采样工作量加大; Zhang Y F 等人<sup>[13]</sup>采用神经网络的方法对采样点数量的确定进行了研究, 该方法的优点在于, 网络结构和网络参数确定后, 适合网络范围采样点数量的计算非常简单, 但网络的使用范围小, 仅限于不同的加工方法下一定直径范围内的圆柱孔, 在确定网络参数时要进行大量的加工实验来形成训练样本. 白作霖等<sup>[14]</sup>对基于坐标测量机的自由曲线曲面的测量进行了研究, 在决定初始测量方向后 (手动测量两点) 沿零件某一截面自动扫描测量, 测量步长设定在一定的范围内, 初值取最小, 自动测量过程中按照被测曲线相对于测量方向的变化快慢对步长动态调整. 文献 [15] 提出一种曲面三角自适应测量方法, 其测点规划类似于程序设计中的“自顶向下, 逐步求精”. 首先对待测曲面进行等间距均匀粗测, 根据测量结果是否满足精度要求来决定是否作进一步的“求精”测量, 该方法充分利用了待测曲面的几何特性, 但对测点的处理比较烦琐, 很难实现实时测量. 另外, 上述方法一般都能较好地实现沿测量方向的测点自适应布置问题, 但对沿测量进给方向的测点自适应布置问题仍有待进一步研究.

### 1.1.3 测量路径的优化

随着产品性能的日益提高, 组成产品的零件的形状也日趋复杂, 往往包含有凸台、深孔等测量障碍区, 测量中可能发生测头与待测零件发生碰撞或

增加测量过程中的探测时间等问题.如何进行测量路径的优化,使得测量头能够以尽可能短的路径安全而又高效地遍历待测曲面的测量区域是自由曲面测量中的又一关键问题.

传统的测量路径采用类似于曲面加工中的行切法和环切法的行扫描测量方式和环形扫描测量方式.当存在测量障碍区时,这两种测量方式需要从测量障碍区上经过,所以空行程多.“P”型点阵块测量方式<sup>[16]</sup>是一种较为简便易行的路径生成方式,它生成的测量路径可有效地避开测量障碍区,空行程少,但在很多情况下会漏去一部分可测点,应用范围有很大的局限性.Voronoi图方法<sup>[17]</sup>能够对很复杂的图形产生优化路径,从而避开各个测量障碍区,避免不必要的空行程,但该方法数据结构复杂,编程困难,占用计算机内存大.文献[18]提出了一种基于蚁群算法的测量路径优化方法,它借鉴生物界种群拟进化机制来实现随机化搜索与优化,具有较强的鲁棒性和全局优化性能,但其搜索时间长,搜索易出现停滞,难以在实际中应用.作者提出了一种基于扫描优角顶点和单调剖分思想的测量路径优化方法<sup>[19]</sup>,较好地实现了测量路径的优化问题.

## 1.2 曲面重建

复杂曲面产品的反求工程 CAD 建模,作为自由曲面零件数字化制造的关键技术之一,涉及计算机、图像处理、图形学、神经网络、计算几何、激光测量和数控等众多的交叉学科和领域,是国内外学术界,尤其是 CAD/CAM 领域广泛关注的热点问题之一.它是指从一个已有的物理模型或实物零件产生出相应的 CAD 模型的过程.与传统意义的仿形制造不同,反求工程主要是原始物理模型转化为工程设计概念或设计模型,从而为提高工程设计、加工、分析的质量和效率提供充足的信息,同时为充分利用先进的 CAD/CAE/CAM 技术对已有的产品原型进行再创新工程服务.

传统的研究和解决此问题的途径一般有复杂曲面的分区域测量建模和测量数据的直接加工两种.前者是以三坐标测量机或激光扫描测量机为基础,在人为制定的测量规划原则的指导下,将一个复杂的自由曲面分成若干个拓扑结构的四边形边界的区域,在每个区域内按截面线进行测量,然后,对每个区域内的数据进行处理,转换为通用 CAD/CAM 系统可以接受的数学模型文件,完成产品的测量建模.后者主要通过非接触式激光扫描测量机完成对物理模型的密集扫描,并将这些数据直接用

于数控加工(英国 Renishaw 公司的系列 SCAN 软件、美国 PTC 公司的 Pro/Engineer 系统以及法国的 STRM 100 软件等均具有这方面的功能. Lin A C 等<sup>[20]</sup>也进行了这方面研究),或者经过对扫描数据的一系列处理,产生构造物体表面模型所需要的主要几何特征;根据这些几何特征,最终由通用 CAD/CAM 系统建立实物的表面模型,这类软件主要包括 Surfer Icam/Surf 等.如何有效地解决测量“点云”对象的造型问题,还有待进一步的研究.

## 1.3 曲面测量加工一体化

为了实现自由曲面反求工程中各个阶段的信息集成,国内外学者对自由曲面的测量、重建和数控加工一体化技术作了大量的研究,比较典型的有:大连理工大学卢杰持教授<sup>[21]</sup>组织研制的“曲面自动跟踪测量和密集数据采集系统 DIG II02C”,在数控仿形机床上通过仿形头,实现实物模型跟踪测量和仿形加工.该系统有 3 个特点:三维电感测头自动跟踪测量实物表面;密集数据采集和存储;数控仿形加工或利用密集数据编制数控加工指令,供其它数控机床使用.青海机床厂生产的加工中心,主轴配上英国 Renishaw 三维电感测头,先仿形测量,后编制数控加工指令进行数控加工,构成数控仿形测量与加工系统.上海机床厂、青岛前哨-英柯发(QI-TECH)公司和中国航空精密机械研究所等单位<sup>[22]</sup>则着重进行了曲面实物模型几何形体数字化方面的研究开发工作.重庆大学梁锡昌教授等<sup>[23]</sup>使用双三角传感器实现了脱离坐标测量机的复杂曲面逆向工程系统.借助于被测物体的转动,用 3 幅图像完成 360°圆周曲面的测量,再将 3 幅图像缝合成完整的曲面.施进发等利用非接触光电测头实现了对轿车油泥模型的局部实际测量;国防科技大学罗飞路<sup>[24]</sup>等借助立体视觉进行了测量加工系统化的研究,使用 B 样条进行曲面的重构,并用 DXF 文件与 AUTOCAD 通讯.华中理工大学的王平江博士<sup>[11]</sup>和天津大学的来新民博士<sup>[15]</sup>等也进行了类似系统的开发.

国外在这方面的实践要更早一些,比较典型的如:日本 Makino 公司的 FDNCC 系列的立式数控仿形铣床,专为模具加工服务,可实现高效的数控加工和高效的仿形加工.意大利 Mandelli 公司生产的 Mandelli7 型数控加工中心,配上英国 Renishaw 三维电感测头,亦构成了一个数控仿形测量与加工系统.世界上著名的生产三坐标测量机的公司,如英国的 Renishaw 公司、意大利的 DEA 公司、德国的 Carl Zeiss 公司、日本的三丰公司以及美国的

Brown & Sharp 公司在开发三坐标测量机的机械系统、数控系统的同时,着力开发具有数控仿形测量数字化功能的完整的测量规划软件,并能与 CAD/CAM 软件联接,编制数控加工指令<sup>[22]</sup>。Livingstone<sup>[25]</sup>使用同步扫描激光位移传感器和五轴机器人组成系统,实现了潜艇螺旋桨叶片的测量。Sarti<sup>[26]</sup>开发出自由曲面的非接触数字化及加工系统,使用其研制的激光位移传感器在三坐标数控铣床上实现了汽车模型的数字化。Yasser<sup>[27]</sup>研制了用于航天飞机零件的逆向工程系统,系统中使用同步扫描传感器扩大视场,利用 IGES 文件与 SurCAM 通讯。Carl Thomas<sup>[28]</sup>采用 6 个高精度 CCD 面阵摄像机摄取图像,经图像处理获取三维信息,再由曲面拟合构造 CAD 模型,但图像匹配算法尚未成熟。Brady<sup>[29]</sup>将激光扫描器和 CNC 立式铣削加工中心集成成为自由曲面成型系统,由工作台的移动和转动实现数字化扫描。Motavalli<sup>[30]</sup>使用 CNC 数控铣床驱动 CCD 摄像机实现冲压板件的扫描,通过边界提取和 B 样条曲线拟合后,由 CAM 模块产生 NC 代码。Bao<sup>[31]</sup>开发出鞋楦加工的逆向工程系统,该系统使用线结构光传感器进行脚部形状的数字化,用商用 HOOPS 图形软件包构造 CAD 模型,进而产生 G 代码。上述系统的开发对实现自由曲面零件反求工程中的信息集成具有较好的借鉴意义。

## 2 结束语

综上所述,面向自由曲面的反求工程虽然在自由曲面测量规划、测点数据曲面重建、测量加工一体化技术等上述各领域均取得较为明显的进步,但在实际应用中,整个过程仍需大量的人工交互,操作者的经验和素质对产品的质量影响很大,需要的投入大,因此逆向工程技术依然是目前 CAD/CAM 领域一个十分活跃的研究方向,以下一些关键技术值得今后研究的关注:

(1) 数据测量的智能化和自动化:发展面向自由曲面反求工程的专用测量系统,高速、高精度地实现实物外形的数字化,并能根据几何外形和后续应用选择测量方式及路径,能进行路径规划和自动测量;

(2) 数据测量和处理的针对性研究:考虑到自由曲面反求工程所需测量的数据量大,对不同的应用领域测量数据的分布差异较大,研究适应特定用途的曲面测量方法和后续采集点数据处理技术需要特别加以关注;特别对于一些宽公差自由曲面零件的快速测量技术和数据处理技术研究,以降低实

现自由曲面反求的成本;

(3) 集成化:发展基于集成的反求工程技术,包括测量技术、基于特征和集成的模型重建技术、基于网络的协同设计和数字化制造技术等。

## [参考文献]

- [1] Kam C L. A Geometric decomposition method for part programming of CMM S [J]. AutoFact Europe Conf 13: 15-13: 24.
- [2] Pakk H J. Development of computer-aided inspection system with CMM for integrated mold manufacturing [J]. Annals of the CIRP, 1993(42): 557-560.
- [3] Koster M. Curvature dependent parameterization of curves and surface [J]. Computer Aided Design, 1991, 23(8): 569-579.
- [4] Li S Z. Adaptive sampling and mesh generation [J]. Computer Aided Design, 1995, 27(3): 235-240.
- [5] 来新民. 基于计算机视觉的自由曲面逆向工程关键技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 1997.
- [6] Terzopoulos D T, Vasilescu M. Sampling and reconstruction with adaptive meshes [A]. Proc IEEE Comput Soc Conf Computer Vision and Pattern Recognition [C]. 1991. 70-75.
- [7] Ahn C H, Lee S. A self organization Neural Network approach for automatic mesh generation [J]. IEEE Trans Magnetic, 1991, 27(5): 4201-4204.
- [8] Menq Chih Siang, Yau Hong T zong, Lai Gwan Y wan. Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(2): 268-278.
- [9] 高国军, 陈康宁, 林志航, 等. 用三坐标测量机检测自由曲面时检测点和路径的规划方法研究 [J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(7): 57-63.
- [10] 李健, 王文, 陈子辰. 自由曲面零件寻位自适应检测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(5): 530-534.
- [11] 王平江. 曲面测量、建模及数控加工集成研究 [D]. 武汉: 华中理工大学, 1996.
- [12] Smith K B. MultiLaser displacement sensor used in accurate digitizing technique [J]. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 1994, 116(11): 482-490.
- [13] Zhang F Y, Nee A Y, Fuh J Y, et al. A Neural network approach to determining optimal inspection sampling size for CMM [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 1996, 9(3): 161-169.
- [14] 白作霖, 赵汝嘉, 张定红, 等. 基于坐标测量机的自由曲面误差评定方法 [J]. 中国机械工程, 1995, 6(6): 1274-1280.

- [15] Song C K, Kin S W. Reverse engineering autonomous digitization of free formed surfaces on a CNC coordinate measuring machine[ J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(7): 1041-1451.
- [16] 王平江, 陈吉红, 李作清, 等. 空间自由曲面数控测量系统中测量路径的优化[ J]. 组合机床与自动化加工技术, 1994(10): 30-35.
- [17] 江元龙, 李圣怡. Voronoi图在复杂曲面轮廓自动测量中的应用[ J]. 组合机床与自动化加工技术, 1996(3): 11-15.
- [18] 王恒奎. 激光测量曲面数字化基础技术研究[ D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- [19] 李剑, 陈桦, 陈子辰, 等. 基于扫描优角顶点和单调剖分的测量路径优化算法研究[ J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(3): 84-87.
- [20] Lin A C, Lin H T. Automatic Generation of NC Cutter Path from Massive Data Points[ J]. CAD, 1998, 30(1): 77-90.
- [21] 卢杰持. DIG II-02C 数控仿形系统[ J]. 机床, 1991(12): 27-29.
- [22] 王平江. 3M 集成技术的研究与实践[ D]. 武汉: 华中理工大学, 1998.
- [23] 唐朝伟, 梁锡昌. 三维曲面激光精密测量技术[ J]. 计量学报, 1994, 15(2): 99-103.
- [24] 罗飞路, 陈栎湘, 周继伟, 等. 自由曲面的立体视觉测量与加工一体化研究[ J]. 国防科技大学学报, 1995(17)2: 12-18.
- [25] Livingstone F R, Rioux M. Development of a large field of view 3-D vision system[ J]. SPIE, 1986, 665: 188-194.
- [26] Saito K, Miyoshi T. Non-contact 3-D digitizing and machining system for free form surface[ J]. Annals of CIRP, 1989, 40: 483-486.
- [27] Hosni Yasser. Laser based system for reverse engineering[ J]. Computers Industrial Engineering, 1994, 26(2): 387-394.
- [28] Carl Thomas Schneider, Kurt Sinnreich. Concept of an optical coordinate measurement machine[ J]. SPIE, 1990, 1395: 816-822.
- [29] Bradley C, Vickers G W. Automated rapid prototyping utilizing laser scanning and free form machining[ J]. Annals of the CIRP, 1992(41): 437-440.
- [30] Huang Chiennan, Motavalli Aaeil. Reverse engineering of planar parts using machine vision[ J]. Computers Industrial Engineering, 1994, 26(2): 369-374.
- [31] Bao H P, Soundar P, Yang T. Integrated approach to design and manufacture of shoe last for orthopaedics use[ J]. Computers Industrial Engineering, 1994, 26(2): 411-421.

[责任编辑: 刘健]

(上接第 19 页)

### [参考文献]

- [1] Paul C R, Hardin K B. Diagnosis and reduction of conducted noise emission[ J]. IEEE Trans EMC, 1988, 30(4): 553-560.
- [2] See K Y. Network for conducted EM I diagnosis[ J]. Electronic Letters, 1999, 35(17): 1446-1447.
- [3] Mardiguian M, Rainbourg J. An alternative method for characterizing EM I filter[ J]. Proc of IEEE on EMC, 1999(2): 882-886.
- [4] Ting Guo, Chen D Y, Lee F C. Separation of the common mode and differential-mode conducted EM I noise[ J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11(3): 480-488.
- [5] Zhao Yang, See Kye Yak. Diagnosis network performance for conducted EM I measurement[ R]. Ohio: IEEE AP-S Digest, 2003.
- [6] Zhao Yang, See Kye Yak, Li Shijin. Noise Diagnosis Techniques in Conducted EM I Measurement: Methods, analysis and design[ R]. CA: IEEE AP-S Digest, 2004.

[责任编辑: 严海琳]