

汽车覆盖件点云处理方法及网络化协同 设计技术



重庆大学博士学位论文
(学术学位)

学生姓名：唐先智

指导教师：刘飞 教授

专 业：机械制造及其自动化

学科门类：工 学

重庆大学机械工程学院

二〇一三年三月

The Method for Processing Point Cloud Data of Automobile Cover and the Techniquesnet for Networked Collaborative Design



A Thesis Submitted to Chongqing University
in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Doctor's Degree of Engineering

By
Tang Xianzhi

Supervisor: Prof. Liu Fei
Specialty: Mechanical Manufacturing & Its Automation

The College of Mechanical Engineering
Chongqing University, Chongqing University
March, 2013

摘要

汽车覆盖件是构成汽车车身的重要零部件。通过逆向工程建立的汽车覆盖件数字模型，应用于车身结构设计、车身刚度分析以及误差检测等方面，将传统的从 CAD 图纸到实物的设计模式改变为基于测量建模的数字化设计模式，极大地提高了产品设计效率，缩短了产品的设计周期，为产品开发设计提供了一条新的途径。然而，一方面逆向工程测量设备的数字化、自动化和测量精度的不断提高，导致了模型的测量数据量的快速增长；另一方面，由于汽车覆盖件存在面积大、厚度薄、产品形状复杂等特征，导致逆向工程的测量建模设计有更高的难度和复杂性，使得还有不少问题需要深入研究。为此，本论文对汽车复杂形体覆盖件逆向工程中的几项关键技术进行了研究。主要研究内容如下：

针对汽车覆盖件的特点，分析逆向工程中不同种类扫描设备的优劣性，对汽车覆盖件数据采集的扫描方法进行了综合研究；并对汽车覆盖件数据预处理技术及网格化技术相关理论进行研究。

汽车覆盖件存在面积大、产品厚度薄等特点带来点云数据采集过程中可能会存在层叠点云现象，若将大量层叠的点云数据处理转化为曲面会消耗大量的时间，同时产生比较大的形状误差。为此，本文提出了一种汽车覆盖件的点云数据分层处理的新的切片算法，该算法首先确定层叠点云数据的位置，然后沿着模型的三维坐标对其进行多层切片，接着对每层切片点云进行采样，确定采样范围内的波峰与波谷点，通过其产生层叠采样点云的分割线（也成为中线），并根据最佳线性的方法确定倒角位置的分隔线段，从而自动将层叠点云数据分离。

汽车覆盖件点云数据获取过程中，因测量原理不同、测量软件的限制以及人为因素等原因会出现点云数据孔洞缺陷等现象，导致点云数据特征不全从而影响后期建立的三维模型失真。对此，本文提出了一种汽车覆盖件点云数据孔洞缺陷修补算法，该算法是在扫描所获得的二维图像和三维空间网格点云数据之间建立映射关系，通过孔洞边界提取方法提取出网格点云数据孔洞的边缘数据，将边缘点映射到二维图片上，再通过二维图片的像素值以及灰度值将映射点分层，从而将三维空间网格点云数据孔洞缺陷进行修复。

复杂的汽车覆盖件建模过程需要协同设计支持，如数据提供方与客户的在线交互、客户对数据信息的全程跟踪以及及时反馈建议信息等。对此，建立了一种基于 Internet 的远程汽车覆盖件逆向工程中设计网络化共享服务平台。应用该平台能在测量建模过程中实现人机交互，能对整个数字化过程进行在线评估，进一步快速、高效获取优化的点云数据，实现与客户网络化协同设计。

最后对本文的工作进行了总结，并展望了下一步的研究方向。

上述研究成果，在为东风汽车，力帆汽车等大中型企业服务中得到了验证，取得了明显的经济效益和社会效益。

关键词：汽车覆盖件，逆向工程，数据测量，层叠点云，点云数据缺陷修补，
网络化协同设计

ABSTRACT

Complex automotive body panels constitute the important parts of the automobile body structure. Created through the reverse engineering of complex automotive body panels digital model used in the design of the body structure, body stiffness analysis and error detection, the traditional kind of design model from a CAD drawing to change the digital design model for measurement-based modeling, greatly improve the efficiency of product design and shorten the product design cycle, and provides a new way for product development and design. However, on the one hand the continuous improvement of reverse engineering digitization, automation and measurement accuracy of the measuring equipment, led to the rapid growth of the model for measuring the amount of data; other hand, due to the presence of auto cover a large area, thin, complex shape products , the measurement modeling using reverse engineering design have a higher degree of difficulty and complexity, and therefore, there are a lot of issues need to delve into; such, the model has a very complex geometry and topology measurement model the existence of the scan point cloud data stacked and the presence of certain areas of the point cloud data missing, as well as the complexity of the modeling process requires collaborative design support. The papers fained at reverse engineering of the automobile cover the keyconduct further research, The main contents are as follows:

Contrary to the characteristics of the auto cover, analysis of the pros and cons of the different types of scanning equipment in reverse engineering, conducted a comprehensive study of the auto cover data acquisition scan method;and auto cover data preprocessing technology and grid technologyrelated theory.

Auto cover large area, thin products, so that it may exist in the point cloud data acquisition process stacked point cloud phenomenon, while producing the large stack of point cloud data processing will consume a lot of time into curved the relatively large shape errors. Hierarchical point cloud data preprocessing car cover is particularly important. In this paper, a car cover hierarchical processing point cloud data slicing algorithm.The algorithm first determines the position of the the cascading point cloud data, and then along the model of the three-dimensional coordinates of its multi-layered slice, then each slicing points cloud is sampled to determine the point of the crests and troughs in the sampling range, and generates a point cloud of the dividing line of the laminate sample through its (also become midline) , and the method according to the

best linear determine chamfered position separator segment , which will automatically the cascading point cloud data separation.

The auto cover point cloud data acquisition process, because of the different measurement principle, measurement limitations of the software as well as human factors because there will be holes in the point cloud data defects phenomenon, leading to incomplete point cloud data features late to establish a three-dimensional model of distortion. In this regard, this paper proposes an automobile cover the hole defects of point cloud data supplement algorithm, the algorithm is to establish the mapping between the scan head, two-dimensional images and three-dimensional grid of point cloud data, through the hole boundary extraction method extracted data of the edge of the holes of the grid point cloud data, the edge point is mapped to a two-dimensional picture, by a two-dimensional picture of the pixel value and a gradation value of the mapping point stratified, so that the point cloud data of the three-dimensional spatial grid repair .

Complex auto cover modeling process needs to be collaborative design support, such as the data side online interaction with customers, tracking customer data information and timely feedback suggestions information. In this regard, the establishment of an Internet-based remote car cover reverse engineering design network shared services platform, Application of the platform to achieve human-computer interaction measurement modeling process, customers can assess the entire digitization process online, to achieve the purpose of the collaboration between enterprises and product design.

Finally, this work is a summary and outlook of future research directions.

The content of the above-mentioned research, validation services for the large and medium-sized enterprises of Dongfeng Motor, Lifan cars, and achieved remarkable economic and social benefits.

Keywords: Auto Cover, Reverse Engineering, Data Measurement, Stacked Point Cloud, Point Cloud data Defects Supplement, Networked Collaborative Design

目 录

中文摘要	I
英文摘要	III
1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 论文的选题背景	1
1.2.1 逆向工程的含义和流程	1
1.2.2 面向产品开发的逆向工程系统体系结构	3
1.2.3 逆向工程系统的应用	4
1.3 论文国内外相关领域的研究现状综述	6
1.3.1 逆向工程中测量建模的研究现状	6
1.3.2 逆向工程中数据分层处理的研究现状	6
1.3.3 逆向工程中孔洞缺陷区域数据补充的研究现状	9
1.3.4 基于逆向工程的网络化共享应用系统研究现状	11
1.4 论文研究目的意义及项目来源	13
1.4.1 本论文的研究目的意义	13
1.4.2 本论文的项目来源	14
1.5 论文的主要研究内容和结构安排	14
1.5.1 论文的主要研究内容	14
1.5.2 本文的结构安排	15
1.6 本章小结	15
2 汽车覆盖件逆向工程中的数据预处理综合研究	17
2.1 引言	17
2.2 汽车覆盖件逆向工程中的数据扫描技术	17
2.2.1 汽车覆盖件逆向工程扫描方法	17
2.2.2 汽车覆盖件逆向工程扫描设备选取	21
2.2.3 汽车覆盖件逆向工程扫描步骤	24
2.3 汽车复杂形体覆盖件逆向工程中的数据预处理技术	26
2.3.1 汽车覆盖件扫描数据拼合	27
2.4 点云数据三角网格化	31
2.4.1 三角网格模型定义	31
2.4.2 三角网格拓扑邻域表示	32

2.5 本章小结	33
3 汽车复杂形体覆盖件逆向工程中数据分层处理算法研究	35
3.1 引言	35
3.2 汽车覆盖件逆向工程中数据分层处理算法的提出	35
3.3 平行层叠点云与交叉层叠点云数据的判定方法	38
3.4 平行层叠点云与交叉层叠点云数据处理方法	44
3.4.1 平行层叠点云数据处理方法	44
3.4.2 交叉层叠点云数据处理方法	48
3.5 层叠点云数据分层处理算法应用	50
3.6 本章小结	51
4 汽车复杂形体覆盖件逆向工程中孔洞缺陷区域数据修补算法	53
4.1 引言	53
4.2 汽车复杂形体覆盖件孔洞缺陷区域判定方法	53
4.2.1 汽车覆盖件孔洞缺陷区域类型	53
4.2.2 汽车覆盖件孔洞缺陷区域判定方法	55
4.3 汽车复杂形体覆盖件孔洞缺陷区域修补算法	57
4.3.1 汽车覆盖件孔洞缺陷区域修补算法的提出	57
4.3.2 二维图片上非编码点获取方法	59
4.3.3 二维图片与三维点云数据非编码点对应方法	60
4.3.4 二维图片像素值与灰度值	62
4.4 孔洞缺陷区域数据修补算法应用	63
4.5 本章小结	64
5 汽车复杂形体覆盖件逆向工程中的网络化协同设计技术	65
5.1 引言	65
5.2 汽车覆盖件逆向工程中网络化系统的体系结构	65
5.2.1 网络结构设计	67
5.2.2 功能模块设计	68
5.2.3 系统运行流程	69
5.3 汽车覆盖件逆向工程中的网络化协同系统支持技术	70
5.3.1 网络化协同系统的实现技术	70
5.3.2 网络化协同可视化支持技术	71
5.3.3 基于 WEB 的协同浏览与批注技术	73
5.3.4 屏幕远程同步共享与远程协同操作	75
5.4 基于网络化协同系统的应用实例	76

5.5 本章小结	78
6 结论与展望	79
6.1 结论	79
6.2 研究展望	79
致 谢	81
参考文献	83
附 录	97
A. 攻读博士学位期间参与的科研项目	97
B. 攻读博士学位期间发表的学术论文	97

1 绪论

1.1 引言

现代工业产品的竞争力已经不仅仅表现在功能使用上的优劣多寡，产品不仅要具有先进的功能，还要有流畅、造型富有个性的产品外观，产品外观的美观与新颖日益成为吸引消费者购买的重要因素。一款成功的产品不仅是功能上要求先进，其外观上也需要有艺术化的造型设计，以吸引消费者的注意力。过去生产一种产品样式就可以畅销若干年，现在则需要对产品不断地推陈出新，因此大型的跨国公司对新产品的研发都非常重视，尤其在飞机、汽车、摩托车、电子产品、家用电器等大众化消费性产品领域表现得尤为突出^[1-4]。随着竞争的日趋激烈，企业对产品设计与开发的能力提出了更高的要求，多品种、小批量替代了少品种、大批量的传统生产模式，这就导致了设计和生产周期越来越短。

随着汽车技术的发展，汽车的车身的材料、结构也发生了变化，因此对汽车的外观和性能要求越来越高。汽车覆盖件是汽车产品的重要部件，根据已经有的实物或油泥模型建立数字化模型日益成为几何建模的十分重要的手段，通过逆向工程建立的汽车复杂形体覆盖件数字模型，应用于车身结构设计、车身刚度分析以及误差检测等方面，将传统的从 CAD 图纸到实物的设计模式改变为基于测量建模的数字化设计模式，极大地提高了产品设计效率，缩短了产品的设计周期，为产品开发设计提供了一条新的途径。

1.2 论文的选题背景

1.2.1 逆向工程的含义和流程

为缩短新产品开发周期、提高产品的设计和制造质量、增强企业对市场的快速响应能力，一系列新的产品快速开发技术应运而生，如 CAD/CAM/CAE 技术、逆向工程技术、快速成型技术、快速模具技术、虚拟设计技术以及并行工程等。其中，逆向工程（Reverse Engineering, RE）技术历经几十年的研究与发展，已经成为新产品快速开发过程中的核心技术，它与计算机辅助设计、优化设计、有限元分析、设计方法学等有机组合构成了现代设计理论和方法的整体。

逆向工程又称为反求工程，是将实物转变为与 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，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，在此基础上对已有产品进行解剖，深化和再创造的过程^[5-8]。同时逆向工程的实施过程是多领域、多学科的协同过程。逆向工程流程图如下图 1.1 所示。

相对于逆向工程而言，正向工程是根据产品预定的功能需求进行开发,绘制出产品设计图,制造并进行装配,得到功能完整的产品的开发模式^[9-11]。正向工程流程图如图 1.2 所示。

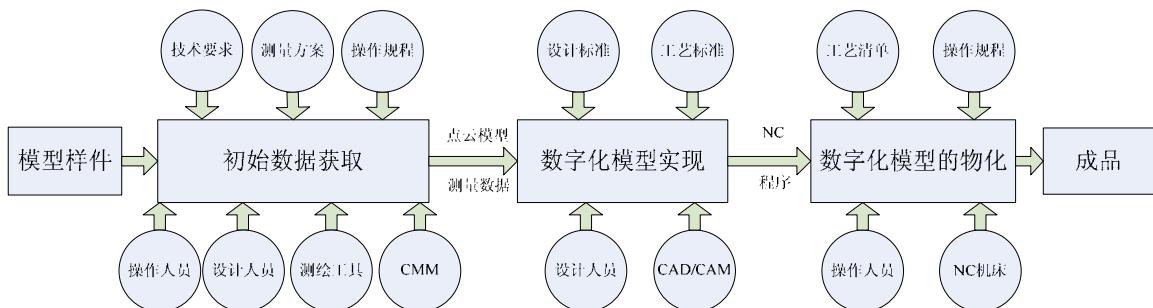


图1.1 逆向工程流程图

Fig.1.1 The process of the reverse engineering

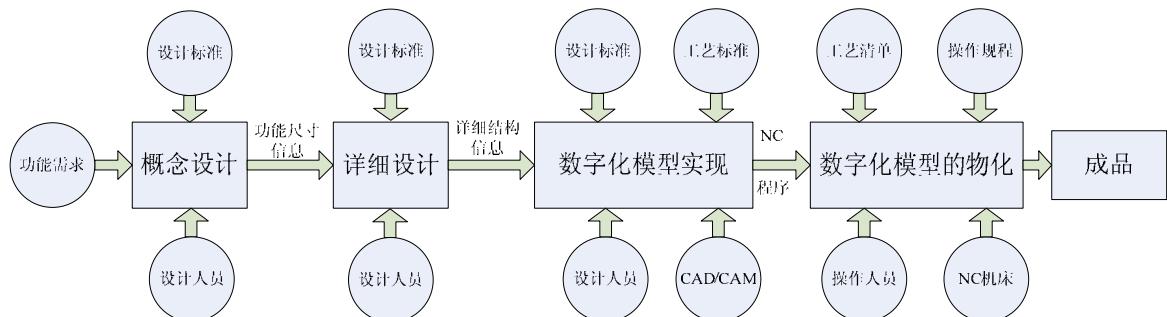


图1.2 正向工程流程图

Fig.1.2 The process of the forward engineering

逆向工程的设计过程与传统的正向设计过程是完全不同的。传统的正向设计是从图纸到零件（产品），而逆向工程的设计是从零件（或原型）到图纸，再经过制造过程到零件（产品）。传统的设计过程是在市场调研的基础之上，根据功能和用途来设计产品，得到图纸或CAD模型，经检查满意后制造出产品来。而逆向工程是从某一存在的零件或产品原型入手，首先对其进行数字化处理（即将整个零件用一个庞大的三维点的数据集合来表示），然后是构造CAD模型。CAD模型经检查满意后，直接利用快速成型技术或数据加工技术制造出最终产品或产品原型。根据需要还可输出图纸。二者的比较可用如图 1.2 所示：

从图 1.3 可以得出如下结论：正向工程是一个从无到有的概念设计过程，而逆向工程则是在已有产品的基础上进行变形设计的再创新过程，它们的设计流程有很大的区别，但二者的目的都是设计并生产符合要求的最终产品。

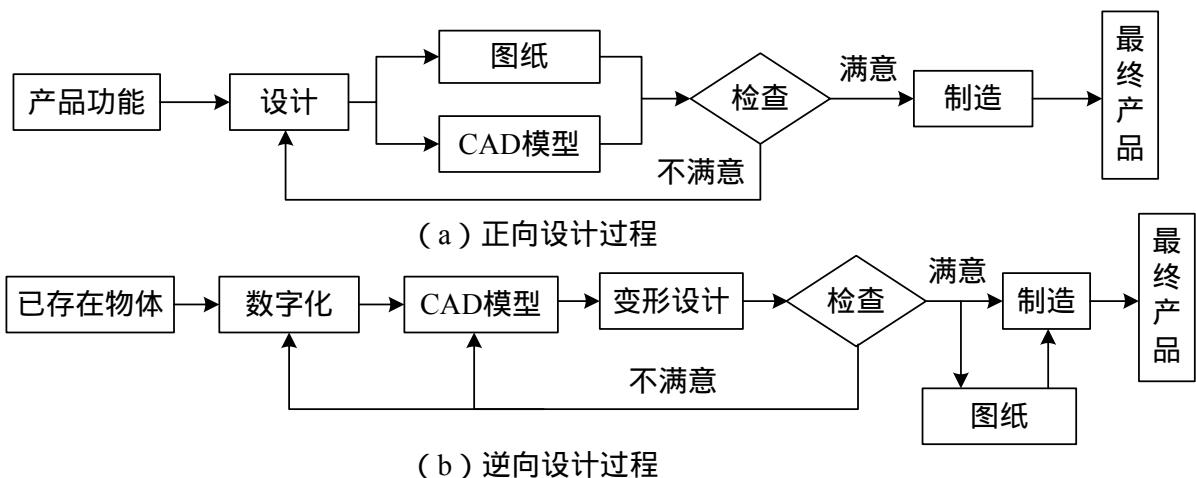


图 1.3 逆向工程与正向工程的区别
Fig 1.3 Difference of reverse engineering and positive engineering

1.2.2 面向产品开发的逆向工程系统体系结构

逆向设计方法的基本思想是：分析已有的产品或设计方案，确定各产品的各个组成部分并作适当的分解，确定产品不同部件存在的内在联系，包括功能联系、组装联系等，然后在更高的、更加抽象的设计层次上获取产品模型的表示方法，最后从功能、原理、布局等不同的需求角度对产品模型进行修改和再设计。与传统正向工程不同，逆向工程不是从高抽象概念到设计的直接物理执行过程，而是通过调整和修改特征参数来逼近零件模型的间接过程。逆向工程的设计流程如图 1.4 所示：

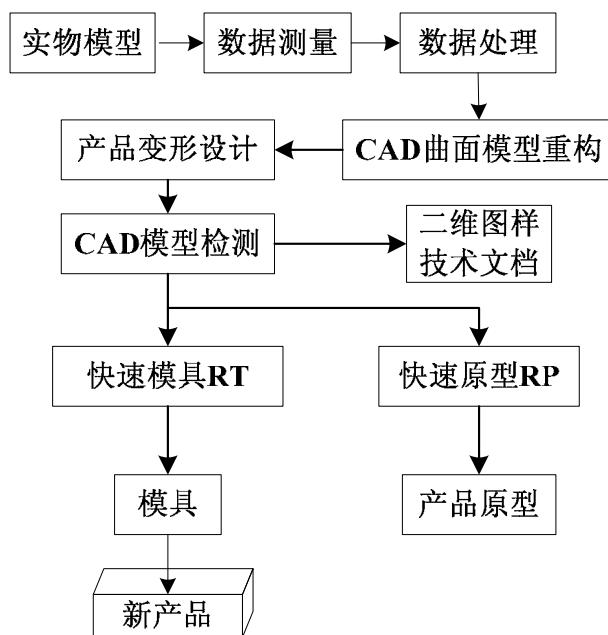


图1.4 逆向工程系统机构图
Fig 1.4 The structure of reverse engineering system.

从图 1.3 中可以看出，逆向工程的主要流程包括：数据测量、数据处理、模型重构、CAD 模型检测，生成合格的产品 CAD 数据。然后对 CAD 数据进行变型设计，将修改后的数据进入下游的 RP 制造或 RT 制造，完成新产品或模具的开发与制造。

1.2.3 逆向工程系统的应用

逆向工程是综合性很强的学科前沿，是近年发展起来的一系列分析方法和应用技术的组合。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、深化和再制造，是已有设计的再设计。利用逆向工程技术对汽车覆盖件的产品开发，目前已成为适应现代制造技术的发展趋势，它为我国的汽车行业开辟了一个新的发展空间和发展领域。逆向工程作为一种新产品开发、消化、吸收的重要手段，在 20 世纪 90 年代初已受到各国工业界和学术届的高度重视，且以其在快速产品开发中的独特优势，得到了广泛重视和迅速发展。

从逆向工程的概念和技术特点可以看出，逆向工程的应用领域主要是飞机、汽车、玩具和家电等模具相关行业。近年来随着生物、材料技术的发展，逆向工程技术也开始应用在人工生物骨骼等医学领域，同时逆向工程技术在工艺品设计以及加工领域也得到了较快的发展。

逆向工程的应用范围主要包括以下几个方面：

新零件的设计，主要用于产品的改型或仿型设计^[12-16]

产品的改型或者仿形设计主要是对原有产品形态的缺陷与不足进行创新或局部修改，增加产品的美观，提升产品档次。是基于现有产品基础上的整体优化和局部改进设计，使产品更趋完善，更适合市场的要求。首先要分析产品需要改进的地方，通常是在材料、工艺、结构上进行改进。目前在我国产品的改型或者仿型设计还处于传统的方法，利用逆向工程进行数据改良是近些年才有所发展，因此有很广阔的发展空间。

已有零件的复制，再现原产品的设计意图^[17-19]

对已有零部件的复制，主要是针对具有复杂形状曲面的产品进行复制和再制造。这种复制是完全仿照原有的零部件的形状、结构以及功能不做修改的复制，比如说对文物等物品的修复，就要保证仿制的形状能达到最大要求的相同。

损坏或磨损零件的还原

当零件损坏或磨损时，可以直接采用逆向工程的方法重构出 CAD 模型，对损坏的零件表面进行还原和修补^[20-23]。由于被测零件表面的磨损，损坏等因素，会造成测量误差，这就要求逆向工程系统具有推理和判断能力。例如，对称性、标准尺寸、平面间的平行和垂直等特性。最后，加工出零件。

数字化模型的检测

对加工后的零件，进行扫描测量，再利用逆向工程法构造出 CAD 模型，通过将该模型与原始设计的 CAD 模型在计算机上进行数据比较，可以检测制造误差，提高检测精度^[24-27]。在模具行业，由于模具制造过程中经常需要反复试冲和修改模具型面，而原始的检测方法对于曲面的检测存在一定的限制，因此数字化模型的检测为模具行业的检测提供了必要的手段。若测量最终符合要求的模具并反求出其数字化模型，在重复制造该模具时就可运用这一备用数字模型生成加工程序，可以大大提高模具生产效率，降低模具制造成本。

模具样品开发

采用 CAD/CAM 一体化技术是现代模具设计制造的要求，可以有效地改善传统方法的不足，由 CAD 建立的产品模型可以直接生成数控指令，通过 DNC 接口实现与机床间的数据通讯，使生产中原来用外形模拟传递改变为用数据量传递，使设计与制造环节直接沟通^[28-30]。而且可以在 CAD 系统中进行外观分析、产品装配、检查配合部件的干涉，对数控加工过程进行仿真，检查加工过程和干涉，实现产品的设计和修改。因此，可以大大降低手工劳动量，缩短新产品研制周期，显著提高产品质量。主要用于：飞机、轮船、汽车、摩托车等机动车，电、资、通产品，消费性电子产品及相关零组件、运动器材、玩具、陶瓷、鞋模等。

人体形状测量：人体外形测量、医学工程^[31-35]

目前逆向工程在医学上的应用大多还处在研究阶段。但逆向工程在医学上应用当前正处于将取得突破的临界点，具有很大的应用前景。目前国内外的研究主要有三个方向：

1) 模仿逆向工程的一般过程，利用现有成熟技术如 CAD 软件、快速成型、数控加工等来形成研究过程链，把原始断层影像信息经处理与之结合，达到医学模型三维重建应用的目的。此方法的特点是易于快速应用，但过程复杂。目前大多研究还停留在此阶段，主要原因是逆向工程在医学上的应用研究才起步，通过此方法可积累经验。目前此过程的关键是医学断层数据与 UG 等自带的逆向工程软件如 Imageware 的结合。

2) 综合性软件的研究开发。综合性软件集成断层影像数据读取、数据分割拟合、3D 重建等功能，可从断层数据直接生成快速成型设备和数控设备可识别的数据，方便医学应用。目前具有代表性的是 Materialise 公司的 MIMICS 软件，其在逆向工程的医学应用领域有一定的通用性，为医院各科室的医学应用研究提供了一个平台。

3) 专门针对某一应用的专业性软件的研究开发。这方面主要集中在 3D 影像重建应用较成熟的领域如口腔科等。

1.3 论文国内外相关领域的研究现状综述

1.3.1 逆向工程中测量建模的研究现状

测量建模的研究概括起来可归纳为两类，一类是在计算机视觉，计算机动画，医学中图象重建等领域进行研究，另一类工程设计领域中进行研究，主要是产生与普通 CAD 系统兼容一致的数字化模型以便能像普通 CAD 模型一样进行交互修改，数控编程等。

在计算机图形学领域，层次细节（LOD）技术^[36-37]，几何压缩技术^[38-39]，可视性选择技术^[40-41]等得到快速发展，其中 LOD 技术是降低空间效率的代价换取时间效率的提高；而几何压缩技术通过对几何和拓扑信息的重组，提高空间利用率；可视性选择技术通过从显示列表中快速去除目前视口内不可见的部分来满足图形绘制的实时性要求。以上技术目的都是为了从图形学角度对超大几何模型的绘制和可视化，但很少考虑模型的进一步处理。

对于机械产品测量建模来讲，重构模型具有复杂的几何形状和拓扑结构，产品的每个曲面不是孤立的，而是相互间有一定的几何约束关系，美国 UTAH 大学几何设计与计算实验室对几何约束下的模型重构进行了研究，但仅限于直线和平面之间的平行，垂直等简单的几何约束关系^[42]，对于任意曲面配合约束模型重构等没有见报。为了提高重构模型的品质，就必须对测量数据进行区域分割，提取轮廓特征，目前该方面的研究大多是根据网格曲面模型的曲率分析结果，将网格划分为特定的曲面片。例如，Bock 和 Guerra^[43]研究根据测量数据提出平面子区域的方法；Yang 和 Lee^[44]提出参数二次曲面逼近方法进行区域分割；上述方法存在的主要问题是边界特征不明显以及不连续，不能保证划分出的子曲面片边界沿着特征轮廓划分，为后续工作增加了难度，并且模型品质得不到保证。

1.3.2 逆向工程中数据分层处理的研究现状

在逆向工程中将一个密集非结构的点云数据转体化为 CAD 模型一般有两种方法：基于三角型多面体网格方法以及分割拟合方法。许多关于三角网格化的技术可以在^[63-66]中找出。但是，以目前计算机的水平而言，将点云数据三角化要占用计算机大量的时间，而且很难减小模型的形状误差，在具体工程中，尤其是在模具和汽车等工业中，为采集到精确描述实体外形的数据而往往使数据成散乱状，很可能得到 CAD 模型非常困难、费时，甚至无法得到完整的曲面或实体模型。

虽然非接触式光学扫描仪能得到非常密集的点云，但并不是所有的数据点都能用于曲面重构。过多的数据点会导致计算机运行、存储和操作的低效率，生成曲面模型需要消耗更多的时间。并且过于密集的点云会影响重构曲面的光顺性，而光顺是产品外形设计中非常重要的要求。为避免上述问题，就需要删除部分

数据点，即对数据点云进行精简处理。

近年来，人们作了许多关于数据点云精简方法的研究，提出了各种处理方法。这些方法主要可以分为三类：减少多边形模型中多边形的数量；使用传统的采样方法；使用网格方法。传统的点云数据精简主要是采用包围盒的方法^[67]，这种方法采用体包围盒来约束点云，然后将大包围盒分解成若干个均匀大小的小包围盒，在每个包围盒中选取最靠近包围中心的点来代替整个包围盒中的点。这种方法简单、高效，但是由于包围盒的大小是由用户任意规定的，因此无法保证所构建的模型与原始点云数据之间的精度。2001年，Sun W等^[68]通过使用局部曲面插值自动确定包围盒的大小，改善这种方法。但不足的是这种方法只能应用于简单的曲面数据且效率比较低。Martin等人^[69]1996年在欧盟的哥白尼项目中提出了使用均匀网格的数据精简方法。如图1所示，这种方法采用图像处理过程中广泛采用的中值滤波的方法，首先建立一种均匀网格，然后将这些输入数据分配到相应的网格中。在分配到同一个给定网格的所有点中，选择一个中值点来表示所有属于这个单元格的点。这种方法克服了均值和样条曲线的限制。但是由于使用均匀大小的网格，对捕捉零件的形状不够灵敏。

Fujimoto 和 Kariye^[70]认为巨大的数据量对下游的制造过程中的使用产生了很多问题，因此减少数据量是很有必要的。在1993年提出一种面向2D数字化点云的改进顺序数据精简方法。这种方法保证了精简数据的误差范围处于给定的角度和距离公差之内。

Chen 等^[71]提出了两种方法：比例数据精简和利用边界限制修正的数据精简。这两种方法在实际应用中更具有可控性。前一种方法首先搜索与某一点相关的所有三角平面片，并选择其中一平面的法向量 u 为基准，用剩余平面的法向量 v_{1-n} 与其求差，并将所得结果向量 w_{1-n} 的三维分量值取正，根据 $6n_i=1w_i$ 求和的结果，得出它的模量并取均值，根据预设的阈值，去除小于阈值的点。后一种方法根据三角平面片面积 S 和各自法向量 n 的关系，以面积作为权值，求出一区域内三角曲面片集权值后的总向量，以此方向作为平面法向向量，做过原点平面，各有关顶点到此平面作差值。则在数据精简前后各存在一值，将这两值之差作为修正值来进行调整。

Hamann^[72]提出了一种根据三角面处的曲率值来决定此三角面的取舍，然后重新拟合的方法，适用于STL文件的自动生成。Hamann 和 Chen^[73]在构建不同平面曲线、压缩2D图像和可视化实体方面提出了精简数据点的方法。根据分段线性曲线逼近的局部绝对曲率估计来选取点，因此精简的程度不仅受被选取的点数的控制，还受误差水平的控制。Veron 和 Leon^[74]在1997年研究了将误差带分配到初多面体的各个点上的方法，平减少多面体模型的结点数目，从而使简化了的多面体可以与每个误差带相交。

Liu GH 等^[75]研究了一种新的高效的基于特征点的点云数据精简方法。该方法将 3D 数据集转化成一系列 2D 数据集,首先采用一个用户自定义的方向和自适应间距将点云数据分层 , 将每一层中的数据子集投影到垂直于分层方向的投影平面中,然后把投影平面内的所有点,将其特征点保留下来,其余的点删除,实现点云数据的精简。

国内学者张丽艳^[76]等人研究了用 Riemann 图建立散乱测点间的邻接关系,在此基础上进行 Riemann 图的最优遍历并计算测点处的最小二乘拟合平面,从而近似计算删除一点引起的误差。提出了分别基于简化后数据集中点个数、数据集中点的密度阈值及删除一点引起的法向误差的阈值准则的数据精简方法。在数据简化的结果和计算效率方面取得较好的效果 , 但存在对临近点的个数 k 的选取依赖过大的缺点。 K 的选取必须保证曲面 M 在点 x_i 的 k 邻近范围内是单凸或者单凹的。吴维勇和王英惠^[77]研究了基于二元张量积 Haar 小波分解 , 构造误差驱动的曲面数据精简算法。该算法由误差驱动,无须事先指定数据点数 , 可以对未知曲面方程的测量数据直接进行精简 , 但是该算法不具有自组织特性 , 无法处理内部特征点,最后所得的精简数据也是一些散乱数据而非规则网格数据。

从测量点云数据中获取平面轮廓数据点并进行草图轮廓的重建,是实现基于特征的实体模型重建的一个关键步骤。由测量点云数据获得平面轮廓数据点的方法有很多,采用点云切片处理来获取轮廓数据点是比较常用的一种方法。“切片”源自于医学切片技术 , 即将各种组织制作成切片在光学显微镜下观察 , 从而得到各种各样的医学图片。逆向工程中引入切片方法,在减少数据量的同时 , 可将新的点集拟合成轮廓曲线。并根据这些轮廓信息以及前面求出的方向矢量信息进行重建曲面。根据切片数据的特点,基于切片方法获取截面轮廓数据的整个处理流程包括:点云切片 , 点云束细化算法 , 排序算法,粗大误差剔除和特征点识别算法 , 为后续截面轮廓重构打好基础。

目前有 2 种计算切片的方法:投影法和求交法。投影法是按一定的距离定义系列穿过点云的平面 , 将点云数据向距离最近的平面投影 , 得到点云束。求交法是由用户指定一定数量的平行平面 , 所有的点将落在距离指定距离的平面的两边 , 一条虚拟的直线将此平面两边最近的点连接起来 , 此虚拟直线与平面的交点集就是要求的点云束。

近年来 , 一种点云分割的方法被提出 , 该方法能够随着表面区域将点云数据分割成几部分 , 由这些分割的区域来拟合出各自单个的曲面。相对基于三角型多面体网格方法 , 该方法能够有效的提高计算机处理效率。但是在钣金零件 , 例如飞机、汽车、轮船覆盖件的海量点云数据采集过程中不可避免的会遇到模型变形问题 , 造成建立模型时层叠点云就很难去处理 , 这样就增加了模型的形状误差。

目前对于汽车复杂覆盖件的点云数据层叠处理方面的研究还很少。Liu^[78]研究出了一种基于层模型的自动分割方法，这种算法可以提高计算机的运行效率。但是，与原始点云数据相比，很难减小后续模型的形状误差。Zhang^[79]研究出了通过使用形状误差来控制层的厚度，从而展现出了一种直观的点云数据分割方法，这种方法一般是应用于快速产品的。同样不能减小所建立模型的形状误差。

本文提出了一种新的层叠点云数据处理算法。

1.3.3 逆向工程中孔洞缺陷区域数据补充的研究现状

随着现代测量技术的快速发展，尤其是光学测量的发展可以在几秒钟内测量出百万乃至千万以上的海量数据点云，测量时间越来越短，测量精度越来越高，点云密度越来越密，一般汽车覆盖件的点云数据可达到几百兆量级上。点云数据的表现形式也是多种多样，可以为三角网格^[45-48]或者一组 B-Spline/NURBS^[49-51]曲面。但是这些通过测量而得到的点云数据往往存在一些不希望出现的孔洞缺陷，主要是由于测量原理不同，测量软件的限制，以及人为因素而导致出现的噪音、冗余、数据缺失等。如：夹具与被测零部件的接触部位无法测量；实物自身的损坏从而导致测量点云存在缺陷；实物形体的复杂性导致测量存在盲区无法测量；目前的逆向工程软件，在从散乱数据点到三角网格的重建过程中，也可能会在数据信息量不足的部位产生孔洞缺陷，等等。

这些孔洞缺陷的出现一方面影响了产品的外观，更为严重的是影响点云数据后续处理。例如，对数据模型进行有限元分析时，孔洞的周围会出现应力集中，使得计算不收敛，分析不准确；对点云数据的后处理过程中，由于点云数据的缺失从而导致了模型特征信息不齐全，建立的三维模型会存在失真的问题。总之，三角网格模型孔洞的产生原因很多，其存在也非常普遍，甚至无法避免。

为此，国内外许多学者都对三角网格模型的孔洞修补问题进行了深入的研究，并取得了一定的成果。Eck等人^[52]对网格孔洞提出了一个分三步的重新网格化算法，首先，把给定的网格分割成三角形区域。然后，计算给定网格在每个三角形内的参数化，这是通过谐波映射使局部变形最小来实现的。最后，按照某一规则递归地细分每个基础三角形并把点还原到三维空间就得到了新的网格。Leong K F等人^[53]采用直接连接孔洞边界的方式填充孔洞，没有参考边界的其他信息，难以获得满意的效果。Pfeifle R等人^[54]在直接填充孔洞的基础上对孔洞三角片进行细分，在孔洞内部不断生成新增三角片，得到的三角片形状较为优化，而且新产生的修补三角片的大小与孔洞周围原有三角网格相协调。张丽艳等人^[55]通过建立空间孔洞多边形的特征面，把对空间孔洞多边形的三角划分问题投影到平面上进行处理，然后根据投影后的孔洞多边形边界的夹角关系不断生成新增的三角片来填充孔洞。Minica P等人^[56]提出了通过提取数字化二维图像的信息来修复缺失点云数

据的方法。

以上所介绍算法在实践工作中也广泛应用，但是随着市场对产品的外观和性能有更高的要求，以上算法局限性也日益明显，所表现的主要缺陷是没有充分考虑网格曲面在孔洞附近的几何形态，修补部分不容易和整个曲面光滑地融为一体，而且他们算法主要是针对简单孔洞进行修补。

综上所述，目前国内外对于点云数据孔洞缺陷区域的补充可以从以下四个方面来进行概括：

在专门逆向软件中通过补充设计来进行修补，以恢复被裁减部分的曲面形状。这种方法是在曲面重构中实现，因此容易使零部件在修补区域产生失真。

对实物零部件进行区域修补填充，以此恢复被裁减部分的曲面形状。

通过专门算法自动的进行数据补充，以此恢复被裁减部分的曲面形状。这种方法直接对点云数据进行操作，是由曲面角度、相邻网格等参数所决定的。

利用二维图像与网格化点云数据的对应关系进行缺陷补充，主要是通过二维图像本身自有的像素和灰度值等参数来处理，目前这种处理方法还在发展阶段。

通过逆向工程建立模型的三维空间模型，将点云数据转换成为三维模型成为曲面拟合。长期以来，曲面拟合技术是计算几何的重要研究内容，众多的研究成果已为逆向工程中曲面构造提供了理论基础。主要有以下几部分：

1) 矩形域参数曲面拟合技术^[57-59]，在计算几何里，常用的曲面模型有 Coons、Bezier、B-Spline、NURBS 等，因而这类曲面的拟合方法一直是曲面拟合的研究重点，许多研究成果已成为成熟技术在 CAD/CAM 中广泛使用。然而，这类曲面的拟合都对型值数据有较严格的要求，一是要求以张量积形式分布；二是型值数据变化不能太剧烈，否则曲面的光顺性得不到满足。

2) 三角域 Bezier 曲面拟合^[60,61]，为了弥补矩形域曲面拟合散乱数据和不规则曲面的不足，人们探讨了采用三角 Bezier 曲面拟合技术。三角域 Bezier 曲面拟合是以 Boehm 等提出的三角 Bezier 曲面为理论基础的，它具有构造灵活、适应性好等特点，因而在散乱数据点曲面拟合中能有效应用。一般来说，定义于三角形上的插值方法包括 3 个步骤：

- a. 三角化对型值数据进行三角化，以建立其拓扑关系；
- b. 曲线网的建立对每一三角形边进行 Bezier 曲线拟合；
- c. G1 曲面的建立在保证相邻曲面片间达到 G1 连续的条件下，用三角曲面片填充曲面网格。

3) 函数曲面拟合方法^[62]，函数曲面也是一种处理散乱数据的较为有效的方法，其特点是构造原理简单，但它对数据的规模适应性不强，数据太稀则拟合精度难以保证，数据量太大则计算量及存贮等都成问题。另外，对边界的处理也难尽人意。

主要有薄板样条法、Shepard 插值法等。

在逆向工程中，曲面重构有其自身特点：

曲面型面数据散乱，且曲面对象边界和形状有时极其复杂，因而一般不便直接运用常规的曲面构造方法；

曲面对象往往不是简单地由一张曲面构成，而是由多张曲面经过延伸、过渡、裁剪等混合而成，因而要分块构造；

由于数字化技术的限制，在反求工程中还存在一个“多视数据”（即从不同方向或位置测量的数据块）问题。一般地，为了保证数字化的完整性，各视之间还有一定的重叠，这就引来一个被称为“多视拼合的问题”（multip leview combination）

目前，在逆向工程中，主要有3种曲面构造的方案：一是以B-Spline 或NURBS 曲面为基础的曲面构造方案；二是以三角 Bezier 曲面为基础的曲面构造方案；三是以多面体方式来描述曲面物体。

本文在国内外的研究成果的基础上，提出了一种汽车覆盖件点云数据孔洞缺陷补充算法。

1.3.4 基于逆向工程的网络化共享应用系统研究现状

随着计算机网络环境的普及和并行工程的深入研究与实施，协同设计技术已成为当今先进制造技术领域的研究热点。许多专家学者在协同设计系统的体系结构、共享模型的表达与现实方法、协同设计过程中的冲突检测与解决策略、支持协同设计的数据管理、多媒体数据的通信和协同界面技术等方面进行了广泛的理论研究，取得了很多研究成果，为建立适用的协同设计环境打下了理论基础。在理论研究的基础上，一些研究机构对协同工作环境的实现方法及构建协同工作环境的关键技术进行了研究，并建立了一些协同设计环境的原型系统。

在基于计算机的分布式协同工作方面，国内外先后提出了一些系统模型。英国兰凯斯特大学提出一种基于“活动”概念的协同工作平台轻权活动模型，核心是能够给对象提供共享环境^[80]；Robinson 的 CSA 通信服务体系结构模型的出发点是为各种 CSCW 应用开发者提供共同的通信服务支持^[81]；Holingsworth 的 CSCW 开发体系结构模型提出的着眼点在于将已有 CSCW 应用环境中的一些关键性的功能部件集成到一个综合性的框架中，以便在集成已有应用和数据的同时可以拓展一些新的技术领域^[82]；Elis 的三元概念模型从系统用户的角度，而不是开发者的角度得到，从概念性的角度对 CSCW 各种系统进行分类，指出了在开发一个 CSCW 应用系统时应注意的各个不同方面。可以说以上关于群体协作模式及协同控制机制的研究，为 CSCW 应用系统的开发及支撑环境的构造，提供了基本的理论依据。

国内外几乎所有著名的大学如加州大学 Berky 分校，大阪大学、清华大学、浙

江大学等都在开展这方面的研究，IEEE 每年召开一次协同设计国际会议(CSCWD)交流这一领域的成果。Anderson 等人对大规模定制敏捷产品开发下的产品协同设计进行了研究^[82]；Huang 等人^[84]提出了基于 Agent 工作流管理的协同产品开发及相关技术；Rezayat^[85]利用 XML 和 KCS 方法进行了基于知识的产品协同开发方法的研究；Nidamarthi 等人^[86]研制的 ATS 系统，利用 CORBA、JAVA 和 VRML 等技术进行协同产品的设计。在协同工作环境的构建方式上，文献^[87]通过分析产品开发协同工作的特点，提出一种由用户视图层、安全控制层、全局特征层以及网络层组成的产品开发协同工作模型，解决了大型核电汽轮机协同开发与无纸化应用问题；文献^[88]为了实现分布式设计过程中信息的有效共享和协作，建立了支持分布式产品设计的协同工作环境，为分布式环境下的协同设计奠定了基础；文献^[89]基于 OMG-CORBA 设计思想，给出了一种分布式协同工作环境的框架结构，并基于该框架开发了一种协同应用程序—电子白板；文献^[90]提出一个基于多 Agent 的网上协同工作环境 MACW，结合技术 Agent、JMF 等给出了系统的实现方法；文献^[91]针对分布式协同工作环境的要求，提出了一个基于 J2EE 平台的分布式协同工作环境解决方案，采用 JMS 消息机制，支持分布式部署，使得该方案适用于大型复杂产品协同设计环境的研究与开发。

随着 Internet 技术和信息技术的飞速发展，现代制造企业呈现出以下特征：客户定制参与(Q)、快速响应(T)、成本降低(C)，(简称 QTC)。我国的制造企业，特别是中小型企业，数量众多、分布广、自身设计资源相对薄弱等特点，建立企业动态联盟，实现远程资源共享和信息交流，克服企业时间、空间、异构平台等方面的差异，形成一个具有数字化、柔性化、敏捷化等优势互补的协同企业^[92-93]具有重要实际意义。因此，构建网络化资源共享、支持新产品协同设计开发的公共服务平台应用成为制造业的热点。

然而，一些CAX(计算机辅助X)软件在系统共享方面仍然有些不足。为了克服这一缺点，开发分布式产品信息新技术的人们都想拥有专有或高端的软件系统。其中，基于网络化协同可视化—有前途的技术是很有发展前途的，它能够使使用者通过网络即时的观看，注释，以及控制三维模型设计^[94]。研究者一直致力于努力构建基于网络化的设计和制造系统^[95-96]。Ahn 等提出了一种基于网络化的 CAD/CAM 系统—CyberCut--通过 Java 开发程序^[97]。马克等提出在互联网上基于代理的协同设计，PACT (Palo Alto 的协同测试平台)，使用 KQML (知识查询和操纵语言) 和 LISP 代理了^[98]。Pang 和 Wittenbrik 研究一种被叫做 Cspray 的可视化共享环境来协助分布式用户^[99]。通过使用 Cspray，用户可以随时通过独立或共享的摄像头位置看到他们的数据。此外，O’Grady 提出异步双向沟通，可以互动的观看每一步的三维数据和标记方法^[100]。在这个系统中，基于网络化的 CAD 系统研究了的抽象的形

状和客户机 - 服务器通信技术。作为一种数据格式，该系统通过一个有利于可视化的网格化CAD模型（VRML）。然而，VRML系统不能检查尺寸精度。

由于产品设计目标具有多样性，网络环境下的产品设计必然是一种多模式的协同设计^[101]。由于已有的网络化共享应用系统多是基于正向设计过程的，而基于逆向工程的网络化共享应用系统相对较少。鉴于以上原因，提出了开发基于逆向工程的网络化共享应用系统（下文简称“系统”）。通过该系统，能将企业用户和逆向工程产品设计提供方连接起来，在双方的共同参与下，完成产品的逆向设计，改变传统的异地开发模式为基于 Internet 的异地协同开发模式，实现对异地设计资源的组织及优化配置，可缩短新产品开发周期，降低新产品开发成本，提高设计质量，增强企业市场竞争力^[102-104]。

复杂的汽车覆盖件建模过程需要协同设计支持，如数据提供方与客户的在线交互、客户对数据信息的全程跟踪以及及时反馈建议信息等。对此，本文建立了一种基于 Internet 的远程汽车覆盖件逆向工程中设计网络化共享服务平台。

1.4 论文研究目的意义及项目来源

1.4.1 本论文的研究目的意义

汽车复杂形体钣金零部件是构成汽车车身的一类重要零部件结构，通过逆向工程建立汽车复杂形体钣金零部件（如汽车车身）的数字模型，可方便地应用于车身设计、车身刚度分析、车身误差检测等方面，它的出现，改变了原来 CAD 系统中从图纸到实物的设计模式，为产品的迅速开发以及快速原型化设计提供了一条新的途径。

目前逆向工程技术还存在很多问题有待解决。如，由于数据采集设备的不同，得到的点云数据质量不同，因此应该根据各种设备自有的特点和应用范围合理选择，同时探索新的数字化测量方法；通过点云数据进行数据重构是逆向工程关键技术，点云数据的预处理显得尤为重要，目前对于点云数据缺陷的补充已经有了一定的研究成果，提出了许多解决方法，但实用性的缺陷补充方法仍然缺乏；此外，在层叠点云数据处理方面目前国内外的相关文献还未见报道。因此，本论文研究意义在于结合汽车覆盖件的结构特点，解决其逆向工程中面临的几个关键基础问题：

逆向工程中汽车覆盖件点云数据分层处理算法；

逆向工程中汽车覆盖件孔洞缺陷区域数据补充算法；

汽车覆盖件逆向工程中的网络化协同设计技术。

本论文的主要研究目标在于：针对上述三个关键基础问题，将可视化技术和信息管理技术采用理论研究与实际应用相结合的方法，对逆向工程中点云数据层

叠算法以及孔洞缺陷区域补充算法等方面进行研究；并结合逆向工程中基于网络化的协同共享应用，构建基于逆向工程的产品协同可视化开发平台的原型系统，并进行应用验证，展示其很好的应用前景。

1.4.2 本论文的项目来源

论文的研究工作来源于以下项目的支持：

汽车零部件制造及检测技术教育部重点实验室开放课题项目“汽车复杂形状覆盖件反求工程中的关键技术研究”(2009KLMT06)；

“十五”国家科技攻关计划重大项目“汽车复杂形状覆盖件反求工程中的关键技术研究”。

1.5 论文的主要研究内容和结构安排

1.5.1 论文的主要研究内容

本文作者长期从事逆向工程技术方面的工作和研究，积累了丰富的工程实践经验，正因为如此，在工作中也发现了许多有待研究的问题，本文主要研究了通过逆向工程技术解决汽车覆盖件模型点云数据层叠问题；汽车覆盖件点云数据孔洞缺陷区域数据补充问题，以及汽车覆盖件逆向工程中的网络化协同设计技术问题。围绕论文的研究目标，论文的研究内容安排如图 1.5 所示。论文的主要研究内容安排如下：

第 1 章为绪论。本章分析了逆向工程以及产品网络化模式的发展和变迁，讨论了网络环境下的分布式协同产品开发技术与研究进展关键技术与发展趋势以及逆向工程技术数据处理方面的发展及其应用概况，介绍本文的课题背景、研究意义与主要研究内容。

第 2 章分析了汽车覆盖件逆向工程中的数据获取方法，对于逆向工程中的数据获取方法进行了阐述，同时讨论了在数据预处理过程中的关键技术，主要讨论了在点云数据处理中的数据拼合问题，提出了多种数据拼合算法。

第 3 章首先提出了逆向工程中经常所遇到的层叠点云数据的问题，点云数据层叠主要有平行层叠以及交叉层叠，然后提出了基于逆向工程的覆盖件层叠点云切片算法，最后给出了逆向工程中覆盖件层叠点云数据处理的应用实例。

第 4 章在分析图片像素特征提取与点云数据特征提取差异的基础上，对基于逆向工程的汽车覆盖件孔洞缺陷区域补充方法进行了讨论。同时提出了基于逆向工程的点云数据缺陷修补方法，并建立了几个基于逆向工程的未知区域补充的实例。

第 5 章讨论了汽车覆盖件逆向工程中有关网络化协同设计技术中的关键技术。研究了汽车覆盖件逆向工程中的网络化系统结构体系设计，汽车覆盖件逆向

工程中的网络化协同系统支持技术，同时提出了基于 WEB 的协同浏览与批注技术。最后给出了覆盖件你想工程中网络化协同设计的实例。

第 6 章，结论与展望，列出了论文的主要创新点，并指出了进一步研究的方向

1.5.2 本文的结构安排

根据前文的综述分析，本文的结构安排如图 1.4 所示

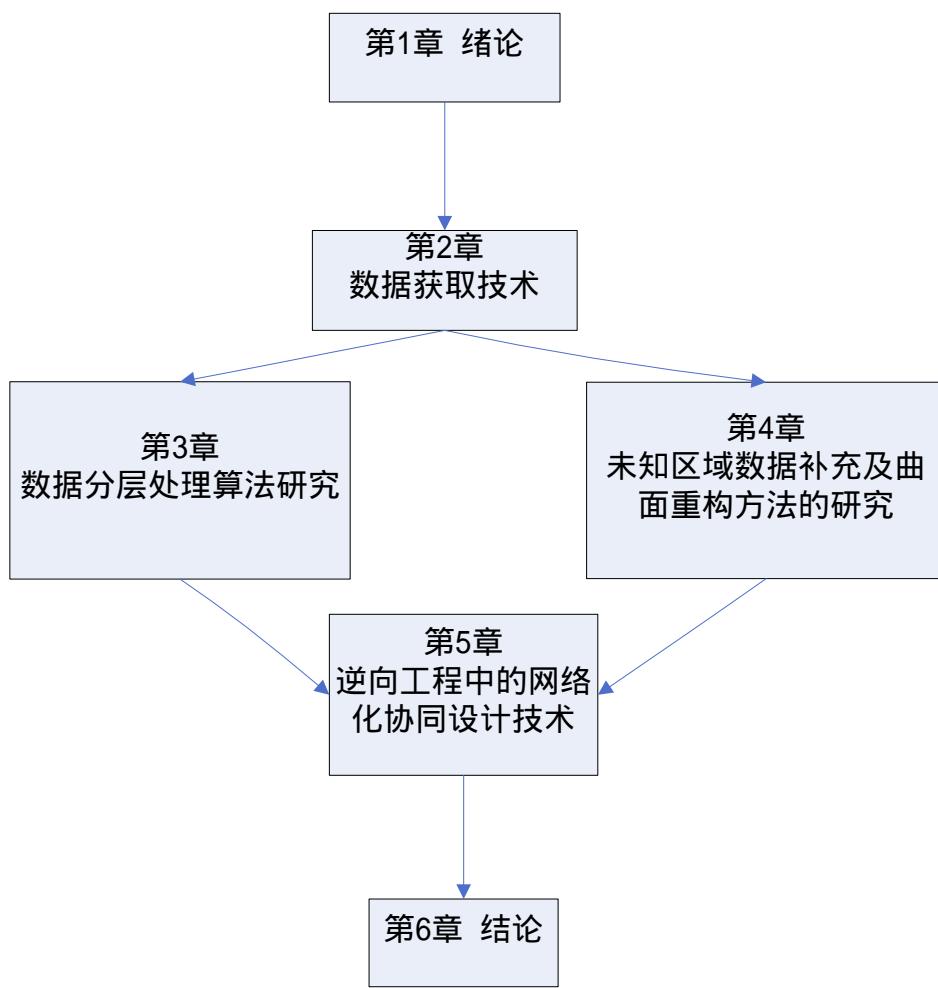


图 1.4 论文的结构和各章内容的安排

Fig1.4 The structure and arrangement of the various chapters in this paper

1.6 本章小结

本章首先对论

文的研究背景进行了介绍，并分析了逆向工程的内涵和特征；研究了逆向工程技术的应用领域；阐述了基于逆向工程汽车覆盖件点云数据缺陷补充，点云数据

分层处理，以及网络化共享应用系统的设计及应用的国内外发展现状；最后，说明了该论文研究的目的意义以及课题来源，并介绍论文的主要研究内容和各部分章节安排。

2 汽车覆盖件逆向工程中的数据预处理综合研究

2.1 引言

在逆向工程中，采集实体表面数据是完成实体模型数字化的第一步。通过扫描技术得到产品的三维点云数据后，以反求工程软件进行点数据处理，经过分门别类、族群区隔、点线面与实体误差的比对后，再重新建构曲面模型、产生 CAD 数据，进而可以制作快速成型件，以确认机构与几何外型，或数控加工与模具制造。因此，逆向工程对数据采集设备的要求很高，以期尽量减少误差，获得与原始模型充分接近的产品设计。数据采集的速度与质量，对逆向工程技术的应用和推广有着重大影响。

数字化扫描技术是集光、机、电和计算机技术于一体的高新技术，主要用于对物体空间外形和结构进行扫描，以获得物体表面的三维坐标信息。它的重要意义在于能够将实物的立体信息转换为计算机能直接处理的数字信号，为实现实物数字化提供了方便快捷的手段。高速三维扫描及数字化系统在反求工程中发挥着巨大作用，高速三维扫描设备已在我国多家飞机、汽车、摩托车、家电、医疗等行业得到应用，取得良好效果。该系统提供了从模型或实物扫描到加工出期望的模型所需的诸多功能，大大缩短了模具的研制制造周期。

三维扫描技术能实现非接触测量，且具有速度快、精度高的优点。而且其测量结果能直接与多种软件接口，这使它在 CAD、CAM、CIMS 等技术应用日益普及的今天很受欢迎。在发达国家的制造业中，三维扫描设备作为一种快速的立体测量设备，因其测量速度快、精度高，非接触，使用方便等优点而得到越来越多的应用。用三维扫描设备对手板，样品、模型进行扫描，可以得到其立体尺寸数据，这些数据能直接与 CAD/CAM 软件接口，在 CAD 系统中可以对数据进行调整、修补、再送到加工中心或快速成型设备上制造，可以极大的缩短产品制造周期。

2.2 汽车覆盖件逆向工程中的数据扫描技术

2.2.1 汽车覆盖件逆向工程扫描方法

三维扫描技术的关键在于如何快速获取物体的立体三维信息。对此，人们进行了长期的研究，发展了各种各样的方法。采用哪种原理来获取三维信息，在很大程度上决定了装置的构造、性能、成本、适用范围，各类三维扫描装置的区别也在此。逆向工程的首要任务是获取对象表面的三维坐标信息，只有获得实物的三维信息，才能实现自由曲面的重构与制造。近十年来，出现了各种各样的物件表面数字化方法，根据信息获取方式的不同，或者是根据测量所用设备的探头是

否接触零部件表面，可以将逆向工程中三维扫描仪分为接触式和非接触式两大类，它们各有所长：接触式测量精度高、不受物体表面反射情况的影响；非接触式扫描速度快，对被测物体的材质没有限制^[105-108]：

非接触式三维信息获取

非接触式三维信息获取多采用深度映像技术和多传感器技术，并结合非线性求解及其它规正化方法。非接触式三维信息获取技术大多基于计算机视觉原理，需要结合摄像机拍摄的图像和目标与摄像头的位置关系。根据是向目标投射光以主动成像，还是不使用附加光源直接拍摄目标图像，这类方法又分为主动式和被动式两类。主动视觉的典型方法包括结构光法和编码光法；被动视觉则使用单目、双目和多目视觉方法，根据在不同的位置架设的单个、两个或多个相机拍摄目标物体，然后使用 Shape from X 方法或者多相机图像中的对应点视差来获得目标深度。非接触式三维信息获取的其它方法还有从光栅相位调制获得深度的 Moire 技术；从时间，相位或波束频率获得距离信息的雷达声纳测距法；从光相位调制获得深度的全息干涉技术；从清晰/模糊获得深度的透镜聚焦方法；获取结构信息的自动断层扫描技术等等。非接触式获取方法的优点在于扫描速度快，适于软组织物体表面形态的研究，主要缺点在于受物体表面反射特性的影响、存在遮挡现象。以下介绍几种主要的非接触式三维获取方法：

1) 结构光法

结构光方法的基本思想是使用结构光投影的几何信息求得景物的深度信息。它是一种既利用图像又利用可控光源的测距技术。用具有特殊结构形状的光源投射到待测物体上，形成光条纹，再由相机拍摄被测物体，根据光源与相机的相对位置，按照计算机视觉的理论，由光条纹的形状可以计算出被照射点的三维坐标，这种方法又称为光条法。结构光图像中物体表面的光亮条越密，所得数据的分辨率越高。因此目前的结构光光源多采用激光，由于激光器可以生成较薄的光平面，因而具有较高的分辨率。

最近几十年，由于新型半导体激光器和新型光电检测元件（如 CDD 和 PSD）的不断发展和完善，使得结构光三维信息获取系统在小型化和高精度及高速度化等诸方面均有了长足的进展。目前，对该方法的研究主要集中在精度的提高上。

已经有相当多的三维扫描仪产品是基于此原理开发的。如 Dimension-3D 系列 ScanStation，Geometrix 公司的 3Scan，3DScanner 公司的 Reversa 系列产品，还有 Polhemus 公司的 FastSCAN 等。

2) 编码光法和莫尔干涉条纹法

1987 年，Boyer 和 Kak 提出了编码光方法，其原理是通过时间、空间、彩色编码的光源帮助来确定物体表面的空间位置。光线通过一光栅投射到景物表面，

其反射光回到光栅处与新的发射光产生干涉，在接收器上出现莫尔条纹，也即莫尔条纹是两束光在传播路径中发生干涉在物体表面的黑白相间等距线，对等距线图像进行梯度运算，由此可以计算出距离。如 GOM 公司的 ATOS 系列产品，将一系列的多个不同空间密度的光栅投影到物体表面，形成一块待测区域；用数码摄像机获取物体形状（光栅变形）信息。

3) 立体视差法

立体视差法是被动式方法的代表，根据三角测量原理，利用对应点的视差可以计算视野范围内的立体信息，用于双目和多目视觉。这种方法模拟人的视觉方式，以两部位于不同位置的相机对同一目标拍摄两幅图像，得到一组“像对”。对于目标上的一个采样点，它在两幅图像上都成像，根据它在两幅图像中的像点和相机位置，可以引出两条“视线”，计算它们的交会点坐标，就是采样点的空间坐标。人类视觉系统对于深度的感知就部分基于这一原理。

4) 脉冲测距法

这一类方法由测距器主动向被测物体表面发射探测信号，信号遇到物体表面反射回来，依据信号的飞行时间或相位变化，可以推算出信号飞行距离，从而得到物体表面的空间位置信息。通常用激光或超声波作为探测脉冲。基于这一原理的激光干涉仪，精度可达光波长量级。但它需要在物体上放置专门的反射体，即属于有导轨测量，其应用范围受到很大限制，不能用于三维扫描。对于无导轨测量，目前基于这种技术，不少公司开发出了用于较大尺度的测距场合（如战场、建筑工地等）的产品。但对于小尺度场合的物体扫描，这类方法最大的困难在于探测信号和时间的精确测量，时间上一个很小的误差，乘上光速，得到的距离误差就很大。通常采用经过调制的激光，根据反射的调制波的相位变化来推算距离。

Leica 公司，Acuity 公司推出了采用激光或红外线的测距仪，精度在毫米级，Senix 公司则开发了超声测距仪。这种方法一般每次测量物体表面一个点，配合机械装置的扫描运动，完成对整个表面的扫描测量。这种方法不涉及图像处理问题，且受遮挡的影响小，但对装置中的脉冲探测和时间测量设备精度要求高，扫描速度慢。

5) 运动序列图像法

其基本思想是依靠物体或摄像机运动，得到多帧序列图像，通过对此图像序列中特定目标的数学分析和三维运动参数的计算，可从中获得物体的三维信息。一般选为图像序列分析的目标有点、线、实体轮廓和光流。早期基本上以单视点影象作为研究对象，对运动的分析存在非线性、相对性和解的不稳定性问题，为了解决这一问题，出现了双视点和多视点的运动恢复方法，但这又引入了立体像对中两幅图像之间立体匹配的问题。从图像中物体的轮廓能估计轮廓所围表面的

方向。能在图像中产生轮廓线的基本方式有四种： 物体离观察者距离的不连续性； 表面朝向的不连续性； 表面反射率的变化； 阴影、光源强光部一类照明效应。利用轮廓信息，可以在一定程度上恢复物体表面的三维信息。

6) 逐层切片恢复形体方法

这种方法将所测物体逐层切片（一层一层地磨掉或切削掉），获得每一层的二维图像，然后利用所有的图像层信息恢复所测三维形体。该方法可同时获得物体表面和内腔的立体信息，特别适合于具有复杂内部结构零件的三维测量，例如，美国 CGI 公司的自动断层扫描仪 CASS 的扫描精度可达 0.25mm ,最大可测尺寸为 300mm×260mm×200mm。但是，它是一种破坏性的处理过程，测量结束后工件原型被完全破坏，很多情形不宜采用。

7) 三维重建的 CT 方法和核磁共振方法

利用 x-射线、 γ -射线、超声波等获得的多个投影，根据投影与 Fourier 变换之间的关系，可以重建人体内部器官的三维结构。CT 的成像过程，是以高能量、高穿透力的 x 射线入射并“穿透”人体受检部位的组织器官后，借不同组织器官的电子密度的差异，使入射 x 射线的能量强度由于被吸收而发生的相应的衰减所产生的线性变化规律—x 射线线性衰减系数，作为成像参数。该方法是诊断辐射学的一次革命。它在非医学领域也得到了应用，包括射电天文学、电子显微镜图形学等。

核磁共振仪是利用核磁共振原理 NMR (Nuclear Magnetic Resonance) 制成的医疗现代化图像仪器。其基本原理是将受检物体置于强磁场中，某些质子（例如人体内的氢质子）磁距沿磁场方向排列，并以一定的频率围绕磁场方向运动；在此基础上使用与质子进动频率相同的射频脉冲激发质子磁距，使其发生能级转换；在质子驰豫的过程中，释放能量并产生信号。核磁共振成像是利用接收线圈获取上述信号后经放大器放大，并输入计算机进行图像重建，从而获得我们所需要的核磁共振图像。核磁共振成像是 80 年代以来广泛应用于临床的图像诊断新技术，其优点是可以在人体内部的纵剖面内成像，而 CT 机只能在横剖面内成像，从而弥补了 CT 机的不足。

接触式三维信息获取

接触式测量又称为机械测量，即利用探针直接接触被测物体表面以获取其三维坐标数据。接触式三维信息获取的基本原理是使用连接在测量装置上的测头（或称探针）直接接触被测点，根据测量装置的空间几何结构得到测头的坐标。典型的接触式三维扫描设备包括三坐标测量机和随动式三维扫描仪。

目前，用来采集物体表面三维数据的测量设备多种多样，其原理各不相同，不同的测量方式，不但决定了测量物体本身的形状、大小，以及精度和速度等，而且还造成了测量数据的不同类型以及后续处理方式的不同。

如下表 2.1 所示。

表 2.1 三坐标测量技术对比

Tab2.1 CMM technology comparison

名称	优点	缺点
接触式测量	成熟的测量技术； 当需要测量少数特征点的坐标时， 测量速度快。 快速获得全场的数据； 扫描结果覆盖整个零件； 细节特征分辨率高； 便携-可移动到零件旁边； 灵活-可适合各种测量范围。	测量自由曲面的速度慢； 测量时间长； 成本高（需要专门的工作台和地基） 少量特征测量速度慢； 对周围环境要求严格（如光线、噪声等）
非接触式测量		

2.2.2 汽车覆盖件逆向工程扫描设备选取

目前对于汽车覆盖件的点云数据获取主要可以选用以下几种设备：

接触式测量设备：主要有三坐标测量机

三坐标测量机（Coordinate Measure Machine, CMM）是将一个探针装在三自由度（或更多自由度）的伺服装置上，驱动探针沿上下、左右、前后三个方向移动，当探针碰到物体表面时，分别测量其在三个方向的位移，就可以知道这一点的三维坐标。控制探针在物体表面移动、触碰，可以完成整个表面的三维测量。其优点是量测精度高，目前在工业生产领域仍然被相当广泛地使用。其缺点也是很明显的：价格昂贵，速度较慢，无法得到色彩信息。这种装置虽然也是通过探针在物体表面扫描来工作，但更适合作纯粹的测量仪器。

非接触式测量设备主要有：

1) FARO 公司生产的基于机械臂原理的三维激光扫描产品

主要包括 Gold 系列、Silver 系列、Sterling 系列。其产品轻巧方便，测量范围大。Sterling4 型可测量范围达 1.2 米，但整个装置只有 5 千克，最大的 Gold12 型测量范围 3.7 米，重量也只有 14 千克，便于搬运，特别适用于安装现场、野外的三维测量需要。机械臂采用航空铝合金制造，加上其独特的精密轴承装配专利技术和先进的结构设计，使其具有很高的精度和可靠性，测量直径 3.5 米的物体误差控制在 0.084mm 左右。装置能监视环境温度的变化，并作出自动的温度补偿，保证测量精度。FARO 的产品主要面向工业领域，多被用作一种三维测量设备。

2) Cyberware 公司生产的 Cyberware 激光扫描设备

基于计算机视觉原理获取物体表面三维信息是当今三维扫描仪的主流技术， Cyberware 公司在这方面可称为先驱。它以其独特的激光一视频技术，生产了一系列三维扫描仪，应用领域包括影视特技制作、工业产品设计、医学、服装等行业，其中尤以影视特技制作最为著称，在许多影片的计算机三维特技制作中扮演了重要角色。 Cyberware 的代表产品为 3030 系列，其适用范围宽，价格适中，性能好，除其中的 30308 外，其余都可以进行彩色扫描。一套完整的扫描装置由测量单元、扫描平台、主机和相应的软件构成。测量单元采用低功率激光、 CCD 摄像机，扫描速率可达 1.4 万点 / 秒。对于彩色扫描型，还有专门的色彩传感器以实现彩色扫描。 3030RGB 型扫描物体尺寸在 30cm 左右，深度方向测量精度为 100-400um (依赖于物体表面的反射情况) ，测量单元重 23kg ，主机为 SGI 工作站。扫描方式分两种，一种是以伺服装置带动物体运动 (旋转或平移) ，完成扫描；而对于“活体”或大件物品，也可以采用被扫描物体静止，测量单元扫描运动的方式。这两种方式各有相应的扫描平台，一般几十秒就可以完成一次扫描。

Cyberware 提供了配套的软件，可以选择扫描参数，以控制扫描运动，完成有关的计算和处理。软件还提供对扫描结果进行三维显示、比例缩放、旋转的功能，用户可以直观地查看扫描结果。软件提供了修改界面的功能，可以修正扫描结果中一些错误的数据，还可以按照虚拟制造、快速成型的要求重整数据，最终的输出结果支持 20 多种数据格式，包括 DXF 、 SCR 、 PLY 、 OBJ 、 ASCII 、 VRML 、 3DS 、 STL 等。

3) 3D Scanners 公司

3D Scanners 公司的技术特色在于采用了“扫描单元—多自由度扫描伺服装置”的模式，以相机、激光器构成一体化的扫描单元（扫描头），安装于可以多自由度运动扫描、可精确定位的伺服装置上。以多个方位的扫描有效地克服了由于物体形状复杂而造成的遮挡问题。其次采用分区扫描策略，每次扫描较小的范围，通过拼合形成最终结果，降低了绝对误差。由于其精湛的制造工艺，使产品成为该领域的佼佼者。 3D Scanners 公司采用的三维处理软件是 RISCAN 操作软件，它提供多种扫描方式控制以及数据格式转化、三维显示、比例缩放、等高线显示、指定点坐标显示等功能。提供修整界面，可以进行内插、均值、毛刺清除、空缺填补、高度范围限制等。主机采用 PC 机，配置为奔腾、 32MB RAM,Windows 操作系统。扫描所得的三维数据能直接转化成一些标准格式，如 DXF 、 STL 、 ASCII 等，直接应用于产品测量、设计开发、模具制造、珠宝设计、快速制造、影视特技制作、制陶、制鞋及医学。

4) GOM 公司

德国 GOM 公司的 ATOS 便携式三维扫描仪 ,该扫描仪在测量时可随意绕着被测物体移动 ,在距被测物体约 700mm 处高速摄取实物表面数据。扫描系统可连续投影 11 种不同间距的光带于物体上 ,通过光带间距的变化 ,再经过数码影像处理器分析 ,在数秒内便可得到实物表面数据 ,实现三维扫描高速化 ,对于大型物体需分块扫描、为了减少扫描照片的拼接误差 ,利用一台 XL 数码像机 ,使若干不同位置扫描的曲面能按特征点自动拼接 ,形成一个完整的三维数字模型。该系统的测量 (扫描) 范围可达 $8m \times 8m$,曲面拼接精度达到 $0.1mm / m$ 。这种扫描系统的扫描不用编程 ,不受场地和实物、检具等位置的限制 ,操作方便 ,由于重量较轻、体积较小 ,可实现异地测量。ATOS 扫描仪不但可以用于尖角、凹槽、复杂轮廓及软质件的测量 ,而且可用于汽车、摩托车外饰件的造型和大型模具的制造。

对于汽车车身覆盖件的数据测量 ,由于汽车车身要求精度很高 ,因此可以选用测量精度较高的测量扫描系统 ,车身主体采用非接触式 - 光栅投影测量 ,同时配合大型零部件扫描的定位系统方法 ,对于车身上的曲面特征线及关键孔位采用接触式三坐标测量 ,最终获得完整汽车车身覆盖件的点云数据。通过如图 2.1 所示的光栅投影扫描设备 ATOS I 来得到被测量模型的点云数据。图 2.1 所示的 ATOS I 设备的扫描系统主要参数如下表 2.2 所示 :



图 2.1 三维数字化设备平台
Fig2.1 Layout machine for 3D digitizing

表 2.2 ATOS I 测量参数

Tab2.2 The measurement parameters of the ATOS I

测量点	2×2000000
测量面积	35 – 1000mm ²
测量点距	0.021-0.615mm
工作距离	450-1200mm
扫描头尺寸	340mm×130mm×230mm

2.2.3 汽车覆盖件逆向工程扫描步骤

对于大型的汽车覆盖件首先要进行坐标定位^[109-112]。TRITOP 定位系统与 ATOS I 扫描系统进行配合使用。TRITOP 是一套工业用非接触式光学量测系统，其最主要目的是获取标非编码的 3D 坐标，快速且精确的把非编码点的 3D 坐标计算出来。

TRITOP 定位系统的使用原理：TRITOP 是以一手持式的高阶数位相机，对被测物拍摄数位相片^[113-114]。在一开始进行量测之前，先会在物体贴上非编码点，然后将编码点放置车身上，要保证在后续的拍摄过程中每张照片里最少有五个编码点和非编码点，这样能够保证拍摄的成功率。如图 2.2 所示为编码点和非编码点位置关系。

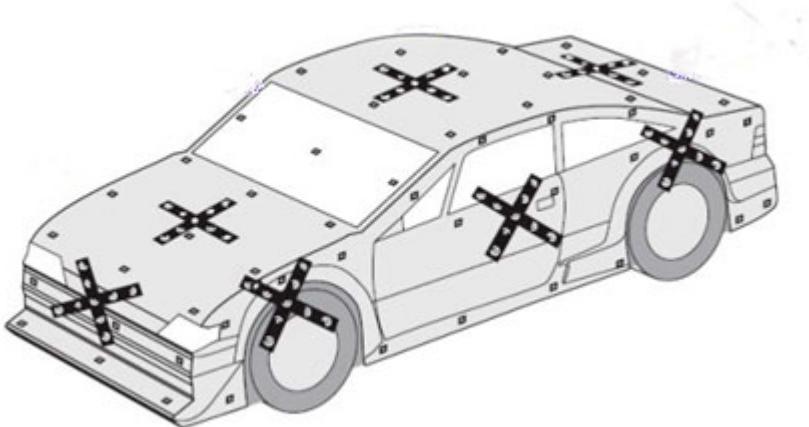


图2.2 编码点与非编码点位置关系

Fig.2.2 The positional relationship between code point and non-coding point.

用高阶数位相机进行拍摄，在拍摄过程中，会拍摄许多不同的角度的影像，将这些影像读入至 TRITOP 软件，因为每一张影像的拍摄角度不同，由每一张影像不同的角度透过三角测距的方式，TRITOP 软体自动的将这些影像结合起来经过

运算之后，就可得到每一个非编码点圆心的 3D 坐标^[115]。

如图 2.3 所示为利用 TRITOP 对一款汽车外表面进行非编码点定位，由于要保持照片的连续性，必须保证相连的两张照片必须存在三个以上的公共标非编码点。因此将拍摄空间分为三层，首先在 Level 0 层进行拍摄，完成后在 Level +1 或者 Level -1 层拍摄，这样就保证了照片之间的连续性。

图2.4所示为利用TRITOP软件计算后的某款卡车车头非编码点坐标数据，由于空间限制，只拍摄了两层，Level 0和Level -1，Level +1层将进行单独拍摄处理。

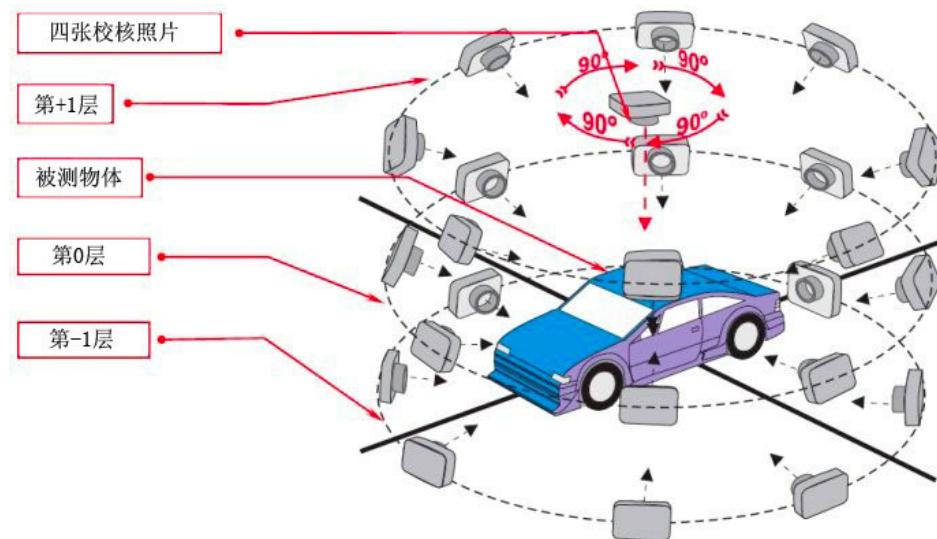


图 2.3 TRITOP 拍摄工作原理
Fig2.3 The principle of TRITOP camera works.

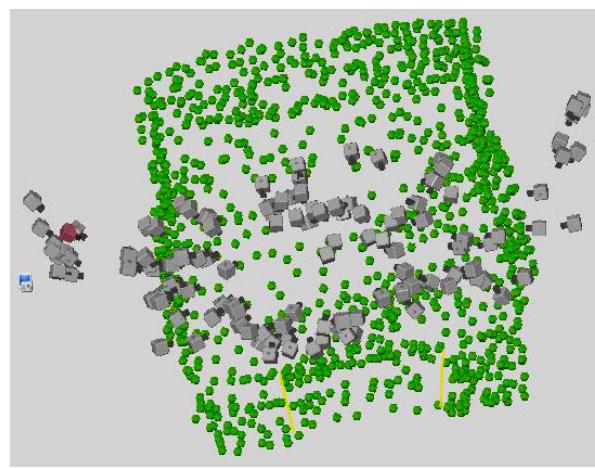


图 2.4 利用 TRITOP 所得到的卡车车头的非编码点点坐标
Fig2.4 Using the software of TRITOP to calculate the truck's front non-coding point coordinates.

通过 TRITOP 得到零部件的非编码点三维数据后就可以利用 ATOS 设备对该零部件进行扫描。对于大型的覆盖件在扫描过程中要注意扫描的连续性，扫描过

程中要保证扫描设备和零部件的稳定性。国内外许多文献^[116-119]多对零部件的扫描做了大量的研究。如图 2.5 所示为某款汽车车身的扫描过程。



图 2.5 车身扫描过程

Fig.2.5 The scanning process of Car body

2.3 汽车复杂形体覆盖件逆向工程中的数据预处理技术

利用三维扫描设备获得物体表面的三维坐标信息以后，得到的是一个离散点的集合，这个集合称为“点云”。获得点云数据仅仅是逆向工程的第一步，在对物体进行三维重建之前，需要对点云数据做一些必要的处理。

这些处理主要是由于测量过程中人为或随机因素引起的误差有可能出现坐标异常点，会导致产生层叠点云，或者飞点，需要予以消除^[120]；当测量数据因视角或扫描软件计算时而导致数据缺损时，要对测量数据加以延拓和修补^[121]；随着测量精度的提高，“点云”数据量可高达几百兆甚至上千兆，其中包含大量的冗余数据，因此需要对数据进行细化处理^[122,123]；复杂拓扑结构的物体表面往往包括许多特征，为了满足重建曲面的拓扑结构要求，还要对测量数据进行区域分割，重现曲面的过渡、裁剪等信息^[124,125]。

以上处理统称为点云数据预处理。目前，三维扫描设备的形式和所采用的原理虽然多种多样，但无论是点扫描、线扫描还是面扫描，绝大部分都不能一次性获得物体全方位的信息，而必须通过扫描设备的运动，才能完成物体全方位的扫描。这样就存在每次扫描的数据拼合的问题。同时在对扫描完成的数据进行预处理时要对其进行光滑，去噪等处理，实际上也是一个数据拼合问题。本节主要讨

论逆向工程中数据拼合的问题。

2.3.1 汽车覆盖件扫描数据拼合

由于汽车覆盖件的体积大、特征复杂，以及测量设备自身的限制，因此通过一次性测量就完成全体零部件的数字化时很困难的，因为有时被测实物的尺寸会超出测量机的测量形成有时探针会有触及不到的表面，或者扫描头扫描不到的死角；而有时测量过程中被测实体的位置发生了移动，或者有时需要重新装夹以补测部分数据等。这时候就需要对全体零部件进行重新定位，两次以上的定位被称为多视图，在后续的模型重构时需要将这些不同坐标系下的多视图数据变换到同一坐标系中，这一过程被称为数据的多视图拼合。对于复杂的模型测量过程往往需要进行多次的定位测量以及多次视图拼合^[89-90]。

基于 CMM（三坐标测量机）的接触式数据获取方式在测量前要根据夹具上的标准块进行坐标定位，因此是先定坐标而后再进行测量，数据的拼合是通过测量块进行的。而基于非接触式光学测量的复杂型面扫描系统则由于每次测量出点云数据的坐标是随机的，要对点云进行数据拼合。

数据拼合有两种情况：第一种情况为扫描中的数据拼合，因为一个完整的点云数据是由多副相连接的三维点云拼接而成的。例如：如图 2.6 所示的汽车车门的数据扫描，红色显示的为当前正在扫描的图形。由于每次扫描时零部件以及扫描设备的位置都不是固定的，因此要保证扫描完成后为一个整体文件。这个拼合功能在各种扫描软件里都自带的有。ATOS I 是根据零部件上面所粘贴的非编码点来进行数据拼合。

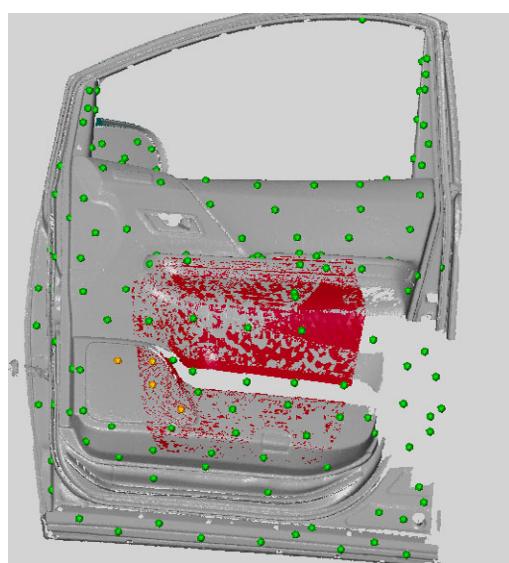


图 2.6 汽车车门扫描过程的数据拼合
Fig.2.6 Put together the point cloud data for the sanning process of car door

第二种情况为同一零部件不同部位，或者不同文件之间的数据拼合，例如：汽车的白车身一般要分成三个文件来扫描，扫描完成后要将这三个数据进行拼合，使其成为在同一个坐标下的三个文件，这样有助于后期数据的处理。如图 2.7 所示为某款汽车白车身车身和底盘之间的数据拼合。

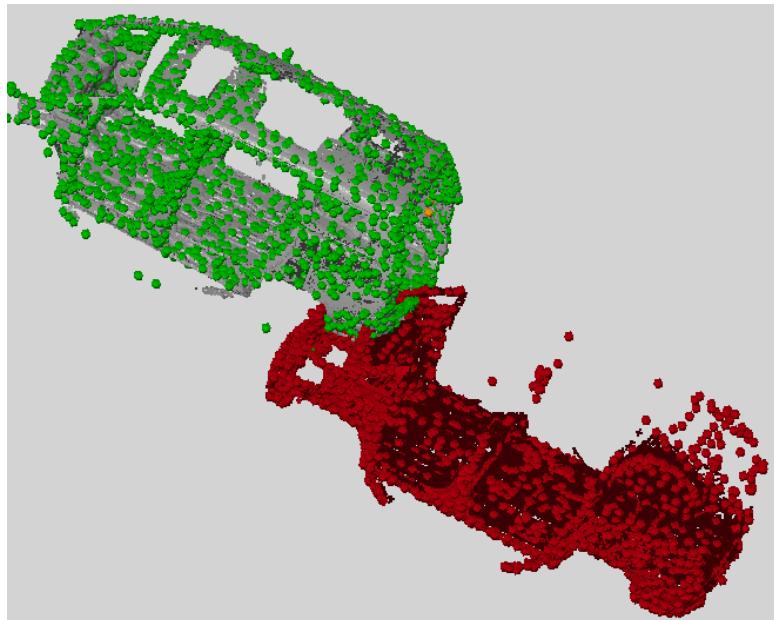


图 2.6 汽车白车身底盘和车身之间的数据拼合

Fig.2.6 Put together the data between the BIW and the basal disc.

对于点云数据的拼合很多文献^[126-131]都做了深入而细致的研究。目前点云数据拼接的方法主要分为两大类：第一类方法是采用经过高精度定标的仪器获取的多片数据以及它们之间的原始变换关系来进行拼接，这类方法主要是和仪器的精度相关，精度越高得到的拼接结果就越好；第二类方法则是利用数据中的变换信息或利用获取数据时引入的其他信息对三维数据进行拼接，这类方法主要是通过数学公式中的一些算法研究来实现。

基于 ICP 算法的扫描数据拼合方法

ICP 算法是点云数据配准过程中使用最多的一种匹配算法，它是通过迭代优化矩阵，在每次迭代过程中，对目标点集上的每个点都要在参考点集中寻找最近点，并利用这样寻找到的最近点计算其相应的旋转矩阵和平移向量，将这些参数应用于目标点集上得到新的目标点集并进行下次迭代过程，最终能得到优秀的转换矩阵，实现两点集之间的精确配准。

在 20 世纪 80 年代中期，很多学者开始对点集数据的配准进行了大量研究。1987 年，Horn^[132]、Arun^[133]等人用四元数法提出点集对点集配准方法。这种点集

与点集坐标系匹配算法通过实践证明是一个解决复杂配准问题的关键方法。但是它的计算效率不高，问题主要在于寻找最近点的过程，因为它需要目标点集的每个点都与参考点集的所有点进行比较来确定相应的最近点。为此在 1992 年，计算机视觉研究者 Besl 和 Mckay^[134,135]介绍了一种高层次的基于自由形态曲面的配准方法，也称为迭代最近点法 ICP (Iterative Closest Point)。以点集对点集配准方法为基础，他们阐述了一种曲面拟合算法，该算法是基于四元数的点集到点集配准方法。从测量点集中确定其对应的最近点点集后，运用 Faugera 和 Hebert 提出的方法计算新的最近点点集。用该方法进行迭代计算，直到残差平方和所构成的目标函数值不变，结束迭代过程。ICP 配准法主要用于解决基于自由形态曲面的配准问题。

迭代最近点法 ICP 最近点法经过十几年的发展，不断地得到了完善和补充。Chen 和 Medioni^[136]及 Bergevin 等人^[137]提出了点到面搜索最近点的精确配准方法。Rusin 和 Levoy 提出了点到投影搜索最近点的快速配准方法。Soon Y 和 Murali 提出了 Contractive-projection-point 搜索最近点的配准方法。此外，Andrew 和 Sing^[138]提取了基于彩色三维扫描数据点纹理信息的数据配准方法，主要在 ICP 算法中考虑三维扫描点的纹理色彩信息进行搜索最近点。Natasha 等人^[139]分析了 ICP 算法中的点云数据配准质量问题^[140]。

该算法的基本思想是：给定两个待拼接的点集 P 合 Q，设 Q 为参考点集（固定不动的点集），P 为目标点集（需要变换到以 Q 为基准的坐标系下）。为了使 P 合 Q 能够拼接在一起，首先对点集 P 中的每一个点在 Q 中找一个与它距离最近的点，建立点对的映射关系，然后通过最小二乘法计算一个最优的坐标变换，即旋转矩阵 R 和平移矢量 T，并令 $P=RP+T$ ，再进行迭代求解直到满足精度为止，可以求出最终的旋转矩阵和平移矢量。

该算法的具体描述如下：

1) 搜索最近点：设有两个点集 $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 和 $Q=\{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ ，其中 $P \subseteq Q$ ：

对点集 P 中的每一个点 $p_i \in P$ ，在 Q 中寻找与它的距离最近的点 q_i ，让它们组成最近点对 (p_i, q_i) 。

2) 求解变换矩阵：按刚体变换求解旋转矩阵 R 和平移矢量 T，使得所有的最近点 (p_i, q_i) 的距离平方和最小，建立式 (3-1) 误差函数。

$$E(R, T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|q_i - (Rp_i + T)\|^2 \quad (2.1)$$

3) 变换点集数据：使旋转矩阵 R 和平移矢量 T 作用于点集 P，即对点集 P 变为 $Rp_i + T$ 。

4) 重复迭代：通常情况下，一次变换并不能使式(2.1)的误差函数达到最小。需要进行多次迭代计算，才能找到最优的旋转矩阵和平移矢量。设第k次迭代求得的旋转矩阵为 R_k 、平移矢量为 T_k ，令 $P_{k+1} = R_k P_k + T_k$ ，然后再利用点集 P_{k+1} 和Q来计算 R_{k+1} 和 T_{k+1} 。迭代终止次数N的判定条件如下：给定阀值 λ ，如果相邻两次迭代的结果满足 $|E(R_{k+1}, T_{k+1}) - E(R_k, T_k)| \leq \lambda$ 则迭代结束。

对于旋转矩阵和平移矢量的求值，奇异值分解的方法，也可以采用单位四元数的方法求解。这里采用奇异值分解的方法求解。

a. 分别计算点集 $\{P_i\}$ 和 $\{Q_i\}$ 的质心：

$$\vec{u}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{p}_i, \quad \vec{u}_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{q}_i \quad (2.2)$$

b. 令矩阵

$$M_{3 \times 3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\vec{p}_i - \vec{u}_p)(\vec{q}_i - \vec{u}_q)^T \quad (2.3)$$

c. 令矩阵M作奇异值分解得：

$$H = UDV^T, \text{其中矩阵 } D = \text{diag}(d_i), d_1 \geq d_2 \geq d_3 \geq 0$$

d. 再令

$$A = \begin{cases} I_3 & \det(U) > 0 \\ \text{diag}(1, 1, -1) & \det(U) \det(V) < 0 \end{cases}$$

如果矩阵 $\text{rank}(H) \geq 2$ ，则可以得到旋转矩阵：

$$R = U A V^T$$

e. 根据旋转矩阵R和两个点集的质心 \vec{u}_p 与 \vec{u}_q ，可求出平移矢量：

$$T = \vec{u}_q - R \vec{u}_p$$

基于遗传算法的点云数据匹配算法

遗传算法是建立在自然选择和群体遗传学机理基础上的随机、迭代、进化算法。20世纪70年代由美国Michigan大学的J.Holland教授提出。它采用多路径搜索，对变量进行编码处理，用对码串的遗传操作代替对变量的直接操作。遗传算法在迭代过程中既保留了父代的优良基因，又在子代中产生变异使算法避免陷入局部最优。同时遗传算法对初始迭代种群选择并无特殊要求。

遗传算法是一种仿生算法，即模拟生命演化的算法。它是从一个初始种群出发，不断重复执行选择、杂交和变异的过程，使种群进化越来越接近某一目标。如果现种群为超越空间的一组点，选择、杂交和变异的过程既是在超空间中进行点集之间的某种变换，通过信息交换使种群不断进化。遗传算法虽然是一类随机算法，但它不是简单的随机移动，它可以有效的利用已有的信息来搜寻那些有希

望的基因。类似于自然进化，遗传算法通过作用于染色体上的基因，寻找好的染色体来求解问题。与自然界相似，遗传算法对求解问题的本身一无所知，它所需要的仅仅是对算法所产生的每个染色体进行评价，并基于适应值来选择染色体，使适应性好的染色体比适应性差的染色体有更多的繁殖机会，遗传算法利用简单的编码技术和繁殖机制来表现复杂的现象，从而解决非常困难的问题，特别是由于它不受搜索空间的限制性假设的约束，不必要求诸如连续性、导数存在和单峰等假设，以及其固有的并行性，遗传算法目前已经在最优化、机器学习和并行处理等领域得到了越来越广泛的应用。

与传统的优化算法相比，遗传算法主要有以下几个不同之处：

1) 遗传算法不是直接作用在参变量集上。而是利用参变量集的某种编码，利用设计变量编码在设计空间进行多点搜索，因而搜索空间大。

2) 遗传算法不是从单个点，而是从一个点的群体开始搜索，有极强的鲁棒性，它仅仅是利用个体的适应度进行群体的进化。

3) 遗传算法利用适应值信息，无须导数或其它辅助信息，杂交算子能使群体进化不断向最优个体逼近遗传算法中的突变算子能避免杂交繁殖收敛于局部最优解，具有全局搜索能力。

4) 遗传算法利用概率转移规则，而非确定性规则。

遗传算法的优越性主要表现在：首先，在搜索过程中不容易陷入局部最优，即使在所定义的适应函数是不连续的、非规则的或有噪声的情况下它也能以很大的概率来找到最优解。其次，由于它固有的并行性，遗传算法非常适用于大规模并行计算。

2.4 点云数据三角网格化

2.4.1 三角网格模型定义

将点云数据进行拼合以后就要对其进行网格化操作。数据拼合是针对点云数据中的散乱的点，而在后续建模工作中需要的是三角网格化的点云数据。同时，三角网格化后的点云数据可以直接进行快速原型（RP）产品的加工。

三角网格模型是由三维空间中的三角形通过顶点和边连接而成的分片线性曲面。关于三角网格的表示 Hoppe^[141]给出了典型的描述：三角网格 $M = (V, K)$ ，其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ ， $v_i \in R^3$ ，表示网格形状由点集在三维空间中的几何位置定义； K 是一种单纯复形，表达点、边、面的一种连接关系（如图 2.7 所示），决定了网格的拓扑类型，可以分别由一组多维单纯形网格表示：

点（0-simplices）： $V = \{i\} \quad K ;$

边（1-simplices）： $V = \{i, j\} \quad K ;$

面 (2-simplices) : $V = \{i, j, k\}$ K

三角网格的单纯复形 K 定义：

vertices: $\{1\}, \{2\}, \{3\}$

edges: $\{1,2\}$, $\{2,3\}$, $\{1,3\}$

face: $\{1,2,3\}$

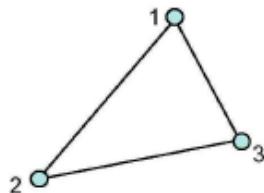
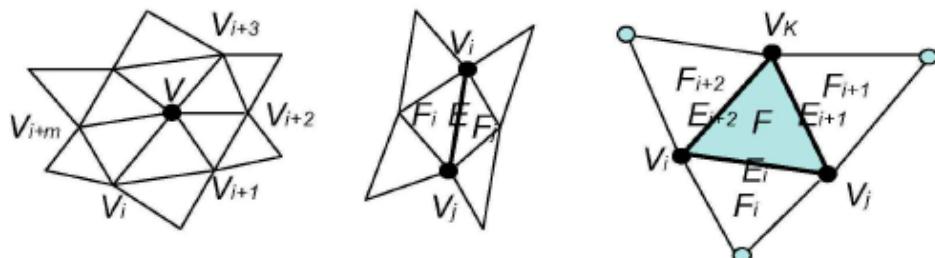


图 2.7 三角网格的单纯复形 K 定义

Fig2.7 Triangular mesh of the simplicial complex K definition

2.4.2 三角网格拓扑邻域表示

三角网格的拓扑结构通过自身包含的单纯复形拓扑邻域信息来表示，如图 2.8 所示。图 2.8 (a) 表示任意点 V 的 1 邻域集合，由与 V 相连接的 m 个顶点组成，记为 $Nbhd(V)_{1}=\{V_1, V_2, \dots, V_m\}$ 。点 V 的 n 邻域集合定义为一个点集，点集里的任意点需要满足经过少于或等于 n 条边就可以到达 V 点，记为 $Nbhd(V)_n=\{V_1, V_2, \dots, V_m\}$, $\text{Min Sum Edges}(Vi-V) \leq n$ ；2.8 (b) 表示任意边的邻域集合，边 E 由顶点 Vi, Vj 组成，由左右相邻的面共享，记为 $Nbhd(E)=\{F_i, F_j\}$ ；图 2.8 (c) 表示任意面的邻域集合，三角面片 F 由顶点 Vi, Vj, Vk 组成，通过共享边的方式与周围的三角片相邻，记为 $Nbhd(F)=\{F_i, F_{i+1}, F_{i+2}\}$ 。利用三格包含的单元单纯复形拓扑邻域信息，可以构建整个三角网格拓扑结构。



(a) 点的邻域

(b) 边的邻域

(c) 面的邻域

(a) Neighborhood of point (b) Neighborhood of edge (c) Neighborhood of plane

图 2.8 三角网格的单纯复形的邻域

Fig2.8 Triangular mesh of the simplicial complex neighborhood

为方便三角网格模型的输入和输出，需要使用特定的文件格式记录模型。这种文件格式不仅需要记录模型表面离散化的三角片，而且还需要记录三角片的方向，如三角片的哪一面指向三角网格模型的外面。SAT，IGES 和 STL 等格式文件都可以用来记录三角网格模型，其中使用最为广泛的是 STL 格式文件。由于 STL 格式简单，它已经成为 CAD 系统和快速原型系统数据传递的标准之一。

STL 格式文件逐个给出构成实体表面的所有三角片的几何信息。每个三角片的几何信息包括三角形所在平面的法矢量和 3 个顶点坐标，顶点的排列顺序与法矢之间须遵循右手法则。在具体形式上，STL 格式文件分为 ASCII 码和二进制两种格式。ASCII 码格式逐行纪录三角面片的几何信息，每一行以一个或两个关键字开头。

二进制 STL 文件采用固定的字节数给出三角面片的几何信息，所反映的内容与 ASCII 码格式相同。文件的起始 80 字节存储文字信息，之后的 4 字节整数记录模型的三角片个数，最后记录每个三角片的几何信息。每个三角片占用 50 个字节浮点数，其中 3 个 4 字节浮点数为一组，分别记录三角片的法矢量、3 个顶点坐标，最后 2 个浮点数暂时没有使用。

2.5 本章小结

本章首先描述了逆向工程中不同种类扫描设备的优劣性，提出了针对汽车复杂形体覆盖件数据采集的扫描方法。并针对 ATOS 光学扫描设备进行了参数分析，阐述了点云数据的获取过程，提出了数据预处理过程中所遇到的问题，并针对点云数据拼合以及三角网格化进行了阐述。

3 汽车复杂形体覆盖件逆向工程中数据分层处理算法研究

3.1 引言

随着测量设备的现代化、数字化、自动化、智能化，测量精度不断的得到提高，模型的测量数据呈快速增长趋势。目前一般的光栅测量设备可以从产品表面轻易获取大量的点云数据，有些达到几百万甚至上千万个点。如此大量的测量数据不仅加大了系统的负荷，而且大大降低了后续处理的效率。因此在抽象建模之前，对点云数据进行预处理显得尤其重要。此外，在实际数据采集过程中，由于测量环境（如温度、噪声、测量人员的经验，零部件的变形等）的影响，在采集到的点云数据中往往含有大量的“坏点”，如果对这些数据不加处理而直接用来拟合曲线曲面，其造型的质量将远远达不到工程实际的要求，也就没有实际的意义。因此，为了得到光顺、精确的反求曲面，就必须将测量设备采集获取的点云数据处理成为理想的点云数据。

由于汽车覆盖件具有面积大，而且产品材料厚度薄的特点，因此在采集到的汽车覆盖件数据中可能会存在层叠点云数据，将大量层叠的覆盖件点云数据的处理转化为曲面会消耗大量的时间，产生比较大的形状误差，还必须要有专业的建模技术人员来构建，而且分层的点云数据不能够用来快速成型产品。因此对汽车复杂形体覆盖件的分层点云数据的预处理显得尤为重要。

3.2 汽车覆盖件逆向工程中数据分层处理算法的提出

在工程实际应用中由于扫描设备，扫描环境以及模型自身的限制等原因，因此在数据采集以及数据处理过程中经常会遇到下面5种情况：

由于汽车车身覆盖件的钢板很薄，在数据采集过程中要移动模型或者扫描设备，因此就会使覆盖件产生受力，由此而出现变形的问题，采集到的点云数据会发生层叠现象。如图 3.1 所示；

对于塑料件的数据采集，由于其本身容易变形，因此在采集过程中移动零件就会使点云数据发生层叠。

对于大型的产品，如风力发电叶片，该产品长度达到了 36 米，因此不能够一次性采集，要分几次采集，本项目采用 6 次采集，每次采集数据段为 6 米，最后将这 6 个点云数据利用定位点进行拼和，由于产品比较长，因此在数据拼和过程中容易使点云数据分层，从而导致了总体数据的扭曲以及高低不平；

对于大型的汽车覆盖件的扫描拼合，由于在扫描过程中零件位置的移动导致其变形，所以在对其进行数据拼合的时候容易产生点云的层叠；

对于泡沫零部件(如汽车座椅)的扫描数据拼合,由于零部件自身的特点,在扫描过程中容易导致其变形,所以在对其进行数据拼合的时候容易产生比较大的点云数据层叠。

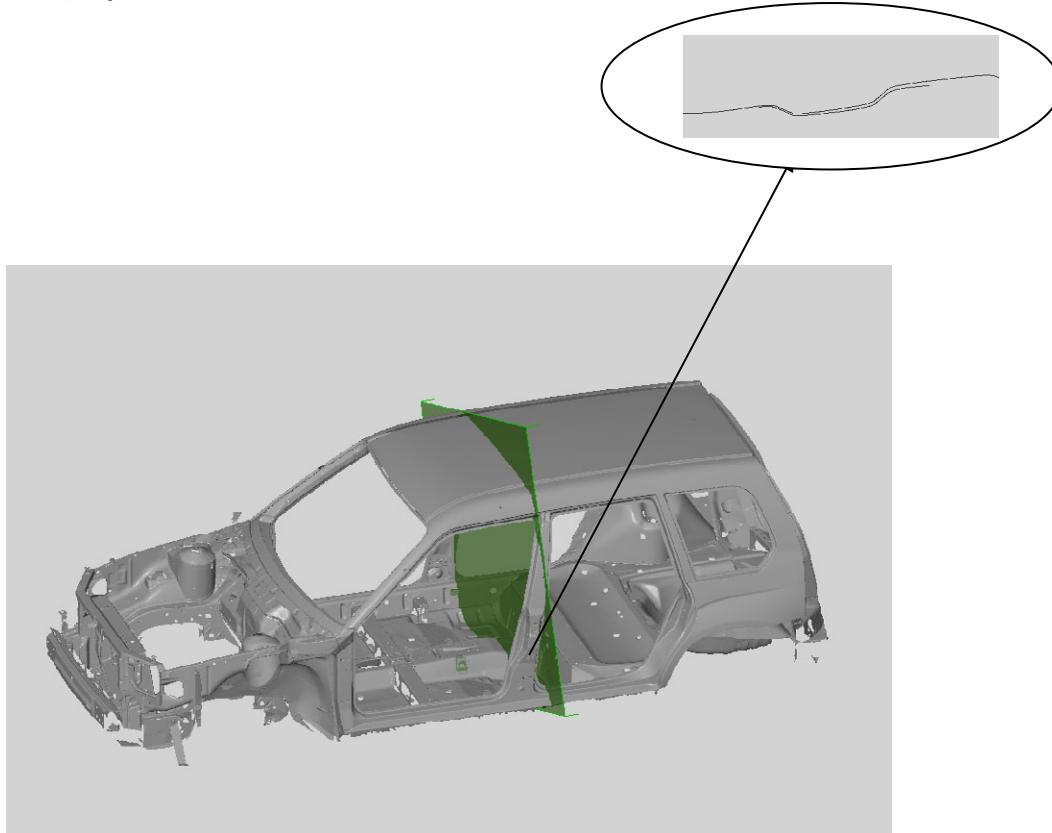


图3.1 汽车白车身STL数据及切片图
Fig 3.1 The STL data and its section map for the BIW

针对汽车复杂形体覆盖件在数据采集和处理中的上述问题,本文提出了一种新的点云切片算法,这种算法能够将层叠的点云数据沿同一个方向切片,由这些切片出的点云来建立多边形曲线,这样就减小了人工处理所带来的形状误差,且这个分割曲线可以用来直接进行快速成型产品的加工。

该算法能够将变形的点云数据进行分层(本文主要研究层叠点云数据中平行以及交叉两种情况,如下图3.2所示),从而有利于后期模型的处理。通过沿着用户所定义的方向切片,将点云分割成了一系列的层。每层的数据点都投影垂直于建模方向的一个平面上,这些投影的数据点被用于重新构建一个多面体近似曲线,近似曲线的真实程度用形状误差度量。

(a) 平行层叠点云
(a) Parallel to the layering point cloud



(b) 交叉层叠点云
(b) Cross to the layering point cloud
图3.2 层叠点云切片图
Fig3.2 Cascading point cloud slice map

利用点云切片方法将数据点切片（切片前点云数据通过前面所描述的方法进行去噪声点），投影到坐标系的二维平面上，然后通过层叠点云切片算法将投影的二维平面点云转化为多边形曲线。第一个切片层就是通过沿切片方向提取多边形来构造的。后面每一层的切片都是通过这种方法来构建的。该算法的系统流程图如图 3.3 所示：

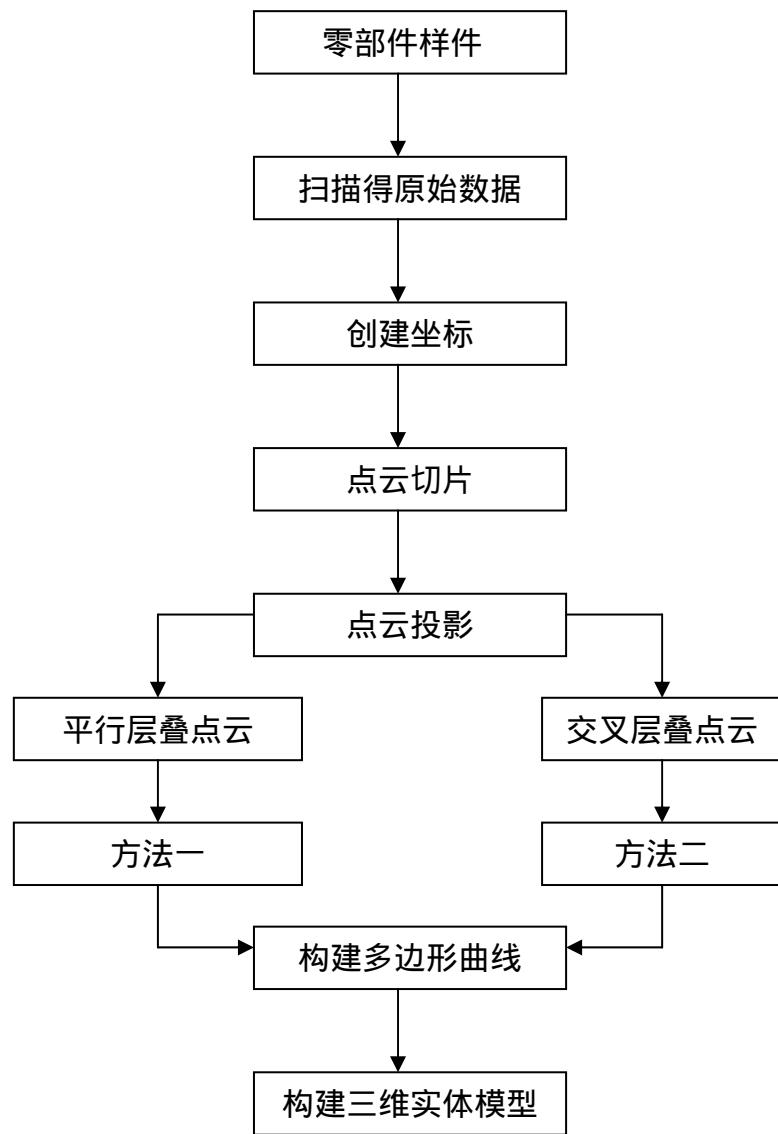


图3.3 层叠点云数据处理系统流程图
Fig3.3 System flow chart

3.3 平行层叠点云与交叉层叠点云数据的判定方法

汽车覆盖件一般为直面和倒角曲面，如图 3.4 所示的汽车白车身底部。但是由于零部件本身的特性，以及扫描设备和条件的限制，所获得的点云数据一般都是呈现波浪形的，这样就存在有最高点与最低点，称之为波峰与波谷点。

将相对于坐标系水平方向设定为相对直边点云（根据实际情况选择 X , Y , Z 平面），倒角部分点云方向被设定为相对斜边点云。首先构建相对直边曲线，对一个单独的层进行构建，这个单独的层采用切片方法获得，可以沿坐标平面对所要处理的点云数据进行切片，从而得到切片点云。其它层的构建方法与这个层相同，分三个步骤来处理：

对点云数据进行切片；

将切片点云通过点云层叠处理算法构建成为一个二维曲线；

通过所建立的曲线依次来分离这些切片点云数据。



图3.4 白车身底盘数据

Fig3.4 The point cloud of the basal disc for BIW

基于上述切片，平行层叠点云与交叉层叠点云数据的判定方法的流程为：

判断切片点云是平行层叠点云或者是交叉层叠点云数据，将点云数据沿所需坐标方向（x、y、z）进行切片，切片的数量与模型的复杂程度成正比例，模型越复杂切片的数量就要越多，反之就要越少。

具体算法如下（垂直 z 向进行均匀切片）：

1) 求得 Z_{min} 、 Z_{max} ；

2) 求出相邻切片之间的距离值，

$$(Z_{max} - Z_{min}) / n$$

$n > 1$, 为切片个数, 由点云数据的密度决定。

3) 将各个测量数据改变 Z 值后放入相应的切片数据结构, 得到 n 个数据集。

取得的切片点云数据用公式表示:

$$S = \{P_i = (x_i, y_i) | i=1, \dots, n\}$$

然后随意选取与切片平面相垂直的平面 A. 将切平面与平面 A 的交线设定为直线 L_1 ($x=a$, a 为常数)。 L_1 与切片点云数据之间的关系分三种情况:

- 1) 平行点云数据切片;
- 2) 交叉点云数据切片, 直线 L_1 正好落在交叉点上;
- 3) 交叉点云数据切片, 直线 L_1 落在交叉点的左右两边。(2) 中描述的直线落在交叉点上为 3) 的特殊情况)

如下图 3.5 所示:

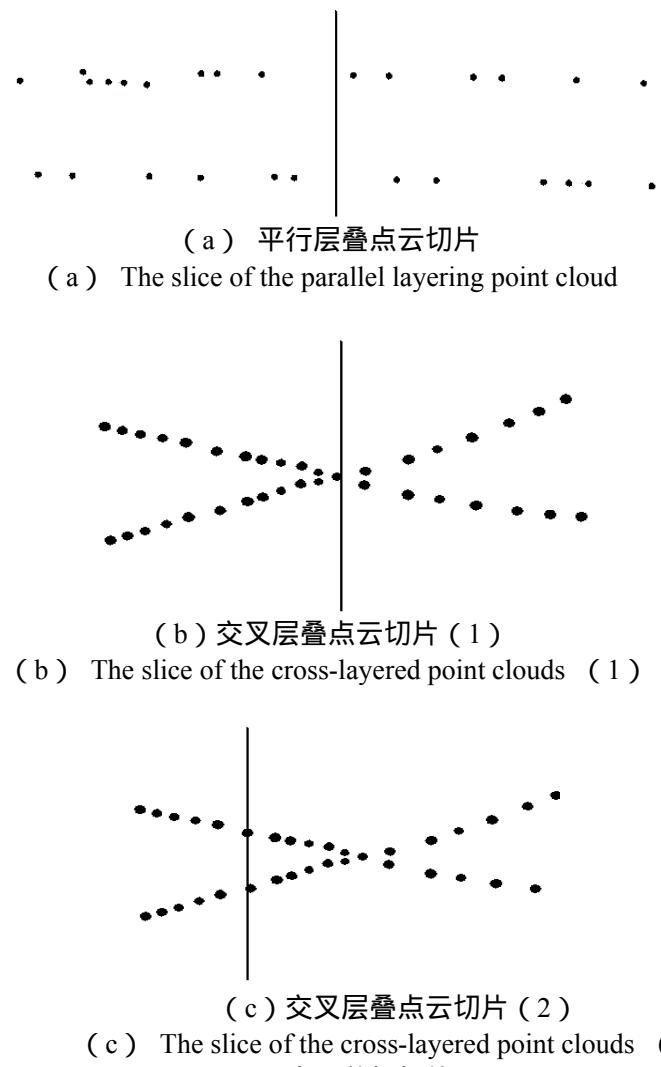
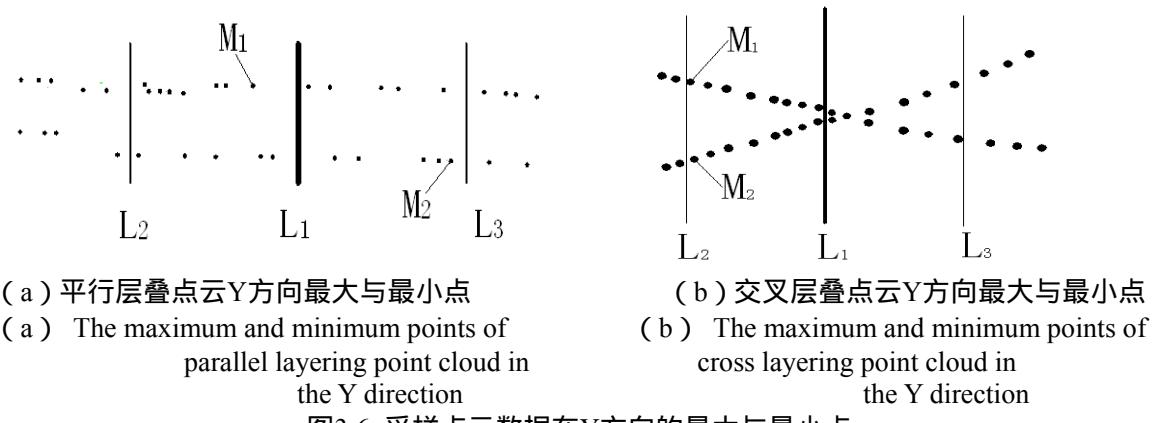


图3.5 点云数据切片图

Fig3.5 The slice map of the point cloud data

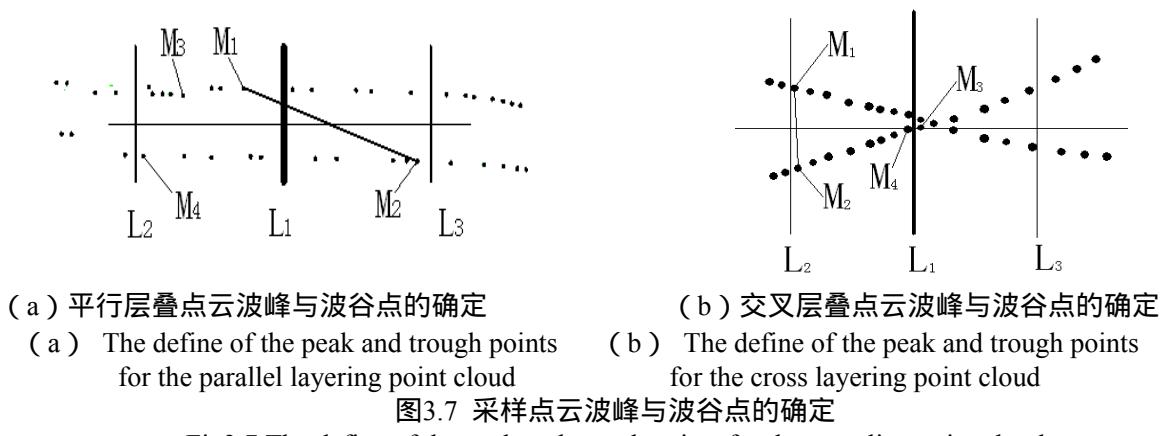
根据点云的密度，在直线 L_1 两边各取一个与 L_1 平行的对称直线 L_2 ($x=a_1$)
 L_3 ($x=a_2$)， L_2 、 L_3 范围内的点云为采样区间：
 $S'=\{G=(x_i, y_i) | i=1, \square, n', a_1 < x_i < a_2\}$ ($S' \subset S$)
 得到采样区间内所有点云 Y 值最大与最小点，得到最大点 M_1 (x_1, y_1)，最小点 M_2 (x_2, y_2)。如图 3.6 所示：



连接点 M_1 与 M_2 。过线段 M_1M_2 的中点做直线 L_1 的垂线。该垂线的方程为：

$$y = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (a_2 \leq x \leq a_3)$$

该直线将采样点云分为了上下两部分，根据前面所提到的波峰与波谷的概念，因此，上下两部分各有一个波峰和波谷点的存在。前面所得到的点 M_1 与 M_2 分别为这两部分的波峰与波谷，上面点云数据距离该直线最近的点 M_3 为上部分的波谷点，下面点云数据距离该直线最近的点 M_4 为上部分的波峰点，如图 3.7 所示：



连接 M_3 与 M_4 ，连接线段 M_1M_2 和 M_3M_4 的中点组成一直线段，将该线段的中点设定为点 N_1 。如下图 3.8 所示：

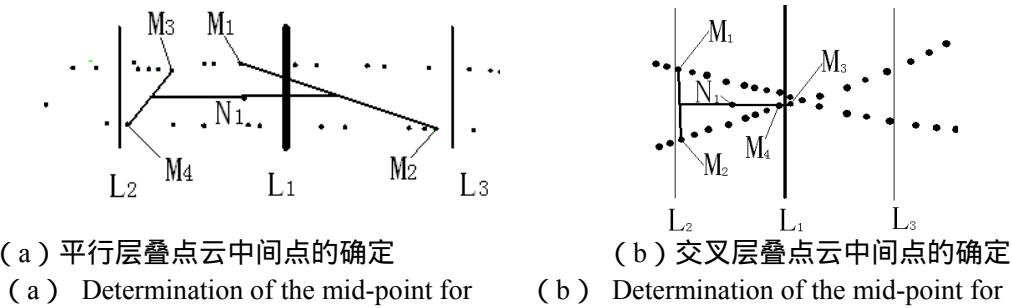


图3.8 采样点云中间点的确定
Fig3.8 Determination of the mid-point for the sampling point cloud

应用上面所描述同样的方法得到符合平面 B 的波峰与波谷点 M_1' 、 M_2' 、 M_3' 、 M_4' ，连接线段 $M_1'M_2'$ 与线段 $M_3'M_4'$ 得到线段的中点 N_1' ，下图 3.9 只说明了平行层叠点云数据的情况，交叉层叠点云数据的另外一个点的确定方法与之相同。

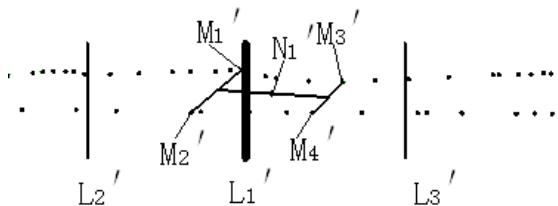


图3.9 另一个采样点云中间点的确定
Fig3.9 Determination of the mid-point for the another sampling point cloud

连接点 N_1 和 N_1' 构成一条直线，该直线将该层中平行层叠点云数据中的直边点云分成了上下两部分（如图 3.10 所示），由于点云数据有倒角部分的存在，因此直线 N_1N_1' 应该有两个端点。

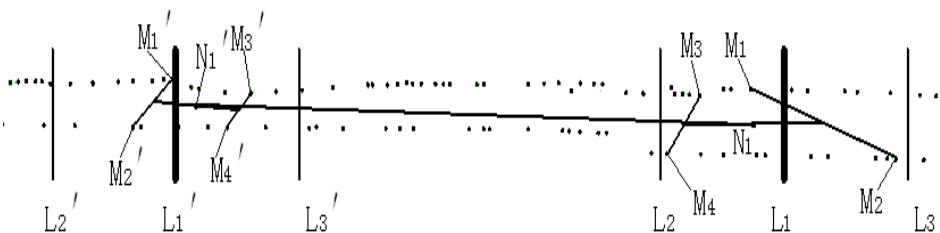


图3.10 采样点云分割线的确定
Fig3.10 Determination of the dividing lines for the sampling point cloud

为了确定直线 N_1N_1' 的端点。先引进一个最佳线性的概念。应用相交的概念^[112,113] 来定义给定点的线性情况。假设 (X, Y) 用来表示一个 N 系列的点云数

据 $\{P_i = (x_i, y_i) / i=1,2,\dots,N\}$, 这些点中的线性指数被设定为 :

$$\rho(X, Y) = \left| \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}} \right| \quad (3.1)$$

这里 X 和 Y 分别表示 $\{x_i\}$ 和 $\{y_i\}$ 的平均值。 $\rho(X, Y)$ 的值在 0 与 1 之间。 $\rho(X, Y)$ 越大说明有着较好的线性。如图 6, 在这里通过两个半径分别为 R_1 和 R_2 的圆来定义相邻点云之间的关系。通过上述算式计算, 得到圆 R_1 和 R_2 的线形指数分别为 0.58 和 0.95。很明显, 在 R_2 中的点表现出了较好的线性, 这是因为与它相邻的 R_1 包括了数据点的一些拐点。

将线段 $N_1 N_1'$ 延长, 与半径为 R_2 的圆相交, 这个交点 H 就为直线 $N_1 N_1'$ 的终点。如下图 3.11 所示。

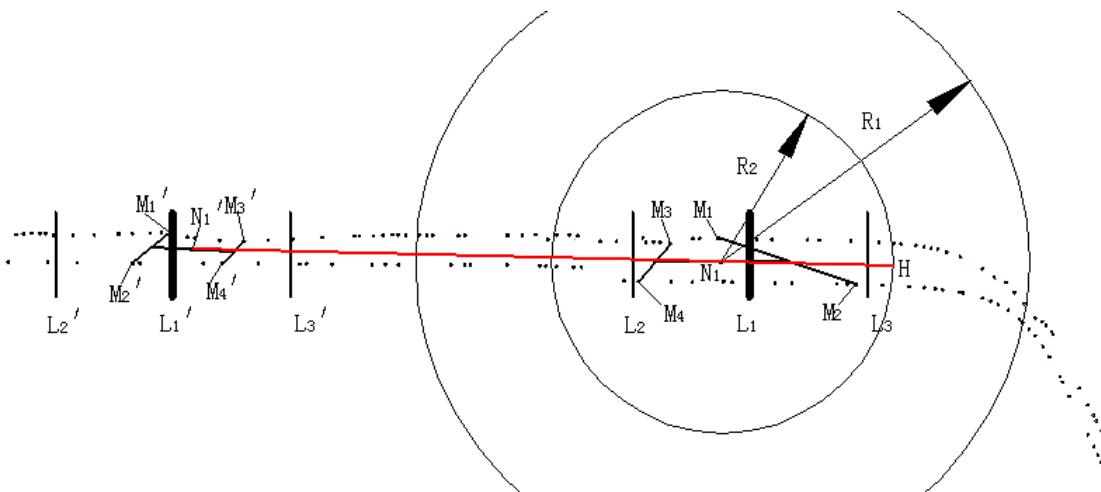


图3.11 相对直边边界点的建立

Fig3.11 Set up of the boundary points for the relative of the straight edges

判断点云数据为平行层叠或者交叉层叠。

在图 3.10 采样区间 L_2 、 L_3 之间判断上下两部分点云数据到分割线的距离。该判断函数为 :

$$f(x_i) = |m - x_i|$$

其中 m 为直线 L_1 的横向坐标值, x_i 为采样点云数据的横向坐标值。

该距离值在采样区间内由左到右表示。如下表 1 所示 :

2.06	2.06	2.07	2.04	2.03	1.99
1.97	1.98	1.92	1.84	1.93	1.86
单位 : mm					
1.62	1.65	1.63	1.60	1.70	1.72
1.68	1.62	1.59	1.57	1.71	1.69

单位 (unit) : mm

表格1 : 图3.10 (a) 点云数据到分割线的距离

Tab.1 The distance for the point cloud data to dividing lines in the Fig 3.10 (a)

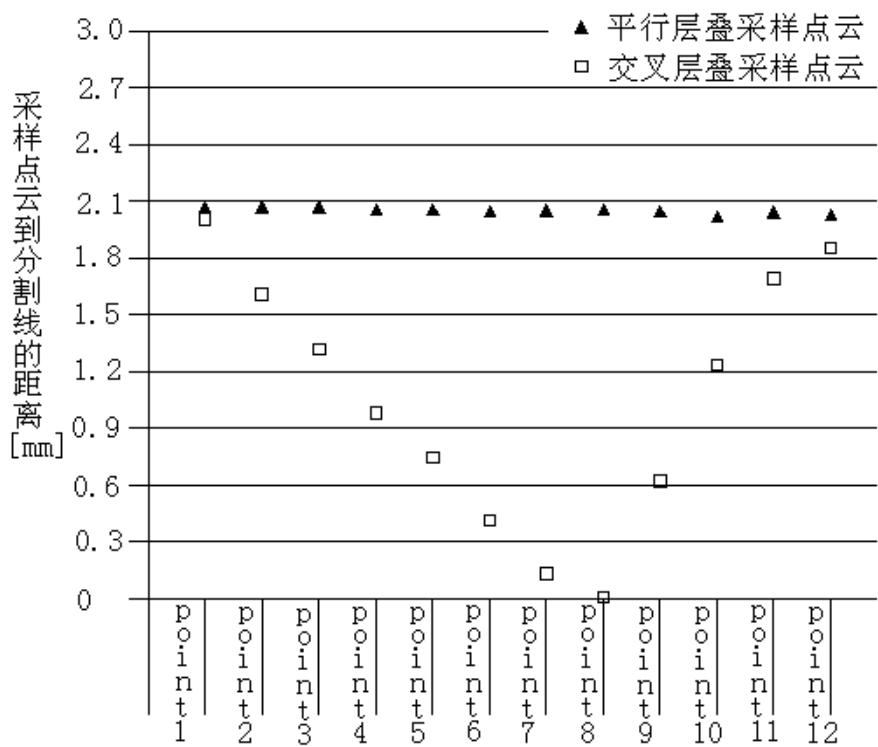


图3.12 表格1中距离的图形表示形式

Fig3.12 The graphical representation of the distance in the table 1

从表格1中可以看出，该采样区间内分割线上部分和下部分的距离值是平均分布的，因此可以判定该点云数据为平行层叠点云。

1.98	1.63	1.32	1.05	0.75	0.43
0.15	0.03	0.62	1.23	1.68	1.83

单位 (unit): mm

2.10	1.75	1.52	1.16	0.85	0.53
0.20	0.50	0.75	1.15	1.49	1.76

单位 (unit): mm

表格2：图3.10 (b) 点云数据到分割线的距离

Tab.2 The distance for the point cloud data to dividing lines in the Fig 3.10 (b)

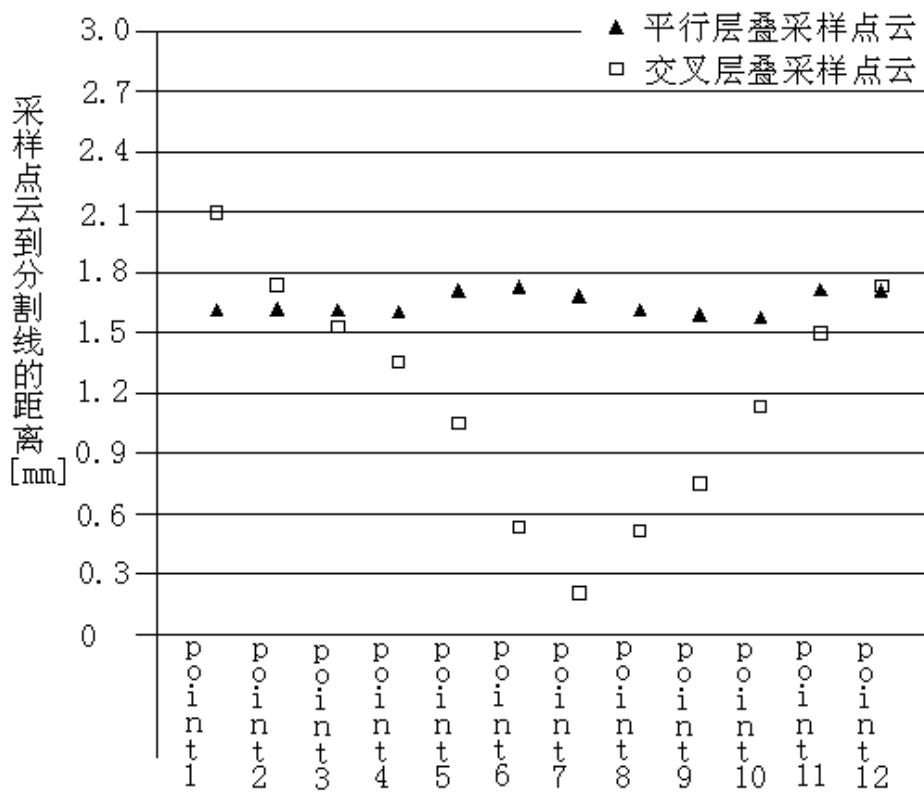


图3.13 表格2中距离的图形表示形式

Fig3.13 The graphical representation of the distance in the table 2

从表格2中可以看出，该采样点云上下两部分到分割线的距离是由大到小排列的，由此可以判定该点云数据为交叉层叠点云。

3.4 平行层叠点云与交叉层叠点云数据处理方法

3.4.1 平行层叠点云数据处理方法

平行层叠点云数据处理分为二维多边形相对斜边构建和倒角部分构建。

二维多边形相对斜边构建

平行层叠点云数据相对斜边区域点云拟合成为曲线后与坐标平面所成的角度较大（如下图 3.14 所示），将采样范围内的点云投影到坐标平面上，最高点与最低点的距离达到了 10mm。因此采用一种近视曲率的方法来构建相对斜边曲线。

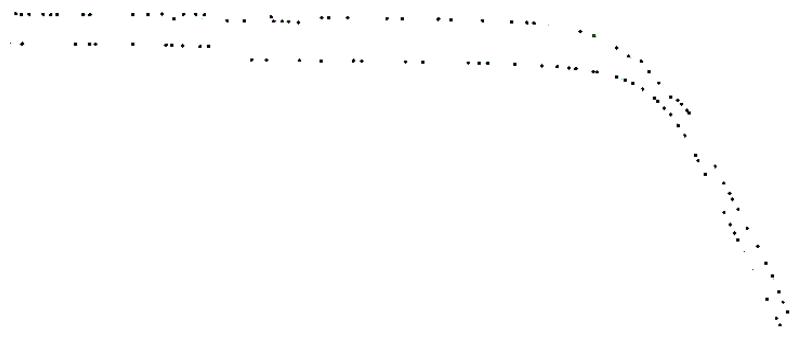


图3.14 相对斜边点云状态
Fig3.18 The condition of the relative bevel point cloud data

首先随意选取与投影平面相垂直的平面 C, 平面 C 在二维空间的表示为直线 L_4 , 接着在直线 L_4 的两端各取一个对称直线 L_5 与 L_6 。然后确定在直线 L_5 与 L_6 范围内分别离这两个平面最近的两个点。确定 M_5 、 M_7 为离直线 L_5 最近的两个点, M_6 、 M_8 为离直线 L_6 最近的两个点。连接 M_5 与 M_8 , M_6 与 M_7 , 相交与点 O。如图 3.15 所示。(若两条直线不相交, 则连接两直线的交点, 然后选取其中点作为点 O)

应用同样的方法得到与平面 D 相关的点 O'。如图 3.16 所示。

连接点 O 与点 O', 直线 OO' 为相对斜边部分的分割线, 如图 3.17 所示。

运用前面提到的线性最佳公式(1)确定相对斜边分割线的两个端点, 如图 3.18 所示。

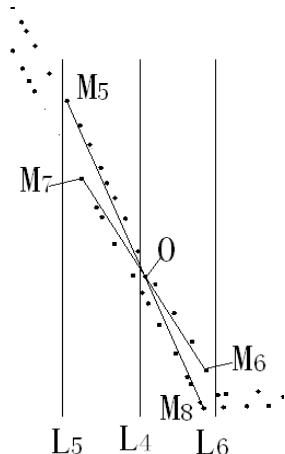


图3.15 相对斜边第一点的建立
Fig3.15 Set up the first point of the relative bevel

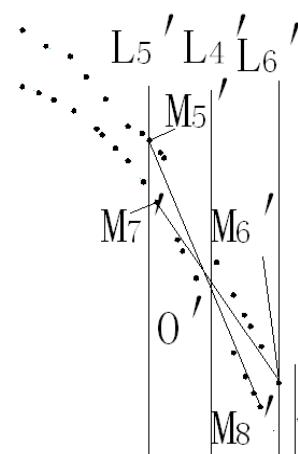


图3.16 相对斜边第二点的建立
Fig3.16 Set up the second point of the relative bevel

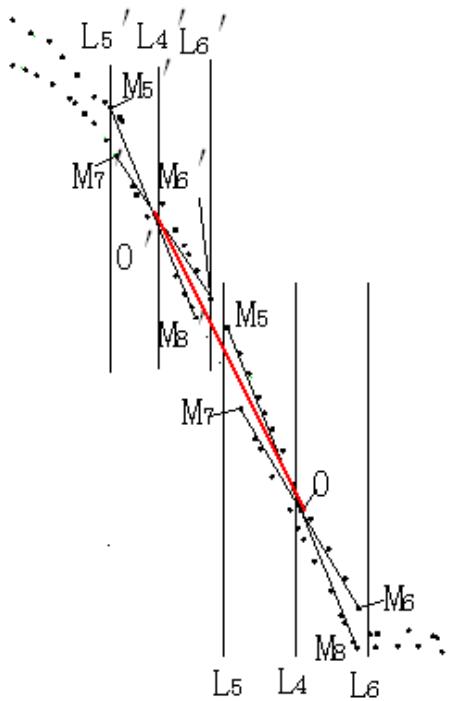


图3.17 相对斜边分割线的建立

Fig3.17 Set up the dividing lines for the relative bevel

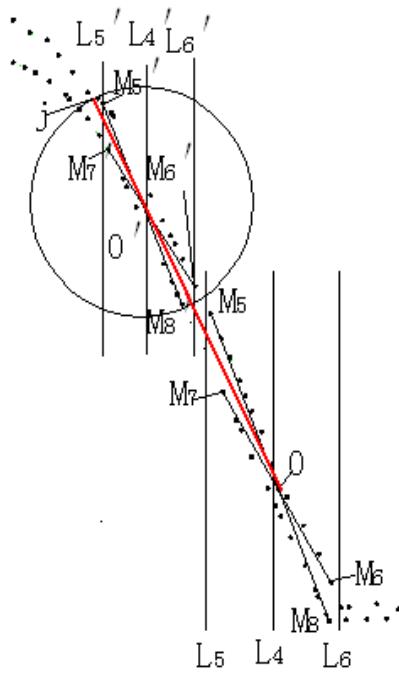


图3.18 相对斜边分割线端点的建立

Fig3.18 Set up the endpoints dividing lines for the relative bevel

倒角部分构建

模型上倒角部分应该是曲线连接的，这里提出使用线段逼近曲线的方法。对于一个圆，它可以用一个内接多边形来近似代替。如图 3.19 所示，圆弧可以用它的内接正多边形来代替。因此可以利用线段来近似代替这个倒角曲线。

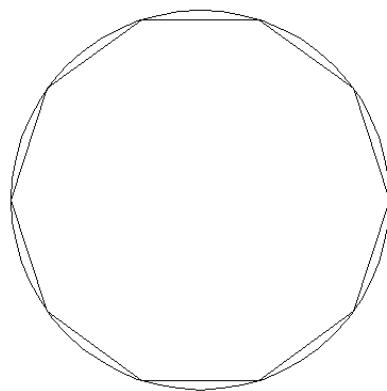


图3.19 圆的内接多边形
Fig3.19 The inscribed polygon of the circle

将上节所提到的两个终点 H 和 j 相连接，这时候判断线段 Hj 是否为倒角区域点云的分割线，判断的原理是看在线段的法向方向（包括内法向和外法向）点云的数量，如图 3.20 所示，线段 Hj 中间部分外法向方向有两层点云，而内法向方向则没有点云，因此，不能将线段 Hj 作为分割线。选取线段 Hj 的中间点建立垂

直平面 E, 然后再次利用第一步所使用的方法来确定相交点 e, 分别建立线段 He 与 ej , 用上面所阐述的判断方法来确定这两条线段是否为分割曲线 , 如果不是的话 , 则重复上述步骤 , 一直到满足分割线的条件为止。如图 3.21 所示 , 线段 eH 符合条件 , 因此为该部分的分割曲线。线段 ej 也符合条件。

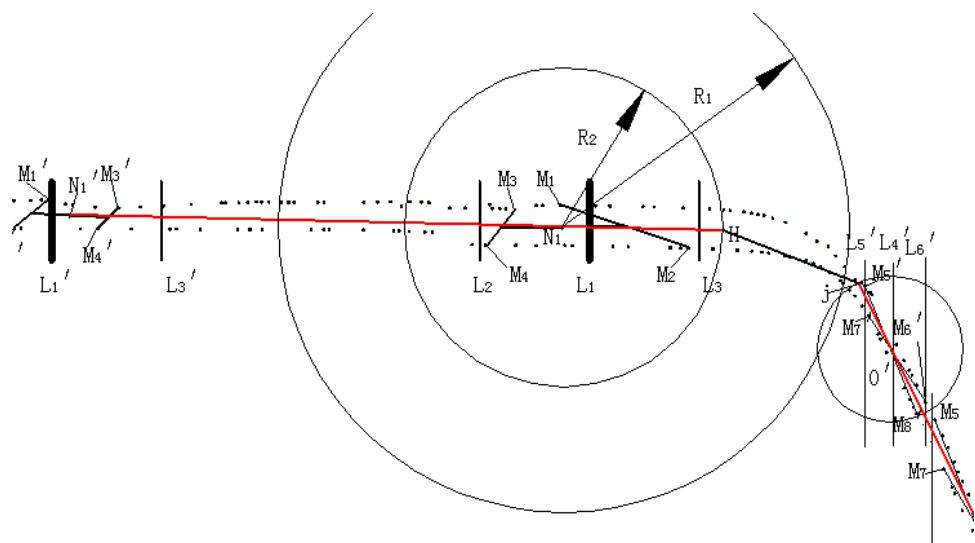


图3.20 确定倒角部分曲线的第一步
Fig3.20 The first step to determine the chamfer part of the curve.

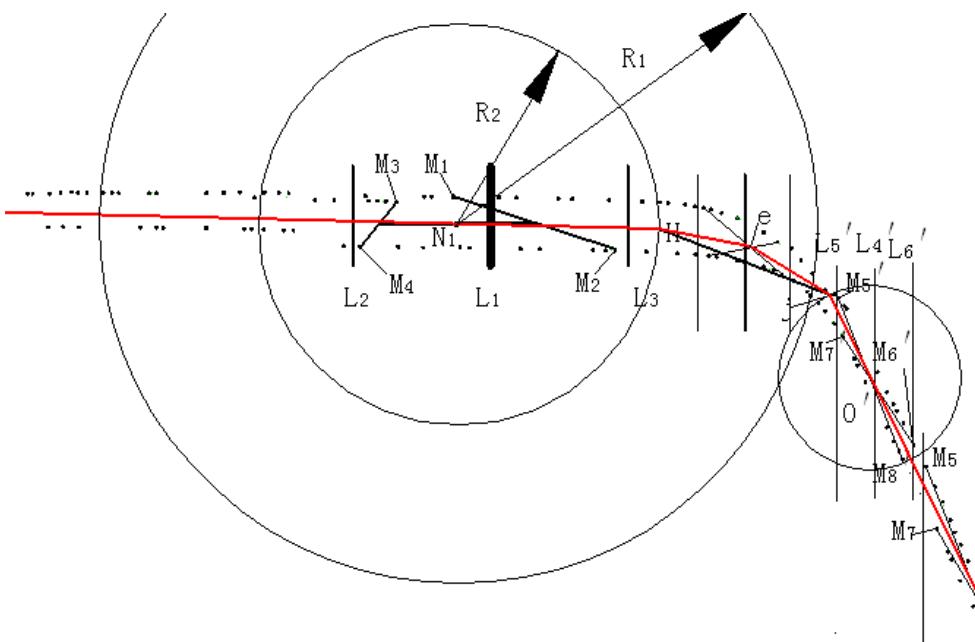


图3.21 确定倒角部分曲线的第二步
Fig3.21 The second step to determine the chamfer part of the curve

如果其中有某段线段不符合要求 , 则要继续分割 , 重复前面步骤 , 一直都符合要求为止。

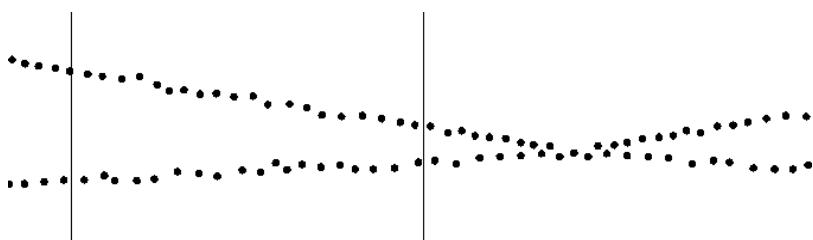
最终所建立的图形如上图 3.21 所示，在该图形中红色线条为该部分点云的多边形曲线。这条多变形曲线就是所要求的模型曲线，利用该曲线既可以进行后续的模型建立工作，又可以直接将其用于快速成型产品加工。

后面层的构建与第一层类似。都是采用先切片，再投影，然后建立多边形曲线的方法来建立的。切片的数量由模型的复杂程度来决定。以本章所举的汽车白车身为例，由于点云数据长度达到了 3300mm，因此点云切片宽度可以达到 12mm 以上。

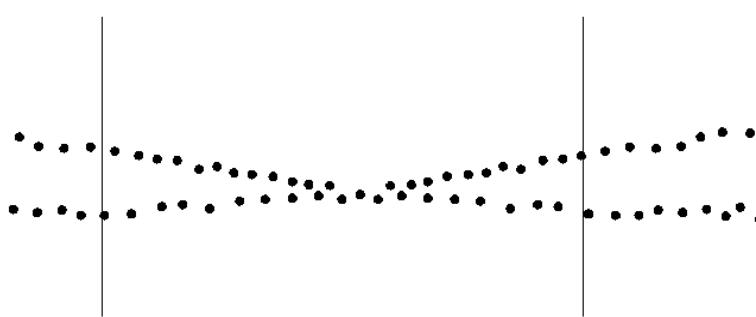
3.4.2 交叉层叠点云数据处理方法

对于交叉层叠点云数据，主要是要确定数据的交点。如点云二维切片图 3.5 (b)(c)，以及图 3.20 和 3.21 的距离所示，交叉层叠点云数据主要是要确认交叉点的位置。前面章节已经有了确定交叉点云的方法，这一节主要是讨论交叉点的确定，以及交叉层叠点云数据的切片方法。

交叉点的确定，首先对点云数据进行采样，建立采样区间方法同平行层叠点云处理相同，如下图 3.22 所示，采样区间和点云数据之间的关系分两种情况：一种是交叉点在采样区间范围之内，另外一种是交叉点在采样区间范围之外。



(a) 交叉点在采样区间外
(a) The intersection outside the sampling interval



(b) 交叉点在采样区间内
(b) The sampling interval in the intersection

图3.22 交叉层叠点云采样区间
Fig.3.22 Cross-layered point clouds sampling interval

通过图 3.22 得出采样区间的两种情况后，对于第一种情况，按照平行层叠点云数据的处理方法处理，即分别选取离采样直线最近的 4 个点，每两个点互相连

接，再连接这两条线段的中点组成一条直线，判断离该直线第一个最近的点云数据坐标，该点即为所求的交点。如下图 3.23 所示，点 R 即为所求的交叉点。

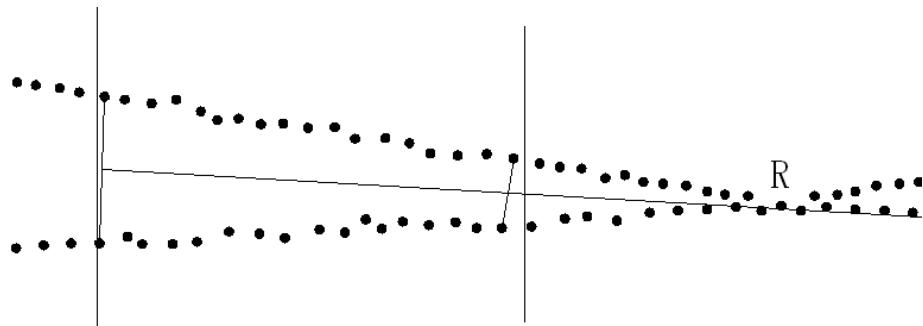


图3.23 采样区间在交叉层叠点云交叉点外时交叉点的判定

Fig.3.23 The method for determine the cross-point when the sampling interval outside the cross-point

对于交叉点在采样区间范围之内的情况，判定方法与前面一种情况有所不同。分为几个步骤，第一步是运用上面提到的判定交叉点在采样区间范围外的方法选取点和直线，然后通过下图 3.24 可以看到这个时候离该直线最近的点并不是交叉点。因为根据点云数据的密度判断该条直线上下两部分，由于采样点云数据点与点之间的平均距离为 0.4mm,因此判断在直线上下两部分点云空格最少为 0.4mm,因此判断该直线并不是分割线，通过这条直线没办法判别交叉点。

第二步，这里采用类似判断层叠点云数据倒角部分的迭代方法来处理。取该直线的中点然后做平行于采样区间的平行线，这条直线将采样区间分为了左右两部分，然后再次运用第一步提到的方法提取两条分割线，将这两条线段的端点相连，如图 3.25 所示，3 条红色的线段即为该步骤所求得的分割线。同样再次判断分割线上下点云数据的疏密程度来决定书否为分割线，通过图形明显的看到还是找不到交叉点，还需要再次迭代。

一直迭代到满足要求为止。最终确定的分割线如下图 3.26 所示。由品红色、红色以及蓝色线段所组成。最终确定了交叉点 R。

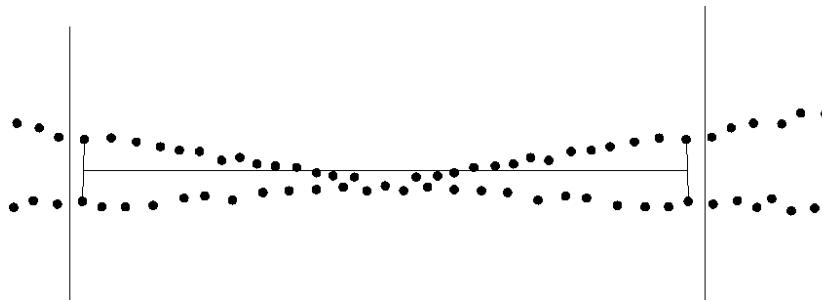


图3.24 迭代第一步

Fig3.24 The first step for the Iteration

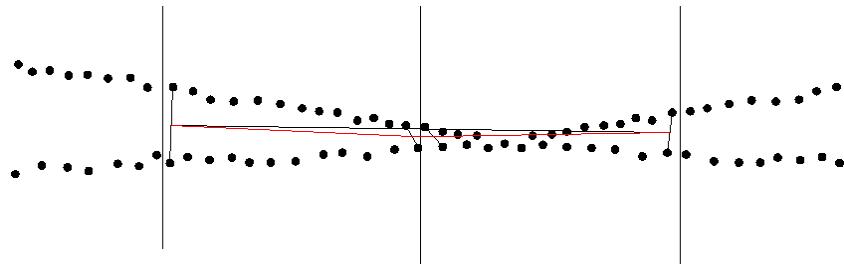


图3.25 迭代第一步
Fig3.25 The first step for the Iteration

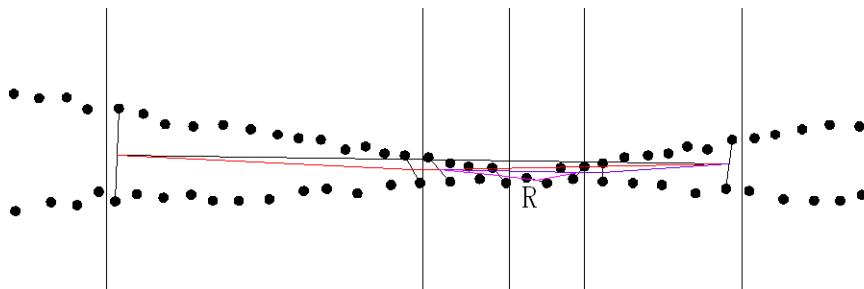


图3.26 最终迭代结果
Fig3.26 The final results of the iteration

通过上述分割点的确定实际上已经得到了采样区间内的分割线。图 3.26 所示的采样区间内的线段即为所求的的分割线。一般情况下倒角部分钣金点云数据不容易产生交叉。因此交叉层叠点云数据的倒角部分分割线的确定同平行层叠点云数据一样。

3.5 层叠点云数据分层处理算法应用

以采用 ATOS I 光学扫描设备得到的某款汽车车身钣金整体数据为例，对上述层叠点云数据处理算法应用如下：图 3.27 (a) 所示为通过该设备采集到的 STL 点云数据。通过局部放大图 3.27 (b) 可以看出，由于在进行数据采集时设备的限制以及扫描对象的移动变形等原因造成了点云数据的层叠，该点云数据有平行层叠和交叉层叠点云数据存在，影像到了以后数据的处理，因此有必要对数据进行预处理。

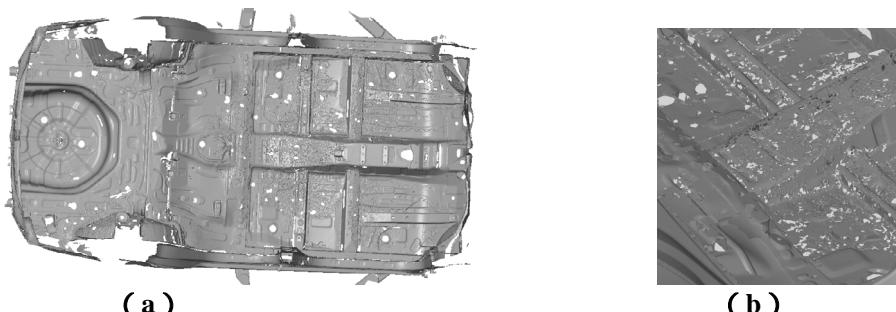


图3.27 原始点云STL化结果及局部显示
Fig3.27 The original point cloud of STL and the local display

运用之前我们研究的层叠点云数据处理方法对该部分点云数据进行处理，处理后的结果如下图3.28所示。

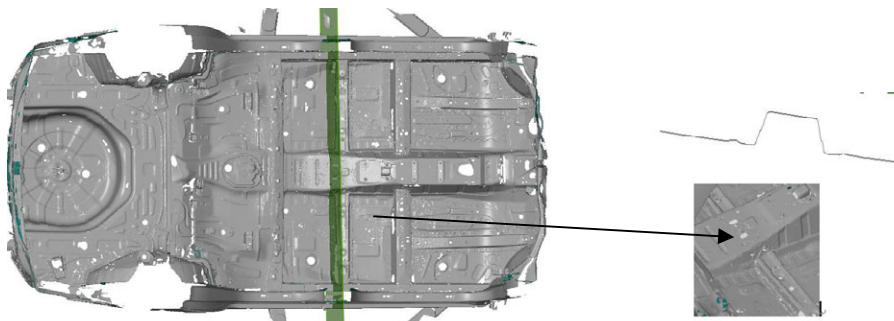


图3.28 方法最终优化后的STL点云及局部显示
Fig3.28 The final optimization of STL point cloud and the local display

图3.27(a)所示为通过该设备采集到的STL点云数据。通过局部放大图3.27(b)可以看出，由于在进行数据采集时设备的限制以及扫描对象的移动变形等原因造成了点云数据的层叠，该点云数据有平行层叠和交叉层叠点云数据存在，影响到了以后数据的处理，因此有必要对数据进行预处理。

3.6 本章小结

本章首先分析了产生层叠点云数据的原因，以及对后续处理所造成的结果。然后分析了层叠点云数据的两种情况，即平行层叠和交叉层叠。针对汽车覆盖件存在面积大，产品厚度薄等特点，本文提出了一种汽车覆盖件的点云数据分层处理的新的切片算法，该算法首先确定层叠点云数据的位置，然后沿着模型的三维坐标对其进行多层切片，接着对每层切片点云进行采样，确定采样范围内的波峰与波谷点，通过其产生层叠采样点云的分割线（也成为中线），并根据最佳线性的方法确定倒角位置的分隔线段，从而自动将层叠点云数据分离。层叠点云数据有可能会出现平行层叠和交叉层叠同时出现，这种情况的处理算法更加复杂，今后将重点放在对于多种情况出现的研究。

4 汽车复杂形体覆盖件逆向工程中孔洞缺陷区域数据修补算法

4.1 引言

在逆向工程的前期实践中，经常会遇到以下问题^[142-145]：

1) 对复杂零部件表面进行数据测量时，由于测量设备的限制，测量方法的多样性以及工件的安装定位等原因，经常会出现一些测量不到的区域，比如汽车覆盖件中的汽车白车身的一些死角，将这部分区域称为盲区。

2) 实物零部件中经常存在经过裁剪活“布尔减”运算等生成的特征，例如：表面凹边，孔或槽等，其裁剪或者“布尔减”前的完整信息在零件中已经不存在。由于这些区域没有被测量，因此对逆向建模者来说，它们是未知的。

3) 在对零部件的扫描工作完成后，要通过计算机来实现点云数据的三角网格化，网格化是一个比较繁琐的过程，要经过精确合并，填充参考点（ATOS 扫描设备在扫描时需要在被测零部件上粘贴参考点），光滑，细化等过程来实现，因此在计算过程中容易将粘贴参考点的地方计算成为孔洞等未知区域。

很显然，这些漏洞的存在是不能接受的。这种信息的缺乏在进行数值模拟时可能会导致意想不到的结果，例如当进行有限元仿真分析，碰撞检测，或者在逆向建模时，等等。因此，必须提出新的方法来填补这些漏洞。

对于上述逆向工程中遇到的问题，目前主要以下几种方法进行解决：

1) 在专门逆向软件中通过补充设计来进行修补，以恢复被裁减部分的曲面形状。这种方法是在曲面重构中实现，因此容易使零部件在修补区域产生失真。

2) 对实物零部件进行区域修补填充，以此恢复被裁减部分的曲面形状。

3) 通过专门算法自动的进行数据补充，以此恢复被裁减部分的曲面形状。这种方法直接对点云数据进行操作，是由曲面角度、相邻网格等参数所决定的。

综合利用上述方法，同时通过原始文件中与所处理的区域相关联的二维测量图像的像素等信息，能有效的解决存在未知区域的汽车覆盖件的反求建模工作。

4.2 汽车复杂形体覆盖件孔洞缺陷区域判定方法

4.2.1 汽车覆盖件孔洞缺陷区域类型

首先要判断孔洞缺陷区域的位置，有几种情况需要考虑，如图 4.1 所示：

孔洞缺陷区域有可能为该零部件的边界部分；

孔洞缺陷区域有可能为该零部件上的自有特征，如：方形孔，圆形孔，条形孔，等等；

孔洞缺陷区域有可能为扫描软件在对点云数据数字化时将零部件上所粘贴的编码点误认为是孔洞缺陷区域。同时，目前的逆向工程软件，在从散乱数据点到三角网格的重建过程中，也可能会在数据信息量不足的部位产生孔洞；

孔洞缺陷区域有可能为该零部件上由于反光等原因没有获得数据点的区域；

孔洞缺陷区域有可能为扫描设备没有捕捉到的地方，如：汽车白车身发动机仓某些死角地方，如图 4.2 所示。

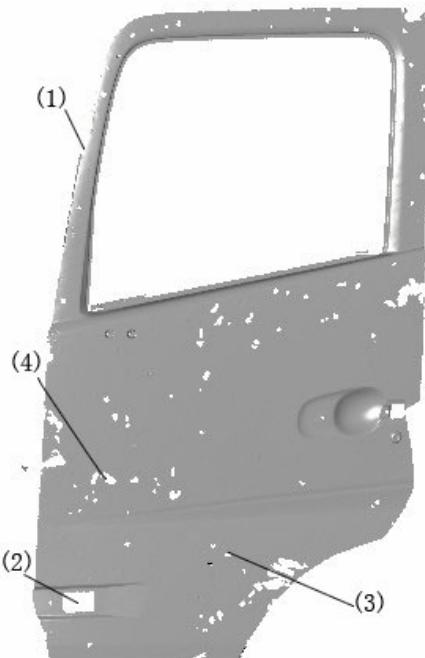


图4.1 汽车车门网格化点云数据未知区域

Fig 4.1 The unknown area of the point cloud data of the grid in the Automotive sheet metal door

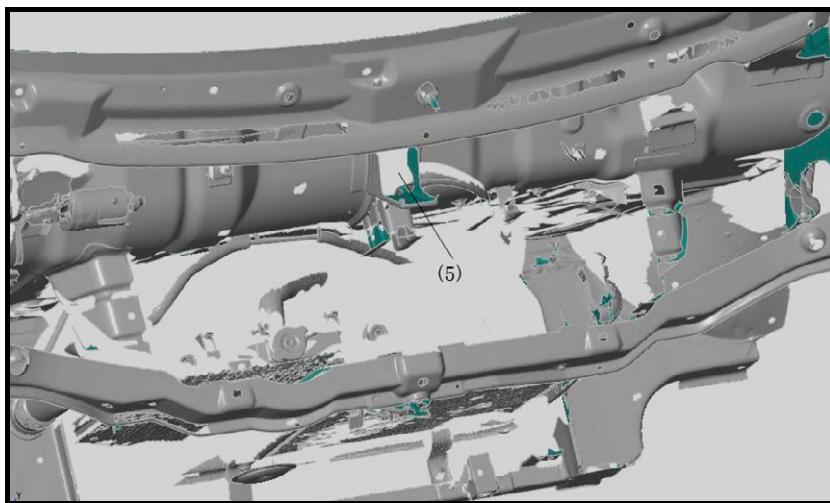


图4.2 汽车白车身发动机舱网格化未知区域

Fig 4.2 The unknown area of the point cloud data of the grid in the Car body in white engine compartment

4.2.2 汽车覆盖件孔洞缺陷区域判定方法

国内外许多学者都提出了许多有关复杂零部件孔洞缺陷区域的计算方法^[146-150]。这里采用一种简单有效的方法来提取覆盖件的边界。网格上一点 P 的所有邻接三角网格构成了 P 的邻接三角网格集合^[151]：

$$T_p = \{T \mid P \in T, T \text{ 是网格上的一个三角片}\}$$

其中 P 的所有邻接点构成 P 的邻接点集合：

$$VP = \{Q \mid T \in T_p, Q \in V(T), Q \neq P\}$$

对 P 的判断可通过点 P 的邻接点集合 VP 来判断。如果 VP 中的点都能通过三角网格的边相连组成闭合的曲线，则点 P 为内点，否则为边界点。如图 4.3 所示， $V_I = \{A, B, C, J, H\}$ ，因这些点通过三角形的边 AB, BC, CJ, JH, HA 组成闭合的曲线，所以点 I 为内点，不是边界点；而 $V_B = \{A, I, C\}$ ，因点 A 和 C 不相邻，所以点 A 为边界点。

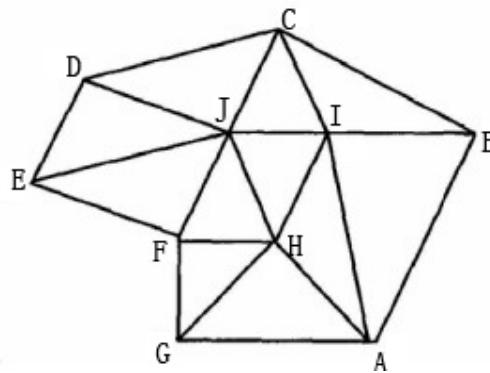


图4.3 边界点判定

Fig 4.3 Determine the boundary points

在实际网格点云数据中，由于噪声点的存在，因此首先应该去除噪声点。Pernot J-P 等^[152]提出了出了去除噪声点以及提取缺陷点云数据边界的方法。非关联的网格是由于在进行数据扫描时所产生的噪声点，不能被认为是合格的数据，如图 4.4 所示红色网格。图 4.5 所示的为提取出的缺陷点云数据的边界曲线。

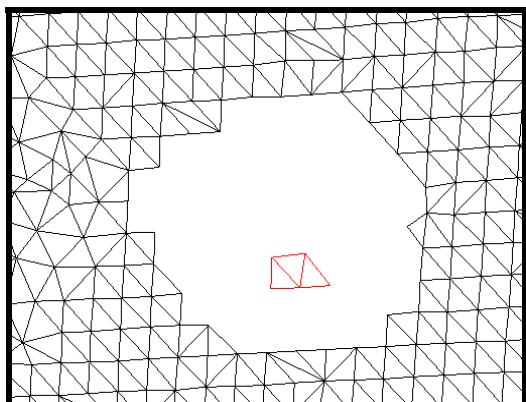


图4.4 网格化点云数据噪声点确定

Fig 4.4 Undesired triangles identification from triangles of the point cloud data

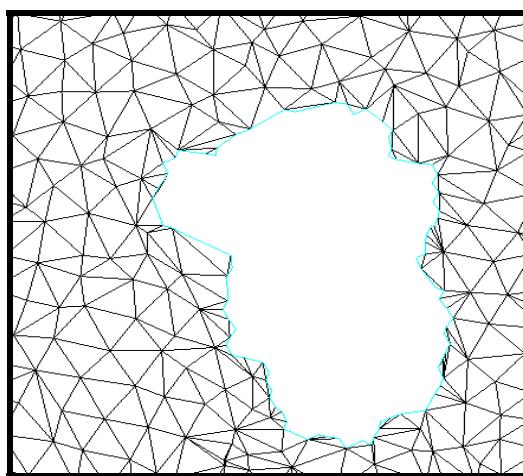


图4.5 网格化点云数据缺陷边界点确定

Fig 4.5 Hole contour identification from triangles of the point cloud data

通过以上方法可以得出数字化点云数据的边界点，如下图4.6 (b) 所示：



(a) 汽车车门点云数据
(a) The point cloud data of the
Automotive sheet metal door



(b) 汽车车门提取边界后的边界点云数据
(b) The boundary points of the
Automotive sheet metal door

图4.6 汽车车门边界点云
Fig4.6 The boundary points of the automotive sheet metal door

4.3 汽车复杂形体覆盖件孔洞缺陷区域修补算法

4.3.1 汽车覆盖件孔洞缺陷区域修补算法的提出

以往的方法是直接对网格化过后的 STL 点云数据进行处理，国内外许多学者的研究都是集中在这方面的^[153-161]。现在各种逆向工程软件都包括有数据漏洞的补充模块，主要集中在以下几种方法：

粗略填充：图 4.7 (b₂) 所示为对缺陷的粗略填充。通过该图片可以看出填充后的网格数据密度达不到要求，同时和周围的网格数据不匹配。因此粗略填充只能应用于对点云数据要求不高，或者是缺陷区域不影响整体模型精度的情况下进行的。例如：某对称的零部件，只要能保证单边对称区域点云数据齐全，另外一边缺失的点云数据可以通过粗略填充来修补。

基于平面的填充：填充后的点云数据为一平面点云，该方法在平面孔洞数据填充中具有一定优势，但是对于曲面填充，如图 4.7 (b₃) 所示，填充后的网格点云数据与周边网格没有连接，而且与模型原始形状差异较大。因此该方法只能针对与模型缺失部分为平面区域，或者是如上面所述的粗略填充情况。

法向填充：首先计算孔洞周围网格点云数据的法向方向，使填充的网格点云数据满足与周围网格数据法向方向上的一致性，这种方法已经基本上满足了数据填充的要求，如图 4.7 (b₄) 所示，但是从图形上可以看出在填充网格的中间数据与原始数据存在差别，因此这种方法并不是最优化的填充方法。基于法向填充目前应用比较多，但是在对位置区域进行修补之前应该先将周围点云数据法向调为一致（内法向或者外法向），因此，实际应用中不能很好的进行数据修补。

光滑填充：该填充方法首先满足的是点云数据的光滑程度，图 4.7 (b₅) 所示，这种方法与图 4.7 (b₄) 所示的方法基本相同，问题基本相同，在空洞的中间部分与实际点云数据不相符。

理论填充：如图 4.7 (b₆) 所示，这种是模型原来缺陷点云数据应该达到的要求，通过本文所阐述的方法，能够使填充的点云数据尽量接近于理论数据。

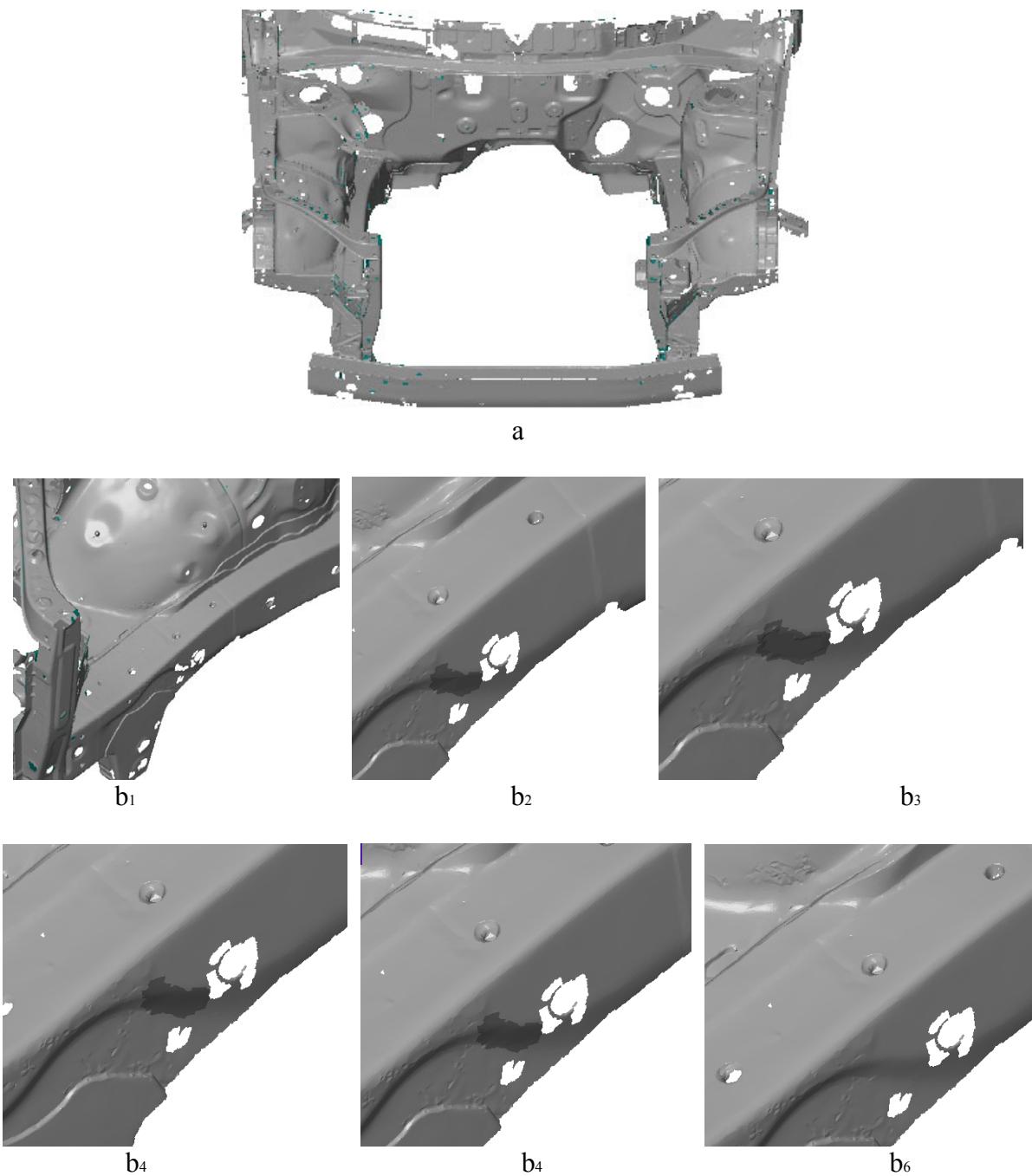


图4.7 不同方法对汽车发动机仓(a)缺陷(b₁)的填充：粗略填充(b₂)，基于平面的填充(b₃)，法向填充(b₄)，光滑填充(b₅)，理论上缺陷点云填充(b₆)

Fig 4.7 Using different methods filling defects (b1) for the Car body in white engine compartment (a):Fill rough(b2),Filling based on plane(b3),Filling on the normal(b4), Smooth filling(b5), Filling the defect point cloud based on theoretical (b6).

但是对于通过二维图片和三位点云数据之间的映射关系来修补数字化模型数据研究的还很少。Minica P^[162]等人提出了通过提取数字化图像信息来修复复杂特征的数字化模型。因为实现二维数字化图片自身就存在误差，再通过该图像到三维模型就加大了误差值，但是相比直接在数字化点云图片上处理，该方法还是有

很多的优势存在。

在本文中，我们提出了一种新的方法填充复杂形状网格中的孔洞。该方法是建立扫描头所获得的二维图像和三维空间网格点云数据之间的映射关系，通过前面所提到的孔洞边界提取方法提取出网格点云数据孔洞的边缘数据，将边缘点映射到二维图片上，通过二维图片的像素值以及灰度值将映射点分层，从而将三维空间网格点云数据进行修复。同时建立的孔洞网格点云数据因该满足周边网格的曲率变化。更确切地说，是解决优化问题。具体步骤为：

确定三维网格数据的孔洞位置，提取边界点云；

确定网格数据与二维图片之间的映射关系，如下图 4.8 所示，将三维孔洞边界点投影在二维图片；

通过二维图片的像素和灰度值来确定缺陷部分图像的位置以及该部分点云数据与其他部分数据之间的关系，通过已经存在的点云数据来重构缺陷点，同时与点云数据方法填充的办法相结合，达到点云数据缺陷部分的填充。

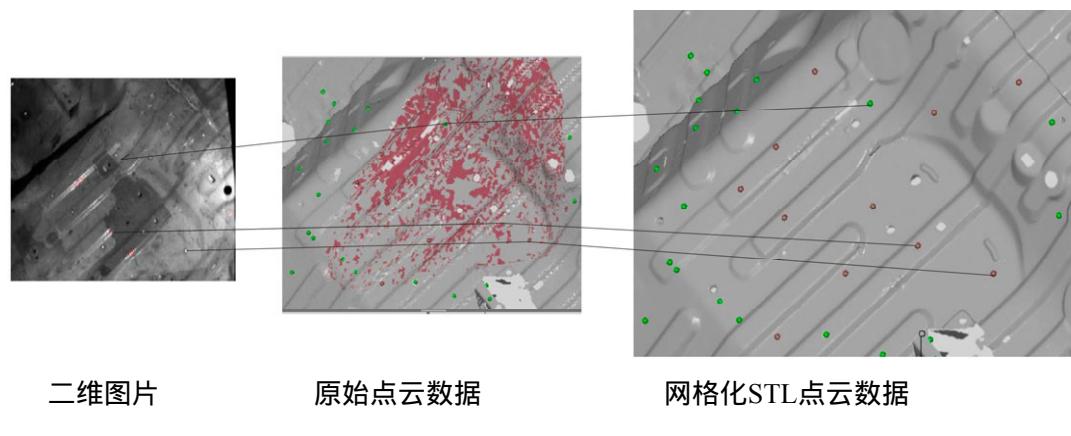


图4.8 二维图片与原始点云和网格化的STL点云数据之间的关系

Fig4.8 The relationship with the two-dimensional image and the original point cloud, and the STL mesh point cloud data

4.3.2 二维图片上非编码点获取方法

要确定映射关系，首先要确定二维图片上的非编码点的位置。由于非编码点是由白色的圆圈 表示，通过二维图片能确定是照片的像素，因此通过像素来获取非编码点的圆心。下面介绍几种圆心提取方法^[163-166]：

一阶矩法

一阶矩法是实际应用中的较多的一种圆心定位方法，它简单直观，且具有一定的定位精度。一阶矩法将图像阈值化而将圆斑从图像中分离出来，然后计算圆

斑的灰度质心，即得到圆心的位置坐标。

一阶矩的方法可以达到亚像素的精度，通过插值的方法增加采样点数，可以进一步提高其定位精度。一阶矩法适用于圆斑光强分布均匀的情况，当圆斑分布不均匀的时候，求取的圆心坐标存在较大的误差。

直接边缘圆拟合

圆拟合的方法利用边缘检测算子（如 Sobel 算子，Roberts 算子，Prewitt 算子等）求的圆斑的边缘点，然后用这些点经行圆拟合，最后求的圆心坐标。该圆的方程为：

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 = R^2$$

(x_0, y_0) 为圆的中心， R 为圆的半径。 (x_i, y_i) 为边缘点。这里 $i=1, \dots, N$, N 为边缘点的个数。定义误差

$$S = \sum_{i=1}^N [R^2 - (x_i - x_0)^2 - (y_i - y_0)^2]^2$$

利用最小二乘原理^[167-169]即可求解得到 x_0 , y_0 和 R 。

圆拟合的方法可以从一定程度上克服圆斑光强分布不均匀的情况带来的影响，它可以利用残缺不全圆弧边缘拟合得到比较精确的圆心位置。但是由于圆拟合采用的边缘检测算子一般只能得到比较粗略的边缘像素点而不能得到精确的边缘位置，因此其拟合精度亦受到一定的限制。在某种情况下，考虑到成像投影变换关系，也采用椭圆拟合的方法，这样可以获得更高的拟合精度。

Hough 变换法

一般描述一个圆需要三个参数（圆心和半径），为了减少参数空间的维数，减少计算量，可以先通过计算圆斑面积估计出圆心的半径。将圆的参考方程改写成极坐标的形式，这样圆的 Hough 变换可以表述如下：

$$x_0 = x_i - R \cos \theta, y_0 = y_i - R \sin \theta$$

将图像中的边缘点 (x_0, y_0) 逐一带入上式中，求出参数 (x_0, y_0) 的值，并将相应的累加阵 $H(x_0, y_0)$ 中的元素加 1。最后找出 $H(x_0, y_0)$ 中元素的最大值，其对应空间参数坐标 (x_0, y_0) 即为圆的中心。

Hough 变换法的圆中心定位精度与参数空间的离散化程度相关。离散化程度越高，精度越高，计算量也越大。Hough 变换同样需要利用边缘检测算子来提取圆的轮廓，它也受边缘检测算子性能的影响。另外，圆半径 R 的估算精度也是影响中心定位精度的重要因素。

4.3.3 二维图片与三维点云数据非编码点对应方法

通过上节可以找到二维图片上的非编码点。针对 ATOS 扫描设备，由于扫描头有三个镜头，中间镜头为光栅的光源，其原理是通过左右两边两个镜头吸收反射

光，并将反射的二维图片传输到电脑，如下图 4.9 所示。

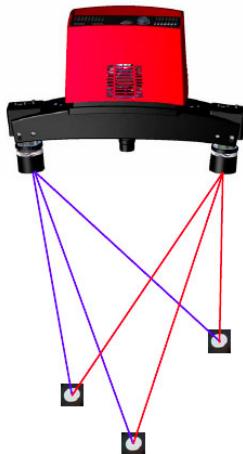


图4.9 ATOS设备扫描头
Fig 4.9 The sensor of the ATOS equipment

因此，在原始的三维数据模型中（即没有经过 STL 网格化、光顺、去噪等处理）有与二维图片相对应的非编码点。下图 4.10 所示为汽车覆盖件数据采集过程中一个画面，从图上可以清楚的看到三维点云数据中的非编码点与二维图片上的非编码点之间的对应关系。

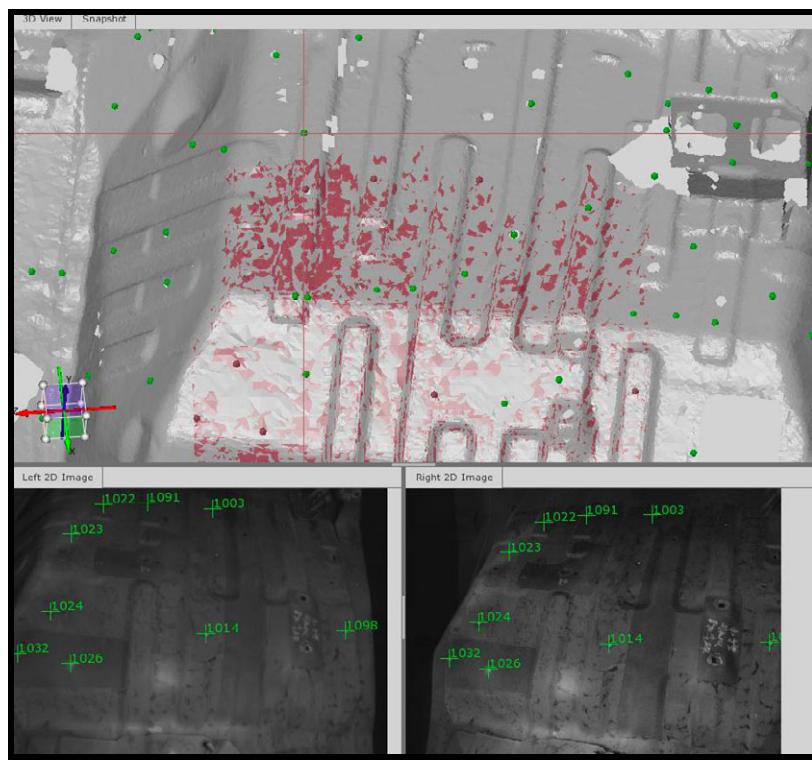


图4.10 数据采集过程
Fig 4.10 The process of the data collection

将三维点数数据中的非编码点投影到扫描头所在位置的平面，假设二维图像非

编码点集为 $I(x, y)$, 投影图像上非编码点集为 $J(x, y)$, 那么应该存在 $I(x_i, y_i) = J(x_i, y_i)$ ($1 \leq i \leq n-1$, n 为二维图像上非编码点的数量)。通过运用第二章所提出的 ICP 算法来进行非编码点之间的匹配, 匹配结果如下图 4.11 所示。

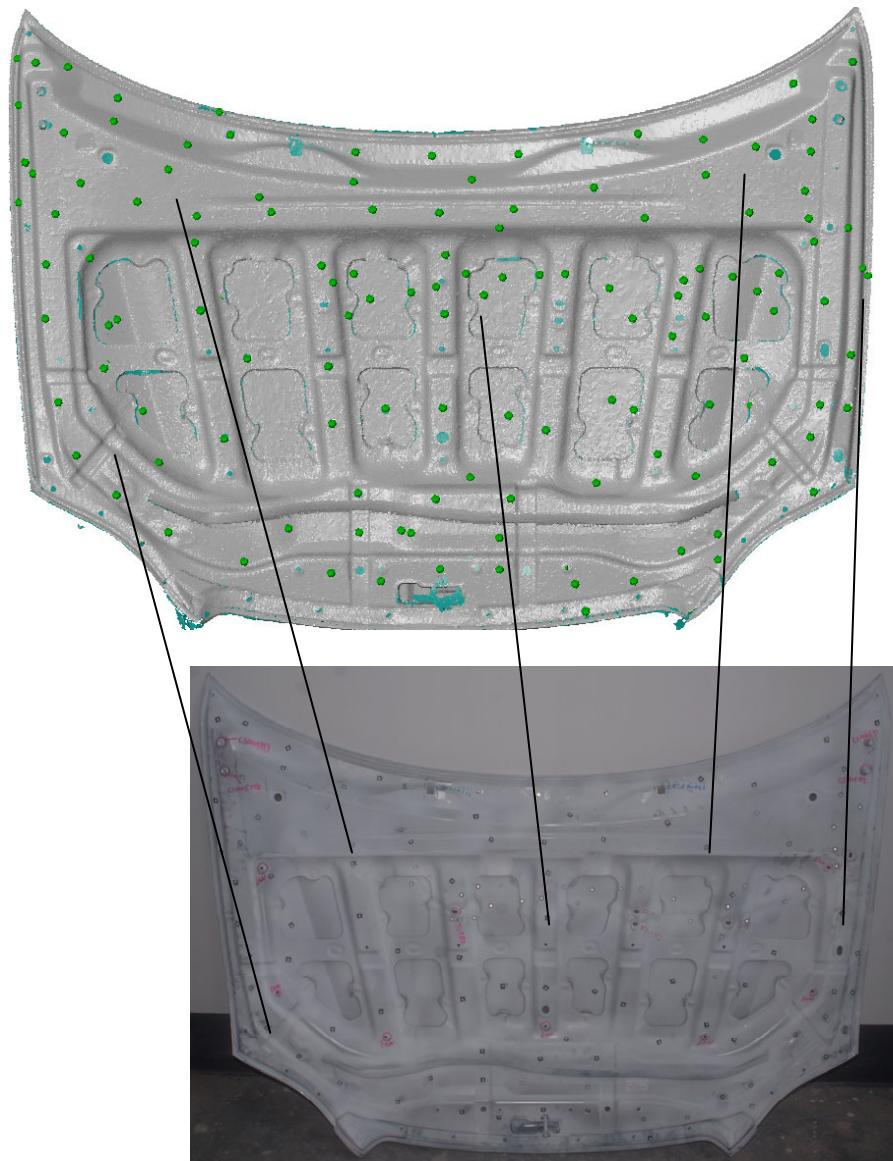


图4.11 局部非编码点对应关系

Fig 4.11 Point correspondence between the local non-coding point

4.3.4 二维图片像素值与灰度值

像素 (Pixel) 是用来计算数码影像的一种单位, 如同摄影的相片一样, 数码影像也具有连续性的浓淡阶调, 我们若把影像放大数倍, 会发现这些连续色调其实是由许多色彩相近的小方点所组成, 这些小方点就是构成影像的最小单位像素。这种最小的图形的单元能在屏幕上显示通常是单个的染色点。越高位的像素, 其

拥有的色板也就越丰富，越能表达颜色的真实感。

灰度值是指色彩的浓淡程度。灰度直方图是指一幅数字图像中，对应每一个灰度值统计出具有该灰度值的象素数。灰度也可认为是亮度，简单的说就是色彩的深浅程度。黑白图像中的灰度是指图像中点的颜色深度，范围一般从 0 到 255，白色为 255，黑色为 0，故黑白图片也称灰度图像。

本文所使用的 ATOS I 扫描设备的镜头像素为 80 万，其分辨率为 1024×768 ，也即为拍摄出的图片在水平方向有 1024 个点，在垂直方向有 768 个点。

如下图 4.13 所示，按照之前提出的搜索算法找到二维图片与三维点云数据之间的对应关系，提取三维点云数据缺陷点的边界数据，将该数据投影到二维图片上。通过图片本身的参数可以获得边界点数据的像素和灰度值。通过映射关系图片，找到模型上缺失部分，找出该部分边界和图片上的对应区域。

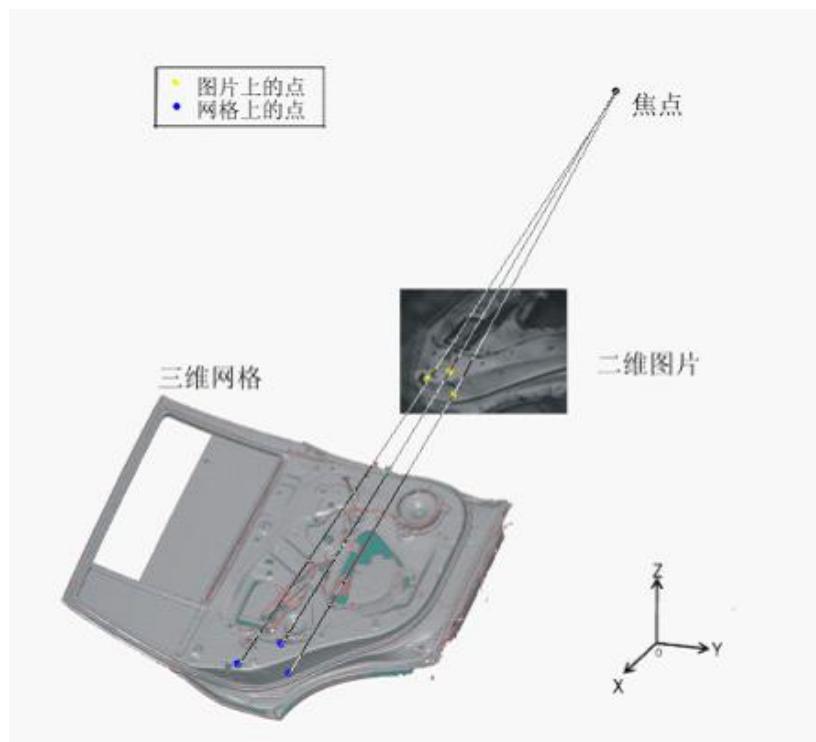


图4.12 通过扫描头焦点连接三维网格与二维图片

Fig.4.12 Linking a 3D mesh to a 2D image through the camera calibration.

4.4 孔洞缺陷区域数据修补算法应用

东风汽车公司某款汽车复杂形体覆盖件如图 4.13 所示。

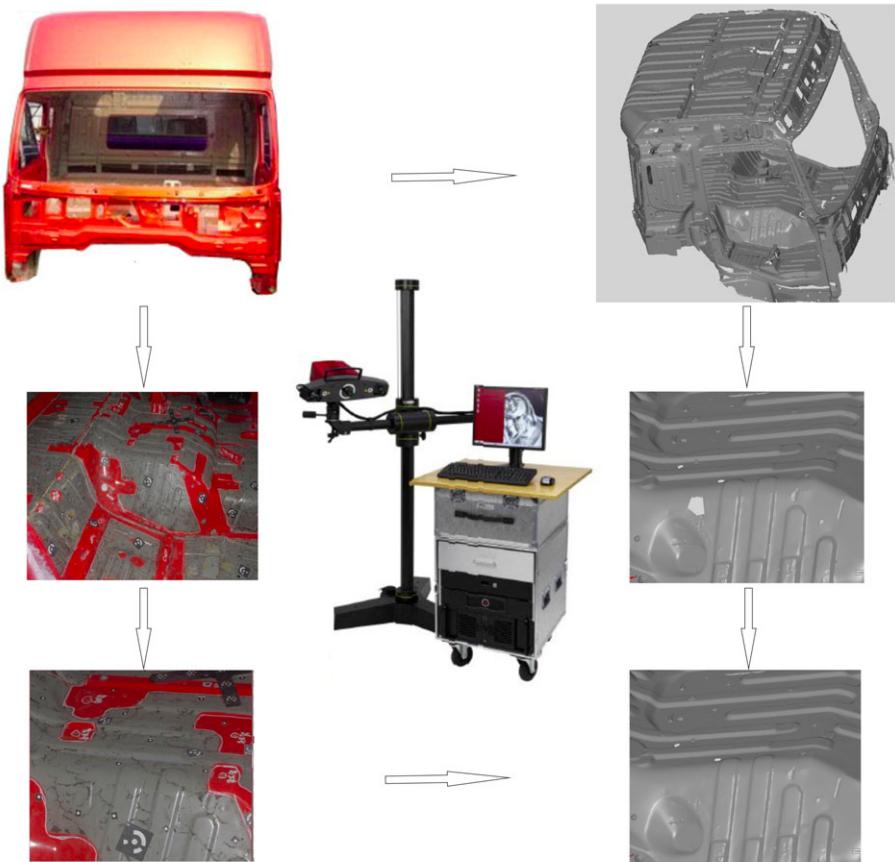


图4.13 汽车车门未知区域数据补充流程
Fig 4.13 The processes of the unknown regional data replenishment for car door

首先对汽车复杂形体覆盖件进行三维数据采集，上图左上角显示为汽车钣金实物模型，然后通过 TRITOP 定位系统对非编码点进行三维空间定位，如上图左中和左下两幅图所示，再通过 ATOS 扫描设备对模型进行数据采集，采集到的三维数据模型如上图右上所示。通过前面章节所阐述的方法找到网格点云数据上缺陷部分，如上图右中所示。

最后结合二维图片通过前面所阐述的孔洞缺陷区域数据补充方法对缺陷点云数据进行修补，修补好的数据如上图箭头最终所示。

4.5 本章小结

描述了复杂覆盖件点云数据孔洞缺陷区域产生的原因，针对汽车复杂形体覆盖件逆向工程中点云数据孔洞缺陷区域数据修补的问题，提出了汽车复杂形体覆盖件点云数据缺陷修补算法，该算法通过二维图片与三维点云数据之间的对应关系，以及二维图片的像素和灰度值等信息，有效的解决了存在孔洞缺陷区域的汽车覆盖件数据修补，降低了后续建模的失真度。

5 汽车复杂形体覆盖件逆向工程中的网络化协同设计技术

5.1 引言

网络化协同设计是现代集成制造系统技术研究的一个重要领域，也是实施敏捷制造、智能制造、虚拟制造、网络化制造等各种先进制造模式的一项重要支撑技术。它支持分布于不同地理位置上的产品开发小组及成员在计算机和信息网络环境下，通过协同设计的各应用系统和工具，进行实时的“所见即所得”的产品开发信息的交流和共享，以达到共同完成产品开发任务的目的^[170-173]。

计算机网络环境下的同步协同设计方式是指参加者可以实时的进行交互协同设计。这种交互模式下，既要求任何一个用户在共享空间内的操作结果都能及时的反映到其他的客户机上，又要求一个用户在共享空间的任何操作动作都能实时的让其他的用户看到，这样对应用程序的共享也就成为了同步协同设计系统中的一个重要的部分。

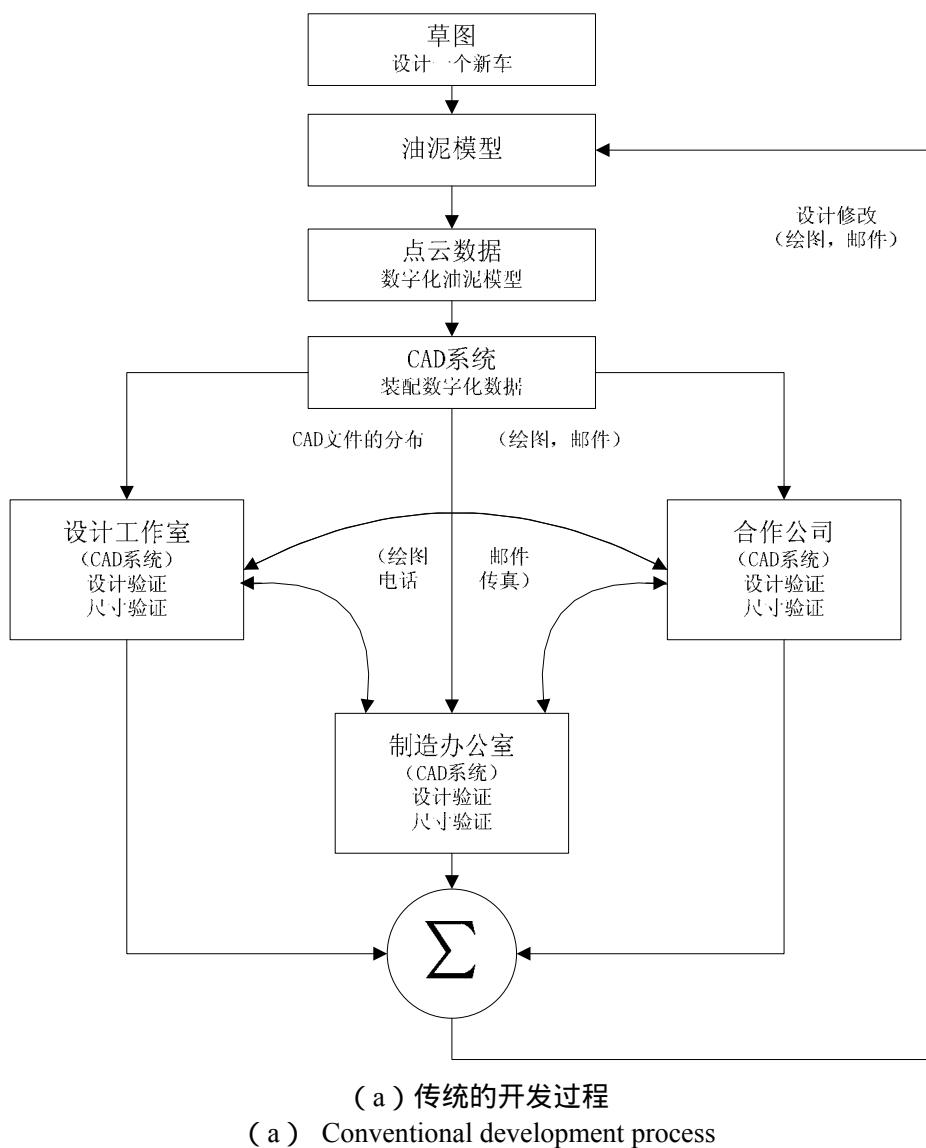
本文提出了一种在逆向工程中基于网络化的协同共享应用系统。通过该系统，能将企业用户和逆向工程产品设计提供方连接起来，在双方的共同参与下，完成产品的逆向设计。从而改变传统的异地开发模式为基于网络化的异地协同开发模式，实现对异地设计资源的组织及优化配置，可缩短新产品开发周期，降低新产品开发成本，提高设计质量，增强企业市场竞争力。

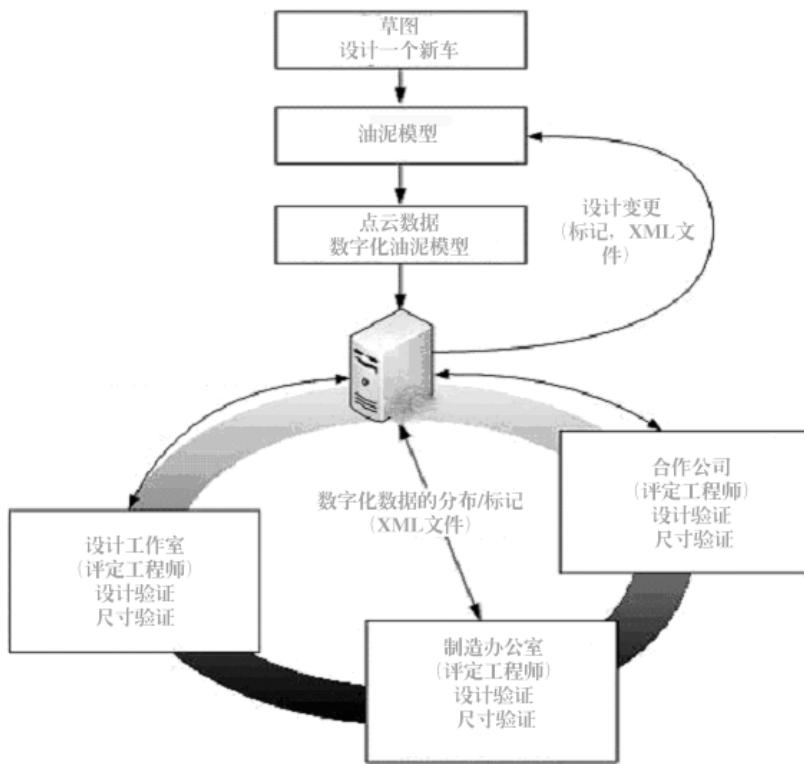
5.2 汽车覆盖件逆向工程中网络化系统的体系结构

对现有的油泥模型或者设计模型进行修改需要数字化过程，通过如图 2.2 所示的 ATOS 扫描设备平台得到汽车覆盖件模型的点云数据。将点云数据转换为 CAD 模型的传统逆向工程设计流程如图 5.1 (a) 所示。在设计的早期阶段没有充分考虑 CAD 模型的生产或加工信息，而且对于模型的尺寸，外观以及干涉等问题是通过由设计工程师，加工工程师或者合作公司来验证的。设计师通过电话，传真，电子邮件等传统方式收集意见，从而对模型进行修改。在汽车的覆盖件设计过程中，一般情况下为了确认覆盖件的内外部形状，应该反复的进行设计、验证、修改的过程，这就需要设计研发人员之间有着密切的合作。长距离的反复操作过程需要大量的时间、精力和人力，一个较长产品的传统开发周期流程如图 5.1 (a) 所示^[174]。

在本文中，为了减少交货时间和提高逆向工程过程的灵活性，研究开发了一个基于逆向工程的网络化共享应用系统平台。该系统平台充分利用现代网络和信息技术，改变传统的远程开发设计模式为基于 Internet 的远程协同开发设计模式，

从而改善了传统的数据测量和验证流程。提出了在产品开发中整合企业供应链上的制造设计资源，研究远程用户和逆向产品设计提供方之间进行产品数字信息和数据交换的方法。实现了通过扫描设备测量得到的点云数据可以直接用来验证设计尺寸。设计师在所开发的 WEB 服务器上对数据进行登记，而且没必要将点云数据转化为 CAD 文件。所开发的系统让合作者在同一时间和不同的地点来验证产品的几何形状以及尺寸信息。合作者还可以通过开发的浏览器，视图功能以及 XML 文件来分享和交流他们的意见和观念，如图 5.1 (b) 所示。设计人员之间的设计冲突是在早期的设计阶段就在网络上进行解决。通过这种方法实现了企业间的协作和产品设计的目的，显著的降低了开发产品的交货时间以及生产成本。





(b) 本文提出的开发过程

(b) Proposed development process

图5.1 开发一个新型汽车的逆向工程过程

Fig5.1 Reverse engineering processes to develop a new car

5.2.1 网络结构设计

本系统采用基于 Web 的三层 B/S 结构，在服务器端，有 WEB 服务器、应用程序服务器、数据库服务器。Web 服务器用于处理远程客户端发送的请求、超文本链接标示语言（Hypertext Markup Language，HTML）页面动态生成、以及同后台数据库连接等任务^[175-182]。应用程序服务器既是软件开发集成的平台，又是多层结构应用的部署、运行平台。远程客户端用户通过浏览器访问服务器，并向服务器提交 HTTP 请求，附带发送所需要的数据。HTTP 请求经过 WWW 服务器处理后，转换为相对应的组件请求。为了确保控制主机的安全性，控制主机处于专用子网的安全地带，隔绝外网对专用子网内控制主机的干扰，应用程序的服务器作为中介跨接在专用子网和其他网段上，用户通过应用程序服务器的共享服务来实现与控制主机信息的交互。本系统网络结构如图 5.2 所示。

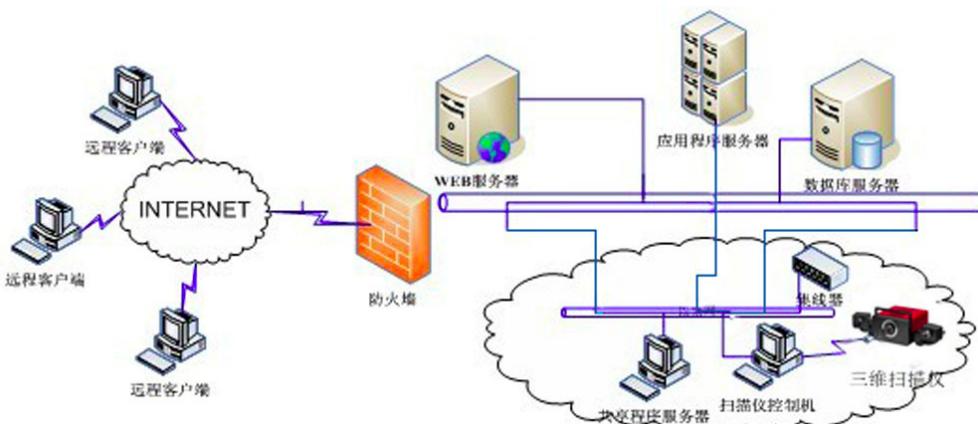


图 5.2 系统网络结构

Fig. 5.2 Systems network architecture

5.2.2 功能模块设计

在网络化协同工作支持平台的基础上开发而成的基于逆向工程网络化共享设计系统，主要包括五个子系统模块：网络化协同工作支持模块、系统管理模块、仪器设备提供方管理模块、用户管理模块和产品造型设计模块，如图 5.3 所示。

各模块的功能如下所述：

1) 网络化协同工作支持模块：该模块为逆向产品设计提供方和企业用户提供全过程参与产品的逆向设计功能。产品逆向设计提供方和企业用户通过该模块对产品的建模数据通过语言、视频、文本交流、文件同步、白板演示等方式进行实时交互，及时反馈修改信息；

2) 系统管理模块：该模块为产品设计提供方和企业用户提供用户管理功能，包括：

- 目录服务器，作为统一用户管理套件的核心，保存信息，为其他部件提供了可伸缩性、高性能和存取控制；
- 元目录服务，为从其他应用系统增加的用户信息提供统一管理方式，包括引擎、连接器、帐号管理合并、用户帐号集成及消息系统集成等功能；
- 证书管理，为应用系统提供根据适当的安全级别来认证用户的方法，便于在公共网络上部署支持加密、认证等应用。

系统管理模块将在网络上提供产品设计方的资料、信誉度、权限等，依赖系统管理模块，各用户可以对产品设计提供方的实力、技术资源、核心竞争力等作出评估。系统管理员通过该模块可以进行用户管理和审核信息申请；

3) 仪器设备提供方管理模块：产品设计提供方通过该模块可以进行设计信息发布、设计信息查看和审核由企业用户提出的设计使用申请，并向企业用户提供逆向阶段结果和最终结果；

4) 用户管理模块 :企业用户通过该模块可以向产品设计提供方提出设计申请和查看申请信息 ,并向逆向产品设计提供方提出建模要求。利用此模块 ,企业用户仅向产品设计提供方提供产品样件 ,其它的设计要求等可以通过该子模块提供 ,这样避免了传送产品样件者多次人员流动来传送技术信息 ;

5) 产品造型设计模块：该模块主要负责产品设计提供方负责产品数字化和产品建模两大功能。数字模型建好后，通过协同工作支持模块，产品设计提供方和企业用户共同确认后，提交到改系统中，企业用户网上下载资料便可。

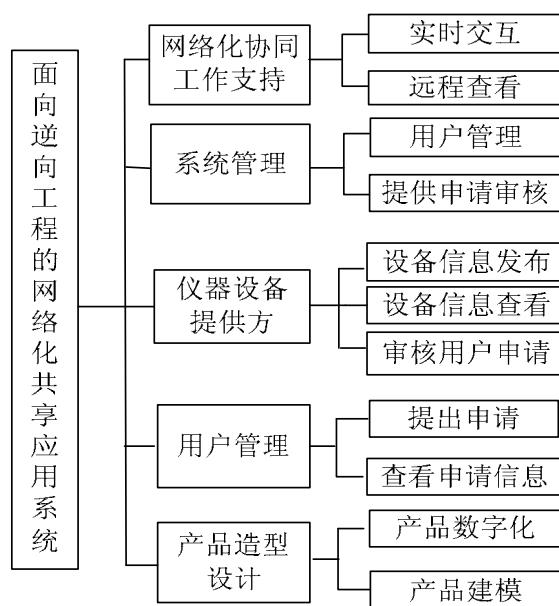


图 5.3 系统功能模块可加减东西使其优化

Fig5.3 System modules can add and subtract things to optimize

5.2.3 系统运行流程

该系统的运行流程设计如图 5.4 所示。

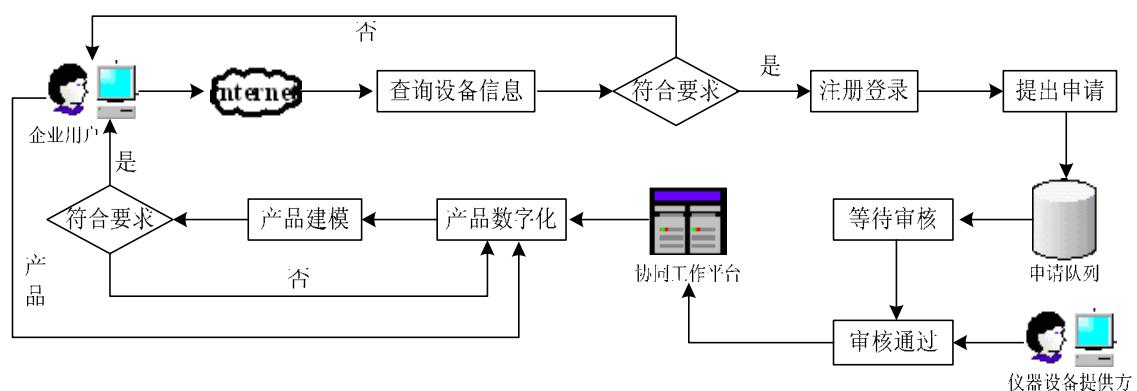


图5.4 系统运行流程

Fig5.4 System processes

企业用户通过 Internet 登录逆向工程网络化共享应用系统，可以查询产品设计提供方的信息资料，例如提供的设备、技术人员、典型案例等信息说明；当企业用户确认系统所提供的功能符合要求后，注册登录系统，提出产品设计申请；产品设计提供方审核企业用户提出的申请，通过企业用户的设计申请；企业用户将产品交付产品设计提供方进行建模；双方通过协同工作平台进行产品数字化和产品建模的协同设计；企业用户通过该平台及时的将修改信息反馈至产品设计提供方，修改产品 CAD 数据；产品设计提供方将符合设计要求的产品数字化模型传至企业。

5.3 汽车覆盖件逆向工程中的网络化协同系统支持技术

网络化协同产品开发过程经常会出现应用企业与设计单位之间、设计单位和设计单位之间、设计单位与制造部门之间等跨企业的针对产品设计和制造等过程进行协同会话、协同浏览、协同批注和协同控制等活动^[183-184]。该系统支持网络化协同产品开发，过程包括样件反求、设计、建模和加工制造等，要求项目成员能及时沟通、跟踪和对反求、制造等现场视频实时监控，因而需要存在多人可视化的协同会话环境，而设计建模过程包含的三维零件图形或产品模型需要协同评阅，有些复杂的、无法独立完成的设计、制造过程也需要多人共同协同操作和共享等。这些都是新产品开发过程网络化协同工作支持技术需要突破的关键点。

针对上述分析，以下将从可视化系统工作环境、基于 WEB 的协同浏览与批注技术、屏幕远程同步共享与远程协同操作等三个方面对系统网络化协同工作支持技术做一些探讨和研究。

5.3.1 网络化协同系统的实现技术

为了实现汽车覆盖件逆向工程中网络化系统功能，点云数据的三维形状必须在网页上实现可视化。主要有两个编程方法来满足要求：java 语言和 OpenGL 插件方法。

Java 是一种可以撰写跨平台应用软件的面向对象的程序设计语言，是由 Sun Microsystems 公司于 1995 年 5 月推出的 Java 程序设计语言和 Java 平台（即 JavaSE, JavaEE, JavaME）的总称。Java 技术具有卓越的通用性、高效性、平台移植性和安全性，广泛应用于个人 PC、数据中心、游戏控制台、科学超级计算机、移动电话和互联网，同时拥有全球最大的开发者专业社群。Java 是一个纯的面向对象的程序设计语言，它继承了 C++ 语言面向对象技术的核心，Java 舍弃了 C ++ 语言中容易引起错误的指针（以引用取代）、运算符重载（operator overloading）、多重继承（以接口取代）等特性，增加了垃圾回收器功能用于回收不再被引用的对象所占据的内存空间，使得程序员不用再为内存管理而担忧。然而，对于发展中的

三维配置程序，包括数值计算等，C++领域比 Java 有着更良好的性能^[185,186]。在本文中，C++用来开发逆向工程过程中基于网络的尺寸精度测量系统。

OpenGL（全写 Open Graphics Library）是个定义了一个跨编程语言、跨平台的编程接口的规格，它用于三维图象（二维的亦可）。OpenGL 是个专业的图形程序接口，是一个功能强大，调用方便的底层图形库。OpenGL™ 是行业领域中最为广泛接纳的 2D/3D 图形 API，其自诞生至今已催生了各种计算机平台及设备上的数千优秀应用程序。OpenGL™ 是独立于视窗操作系统或其它操作系统的，亦是网络透明的。微软公司通过合并互联网和 OLE 技术开发了 Active X。使用 ActiveX 的 OpenGL 插件的方法通过丰富的图形库足以代表 CAD 模型。它相比使用 Java applet 的方法能更好地验证基于网络的三维数据。Active X 控制技术应用到本文中的三维图形数据处理中^[187,188]。

5.3.2 网络化协同可视化支持技术

系统框架

在协同设计过程中，参加设计的各个单位的人员经常需要就产品的设计、建模在网上进行协商、对重要的文档进行讨论。这样的工作方法，属于群体合作。对群体合作模式的研究，有助于改善人们信息交流的方式，消除或减少人们在时间和空间上的相互分隔，从而节省设计人员的时间和精力，提高群体工作的质量和效率。

选择应用广泛、技术成熟的 Microsoft 公司的 NetMeeting 视频会议系统作为可视化协同工具的多媒体支持系统。其可视化协同工作环境如图 5.5 所示。

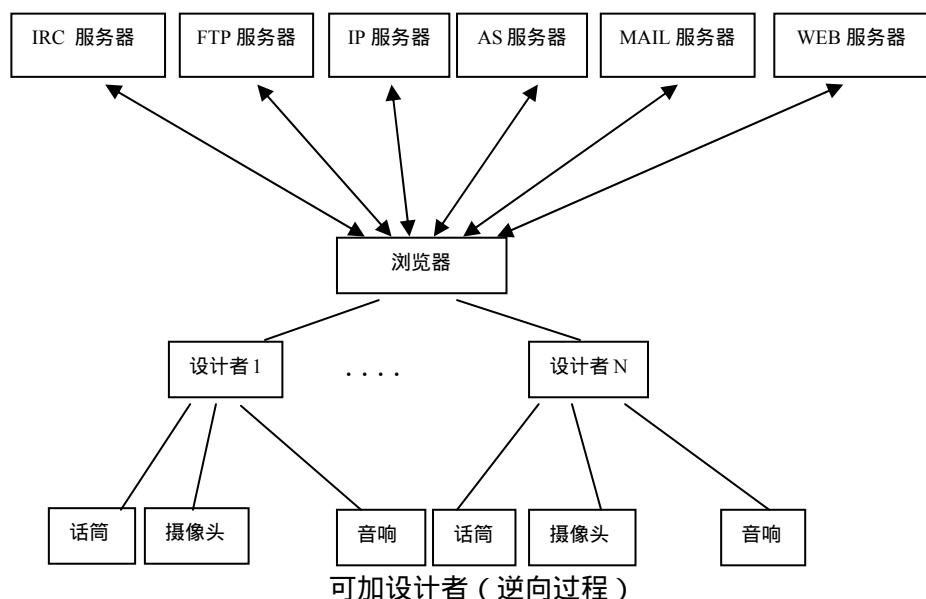


图 5.5 网络化协同开发可视化协同工作环境

Fig.5.5 Networked collaborative development environment for visual work.

图 5.6 显示的是汽车覆盖件逆向工程中的网络化协同可视化系统框架。该系统由一个数字化的客户端，一个集成的服务器和网络客户端组成。数字化的客户端通过使用浏览器和尺寸精度检测模块的网络页面来注册测量数据文件。集成服务器是由网络，数据库和应用服务器组成的。网络服务器是通过使用微软公司结构化查询语言 (SQL) 和的动态服务器页面 (ASP) 建造的。网络服务器连接网页，执行用户认证，文件上传/下载，文件搜索，等等。数据库服务器管理测量文件与 SQL 连接。应用服务器通过网络分配 ActiveX 控件作为客户端程序。从服务器上下载的程序自动安装在客户端的个人电脑上。当网络客户在网络或者网络环境下连接到整个服务器上时，通过使用分布的文件可以执行搜索，查看和数据文件的验证。表 5.1 描述了服务器系统环境的硬件和软件规范。

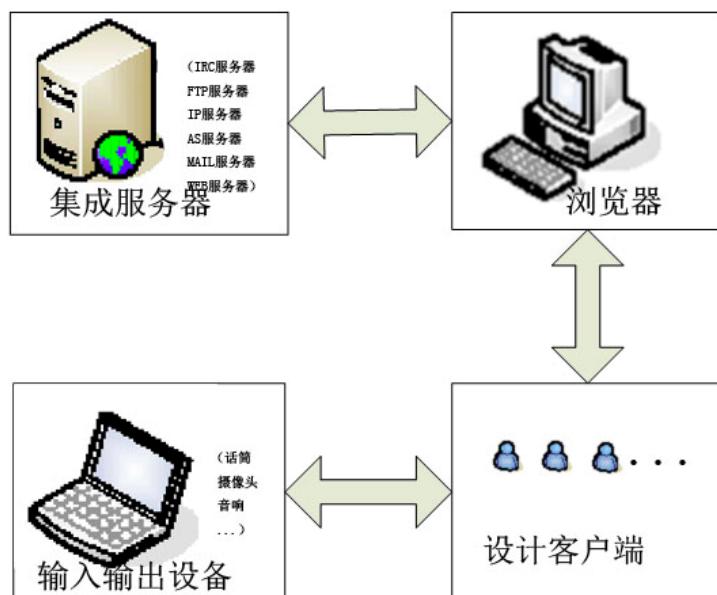


图 5.6 网络化协同开发可视化系统框架

Fig5.6 Network visualization system framework for collaborative development

表 5.1 服务器系统环境
Table5.1 Server system environment

名称	规格
硬件	
CPU	Inter 奔腾双核 E5300
内存	2.00GB
软件	
操作系统	Windows XP
数据库	MS-SQL 2005

网络化协同可视化功能

在新产品开发过程网络化协同工作支持系统可视化协同工作环境中可实现以下功能：

1) 交谈 (Chat) , Chat 是基于 IRC (Internet Relay Chat) 协议的一种网上通讯机制 , 它是一种以文字方式进行的交谈。它使得 Internet 上的某个用户不仅可以和另外的某一特定用户单独交谈 , 而且还可以与 Internet 上的许多用户同时交谈 , 以讨论共同关心的问题。

2) 共享电子白板 (Shared White Board) , Chat 只能进行文字交谈 , 而在工程设计当中 , 很多时候需要用图形来表达设计者的意图。共享电子白板提供了一种图形环境 (包括各种常用的绘图工具 , 如直线 , 曲线 , 圆 , 矩形 , 文字等 , 还可以剪贴图形) 以供设计者表达自己的思想 , 就象大家坐在同一间教室中 , 共用一块黑板在进行讨论一样。

3) 视频电话 (Net Phone) , 视频电话允许用户通过网络进行语音和形体交谈 , 就象我们平时用电话交谈一样。所不同的是 , 普通的电话交谈是基于模拟交换的 , 而视频电话是基于数字交换的 , 而且视频电话还能实时传送通话的双方彼此所在环境的视频图像 , 可以将手势、动作、样品等现场信息实时传送给对方 , 从而协助设计者之间方便快捷地交流。

4) 应用程序共享 (Application Sharing) , 应用程序共享允许多个人同时运行一个程序 , 这个程序只要在其中一个用户的机上存在就行。每个用户都可以在自己的屏幕上看见这个程序的运行界面 , 并且在获得控制权之后可以进行操作。这对于产品设计阶段的讨论是非常有用的 , 例如可以将 CAD 程序共享 , 进行协同设计。

5) 文件传输服务 (FTP Service) , 文件传输服务是基于 FTP (File Transport Protocol) 协议而实现的设计者之间的设计电子文档在线传送服务。设计者可以将设计有关的各种电子文件通过上传和下载进行实时交流。

5.3.3 基于 WEB 的协同浏览与批注技术

普通 CSCW 软件提供多种音频、视频交流手段 , 但对于产品设计而言 , 会涉及二维图形、三维模型、文本等多种格式图档 , 因此 , 必须提供专门的协同设计工具。

三维模型协同浏览与批注

对于产品设计而言 , 基于 3D 模型开展异地协同交流是必不可少的功能。针对网络化协同设计的人员具有异地分布、使用异构 CAD 软件等特点 , 设计并开发了基于通用格式 VRML 的三维模型协同浏览与批注工具。该工具使设计者可以从各个角度观察产品的三维数字模型 , 可以进入到模型内部 , 甚至可以对模型进行

拆卸，可以拾取模型上的某一点或圈阅模型的某一部分进行批注，发表意见，也可以浏览他人已批注的三维模型，了解他对设计模型的建议和意见。通过异地协同技术，构建了一个人与人交流环境，支持异地多个设计专家通过 Internet 在一个共享空间中基于三维 VRML (Virtual Reality Modeling Language，虚拟现实建模语言) 模型进行同步交流，既可以直观、清晰地表达自己的观点，也可以精确理解他人的观点，为产品的协同创新提供支持。如图 5.7 所示。

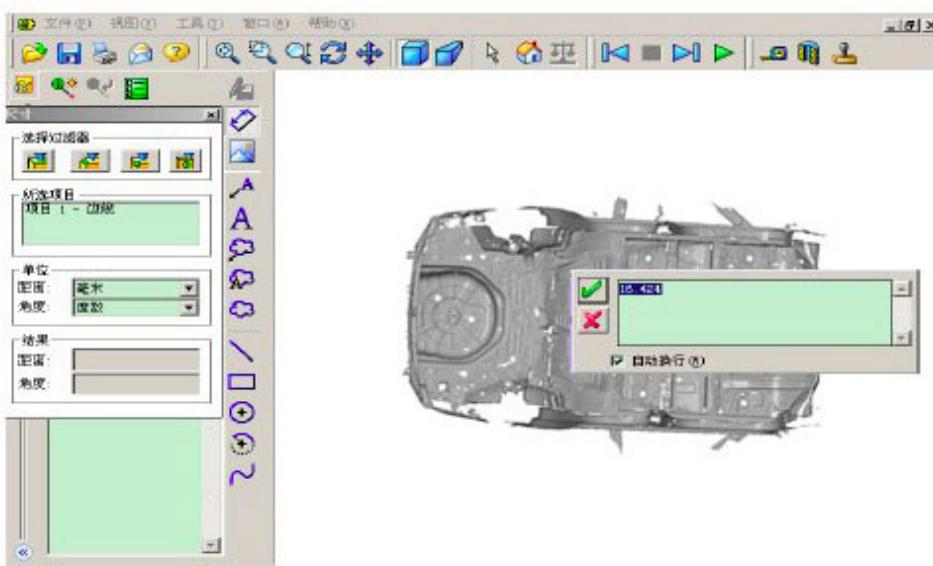


图 5.7 三维模型协同浏览与批注工作界面
Fig. 5.7 Working Interface of Collaborative Browsing

一个包括点云数据数字化文件的名称，数据信息核查结果，用户意见以及标记结果的 VRML 文件。如果上述信息保存在一起形成一个文件，那么文件的大小将非常大。而且在产品开发过程中，用户是通过反复下载相同的点云数据来观看和检查其他客户的意见以及核查结果。由于标记结果被保存为 VRML 文件，而不是作为常规的数字化文件，因此反复下载同一个容量较大的点云数据文件的过程被淘汰。

多种格式图档协同浏览与批注

在协同设计中，针对异构系统产生的多种格式图档交互问题，设计并开发了一个多种格式图形、图像和文本文档协同浏览与批注工具，利用格式转换器，实现了对图形、图像、文档、电子表格、数据库表格等几十种格式文件的异地协同浏览与批注，涵盖了产品设计中相关文件的种类。

以上两个工具，均采用 java3D 开发，并部署为 ActiveX 控件，用户可以将其作为一个独立的工具系统使用，也可方便地集成到自己的桌面系统或 Web 应用程序中。

由标记的位置坐标，选定的点云，结果值和用户观点名称组成的验证结果根据核查的功能有着不同的信息，例如像坐标，线的长度，点到点的距离等等。因此，核查结果根据核查方程参数被进行分类和保存以确认核查功能。当验证结果完成时产生包含一个结果值的标记。标签的位置坐标是在显示器上显示的是一个坐标值。

标记结果根据标记函数的参数被分类以确认标记的形式。每个结果中包含选择的点，颜色，文本和用户观点的名称。

如果要求有新的尺寸核查或标记的功能，所开发的系统通过分配的核查和标记功能函数，以及实施的附加功能来更新^[189-192]。

5.3.4 屏幕远程同步共享与远程协同操作

在网络化协同工作支持系统中，通过屏幕共享技术来实现多个用户对同一个辅助设计软件屏幕画面的同步、实时的浏览。其原理就是把工具软件的屏幕显示画面转化为一张图片，并向其他用户广播。当用户接收到数据后，按图片方式对远程的计算机屏幕进行显示。用户感觉到的就像远程的设计软件安装到了本地的计算机中一样。屏幕共享的实现可分为如下几步，如图所示 5.8 所示：

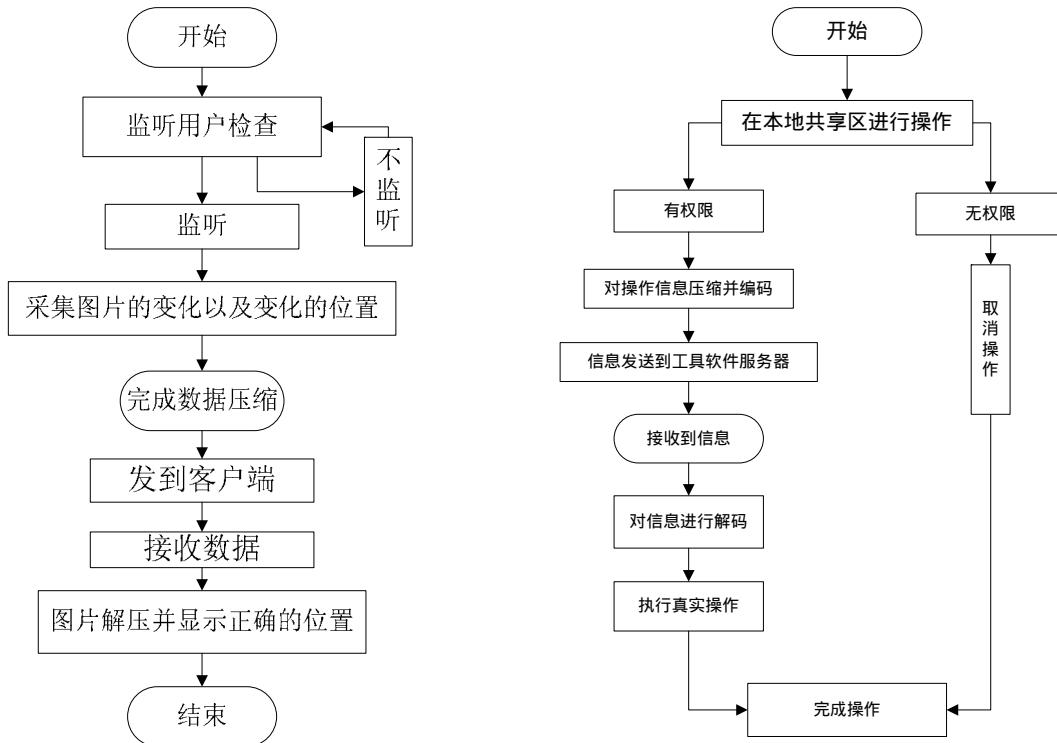


图 5.8 屏幕共享实现过程
Fig5.8 The sharing process of computer screen

图 5.9 协同操作过程
Fig5.9 The process of collaborative operation

把工具软件服务器在某一时刻的屏幕捕捉下来，并转化为一张图片；

在尽可能短的时间内把图片压缩，并传送给协同工作组中的各个用户；

接收到数据后，用户端的程序解压缩图片数据，并按照图片的格式在正确的位置显示图片。

当服务器屏幕有任何的变化时，服务器都迅速地把变化的图片数据及其坐标位置发布给各个用户，使用户的显示屏幕得到实时的更新，从而实现远程的工具界面在多个用户端的同步、实时显示。因为服务器端传送过来的图片数据只是发生了变化的部分，因而对网络带宽的要求较低。

在网络化协同工作支持系统中，用户对远程工具软件的操作是通过一种远程虚拟控制技术来实现的，见图 5.9 所示。首先，用户对远程的工具软件进行操作要先取得操作权限收集相关信息，并对信息按照一定的规则进行编码。然后，编码信息被传送到远程工具软件的服务器中；接收到编码信息后 服务器将对传送来的信息进行解码，得到用户的操作指令，并根据操作指令，驱动服务器上的操作系统执行真实的操作动作。按照这样的过程就实现了对工具软件服务器的远程操作。

5.4 基于网络化协同系统的应用实例

基于逆向工程的网络化共享应用系统将不同地点的各种数字化设备、产品造型设计人员、快速原型和数控加工等组成一个异地共享系统，可以实现设备资源和人力资源的共享。现以南京某一汽车制造企业和设计公司设计生产某型号的汽车覆盖件为例，验证该系统的可行性和优越性。

为生产出符合设计要求的汽车形体覆盖件，通过应用网络化共享应用系统，远程使用了重庆大学的光学扫描仪对车该零件产品进行扫描，然后进行产品的三维逆向造型，且作了相应的创新再设计。设计过程中，该企业依托该系统及硬件设备，进行远程交互和设计协作，系统平台网址 <http://192.168.100.17:8000/cpds/login.jsp>，汽车复杂形体覆盖件在本平台上协同设计过程如图 5.10 到 5.12 所示。



图 5.10 用户登录后的管理页面
Fig 5.10 Management page of user login in

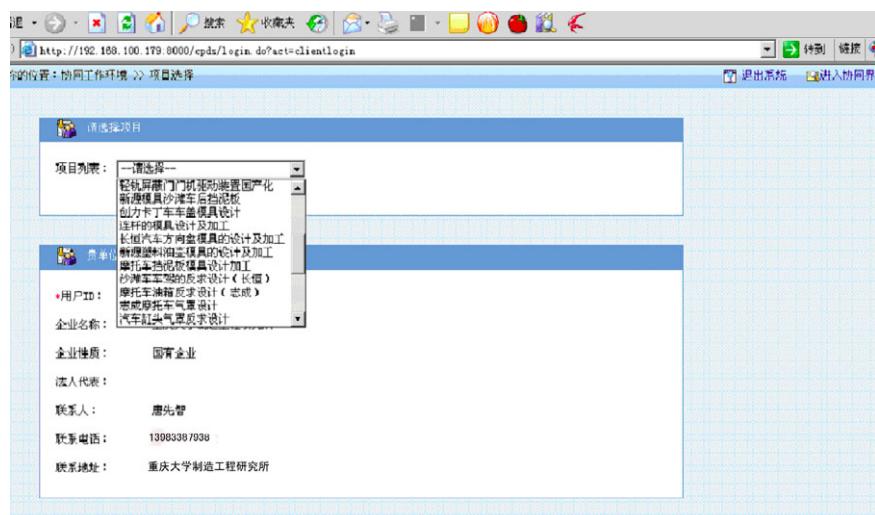


图 5.11 协同工作支持子系统的管理页面
Fig 5.11 Management page of subsystem for collaborative work

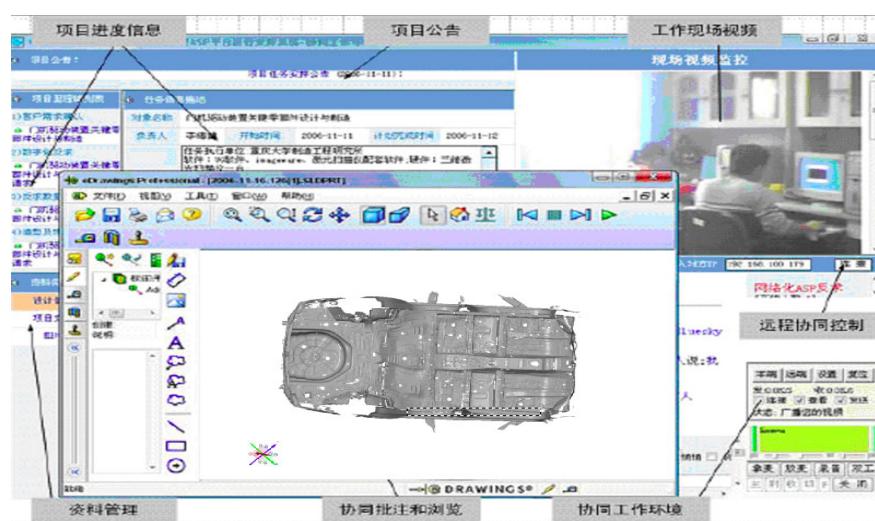


图 5.12 系统协同设计过程
Fig 5.12 System co-design process

5.5 本章小结

本章描述了网络化系统设计平台的过程，针对网络化协同设计共享服务汽车复杂形体覆盖件逆向工程中的问题，研究了设计网络化共享服务平台的方法；该方法充分利用现代网络和信息技术，改变传统的远程开发设计模式为基于 Internet 的远程协同开发设计模式，在网络化协同工作平台的基础上开发了基于逆向工程的网络化共享的应用设计平台，提出了在产品开发中整合企业供应链上的制造设计资源，研究远程用户和逆向产品设计提供方之间进行产品数字信息和数据交换的方法，实现与客户网络协同设计和产品数字化模型的在线表达，达到共享应用系统平台，实现企业间的协作和产品设计的目的。

6 结论与展望

6.1 结论

本论文针对面积大、厚度薄、产品形状复杂的汽车覆盖件复杂形体逆向工程的数字化设计问题，开展了汽车覆盖件测量建模中点云处理及其网络化协同设计等关键技术研究，主要结论如下：

针对复杂形体汽车覆盖件存在面积大，产品厚度薄等特点带来的点云数据采集过程中存在层叠点云现象，影响后期点云数据处理效率以及产生较大形状误差的问题，提出了一种汽车覆盖件的点云数据分层处理的新的切片算法。该算法通过确定层叠点云数据位置、沿三维坐标多层切片、切片点云采样、采样点云分割线生成等步骤，实现层叠点云数据的自动分离。算法提高了点云数据处理的效率和后续模型重构的品质。

针对汽车覆盖件因测量原理不同、测量软件的限制以及人为因素等原因使点云数据获取过程中存在点云数据孔洞缺陷，导致点云数据特征不全从而影响后期建立的三维模型失真的问题，提出了一种汽车覆盖件点云数据孔洞缺陷修补算法。该算法通过二维图片与三维点云数据之间的对应关系，以及二维图片的像素和灰度值将映射点分层等信息，有效的解决了点云孔洞缺陷的修补，为后续建模提供了完整的点云数据。

针对汽车覆盖件逆向工程的网络化协同设计过程中数据提供方与客户在线交互困难、客户难以全程跟踪数据信息以及及时反馈建议等问题，开发了一种基于 Internet 的远程汽车覆盖件逆向工程中设计网络化共享服务平台。该平台能快速、高效获取优化的点云数据，实现企业间的协作和产品协同设计的目的。

6.2 研究展望

本文主要研究了逆向工程中层叠点云数据的平行分层和交叉分层两种情况，但是在实际工程中有可能会存在这两种情况同时存在的方式，处理这种情况所需的算法更加复杂，这方面的问题有待今后进一步深入研究。

本文提出了通过照片以及像素值对点云数据进行缺陷补充的方法，但是在一些特殊的情况下二维照片的像素值达不到要求，因此今后有必要研究通过照片直接来进行点云数据缺陷补充的方法。

致 谢

我要深深感谢尊敬的导师刘飞教授。本文是在刘老师的悉心指导下完成的，作者在攻读博士学位的过程中，刘老师倾注了大量的心血。刘老师深厚广博的学识修养、严谨求实的治学态度、敏锐活跃的学术思想、崇高执著的敬业精神和平易近人的学者风范深深地影响和教育了我，是我毕生受益的宝贵财富。刘老师对高科技的敏锐洞察力和对前沿科学的研究的把握能力大大开拓了学生的眼界，将是我永远追求的境界。刘老师在学业、工作、生活、思想等各方面无微不至的关心和帮助，我将终生铭记。值此论文完成之际，对导师给予我的无微不至的关怀和培养致以诚挚的敬意和衷心的感谢。

在攻读博士学位期间得到了何彦，李绪武，杨刚生，陈龙飞 等老师同学的指点与帮助，感谢他们在论文和课题研究期间及学习生活中给予的支持和帮助，感谢他们带给我快乐的求学时光。

同时要感谢我的家人，在我漫长的求学之路上，正是他们给予我的关爱，以及的鼓励、理解，督促作者刻苦拼搏，这份亲情是我永远的力量源泉和不倒的精神支柱。

最后，感谢所有关心、帮助，支持我的领导，老师，同事、亲人和朋友！

唐先智

二〇一三年三月于重庆大学

参考文献

- [1] Saito K, Miyoshi T. Non-contact 3-D digitizing and machining system for free form surface[J]. Ann CIRP 1991;40:483 – 6.
- [2] Fan K-C. A non-contact automatic measurement for free-form surface profiles[J]. Comput Integr Manufact Syst 1997;10:277 – 85.
- [3] Wang G, Zheng B, Li X, Houkes Z. Modeling and calibration of the laser beam scanning triangulation measurement system[J]. Robot Auton Syst 2002;40: 267 – 77.
- [4] Motavalli S. Review of reverse engineering approaches[J]. In: 23rd International conference on computers and industrial engineering, vol. 35 (1 – 2), 1998. p. 25 – 8.
- [5] L. Li, N. Schemenauer, X. Peng, Y. Zeng, P. Gu, A reverse engineering system for rapid manufacturing of complex objects[J], Robot. Comput. Integrated Manuf. 18 (1) (2002) 53–67.
- [6] X. Yan, P Gu, A review of rapid prototyping technologies and systems[J]. Computer-Aided Des. 28 (4) (1996) 307–318.
- [7] K.H. Lee, H. Woo, Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping[J].Comput. Ind. Eng. 38 (1) (2000) 21–38.
- [8] Y.H. Chen, C.T. Ng, Y.Z. Wang, Generation of an STL file from 3D measurement data with user-controlled data reduction[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 15 (2) (1999) 127–131.
- [9] Yadong Li, Peihua Gu (2004). Free-form surface inspection techniques state of the art review[J]. Computer-Aided Design 36:1395–1417.
- [10] Vollmer J, Mencl R, Muller H (1999). Improved Laplacian smoothing of noisy surface meshes[J]. In: Proceedings of the 20th Annual Conference of the European Association for Computer Graphics (Eurographics' 99), Milan, Italy, September 1999, vol 18, no 3
- [11] Feldman M (1994). Tight string method to fair piecewise linear curves[C]. In: Sapidis NS (ed) Designing fair curves and surfaces, SIAM Publications, Philadelphia, Pennsylvania
- [12] T. Várady, R.R. Martin and J. Cox, “Reverse engineering of geometric models – an introduction” [J].Computer-Aided Design, Elsevier, 1997, 29(4), pp. 255-268.
- [13] S. Motovalli, “Review of reverse engineering approach-ed” [J]. Computers and Industrial Engineering, Elsevier, 1998, 35, pp. 25-28.
- [14] Lartigue C, Contri A, Bourdet P. Digitised point quality in relation with point exploitation[J]. Measurement 2002; 32:193–203.
- [15] Bourdet P, Contri A, Lartigue C. Quality of 3D digitised points with non-contact optical sensors[J]. Ann CIRP 1999; 51(1):443–6.

- [16] Xi F, Liu Y, Feng H-Y. Error compensation for three-dimensional line laser scanning data[J]. Int J Adv Manuf Technol 2001; 18:211–6.
- [17] H Y Feng, Y Liu, and F Xi. Analysis of digitizing errors of a laser scanning system[J]. Precision Engineering, 25:185– 191, 2001.
- [18] S Larsson and J Kjellander. Motion control and data capturing for laser scanning with an industrial robot. Robotics and Autonomous Systems[J].54:419–512, 2006.
- [19] X. Zexiao, W Jianguo, and J Ming. Study on a full field of view laser scanning system[J]. International Journal of machine Tools & Manufacture, 25:185–191, 2001.
- [20] Liu Zhenkai, Wang Lihui, Lu Bingheng. Integrating cross-sectional imaging based reverse engineering with rapid prototyping[J]. Comput Ind 2006;57(2):131 – 40.
- [21] Peng Q, Loftus M. A new approach to reverse engineering based on vision information[J]. Int J Mach Tools Manufact 1998;38(8):881 – 99.
- [22] Peng Q, Loftus M. Using image processing based on neural networks in reverse engineering[J]. Int J Mach Tools Manufact 2001;41:625 – 40.
- [23] Carbone V, Carocci M, Savio E, Sansoni G, De Chiffre L. Combination of a vision system and a coordinate measuring machine for the Reverse Engineering of freeform surfaces[J]. Int J Adv Manufact Technol 2001;17:263 – 71.
- [24] Zhou Chunjiang, Du Hongwen. Measuring Data Processing Based on Reverse Engineering [J]. Mechanical& Electrical Engineering, 2004, Vol21, No.5: 50-52.
- [25] Park, S.C., Sculptured surface machining using triangular mesh slicing[J].Computer-Aided Design, 2004, Vol 36 No.3: 279-288.
- [26] Hong Jun, Ding Yuncheng, Cao Liang, etc. Data Cloud Direct Reduction in Reverse Engineering [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, Vol38, No.7: 661-664.
- [27] Rao Xixin, Liu Hesheng, Zhong Chunhua, etc. Quality Inspection for Punching Parts Based on 3D Alignment [J]. Machine Design & Research, 2007.(2) :91-95.
- [28] Z Marciniak, J L Duncan. The Mechanics of Sheet Metal Forming[J].Edward-Arnold, TCY Press, New York, 1989.
- [29] A P Karafillis, M C Boyce, Tooling design in sheet metal forming using springback calculations[J]. Int. J. Mech. Sci. 34 (1991) 113–131.
- [30] A P Karafillis, M C Boyce, Tooling and binder design for sheet metal forming processes compensating springback error[J]. Int. J. Mach. Tool Manufact. 36 (1995) 503–526.
- [31] M J Thali, M Braun, W Bruschweiler, R Dirnhofer, “Matching tire tracks on the head using forensic photogrammetry” [J].Forensic Science International, N. 113, 2000, pp. 281-287.
- [32] W Bruschweiler, M Braun, R Dirnhofer, “Analysis of patterned injuries and injury-causing

- instruments with forensic 3D/CAD supported photogrammetry (FPHG): an instruction manual for the documentation process" [J]. Forensic Science International, N. 132, 2003, pp. 130–138.
- [33] G. Sansoni, A Patrioli, F Docchio, "OPL-3D: a novel, portable optical digitiser for fast acquisition of free-form surfaces," [J]. Rev. Scient. Instr., Vol. 74, N. 4, 2003, pp. 2593-2603.
- [34] V Carbone, M Carocci, E Savio, G. Sansoni, L De Chiffre, "Combination of a vision system and a Coordinate Measuring Machine for the Reverse Engineering of Freeform Surfaces"[J].Int. J. Adv. Manuf. Tech., N. 17, 2001, pp. 263-271.
- [35] G. Sansoni, F Docchio, "Three-dimensional optical measurements and reverse engineering for automotive applications" [J]. Robotics and Computer-Integrated manufacturing, Vol. 20, 2004, pp. 359-367.
- [36] J.D.Cohen,er al. Hybird simplification:combing multi-resolution polygon and point rendering[C]. IEEE Visualization 2001.
- [37] J.El-Sana,et al.Integrating occlusion culling with view-dependent rendering[C]. IEEE Visualization 2001
- [38] S.Gumhold,et al.Real time compression of triangle mesh connectivity[C].Siggraph'98 Prceedings.
- [39] J.Rossignac.3D geometry compression:just-in-time upgrades for triangle meshes[C]. Siggraph'98 Prceedings.
- [40] H.Zhang et al.Visibility Culling Using Hierarchical Occlusion Maps[C].Computer Graphics 1997.
- [41] K.Hillesland,et al.Fast and simple occlusion culling using hardware-based depth queries[C].Technical Report TR02-039,University of North Carolina,2002.
- [42] W.Thompson,et al.FEATURE-Based Reverse Engineering of MechaNICAL Parts[C].IEEE Transactions on Robotics and Automation,1999.
- [43] M.Bock,et al.Segmentation of range images through the integration of different strategies.6th international Workshop on Vision Modeling and Visualization, [C].Stuttgart,Germany,2001.
- [44] M.Yang,E.Lee.Segmentation of measured data using a parametric quadric surface approximation[C].Computer-Aided Designed,31(7),1999.
- [45] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, McDonald J, Stuetzle W. Surface reconstruction from unorganized points[J]. In: Proceedings of the 19th annual conference on computer graphics. 1992. p. 71-8.
- [46] Edelsbrunner H, Mücke EP. Three-dimensional alpha shapes[J]. ACM Transactions on Graphics 1994;13 (1):43_72.

- [47] Amenta N, Bern M, Kamvysselis M. A new Voronoi-based surface reconstruction algorithm[J]. In: Proceedings of the 25th annual conference on computer graphics and interactive techniques, vol. 32. 1998. p. 415-21.
- [48] Bernardini F, Mittleman J, Rushmeier H, Silva C, Taubin G. The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction[C]. IEEE.
- [49] Ma W, Kruth JP. Parameterization of randomly measured points for least squares fitting of B-spline curves and surfaces[J]. Computer-Aided Design 1995; 27 (9):663_75.
- [50] Forsey DR, Bartels RH. Surface fitting with hierarchical splines[J]. ACM Transactions on Graphics 1995; 14 (2):134-61.
- [51] Eck M, Hoppe H. Automatic reconstruction of B-spline surfaces of arbitrary topological type[C]. In: Proceedings of the 23rd annual conference
- [52] M. Eck, T. DeRose, T. Duchamp, et al. Multiresolution analysis of arbitrary meshes [J]. ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'95 Proc.), 1995: 73-182
- [53] K F Leong, C K Chua, Y M Ng. A Study of Stereolithography File Errors and Repair. Part 2: Special Cases [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1996, 12 (6): 415-422
- [54] R Pfeifle, H P Seidel. Triangular B-Splines for Blending and Filling of Polygonal Holes[A].In: Proceedings of Graphics Interface '96,1996,Toronto, Canada. Page:186-193
- [55] Zhang Liyan, Pan Xiaolin, An Luling. A Smooth Hole Filling Algorithm for Triangle Mesh Surfaces [J].Journal of Engineering Graphics. 2002, 22 (4):113-119.
- [56] Minica Panchetti, Jean-Philippe Pernot, Philippe Véron. Towards recovery of complex shapes in meshes using digital images for reverse engineering applications[C]. Computer-Aided Design. 42 (2010) 693-707.
- [57] K.H. Lee, H. Woo, Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping[J].Comput. Ind. Eng. 38 (1) (2000) 21–38.
- [58] Y.H. Chen, C.T. Ng, Y.Z. Wang, Generation of an STL file from 3D measurement data with user-controlled data reduction[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 15 (2) (1999) 127–131.
- [59] S.H. Lee, H.C. Kim, S.M. Hur, D.Y. Yang, STL file generation from measured point data by segmentation and Delaunay triangulation[J]. Computer-Aided Des. 34 (10) (2002) 691–704.
- [60] W. Sun, C. Bradley, Y.F. Zhang, H.T. Loh, Cloud data modeling employing a unified, non-redundant triangular mesh[J]. Computer-Aided Des. 33 (2) (2001) 183–193.
- [61] Weir DJ, Milroy M, Bradley C, Vickers GW. Reverse engineering physical model semploying wrap aroud B2 spline surfaces and quadrics [A].Proc Introduction Mech Engrs PartB[C].1996, 210: 147 ~ 157.

- [62] G.H. Liu, Segmentation of cloud data for reverse engineering and direct rapid prototyping[C]. M.Eng. Thesis, National University of Singapore, Singapore, 2001.
- [63] Y.F.Zhang, Y.S.Wong, H.T.Loh, Y.F.Wu, An adaptive slicing approach to modeling cloud data for rapid prototyping[J]. Materials Processing Technology. 140(2003)105-109.
- [64] Trevor J, Rodden T,Blair G.S. COLA: a light weight platform for CSCW [C]. Proceedings of ECSCW 93, Sept. 13-17, Milan, Italy, Kluwer Academic Publishers, 1993: 15-30.
- [65] 史美林.计算机支持的协同工作：概念、技术、应用[M].北京：电子工业出版社，1998.
- [66] David H. Workflow Management Coalition[J]. The workflow reference model Document Number TC00-1003 [S], 1995.
- [67] David M, Anderson. Agile Product Development for Mass Customization: How to Develop Deliver Products for Mass Customization, Niche Markets JIT, Build-to-order and Flexible Manufacturing [M]. Boston, USA: Harvard Business School Press, 1997:10-15.
- [68] Sun W,Bradley C, Zhang YF,Loh HT.Cloud data modeling employing a unified, non-redundant triangular mesh[J].Comput Aided Des.2001,33(1):83 ~ 93.
- [69] Martin RR, Stroud IA, Marshal AD.Data Reduction for Reverse Engineering [A]. Computer and Automation Institute of Hungarian Academy of Science,January 1996(1068):63 ~ 69.
- [70] Fujimoto M, and Kariya K.An Improved Method for Digitized Data Reduction for Computer Integrated Manufacturing [A].Proc.International Conferenceon Indusrtial Electronics, Contol,Instrumentation, and Automation[C].1992,896 ~ 901.
- [71] Chen YH,Wang YZ.Data Reductionin Integrated Reverse Engineering and Rapid Prototyping [J].International Journal of Computer Integrated Manufacuring,1999,12(2):97 ~ 103.
- [72] Hamann B. A Data Reduction Scheme for Triangulation Surfaces [J].Computer Aided Geometric Desig., 1994, 11:197 ~ 214.
- [73] Hamann B, Chen J.Data Point Selection for Piece wise Linear Curve Approximation [J]. Computer Aided Geometric Design,1994,11:289 ~ 301.
- [74] Veron P , Leon JC.Static Polyhedron Simplification using Error Measurements [J].Computer Aided Design,1997,29:287 ~ 298.
- [75] Liu GH, Wong YS, Zhang YF, Loh HT.Error based segmentation of cloud data for direct rapid prototyping [J]. Commputer Aided Design.2002,35:633 ~ 645.
- [76] 张丽艳,周儒荣等.海量测量数据简化技术研究[J].计算机辅助设计与图形学学报.2001,13(11):1019 ~ 1023.
- [77] 吴维勇,王英惠.二元 Haar 小波分解下的曲面数据压缩算法[J].小型微型计算机系统,2003,24(2):309 ~ 311.
- [78] Gou Hongmei, Huang Binqing, Liu Wenhui, et al. Agent based Approach for Workflow

- Management[C]. Nashville, USA, 2000 IEEE International Conference, 2000: 292-297.
- [79] WANG K, ZHANG M. Web Service and HLA Based Collaborative Modeling and Simulation for Complex Product Design [J]. Proceedings of the International Conference on Advanced Design and Manufacture, 2006, 551-555.
- [80] 龙红熊 ,王为民 ,戈鹏等. 产品开发协同工作环境嘛模型及其应用[J].计算机工程与应用 , 2007 , ,43 (20): 235-239.
- [81] 史琦 ,李原 ,杨海成.分布式产品设计的协同工作环境[J].计算机工程与应用 , 2002,11:38-40.
- [82] 李朋 ,张景 ,吕林涛等。分布式协同工作环境的框架设计与关键技术研究[J]。微电子学与计算机 , 2003,2:10-12.
- [83] 白丽娜 ,唐刚斗。基于多 Agent 的协同工作环境的实现[J]。系统工程与电子技术 ,2003,25 (12): 1528-1531.
- [84] 李安纪 ,尹建伟 ,陈刚。基于 Web 的分布式协同工作环境的研究与实现[J].计算机应用研究 , 2006,2:22-23.
- [85] M Rezayat. Knowledge based Product Development Using XML and FCS [J]. Computer Aided Design, 2000, 32(1):299-309.
- [86] Nidamarthi S, Allen R H, Sriram R D.Observations from Supplementing the Traditional Design Process via Internet based Collaboration Tools [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2001, 14(1):95-107.
- [87] HERON E A, RAND D A, Bayesian inference for dynamic transcriptional regulation; the Hes1 system as a case study, Bioinfomatics [J]. 2007, 23(19):2596-603.
- [88] C. H. Chu, C. Y. Cheng and C. W. Wu, Applications of the Web-based collaborative visualization in distributed product development [J].Computers in Industry, 57 (2006) 272-282.
- [89] S. H. Ahn, et al., Design consultant: a networkbased concurrent design environment, [J].Proceedings of ASME IMEC & E, USA. (1999) 23-30.
- [90] G. Q. Huang, Web-based support for collaborative product design review[J].Computers in Industry, 48 (2002) 71-88.
- [91] S. H. Ahn, et al., CyberCut: an Internet-based CAD/CAM system[J].Transactions of ASME, 1 (4) (2001) 52-59.
- [92] J. M. Mark, et al., PACT: an experiment in integrated concurrent engineering systems[J]. IEEE Computer, 26 (1993) 28-37.
- [93] A. Pang and C. Wittenbrink, Collaborative 3D visualization with Cspray[J]. IEEE Computer Graphics Application, 17 (1997) 32-41.
- [94] O. O'Grady, et al., Distributed concurrent engineering: Internet-based interactive 3-D dynamic

- browsing and markup of STEP data[J].*Concurrent Engineering Research and Applications*, 6 (1998) 53-70.
- [95] CHAPPUIS C, RASSINEUX A, BREITKOPF P, VILLON P. Improving surface meshing from discrete data by feature recognition[J]. *Eng Comput*. 2004, 20(3), 202–209.
- [96] QU XZ, STUCKER BE. Circular hole recognition for STL based tool path generation [J]. *Rapid Prototyping*. 2005, 11(3), 132–139.
- [97] ALLEN E, FETROW J , DANIEL L, THOMAS S and JOHN D, Algebraic dependency models of protein signal transduction networks from time-series data[J]. *Theoret. Biol.* 2006,238, 317–330.
- [98] DOESCHL A, DAVISON M, RASMUSSEN H and REID G, Assessing cellular automata based models using partial differential equations [J].*Math. Comput. Modelling* 40 2004, 977–994.
- [99] NOMAN N, IBA H. Reverse engineering genetic networks using evolutionary computation [J]. *Genome Informatics*, 2005, 16 (2), 205–214.
- [100] Yau HT, Menq CH (1995) Automated CMM path planning for dimensional inspection of dies and moulds having complex surfaces [J] *Int J Mach Tools Manuf* 35:861–876.
- [101] Lartigue C, Mehdi C, Thibaut F (2006) Scan planning strategy for a general digitized surface[C]. *J Comput Inf Sci Eng* 6:331.
- [102] Wu Y, Singh P, Kaucic R, Chen J, Little F (2007) Multimodal industrial inspection and analysis[J]. *J Comput Inf Sci Eng* 7:102–107.
- [103] Sarfraz M (2006) Computer-aided reverse engineering using simulated evolution on NURBS[J]. *Virtual Phys Prototyping* 1(4):243–257 December.
- [104] Bopaya Bidanda , Yasser A Hosni. Reverse engineering and its relevance to industrial engineering :a critical review[J]. *Computers ind Engng*,1997,29(1-4):637-640.
- [105] E.K. Forkuo, B. King, Automatic fusion of photogrammetric imagery and laser scanner point clouds[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXV* (2005) 921–926 Part B4.
- [106] H.A. Grebla, C.O. Cenan, Distributed machine learning in a medical domain[J].*Proc. ICCCC*, The AGORA Univ. of Oradea, Romania, 2006, pp. 245–250.
- [107] H. Haggen, S. Mattila, 3-d indoor modeling from videography[C]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXV* (2002) Part B5.
- [108] S.-Y. Park, An image-based calibration technique of spatial domain depthfrom-defocus[J].*Pattern Recognition Letters* 27 (12) (2006) 1318–1324.
- [109] I.K. Petrovic, Computer design agents and creative interfaces[J]. *Automation in Construction*

5 (3) (1996) 151–159.

- [110] 周士侃, 娄臻亮, 舒世湘. 基于 Atos & Tritop 的点云采集方法[M]. 模具技术 2004, N0. 2.
- [111] Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical method[J]. Opt. Eng., 2000, 39(1): 10-22.
- [112] Zitova B, Flusser J. Image registration methods: A survey[J]. Imaging and Vision Computing, 2003, 21: 977-1000.
- [113] 金刚 , 吴晓刚 , 李德华.三维扫描系统中的关键技术[J].计算机世界 , C1,1999.7.26
- [114] 金刚 , 周学泳 , 李德华.三维扫描技术的应用[J].计算机世界 , C7,1999.7.26
- [115] D J Weir, M J Milroy et al. Reverse engineering physical models employing wrap-around B-spline surfaces and quadrics[J]. Proc Instn Mech Engrs, Part B:Journal of Engineering Manufacture,1995, 210(2): 147-157
- [116] Gu P,Yan X. Neural network approach to the reconstruction of free form surfaces for reverseengineering[J]. CAD , 1995 , 27(1):54-64
- [117] 马小虎等 . 基于三角形移去准则的多面体模型简化方法 [J]. 计算机学报 , 1998,21(6):492-498
- [118] Garland M et al. Surface simplification using quadric error metrics[J]. In :ACM SIGGRAPH , Los Angeles , 1997. 209-216
- [119] Chen Y H, Liu C Y. Quadric surface extract ion using genetic algorithms [J]. Computer Aided Design,1999, 31 (2) : 101-110.
- [120] Sapidis N, and Perucchio. Delaunary triangulation of arbitrarily shaped planar Domains, [J].Computer Aided Geometric Design,1991,Vol.8:421-437
- [121] Eck M, DeRose T, Duchamp T, Hoppe H, Lounsbery M, Stuetzle W. Multiresolution analysis of arbitrary meshes[C]. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH), 1995, p. 82±90.
- [122] Ferrie FP, Lagarde J, Whaite P. Darboux frames, snakes and superquadrics: geometry from the bottom up[C]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 1993;15(8):771±83.
- [123] Mathieu L, BalluA. Amodel for a coherent and complete tolerancing process[J]. In: Proceedings of the 9th international seminar on computer-aided tolerancing, Tempe; 2005. p. 35 – 44.
- [124] Ainsworth I, Ristic M, Brujic D. CAD-based measurement path planning for Free-Form shapes using contact probes[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2000;16(January(1)):23 – 31.
- [125] Xi F, Shu C. CAD-based path planning for 3-D line laser scanning[J]. Computer- Aided Design 1999;31(7):473 – 9.

- [126] Li Y, Gu P. Free-form surface inspection techniques state of art review[J]. Computer-Aided Design 2004;36(November(13)):1395 – 417.
- [127] Son S, Park H, Lee K. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2002;42(June(8)):889 – 97.
- [128] Yao AW. Applications of 3D scanning and reverse engineering techniques for quality control of quick response products[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2005;26 (November (11 – 12)):1284 – 8. Feng H, Liu Y, Xi F. Analysis of digitizing errors of a laser scanning.
- [129] 陈三清. 点云数据的配准方法研究[J]. 光盘技术 , 2009,(05).
- [130] 刘繁明, 屈昊. ICP 算法的鲁棒性改进[J]. 仪器仪表学报 , 2004,(S1).
- [131] 程俊廷, 赵灿, 王从军, 莫健华. 基于参考点和 ICP 算法的点云数据重定位研究[J]. 计算机测量与控制 , 2006,(09).
- [132] B. K. P. Horn, B. G. Schunk. Determining optical flow[J]. Artificial Intelligence, 1987. 17: 185-203.
- [133] K. S. Arun, T. S Huang, S. D. Blostein. Least-squares fitting of two 3-D point sets[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987. 9(5): 698-700.
- [134] Bes I PJ, Mckay ND.A Method gor Registration of 3-D Shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI).1992,14 (2):239-256
- [135] Paul J. Bes I, Neil D. McKay. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992. 14(2): 239-256.
- [136] Y. Chen, G. Medioni. Object Modeling by Registration of Multiple Range Images[J]. Image and Vision Computing, 1992. 10: 145-155.
- [137] R. Bergevin, M Soucy, H. Gagnon, et al. Towards a general multi-view registration technique[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996. 18(5): 540-547.
- [138] Andrew Edie Johnson, Sing Bing Kang. Registration and Integration of Textured 3D Data[J]. Image and Vision Computing, 1999. 17: 135-147.
- [139] Natasha Gelfand, Leslie Ikemoto, Szymon Rusinkiewicz, et al. Geometrically Stable Sampling for the ICP Algorithm[A]//. Proceedings of Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling[C]. Stanford University, CA, USA, 2003: 260-267.
- [140] 李宏飞. 网络图形特征点提取方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报 , 1992,(03).
- [141] Hugues Hoppe. Surface Reconstruction from Unorganized Points [D]. University of Washington, 1994.

- [142] 周春艳 , 李勇 , 邹峰嵘. 三维点云 ICP 算法改进研究.计算机技术与发展.2011 (08) .
- [143] 郑德华. ICP 算法及其在建筑物扫描点云数据配准中的应用[J]. 测绘科学, 2007. 32(2).
- [144] I.K. Lee, Curve reconstruction from unorganized points[J]. Computer-Aided Geomet. Des. 17 (2) (2000) 161–177.
- [145] J. Pitman, Probability, Springer, Berlin, 1992.
- [146] M. Eck, T. DeRose, T. Duchamp, et al. Multiresolution analysis of arbitrary meshes[J]. ACM Computer Graphics(SIGGRAPH'95 Proc.), 1995: 73-182
- [147] K.F.Leong, C.K.Chua, Y.M.Ng. A Study of Stereolithography File Errors and Repair. Part 2: Special Cases[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1996, 12 (6): 415-422
- [148] R.Pfeifle, H.-P.Seidel. Triangular B-Splines for Blending and Filling of Polygonal Holes[A].In: Proceedings of Graphics Interface '96,1996,Toronto, Canada.Page:186-193
- [149] Zhang Liyan, Pan Xiaolin, An Luling. A Smooth Hole Filling Algorithm for Triangle Mesh Surfaces[J].Journal of Engineering Graphics. 2002,22 (4):113-119
- [150] Chui C, Lai M-J. Filling polygonal holes using C1 cubic triangular spline patches[J]. Comput Aided Geom Des 2000;17:297–307.
- [151] Carr J,Beatson R, Cherrie J, Mitchell T, Fright W, McCallum B. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions[J]. Comput Graphics (Proc SIGGRAPH) 2001;67–76.
- [152] Pernot J-P, Moraru G, Véron P. Filling holes in meshes for efficient reverse engineering of products[C]. In: Tools and methods for competitive engineering.2006. p. 273_84.
- [153] Liepa P. Filling holes in meshes Eurographics Symposium on Geometric Processing[C]. 2003 p. 200–7.
- [154] Canann S, Muthukrishnan S, Phillips R. Topological refinement procedures for triangular finite element meshes[J]. Eng Comput 1996; 12:243–55.
- [155] Yongtae Jun。 A piecewise hole filling algorithm in reverse engineering[J]。 Computer-Aided Design 37 (2005) 263–270
- [156] 张献颖 ,周明全 ,耿国华.空间三角网格曲面的边界提取方法[J].中国图像图形学报 ,2003 : 1223-1226
- [157] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, McDonald J, Stuetzle W. Surface reconstruction from unorganized points[C]. In: Proceedings of the 19th annual conference on computer graphics. 1992. p. 71_8.
- [158] Edelsbrunner H, Mücke EP. Three-dimensional alpha shapes[J]. ACM Transactions on

Graphics 1994;13(1):43_72.

- [159] Amenta N, Bern M, Kamvysselis M. A new Voronoi-based surface reconstruction algorithm[C]. In: Proceedings of the 25th annual conference on computer graphics and interactive techniques, vol. 32. 1998. p. 415_21.
- [160] Bernardini F, Mittleman J, Rushmeier H, Silva C, Taubin G. The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction[C]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 1999;5(4):349_59.
- [161] Ma W, Kruth JP. Parameterization of randomly measured points for least squares fitting of B-spline curves and surfaces[J]. Computer-Aided Design 1995; 27(9):663_75.
- [162] Minica P, Jean P P, Philippe V。 Towards recovery of complex shapes in meshes using digital images for reverse engineering applications[J]。 Computer-Aided Design。 42 (2010) 693_707
- [163] Forsey DR, Bartels RH. Surface fitting with hierarchical splines[C]. ACM Transactions on Graphics 1995;14(2):134_61.
- [164] Eck M, Hoppe H. Automatic reconstruction of B-spline surfaces of arbitrary topological type[C]. In: Proceedings of the 23rd annual conference on computer graphics and interactive techniques, vol. 30. 1996. p. 325_34.
- [165] Ma W, Zhao N. Catmull_Clark surface fitting for reverse engineering applications[C]. In: Proceedings of geometric modeling and processing, theory and applications. 2000. p. 274_83.
- [166] Lee A, Moreton H, Hoppe H. Displaced subdivision surfaces[C]. In: Siggraph 2000, Computer graphics proceedings. 2000. p. 85_94.
- [167] 魏新国, 张广军. 基于亚像素边缘提取的圆心定位方法[C] . 2002 年全国光电技术学术交流会. 2002.p. 187-190
- [168] 薛婷;孙梅;张涛;吴斌;;类椭圆特征自动识别及亚像素提取的完整实现[J];光电子.激光;2008 年 08 期
- [169] 张永宏,胡德金,张凯,徐俊杰;基于灰度矩的 CCD 图像亚像素边缘检测算法研究[J];光学技术;2004 年 06 期
- [170] 王社阳;宋申民;陈兴林;强文义;;改进的空间矩亚像素边缘检测算法[J];哈尔滨工业大学学报;2006 年 06 期
- [171] Levin D. The approximation power of moving least-squares[J]. Mathematics of Computation. 1998 , 67 (224) : 1517-1531.
- [172] Amenta N , Bern M , Kamvysselis M.A new voronoi-based surface Reconstruction Algorithm[C]//Proc. SIGGRAPH , 1998 : 415-422.
- [173] Bajaj C L , Bernardini F , XU G. Automatic reconstruction of surfaces and scalar fields from 3D Scans. [C]//Proc. SIGGRAPH , 1995: 109-118.

- [174] Gutein C., Roseman M., Greenberg S.A usability study of awareness widgets in a shared workspace groupware system[C]. Proceedings of the1996 ACM Conference on Computer Supported Cooperative work. Cambridge , MA , USA , 1996.258-267.
- [175] Kamel, Nabil N. , Davison , Robert M. Applying CSCW technology to overcome traditional barriers in group interactions [J].Source: Information & Management , 1998 , 34(11):209-219.
- [176] 范玉顺 , 刘飞 , 祈国宁。网络化制造系统及其应用实践【M】.北京 : 机械工业出版社 , 2003.
- [177] 范玉顺。网络化制造的内涵与关键技术问题【J】。计算机集成制造系统 -CIMS,2003,9(7):5762582.
- [178] In-Ho Song, Kyung-Don Kim and Sung-Chong Chung. Internet-based dimensional verification system for reverse engineering processes[J]. Journal of Mechanical Science and Technology 22 (2008) 1259~1268.
- [179] DOESCHL A, DAVISON M, RASMUSSEN H and REID G, Assessing cellular automata based models using partial differential equations[J].Math. Comput. Modelling 40 2004, 977–994.
- [180] NOMAN N, IBA H. Reverse engineering genetic networks using evolutionary computation[J]. Genome Informatics, 2005,16(2), 205–214.
- [181] PERKINS T J, JAEGER J, REINITZ J, GLASS L. Reverse engineering the gap gene network of drosophila melanogaster[J]. PLoS Computational Biology, 2006, 2(5), 417–428.
- [182] WERHLI A V, GRZEGORCZYK M and HUSMEIER D. Comparative evaluation of reverse engineering gene regulatory networks with relevance networks, graphical gaussian models and Bayesian networks [J]. Bioinformatics, 2006, 22(20), 2523-2531,
- [183] 陈继忠 , 田凌. 面向协同产品商务的企业信息集成平台研究[J].计算机集成制造系统 -CIMS , 2005 , 11(8) , 1081- 1087.
- [184] 战洪飞 , 顾新建 , 沈祖志. 基于 Web 的异地协同产品设计系统研究[J].中国机械工程 , 2004 , 14(15) , 1306~1308.
- [185] 胡卫民.新产品开发过程 ASP 平台的运行模式研究及应用[J].重庆大学学报 , 2008 , 5(31),30-34.
- [186] 孙林夫.面向网络化制造的协同设计技术[J].计算机集成制造系统-CIMS , 2005 , 1 (11): 1-6.
- [187] J. E. Moreira, S. P. Midkiff and M. Gupta, A comparison for Java, C/C++, and FORTRAN for numerical computing[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 40 (5) (1998) 102-105.
- [188] In-Ho Song, Kyung-Don Kim, Sung-Chong Chung. Internet-based dimensional verification system for reverse engineering processes. [J] Journal of Mechanical Science and Technology

22 (2008) 1259~1268.

[189] 刘胜.面向现代集成制造的网络化销售和定制系统研究与应用[D].重庆大学博士论文, 2003 : 8 ~ 9.

[190] International Organization Standardization, ISO/DIS 10303-219, Industrial Automation Systems and Integration-Product Data Representation and Exchange-Part[C]. 219: Application Protocol: Dimensional Inspection, (2004).

[191] I. H. Song and S. C. Chung, , Web-based precision dimensional verification system for rapid design and manufacture[J]. Proc. of American Society for Precision Engineering, Protland, Oregon, USA. (2003) 359-362.

[192] I. H. Song, K. D. Kim and S. C. Chung, An Internet-based dimensional verification system for reverse engineering[J].Transactions of the KSME (A), 27 (2004) 1409-1417.

附录

A. 攻读博士学位期间参与的科研项目

- [1] 逆向工程的数字化模型重构关键技术的算法研究（重庆市科委自然基金计划面向项目负责人）
- [2] 基于人面防护装备的标准头面模型重构机理研究（重庆市科委自然基金计划面向项目负责人）
- [3] 汽车复杂形体钣金零部件反求工程中的关键技术研究（教育部重点实验室项目 项目负责人）

B. 攻读博士学位期间发表的学术论文

- [1] 唐先智；刘飞；李绪武 钣金零件反求数据分层处理算法研究 中国机械工程 2010 卷：21 期：6 679-682
- [2] 唐先智；刘飞；李绪武 A networked sharing application system for reverse engineering 重庆大学学报 2009 卷：32 期：5 (505-511)(EI : 20093012222262)
- [3] Tang XianZhi,FangLiang,Xiao Feng Measurement and Analysis of Liquid Density of NiCoAlMo Quarternary Alloys RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING 2011 卷：40 期：3 (5)(SCI : 000290128600002 EI : 20112013989837)
- [4] 唐先智 ;杨刚生 ;刘飞 A method for feature contour extraction of triangular meshes based on multi-seed points 重庆大学学报 2012 卷：35 期：5 (40-46+68)(EI : 20122815234115)