



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

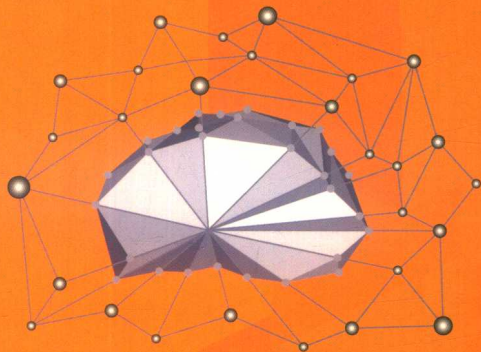
3D打印前沿技术丛书

丛书顾问◎卢秉恒 丛书主编◎史玉升

3D反求技术

梁 晋 史宝全◎编著

3D FANQIU JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

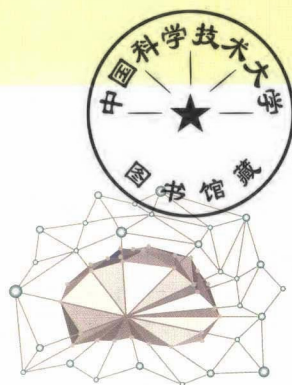


湖北省学术著作出版专项资金资助项目
3D打印前沿技术丛书
丛书顾问◎卢秉恒 丛书主编◎史玉升

3D反求技术

梁 晋 史宝全◎编著

3D FANQIU JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

反求技术用于获得实物的三维数据模型,其与3D打印技术紧密配合,可有效缩短产品的开发周期,提高产品更新换代的速度,增强企业竞争力。本书从数据采集、数据处理及数据建模三个方面对3D反求技术所涉及的各种理论与方法进行了系统性的阐述,尤其是详细介绍了各种先进的光学三维测量理论与方法,并介绍了一些典型案例,以使读者了解3D反求技术在工业、医学等各个领域的应用前景。

本书可作为高等院校机械工程专业本科和专科学生的实践教材、培训教程或参考书,对于相关领域的专业工程技术人员和研究人员 also 具有很高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

3D反求技术/梁晋,史宝全编著. —武汉:华中科技大学出版社,2019.1
(3D打印前沿技术丛书)
ISBN 978-7-5680-4828-6

I. ①3… II. ①梁… ②史… III. ①立体印刷-印刷术 IV. ①TS853

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第294516号

3D 反求技术

3D Fanqiu Jishu

梁 晋 史宝全 编著

策划编辑:张少奇

责任编辑:姚同梅

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:17.5

字 数:348千字

版 次:2019年1月第1版第1次印刷

定 价:138.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



3D 打印前沿技术丛书

顾问委员会

主任委员 卢秉恒(西安交通大学)
副主任委员 王华明(北京航空航天大学)
聂祚仁(北京工业大学)

编审委员会

主任委员 史玉升(华中科技大学)
委员 (按姓氏笔画排序)
朱 胜(中国人民解放军陆军装甲兵学院)
刘利刚(中国科学技术大学)
闫春泽(华中科技大学)
李涤尘(西安交通大学)
杨永强(华南理工大学)
杨继全(南京师范大学)
陈继民(北京工业大学)
林 峰(清华大学)
宗学文(西安科技大学)
单忠德(机械科学研究总院集团有限公司)
赵吉宾(中国科学院沈阳自动化研究所)
贺 永(浙江大学)
顾冬冬(南京航空航天大学)
黄卫东(西北工业大学)
韩品连(南方科技大学)
魏青松(华中科技大学)



About Author

作者简介



梁 晋 西安交通大学教授, 博士生导师。主要从事跨学科的机械电子和信息技术研究, 将近景工业摄影测量、三维光学测量、计算机视觉、图像处理等技术与机械学科的模具技术、CAD 技术、数值模拟技术、变形应变分析技术等相结合, 实现了复杂结构与材料的三维变形与应变检测与分析。先后主持 863 计划项目、国家自然科学基金项目、国家机床重大科技专项子项目、江苏省攻关项目等 20 个项科研项目; 发表论文 60 多篇(其中 SCI/EI 收录 40 多篇), 出版著作 10 多本, 获中国发明专利授权 7 项, 参与制定国家标准 1 项; 获得国家科学技术奖(技术发明奖)二等奖 1 项(第一完成人), 获得陕西省科技进步奖一等奖和二等奖各 1 项(均为第一完成人)。



史宝全 西安电子科技大学副教授, 硕士生导师。主要从事三维光学精密检测仪器和人工智能(AI)与智能机器人技术的研究。先后主持国家自然科学基金项目、陕西省自然科学基金项目、航空科学基金项目等多个科研项目; 发表学术论文 20 余篇, 获中国发明专利授权 10 余项, 参与制定国家标准 1 项; 获陕西省科技进步奖一等奖 1 项(第三完成人), 2018 年入选陕西高校“青年杰出人才”。



总序一

“中国制造 2025”提出通过三个十年的“三步走”战略,使中国制造综合实力进入世界强国前列。近三十年来,3D 打印(增材制造)技术是欧美日等高端工业产品开发、试制、定型的重要支撑技术,也是中国制造业创新、重点行业转型升级的重大共性需求技术。新的增材原理、新材料的研发、设备创新、标准建设、工程应用,必然引起各国“产学研投”界的高度关注。

3D 打印是一项集机械、计算机、数控、材料等多学科于一体的,新的数字化先进制造技术,应用该技术可以成形任意复杂结构。其制造材料涵盖了金属、非金属材料、陶瓷、复合材料和超材料等,并正在从 3D 打印向 4D、5D 打印方向发展,尺度上已实现 8 m 构件制造并向微纳制造发展,制造地点也由地表制造向星际、太空制造发展。这些进展促进了现代设计理念的变革,而智能技术的融入又会促成新的发展。3D 打印应用领域非常广泛,在航空、航天、航海、潜海、交通装备、生物医药、康复产业、文化创意、创新教育等领域都有非常诱人的前景。中国高度重视 3D 打印技术及其产业的发展,通过国家基金项目、攻关项目、研发计划项目支持 3D 打印技术的研发推广,经过二十多年培养了一批老中青结合、具有国际化视野的科研人才,国际合作广泛深入,国际交流硕果累累。作为“中国制造 2025”的发展重点,3D 打印在近几年取得了蓬勃发展,围绕重大需求形成了不同行业的示范应用。通过政策引导,在社会各界共同努力下,3D 打印关键技术不断突破,装备性能显著提升,应用领域日益拓展,技术生态和产业体系初步形成;涌现出一批具有一定竞争力的骨干企业,形成了若干产业集聚区,整个产业呈现快速发展局面。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准 3D 打印科学技术前沿,组织策划了本套“3D 打印前沿技术丛书”,并且,其中多部将与爱思唯尔(Elsevier)出版社一起,向全球联合出版发行英文版。本套丛书内容聚焦前沿、关注应用、涉猎广泛,不同领域专家、学者从不同视野展示学术观点,实现了多学科交叉融合。本套丛书采用开放选题模式,聚焦 3D 打印技术前沿及其应用的多个领域,如航空航天、

工艺装备、生物医药、创新设计等领域。本套丛书不仅可以成为我国有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,也是我国科技人员展示研究成果的国际平台。

近年来,中国高校设立了 3D 打印专业,高校师生、设备制造与应用的相关工程技术人员、科研工作者对 3D 打印的热情与日俱增。由于 3D 打印技术仅有三十多年的发展历程,该技术还有待于进一步提高。希望这套丛书能成为有关领域专家、学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者、编者与读者之间的联系,促进作者、读者在应用中凝练关键技术问题和科学问题,在解决问题的过程中,共同推动 3D 打印技术的发展。

我乐于为本套丛书作序,感谢为本套丛书做出贡献的作者和读者,感谢他们对本套丛书长期的支持与关注。

西安交通大学教授
中国工程院院士



2018 年 11 月



总序二

3D 打印是一种采用数字驱动方式将材料逐层堆积成形的先进制造技术。它将传统的多维制造降为二维制造,突破了传统制造方法的约束和限制,能将不同材料自由制造成空心结构、多孔结构、网格结构及功能梯度结构等,从根本上改变了设计思路,即将面向工艺制造的传统设计变为面向性能最优的设计。3D 打印突破了传统制造技术对零部件材料、形状、尺度、功能等的制约,几乎可制造任意复杂的结构,可覆盖全彩色、异质、功能梯度材料,可跨越宏观、介观、微观、原子等多尺度,可整体成形甚至取消装配。

3D 打印正在各行业中发挥作用,极大地拓展了产品的创意与创新空间,优化了产品的性能;大幅降低了产品的研发成本,缩短了研发周期,极大地增强了工艺实现能力。因此,3D 打印未来将对各行业产生深远的影响。为此,“中国制造 2025”、德国“工业 4.0”、美国“增材制造路线图”,以及“欧洲增材制造战略”等都视 3D 打印为未来制造业发展战略的核心。

基于上述背景,华中科技大学出版社希望由我组织全国相关单位撰写“3D 打印前沿技术丛书”。由于 3D 打印是一种集机械、计算机、数控和材料等于一体的新型先进制造技术,涉及学科众多,因此,为了确保丛书的质量和前沿性,特聘请卢秉恒、王华明、聂祚仁等院士作为顾问,聘请 3D 打印领域的著名专家作为编审委员会委员。

各单位相关专家经过近三年的辛勤努力,即将完成 20 余部 3D 打印相关学术著作的撰写工作,其中已有 2 部获得国家科学技术学术著作出版基金资助,多部将与爱思唯尔(Elsevier)联合出版英文版。

本丛书内容覆盖了 3D 打印的设计、软件、材料、工艺、装备及应用等全流程,集中反映了 3D 打印领域的最新研究和应用成果,可作为学校、科研院所、企业等

单位有关人员的参考书,也可作为研究生、本科生、高职高专生等的参考教材。

由于本丛书的撰写单位多、涉及学科广,是一个新尝试,因此疏漏和缺陷在所难免,殷切期望同行专家和读者批评与指正!

华中科技大学教授



2018 年 11 月

前言

3D 反求技术亦称逆向工程(reverse engineering, RE)技术。3D 反求是指采用一定的反求手段或反求设备对产品实物或模型进行反求测量,获得测量数据,然后在三维逆向设计软件中重构出产品的三维 CAD 数字模型,并在此基础上进行生产加工、改型或再创新,是一个从产品到三维 CAD 数字模型再到新产品的过程。利用 3D 反求技术,在消化、吸收先进技术的基础上,设计和开发各种新产品,可有效缩短产品开发周期,提高产品更新换代的速度,增强企业竞争力。

本书从数据采集、数据处理及数据建模三个方面对 3D 反求技术所涉及的各种理论与方法进行了系统性的阐述。第 1 章对 3D 反求的基本原理,3D 反求与正向设计及 3D 打印的关系,3D 反求的基本流程、关键技术及应用领域进行了概述。第 2 章至第 7 章介绍了各种先进的点云数据采集理论与方法,包括近景工业摄影测量理论与方法、三维激光扫描测量理论与方法、光栅投影式面结构光测量理论与方法等。第 8 章介绍了各种点云数据处理理论与方法。第 9 章与第 10 章论述了点云数据建模理论与方法。第 11 章围绕人体三维快速反求、大型雕塑建模、零件修复等案例展开,介绍了 3D 反求技术在工业、医学等各个领域的应用前景。

本书由西安交通大学梁晋教授和西安电子科技大学史宝全副教授编著。此外,西安交通大学的博士研究生千勃兴参与了第 4、5 章的撰写,博士研究生冯超参与了第 8、9 章的撰写,硕士研究生梁瑜参与了第 10 章的撰写,研究生魏斌、龚春园、刘世凡、赵蒙、张铭凯、牌文延等参与了校稿。本书在梁晋教授团队多年从事光学三维非接触式测量技术研究与应用的基础上撰写而成,课题组多位博士和硕士研究生参与了相关工作,相关研究也得到国家自然科学基金(项目编号:51675404,51421004,51405363)的资助,在此表示衷心的感谢。此外,为了使本书内容尽量全面覆盖 3D 反求技术所涉及的各种理论与方法,在撰写过程中也借鉴了国内外同行在 3D 反求理论与技术方面的研究成果,在此一并致谢。最后,感谢华中科技大学出版社对本书出版工作的鼎力支持。

由于作者水平有限,书中疏漏及不足在所难免,恳请广大读者批评指正,提出宝贵意见。

作者

2018.09

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 3D 反求基本原理	(1)
1.2 3D 反求基本流程及关键技术	(3)
1.3 3D 反求应用领域	(15)
1.4 本章小结	(17)
参考文献	(18)
第 2 章 光学三维测量的视觉几何基础	(19)
2.1 人类视觉的形成	(19)
2.2 Marr 视觉理论	(21)
2.3 相机模型	(23)
2.4 空间几何变换	(26)
2.5 视觉几何	(31)
2.6 本章小结	(34)
参考文献	(35)
第 3 章 人工标志点识别技术	(36)
3.1 人工标志点类型	(36)
3.2 人工标志点识别	(41)
3.3 人工标志点在光学三维测量中的应用	(57)
3.4 本章小结	(62)
参考文献	(62)
第 4 章 相机标定技术	(64)
4.1 标定方法概述	(64)
4.2 相机畸变模型	(66)
4.3 标定靶标	(70)
4.4 Tsai 两步法标定法	(75)
4.5 张正友平面标定法	(77)
4.6 基于近景工业摄影测量的相机标定方法	(81)
4.7 基于消隐点的相机自标定方法	(85)
4.8 本章小结	(88)
参考文献	(89)

第 5 章 近景工业摄影测量技术	(91)
5.1 近景工业摄影测量基本原理	(91)
5.2 近景工业摄影测量关键技术	(94)
5.3 典型的近景工业摄影测量系统	(106)
5.4 近景工业摄影测量技术的应用	(108)
5.5 本章小结	(120)
参考文献	(121)
第 6 章 三维激光扫描测量技术	(122)
6.1 激光	(122)
6.2 脉冲式激光测距技术	(128)
6.3 相位式激光测距技术	(131)
6.4 激光三角法测距技术	(135)
6.5 三维激光扫描技术	(140)
6.6 典型的三维激光扫描系统及其应用	(143)
6.7 本章小结	(149)
参考文献	(149)
第 7 章 光栅投影式面结构光三维测量技术	(151)
7.1 结构光编码方法	(151)
7.2 结构光三维重建	(155)
7.3 光栅投影式面结构光扫描策略	(161)
7.4 典型面结构光三维重建系统的应用	(164)
7.5 本章小结	(169)
参考文献	(169)
第 8 章 点云处理技术	(172)
8.1 点云初始化	(173)
8.2 点云配准	(178)
8.3 点云融合	(180)
8.4 点云去噪	(184)
8.5 点云采样	(186)
8.6 孔洞修补	(189)
8.7 三角化	(191)
8.8 本章小结	(193)
参考文献	(194)
第 9 章 三角网格处理技术	(198)
9.1 三角网格光顺	(198)

9.2	三角网格简化	(200)
9.3	三角网格细分	(202)
9.4	三角网格孔洞修补	(204)
9.5	重新网格化	(207)
9.6	三角网格修复	(209)
9.7	开源点云处理软件	(215)
9.8	本章小结	(217)
	参考文献	(218)
第 10 章	曲面建模技术	(224)
10.1	曲面重构	(224)
10.2	曲面品质评价	(235)
10.3	常用建模软件	(238)
10.4	本章小结	(241)
	参考文献	(242)
第 11 章	3D 反求应用案例	(243)
11.1	人体 3D 反求	(243)
11.2	3D 反求技术在大型雕塑制作中的应用	(247)
11.3	3D 反求技术在零件修复中的应用	(253)
11.4	3D 反求技术在产品质量检测中的应用	(256)
11.5	3D 反求技术在医学上的应用	(259)
11.6	本章小结	(261)

第 1 章 概 论

1.1 3D 反求基本原理

1.1.1 3D 反求技术

3D 反求技术亦称逆向工程(reverse engineering, RE)技术^[1-5]。如图 1-1 所示,3D 反求采用一定的三维反求设备或反求手段对产品实物或模型进行反求测量,获得测量数据(通常为三维离散点云数据),然后在三维逆向设计软件(如 Geomagic Studio、Imageware 等软件)或三维正向设计软件包含的逆向设计模块中重构出产品的三维 CAD 数字模型,并在此基础上进行生产加工、改型或再创新,是一个从产品到三维 CAD 数字模型再到新产品的设计过程。

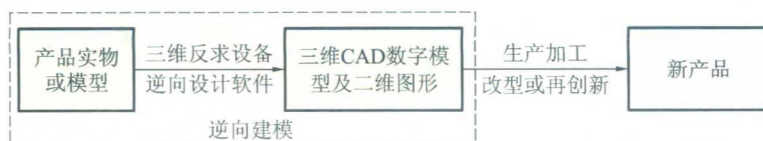


图 1-1 产品 3D 反求流程

利用 3D 反求技术,在消化、吸收先进技术的基础上,设计和开发各种新产品,可有效缩短产品开发周期,提高产品更新换代的速度,增强企业竞争力,因此发展 3D 反求技术具有重要的工程意义。据不完全统计,3D 反求技术作为吸收先进技术的一种手段,可使新产品开发周期缩短 40% 以上。以保时捷 RIVAGE 的设计制造为例,通过采用 3D 反求技术,保时捷 RIVAGE 从概念设计到新车上市仅用了 7 个月的时间。

1.1.2 3D 反求与正向设计

正向设计也称为正向工程或顺向工程(forward engineering, FE)技术^[1-5]。如图 1-2 所示,正向设计是指设计师面向市场需求,分析产品的功能描述,然后进行概念设计、总体设计和零部件设计,形成三维 CAD 数字模型及二维图形,最后制

定工艺流程并进行加工制造的过程。根据产品正向开发的流程可知,正向设计是一个从需求到二维图样再到产品的设计过程,每个零部件都有相应的设计图,并按确定的工艺文件进行加工制造。



图 1-2 产品正向设计流程

3D 反求与正向设计的区别在于:3D 反求是利用三维反求设备或手段进行逆向建模,即由产品实物或模型建立产品的三维 CAD 数字模型及二维图形;而正向设计是设计师从概念设计和功能设计出发进行正向建模,即在正向设计软件(如UG、Pro/E等)中构建出产品的三维 CAD 数字模型及二维图形,是一个从无到有的设计过程。由于3D反求与正向设计的建模过程刚好相反,二者相结合可以构成闭环的产品设计制造过程,即形成二维图样到产品再到二维图样的闭环设计过程。因此,在产品实际开发过程中,通常将3D反求和正向设计结合使用,从而大大提高新产品开发的效率。

1.1.3 3D 反求与 3D 打印

3D 打印(3D printing)技术也称为增材制造(additive manufacturing, AM)技术或快速原型(rapid prototyping, RP)技术^[3]。它以三维 CAD 数字模型(通常为 STL 格式的三角网格模型)为基础,在软件中根据工艺要求将待打印的三维 CAD 数字模型切割成一系列厚度较薄的层片,然后对各层片的轮廓信息进行处理,生成数控加工代码,并控制 3D 打印机逐层打印,最终得到产品实物。3D 打印技术基于“离散—堆积”的成形原理,将三维产品的加工过程离散成一系列二维层片的加工,一方面降低了加工制造的难度,另一方面也实现了无模制造,降低了加工成本。与传统材料加工方式相比,3D 打印技术不仅制造速度快(往往只需要几个小时到几十个小时便可以完成从设计到零件制造的全过程),而且可实现任意复杂形状零件的加工制造。此外,3D 打印机通常操作简单,用户不需任何相关技术知识都可使用,如图 1-3 所示的 M3D 公司生产的“The Micro 3D”(M3D)打印机,只需与计算机连接,然后在网络上下载或设计相应的三维 CAD 数字模型,按“打印”键,便可打印出任意复杂形状的零件。

3D 反求作为一种逆向设计技术,可以快速获取产品实物或模型的三维 CAD 数字模型,提供 3D 打印所需 STL 文件数据。3D 反求与 3D 打印相结合可以提高新产品研制的速度。在新产品研制过程中,设计师往往要根据初始设计图制作缩小比例模型(通常为油泥模型或黏土模型),然后在缩小比例模型上进行修改,修



图 1-3 M3D 打印机及部分 3D 打印产品

改后再进行测绘,重新绘制图形,最后制作等比例模型或样件,并做进一步的修改完善。如图 1-4 所示,在缩小比例模型修改完成后,可以采用 3D 反求技术进行逆向建模,快速建立缩小比例模型的三维 CAD 数字模型,并在软件中按比例放大三维 CAD 数字模型,再结合 3D 打印,快速加工出等比例的模型或样件,用于检查并发现设计中存在的问题。此外,在产品更新换代过程中,也可以采用 3D 反求技术快速建立现有产品的三维 CAD 数字模型,并在软件中进行改型设计,改型完成后通过 3D 打印加工制造出新产品,实现产品的快速更新换代。



图 1-4 3D 反求与 3D 打印相结合进行产品的快速设计与生产

1.2 3D 反求基本流程及关键技术

1.2.1 3D 反求基本流程

3D 反求主要包括三维逆向建模及产品(或实物原型)加工制造两个环节,其中逆向建模最为关键。如图 1-5 所示,逆向建模主要包括三个步骤:点云数据采集、点云数据预处理及点云数据建模。点云数据采集是指采用反求设备获取物体表面的点云数据^[4,5]。反求设备的测量视场大小有限,一次测量往往只能获得一个视角的点云数据,为了构建被测物体完整的三维 CAD 数字模型,需要移动反求设备或被测物体,从多个视角进行点云数据的采集,获得多视角点云数据。点云数据预处理是指对采集的多视角点云数据进行对齐、融合、去噪与采样等处理,去除所采集点云数据中的冗余与噪声,获得完整的、单层的、光顺的、保持细节特征的点云数据模型^[4,5]。点云数据建模是指根据预处理后的点云数据构建流形的多边形(三角形、四边形等)网格模型或 NURBS 曲面模型^[6]。

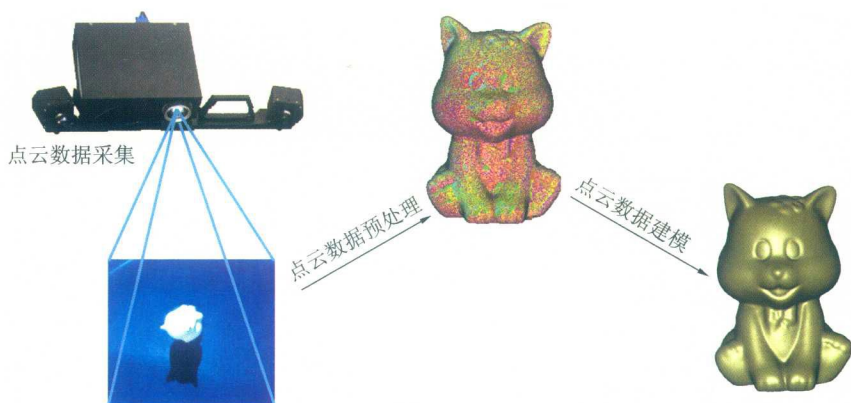


图 1-5 逆向建模基本流程

1.2.2 点云数据

点云(point cloud)数据是指采用各种反求设备采集的物体表面离散点数据的集合。每个点数据包含的基本信息是它的三维坐标(X 、 Y 、 Z 坐标)及法向量,此外,也可以包含离散点处物体表面的其他属性如颜色、光照强度、纹理特征等。通常,将使用三坐标测量机等测量设备采集的数量较少、点间距较大的点云数据称为稀疏点云数据,如图 1-6(a)所示,而将使用三维激光扫描仪或照相式扫描仪得到的数量较多、点间距较小的点云数据称为密集点云数据,如图 1-6(b)所示。

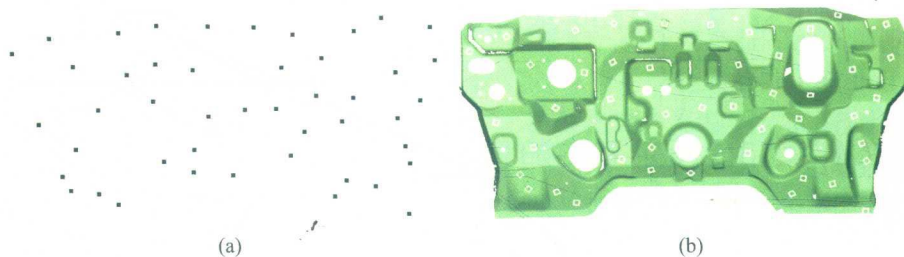


图 1-6 采集的某汽车钣金件点云数据

(a) 稀疏点云数据; (b) 密集点云数据

按照是否包含栅格线信息,点云数据又可以划分为结构化点云数据及散乱点云数据。栅格线信息即采集点云数据时的扫描线信息,一条扫描线上的点数据位于一个平面内。结构化点云数据即采集的点数据有序地位于系列栅格线上,如图 1-7(a)所示,采用激光线结构光或光栅投影式面结构光扫描设备采集的点云数据通常为结构化点云数据。散乱点云数据中点数据呈现无序分布状态,如图 1-7(b)所示。