



新世纪高等学校教材

地理科学系列教材

影像三维数字化基础教程

张吴明 朱 凌 王颢星 等 编 著

YINGXIANG SANWEI
SHUZHUA JICHU JIAOCHEN



北京师范大学出版集团

BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP

北京师范大学出版社

新世纪高等学校教材

地理科学系列教材

影像三维数字化基础教程

YINGXIANG SANWEI SHUZHUA JICHU JIAOCHENG

张吴明 朱 凌 王颢星 编 著
朱 振 谢玉玲 张孝斌



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

影像三维数字化基础教程 / 张昊明等编著. — 北京: 北京师范大学出版社, 2012.10

(新世纪高等学校教材)

ISBN 978-7-303-14804-2

I. ①影… II. ①张… III. ①三维—动画—计算机图形学—高等学校—教材 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 129481 号

营销中心电话 010-58802181 58805532
北师大出版社高等教育分社网 <http://gaojiao.bnup.com.cn>
电子邮箱 beishida168@126.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com.cn
北京新街口外大街 19 号
邮政编码: 100875

印 刷: 北京东方圣雅印刷有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 170 mm × 230 mm
印 张: 13.5
字 数: 242 千字
版 次: 2012 年 10 月第 1 版
印 次: 2012 年 10 月第 1 次印刷
定 价: 22.00 元

策划编辑: 胡廷兰 责任编辑: 胡廷兰
美术编辑: 毛 佳 装帧设计: 毛 佳
责任校对: 李 菡 责任印制: 孙文凯

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

内容简介

本书是影像三维数字化的基础教程，主要讲述基于影像的三维信息获取的基本原理与算法，也即如何从二维照片中提取与物体位置、尺寸等相关的几何信息(三维信息)。内容包括：三维数字化定义与应用概述；常见三维信息获取的方法介绍及基于影像的三维信息获取概述；数字影像及相关软、硬件基础；基于影像的三维信息获取基本原理与算法(几何三维重建和图像处理)；三维数字化综合应用示例。

本书的重点不是算法的数学推导和编程实现，也不是展示最新的研究成果，而是让读者从整体上理解基于影像的三维信息获取的基本原理和概念，并通过对算法进行图文并茂的几何解释，让读者更形象地掌握基于影像的三维信息获取的基本算法。希望能够达到令读者轻松入门、对三维信息数字化技术逐渐产生兴趣的目的。

本书选择 SketchUp、PhotoModeler Lite 和 FreeMat 三种免费软件分别作为几何建模、图像建模和科学计算工具，结合免费的 GIS 软件 Google Earth，构建了一个易于获得的、低成本(无成本)的、完整的三维信息数字化教学平台，使得三维信息数字化课程易于在各院校单位开展，更能够提高读者的学习兴趣。

本书主要面向的读者是非计算机视觉和摄影测量专业的本科生、研究生，要求具有大学理工科微积分、线性代数等数学知识，具备一定的计算机操作基础，对数字图像获取和处理有一定的了解。本书可作为与三维信息获取有关专业学生的教材和参考书，也可作为相关领域科研工作者的入门读物。

前言

学习知识时，尤其在学习陌生领域的相关知识时，学习兴趣和主动学习意愿是至关重要的。从学生的角度来看，“不爱学、不想学”往往是因为觉得课程知识与其日常生活及今后工作没有太多联系，认为学了也没有用；同时，课程内容难度较大，而相关基础又较为薄弱，因此必然会产生一定的“畏难情绪”。就三维信息获取而言，本书面向的对象是非计算机视觉和摄影测量专业的学生及其他三维信息获取技术的初学者。由于刚刚接触这一全新领域，他们的三维空间想象力较为有限，并且对相关术语和概念也较为陌生。针对上述问题，本书或选择影视特效等学生可能会感兴趣的领域，或结合生活实际，利用软件作出原理性示范，增强学生的学习兴趣 and 自信心，同时培养学生的三维空间想象力和动手能力。

教材由5章组成，第1章为绪论，第2章为预备知识，第3章、第4章是教材的核心内容，第5章为综合应用示例。

第1章绪论。给出三维数字化定义，列举三维数字化应用领域、三维数字化设备及方法，并从视觉空间知觉的角度讲解了由二维影像中提取三维信息的基本原理。通过本章学习，读者将对三维数字化尤其是影像三维数字化有初步的了解。

第2章预备知识。本章依次介绍了几何建模软件 SketchUp、图像建模软件 PhotoModeler Lite、数字影像获取硬件、数字影像处理基础，以及科学计算与可视化软件 FreeMat。通过这些预备知识的学习，读者将能够更容易、更深入地理解后续课程内容。

第3章基于影像的三维信息获取原理——几何重建。主

要讲解如何通过相机(像方)和物体(物方)之间的几何关系确定物体的位置、姿态、形状、大小等信息。通过本章学习,读者将掌握影像三维重建的原理和基本算法。

第4章基于影像的三维信息获取原理——图像处理。主要讲解自动影像特征提取和匹配的原理与算法。通过本章学习,结合第3章的内容,读者将了解复杂物体形面的影像三维数字化方法以及提高效率和自动化水平的途径。

第5章综合应用示例。本章以两个影像三维数字化的科研项目为例,展示了教材中各种算法在实践中的作用与用法,以此对之前的知识内容进行总结。

在此,对书中采用的部分素材和内容来源致以诚挚的谢意。一方面,三维信息数字化是一个较新的概念,正处于研究和发展阶段,没有较为系统的理论体系,因此教材中的定义多来自互联网,如 Wiki 百科和百度百科等。另一方面,三维信息数字化涉及的学科和应用领域比较广泛,作者由于自身水平和研究领域有限,不可能面面俱到,因此教材中部分素材来自互联网,如相关厂家和公司的产品和应用领域介绍等。在此一并感谢。

本教材是面向非计算机视觉和摄影测量专业的影像三维数字化教材编写的一次探索与尝试,在内容选择、设置和阐述等方面难免存在缺憾,敬请读者提出宝贵意见、建议。希望本教材的出版能够抛砖引玉,让面向非计算机视觉和摄影测量专业的三维信息获取受到更多的关注,能够出现更多、更好的教材和读物,让更多的人了解和掌握三维数字化技术。

目 录

第1章 绪论 /1

- 1.1 三维数字化定义与应用领域 1
- 1.2 三维信息获取方法及分类 6
- 1.3 基于影像的三维信息获取的心理学
解释 11
- 思考与练习 15

第2章 预备知识 /16

- 2.1 几何建模软件 17
- 2.2 图像建模软件 33
- 2.3 数字影像获取硬件 40
- 2.4 数字影像处理基础 45
- 2.5 科学计算与可视化软件 59
- 思考与练习 85

第3章 基于影像的三维信息获取原理 ——几何重建 /86

- 3.1 基础知识 86
- 3.2 坐标系与坐标转换 89
- 3.3 三维重建流程 99
- 3.4 共线条件方程 104
- 3.5 前方交会 114
- 3.6 空间后方交会 118
- 3.7 相对定向 127
- 3.8 绝对定向 146

思考与练习	154
-------------	-----

第4章 基于影像的三维信息获取原理——图像处理 /155

4.1 影像自动特征提取与匹配概述	155
4.2 点特征提取方法	156
4.3 线特征提取方法	161
4.4 常规影像匹配方法	170
4.5 提高影像自动匹配速度与精度的方法	173
4.6 尺度不变特征变换算法	185
思考与练习	194

第5章 综合应用示例 /195

5.1 概述	195
5.2 玉米三维重建	196
5.3 电力巡线	200
思考与练习	203

参考文献 /204

第1章 绪论

本章将介绍三维数字化定义与应用领域、三维信息获取方法及分类和基于影像的三维信息获取的心理学解释。

1.1 三维数字化定义与应用领域

1.1.1 定义

提到三维数字化(three-dimensional digitization 或 3D digitization), 首先要了解什么是数字化。数字化(digitization)的提出与计算机的发展密不可分, 我们知道计算机只能处理二进制数 0 和 1, 它“将许多复杂多变的信息转变为可以度量的数字、数据, 再以这些数字、数据建立起适当的数字化模型, 把它们转变为一系列二进制代码引入计算机内部, 进行统一处理, 这就是数字化的基本过程”, 也即模拟信号转换为数字信号的处理过程。

由以上定义可知, 现实世界中的各种信息(如图像、视频、声音、文档等)只有经过数字化才能为计算机所存储和处理。三维数字化从字面理解也是一个数字化的过程, 只是数字化的对象是特定的三维信息, 包括物体的位置、形状、大小、姿态等几何信息, 以及颜色、材质等属性信息, 本书中的三维信息特指三维几何信息。

“三维数字化技术就是指三维采集、三维显示、三维输出及与此相关的计算机技术。”本书中的三维数字化特指三维采集(或者称做三维信息获取), 也即通过一定的技术手段将现实世界中的三维信息采集到计算机中。本书将重点讲述影像三维信息的获取方法, 即如何从二维照片中提取与物体位置和尺寸相关的三维几何信息。如图 1-1-1(a)所示, 从若干个角度拍摄的鼎的相片中, 可以得到图 1-1-1(b)中鼎的计算机三维模型。

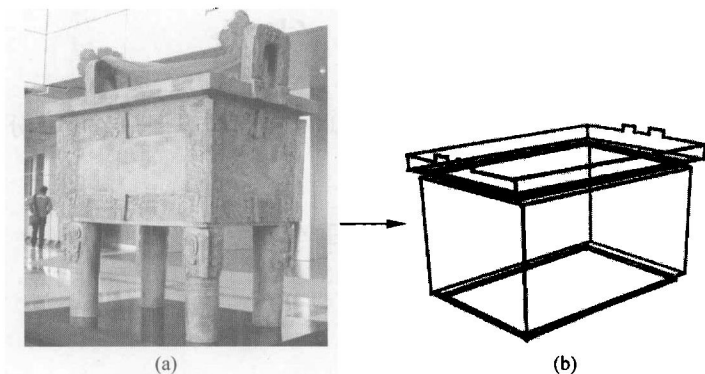


图 1-1-1 从二维照片提取物体三维几何信息的示意图

1.1.2 应用领域

初次接触三维数字化概念的读者一定会有这样的疑问：学习三维数字化有什么用？可以应用到哪些领域？能够解决什么实际问题？三维数字化技术的应用领域非常广泛。可以说凡是与三维信息有关的领域，大到星球测绘小到显微世界，都可能是三维数字化技术的用武之地。下面列举几个三维数字化技术的应用领域，希望通过这些具体的应用范例起到抛砖引玉的作用，激发读者对三维数字化的兴趣和好奇心，更主动地投入后续课程内容的学习。

1.1.2.1 工业

三维数字化可用于工业领域中的反求工程和产品检测。

通常，正向工业设计首先在计算机中画出产品的计算机辅助设计(computer-aided design, CAD)图纸，然后根据图纸生产模具，最后利用模具生成最终产品。反求工程(reverse engineering)则与之相反，首先通过三维数字化的方法对最终或中间产品的实物进行三维扫描，形成计算机三维模型，然后在计算机中对此三维模型进行重新设计或改进，再由修改后的图纸重新制造模具和产品。反求工程可用于产品设计和改进，如汽车外形曲面和手机外壳等。

工业产品合格与否，需要进行检测，例如工业零件的外形检测。采用三维信息数字方法，可以将产品的形状扫描到计算机中形成待检验的三维模型或CAD图纸，与设计三维模型或CAD图纸进行对比即可知道产品与设计的一致性程度，结合二维或三维显示可以将差别形象地表示出来。

1.1.2.2 服装

通过快速三维人体扫描技术可以获得毫米或厘米级精度的人体三维模型,进而在服装 CAD 中进行尺寸量测和服装设计,真正做到“量体裁衣”。

1.1.2.3 医学

与在服装领域的应用类似,整个人体或某些部位三维扫描后的模型也可应用在医学领域。例如,可以根据这些三维模型进行医学仿真和手术方案设计,并可使整个手术过程可视化。图 1-1-2 是人脸三维点云,可用于整形。



图 1-1-2 面部三维点云

1.1.2.4 公安

无论刑事案件侦破还是交通事故鉴定,往往都需要对现场进行勘察。借助三维数字化技术可以将现场三维环境以及事故车辆和受害人所在位置等信息采集到计算机中,实现三维现场存档,在交通事故 CAD 软件和犯罪现场 CAD 软件的辅助下,可实现在计算机重建的虚拟场景中进行勘察和量测,并可以提高测量精度,这也使重复勘察成为可能。

1.1.2.5 影视

影视特效是三维数字化的一个重要的应用领域。一般过程是首先从连续视频中进行真实三维场景恢复重建,然后将背景前的场景或三维建模软件制作的三维模型与真实三维场景合成,达到以假乱真的效果。

1.1.2.6 游戏

目前,游戏从二维过渡到三维,无论格斗、赛车,还是球类运动,甚至角色扮演类或网络游戏的场景和人物都多为三维。三维数字化技术可以用于静态三维场景和三维模型的建立,也可以通过动作捕捉(motion capture)技术捕获真人的运动状态,进而生成动态的游戏人物。此外,还能够利用“三维摄像头”等硬件(如微软的 Kinect)对游戏进行三维控制,可以说不但游戏场景进入了三维时代,游戏的操作也逐渐进入了三维时代,这些都是三维数字化技术在游戏领域的具体应用。

1.1.2.7 文物保护

三维数字化技术在文物保护领域也大有可为(图 1-1-3)。一方面,可以将文物三维数字化后的数据进行永久保存,用于后续的文物研究和修复;另一方

面,也可以将文物三维模型结合三维虚拟场景建立虚拟博物馆,并可供更多的人虚拟游览。

1.1.2.8 建筑

当前数字城市概念方兴未艾,建立数字城市的一项重要任务就是获取建筑物信息并建立三维模型。建筑物三维模型不但可用于漫游,而且可以进行尺寸量测,辅助城市规划,如图 1-1-4 所示。



图 1-1-3 将三维数字化技术用于文物保护

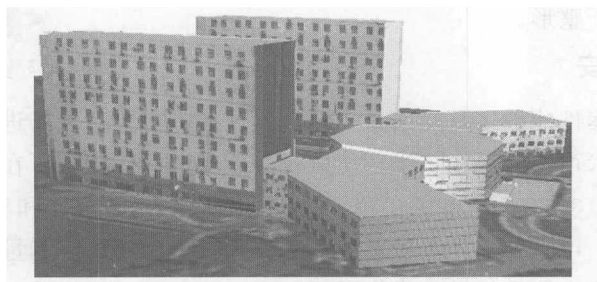


图 1-1-4 建筑物三维模型示例

1.1.2.9 测绘

三维数字化技术在测绘领域的应用较为成熟,例如利用飞机平台或卫星平台获取影像,通过摄影测量(photogrammetry)处理获得数字地面模型(digital elevation model, DEM)和正射影像图(ortho-image),进而制作三维地图。图 1-1-5 为 Google Earth 中的卫星影像地图,可在该地图上进行位置量测和地物标记。图 1-1-6 为我国“嫦娥一号”探月卫星搭载的线阵相机所拍摄的照片经影像三维数字化处理后获得的月球“万户撞击坑”地形图。



图 1-1-5 Google Earth 中的卫星影像地图示例

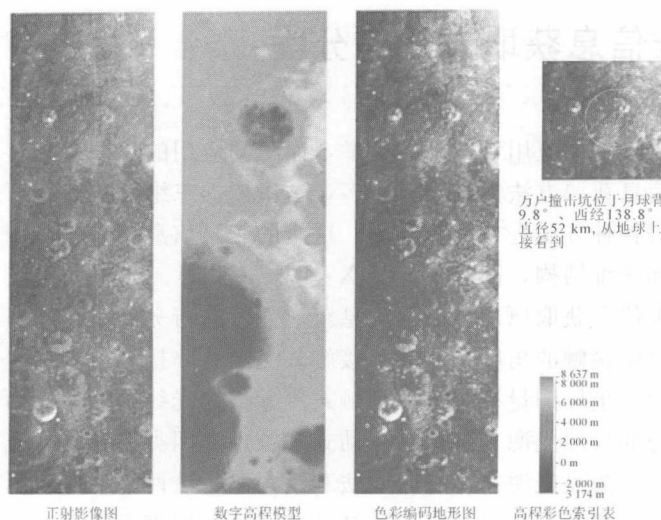


图 1-1-6 月球的万户撞击坑

1.1.2.10 农业

三维数字化技术用于农业，可以获得作物在不同生长期的三维模型，提高虚拟农业和精准农业的水平。如图 1-1-7 所示，从(a)(b)所示的玉米照片中可提取出(c)所示的玉米三维模型，并可进一步在三维模型上量测叶面积等结构参数，还可用于遥感产品验证和遥感模型研究。

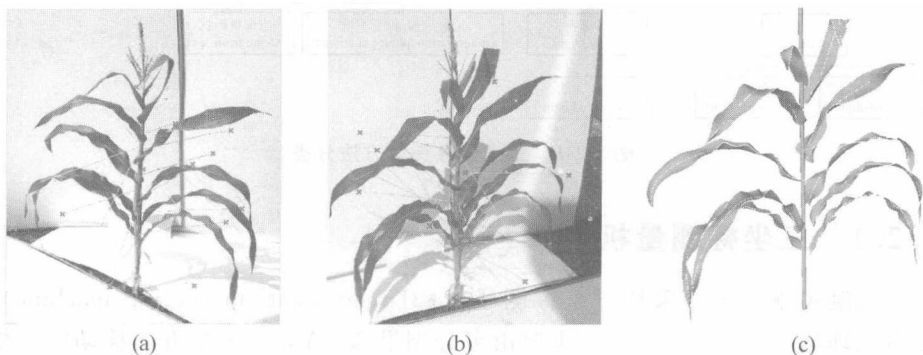


图 1-1-7 通过影像三维数字化重建玉米三维模型

1.2 三维信息获取方法及分类

三维数字化技术的应用领域不胜枚举，而不同应用的需求又千差万别，与之相应的三维信息获取方法也是种类繁多，这里依据三维信息获取原理进行粗略的分类，并对各种方法进行简要介绍。这里的三维信息获取特指物体外部形貌，不包括内部三维结构，因此不涉及 X 射线、CT 等。

可根据三维信息获取原理对三维信息获取方法进行分类(图 1-2-1)。首先，从是否与被测物体接触的角度可以分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量的主要设备为三坐标测量机，而非接触式测量根据光线是来自人为构造的光源还是环境本身的自然光源又可分为主动式和被动式两类。主动式光源有激光和可见光的区别：激光光源有飞行时间法和三角测量法两种手段；可见光光源主要有结构光法。使用环境自然光源的被动式方法随原理不同又可分为立体视觉/摄影测量和从 X 恢复形状两大类。下面进一步介绍不同三维测量方法的原理和主要设备。

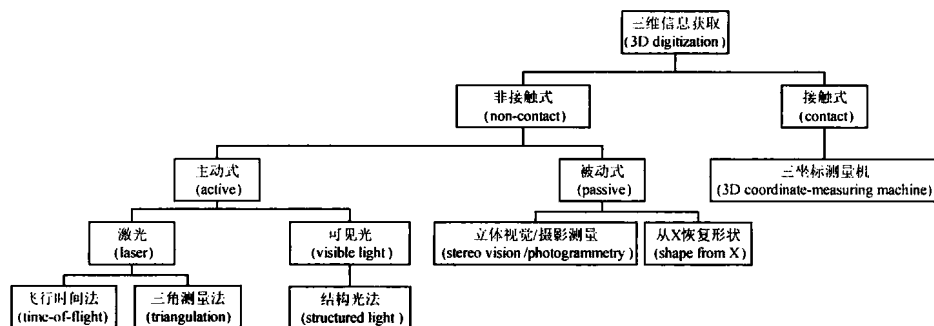


图 1-2-1 三维信息获取方法分类

1.2.1 三坐标测量机

接触式测量主要采用三坐标测量机(3D coordinate-measuring machine)，测量原理如图 1-2-2(a)所示，主要由可分别沿 X，Y，Z 三个方向移动的三根轴以及可旋转的探头组成。其工作示意图如图 1-2-2(b)所示，根据三根轴的移动量以及探头的旋转角度，可以确定与探头相接触的物体表面点的三维坐标(三维坐标表示在与三坐标测量机相关联的坐标系内)，触碰物体表面的多个点即可将物体的大致三维形状采集到计算机中。

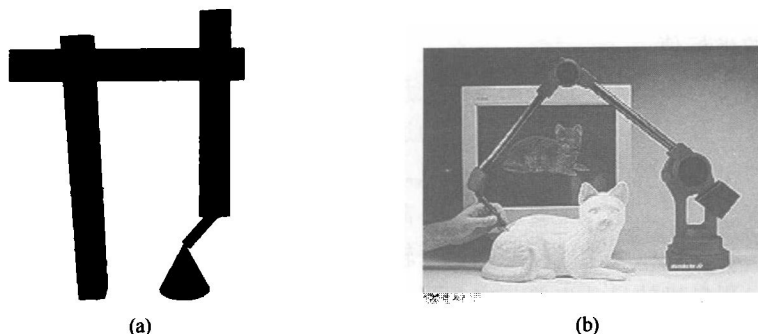


图 1-2-2 三坐标测量机原理图及工作示意图

三坐标测量机采集到计算机中的三维数据是大量离散的三维点，称为点云(point clouds)。点云是多数三维信息获取设备输出的最基础的三维数据，可以从图 1-2-3 中得到对点云的直观认识。其中，(a) 为渲染后的三维表面模型；(b) 为叠加了点云的三维表面模型，可清楚看到大量离散的三维坐标点分布于物体表面上，三坐标测量机接触物体的次数越多，点云越密集，数量越大，也更能反映物体的细节；(c) 为头部放大图，该图去掉了作为背景的三维表面模型，仅保留点云。

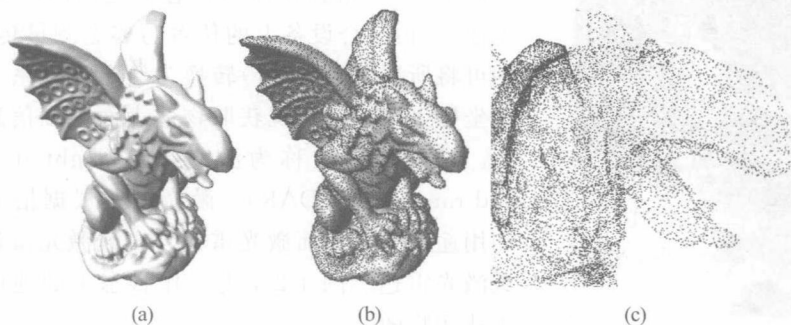


图 1-2-3 点云示例图

三坐标测量机常用的数据采集方式有触发式和连续式两种。

(1) 触发式数据采集。采样头的探针每次接触模型表面，就采集轮廓的一个数据，然后再横向移动一个间距，从而采集相邻的轮廓数据，最后构筑整个表面的线框模型。触发式数据采集的速度较低(每秒一点至几点)。早期的三坐标测量仪大都是这一类。其精度可达 $0.5\ \mu\text{m}$ 。

(2) 连续式数据采集。近年来检测技术发展很快，出现了称做高速扫描机的连续式数据采集系统。即采样头的探针沿着模型表面以某一切向速度移动，

在这一过程中就会产生对应各坐标偏移量的电流或电压信号，并可将其转换成对应点的坐标值。

为避免因探头和物体接触发生变形而带来误差，三坐标测量机的探头(测针)通常用红宝石制造，并且机械结构的运动和测量也相当精确，因此三坐标测量机可以达到很高的精度，通常为微米级。但随之而来的问题是机械结构复杂，成本和价格较高，对工作环境要求高，必需防震、防灰、恒温等。此外，它的扫描数字化速度受到机械运动的限制，速度较慢，效率较低；且当测量如汽车等大尺寸物体时，测量机的尺寸也要与之相当，因此其应用范围比较受限。

三坐标测量机最大的缺点是由于测量要求探头与实物接触，不可避免地会在一定程度上造成被测试件的变形，因而不适合柔软实物的测量，也无法测量探头不能触及的表面。为解决这个问题，各种非接触三维形面测量方法应运而生，下面将介绍几种典型的非接触测量方法。

1.2.2 飞行时间法

飞行时间法(time-of-flight)激光测距的原理非常简单，设备发出激光脉冲，经物体反射后由传感器接收，记录脉冲从发出到返回的飞行时间 t ，则可

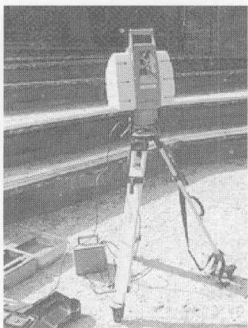


图 1-2-4 工作状态下的地面
激光雷达实物图

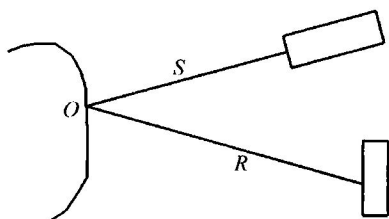
根据 $s=ct/2$ 得到物体与传感器之间的距离(c 为光速)。再结合设备上的位置与姿态测量传感器，则可将所测距离(标量)转换为给定坐标系下的三维坐标(矢量)，实现获取物体表面三维信息的目的。这种设备被称为激光雷达(light detection and ranging, LIDAR)。激光雷达根据搭载平台和用途可分为地面激光雷达、车载激光雷达和机载激光雷达。图 1-2-4 为工作状态下的地面激光雷达实物图。

基于飞行时间法的激光雷达的优点是三维信息获取速度快，测量距离可达几百米甚至几千米；缺点是精度相对较低，为毫米或厘米级。其主要用于地形、建筑物等测量领域。商品化激光雷达多为逐点测量方式，但目前已经出现了基于飞行时间法的面阵成像多点同时测量的设备，其可能打开新的应用领域。

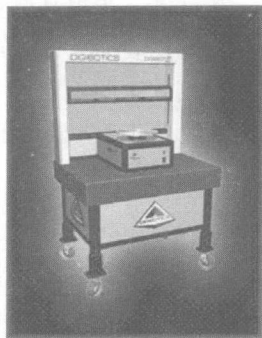
1.2.3 三角测量法

三角测量法(triangulation)同样利用激光进行三维信息获取，但与飞行时

间法原理不同,三角测量法是利用激光发射器、激光接收器以及物体之间几何上的三角关系确定物体表面三维坐标的,原理如图 1-2-5(a)所示。已知激光发射器发出的光线 S 和激光接收器接收到的光线 R , 则两条直线 S 和 R 相交即可确定物体表面一点 O 的位置, 也即其空间三维坐标。图 1-2-5(b)为一种基于激光三角测量原理的设备实物图。



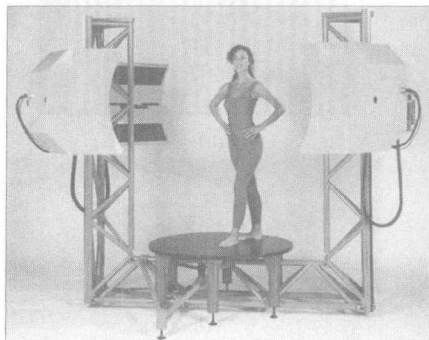
(a)



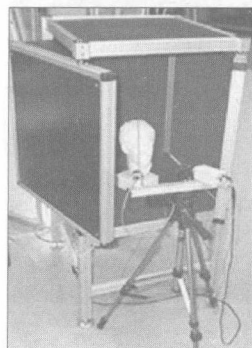
(b)

图 1-2-5 激光三角测量原理及实物图

激光三角测量的优点是不需要接触被测物体, 而且测量精度较高, 与接触式三坐标测量机的精度相当, 可以用激光三角测量探头取代接触式三坐标测量机的红宝石探头, 从而实现非接触式的三坐标测量机。激光三角测量由于是逐点测量, 其缺点是测量效率低。为此, 有厂家开发了新设备, 用激光线扫描取代激光点扫描, 从而提高了三维数据获取效率。图 1-2-6 为一种人体线激光扫描设备(a)和一种小物件线激光扫描设备(b)。



(a)



(b)

图 1-2-6 线激光扫描设备实物图