



北京建筑大学学术著作出版基金资助出版

# 地面激光雷达与摄影测量 三维重建

王晏民 黄明 王国利 等著 ■

非外借



科学出版社

北京建筑大学学术著作出版基金资助出版

# 地面激光雷达与摄影测量 三维重建

王晏民 黄明 王国利 等著



科学出版社

## 内 容 简 介

三维建模在文化遗产数字化保护、智慧城市建设与管理、建筑全生命周期管理、大型复杂钢结构建筑物建造、大型工业产品的生产等行业中的需求越来越迫切,激光雷达和摄影测量是最有效的三维数据获取手段,但单独使用均存在不可避免的缺陷。激光雷达与摄影测量三维重建的目的在于将二者有机结合,取长补短,实现复杂场景和对象的精细三维重建。本书系统介绍激光雷达点云获取、摄影测量影像匹配及二者配准融合的基本原理与方法,进一步介绍点云分割、几何建模与纹理建模的一般方法及三维重建软件的基本功能,最后给出典型的工程应用实例。

本书可作为工程测量、摄影测量、三维地理信息系统相关专业的本科教材,也可作为计算机图形学领域的研究开发人员、建筑遗产数字化保护的工程技术人员、相关专业教师和研究生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

地面激光雷达与摄影测量三维重建/王晏民,黄明,王国利等著.  
—北京:科学出版社,2018.9

ISBN 978-7-03-058160-0

I. ①地… II. ①王… ②黄… ③王… III. ①地面雷达—激光雷达—地面摄影测量 IV. ①P232

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第140009号

责任编辑:王彦刚 王会明/责任校对:马英菊  
责任印制:吕春珉/封面设计:东方人华

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2018年9月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:355 000

定价:56.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62138978-2016 (BA02)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

## 前 言

20 世纪中后期, 三维激光扫描技术作为一种快速实景复制技术, 是测绘领域继全球定位系统技术之后的又一次技术革新, 它通过全景化的快速测量方法获取高分辨率、精细的地理空间对象表面的三维点云数据, 为建立精细的三维实体模型提供了必备的数据基础。从应用领域来看, 文化遗产数字化保护、智慧城市建设和管理、建筑全生命周期管理、大型复杂钢结构建筑物建造、大型工业产品的生产等行业对精细三维模型的需求越来越强烈, 给测绘地理信息技术提出了新的挑战。

目前, 激光雷达与摄影测量是最有效的三维数据获取手段, 但单独使用均存在不可避免的缺陷。例如, 激光点云边面特征信息明显, 而边缘及角点信息不明显, 摄影测量影像信息则正好相反。此外, 三维激光扫描受作业环境的影响, 不可避免地会出现扫描漏洞、数据疏密不一、精度不足等数据异常现象。本书将二者有机结合, 取长补短, 详细阐述激光雷达与摄影测量联合建模的原理与方法。

全书共分 9 章, 内容如下:

第 1 章 绪论, 介绍激光雷达测量、摄影测量的概念、原理及数据成果特点, 并进一步阐述从两类数据实现三维建模的异同。

第 2 章 激光雷达点云, 主要介绍激光雷达测量系统的组成及数据获取方式, 在实际施测中控制网的布设及扫描方案的设计, 以及点云噪声处理、平滑的基本实现方法。

第 3 章 摄影测量, 首先介绍摄影测量影像获取的方法, 然后介绍影像匹配的算法, 最后介绍从影像生成点云的方法。

第 4 章 三维点云配准, 从配准概念、原理入手, 重点阐述基于几何特征配准、迭代最近点配准、多站整体配准及自动配准的原理与方法, 最后介绍影像点云和激光点云两类点云配准的方法。

第 5 章 点云融合与分割, 主要介绍去冗、抽稀、简化的概念、原理与常见方法, 以及基于特征提取的点云分割方法。

第 6 章 几何重建, 重点阐述几何重建的概念、规则几何体基本体素、从点云自动提取旋转体的方法、不规则体的三角网构建方法, 以及结构实体几何模型的构造方法, 最后介绍基于深度图像建模的方法。

第 7 章 纹理重建, 从摄影测量角度介绍影像定向、点云与影像纹理映射的方法, 基于深度图像的纹理映射方法, 以及多张影像纹理映射的接边与纹理镶嵌的处理方法。

第 8 章 激光雷达与摄影测量三维重建软件, 设计高内聚、低耦合的激光雷达与摄影测量三维重建系统, 包括数据库管理、数据预处理、点云配准、三维几何重建和纹理重建及可视化平台、数据编辑、影像管理等。

第 9 章 工程应用, 介绍激光雷达与三维重建技术在古建筑与现代建筑等领域的工



程应用。

另外，本书中的部分图片增加了二维码，学生只需扫一扫书中的二维码，即可浏览彩图，从而更直观地了解相关内容。

本书研究成果受以下项目资助：北京市教育委员会科技计划一般项目“三维精细CSG-Brep模型拓扑关系的研究”（2016子项目49）；国家行业公益性科研专项“多源遥感数据精细三维全景建模技术与系统——LiDAR点云数据自动处理技术与多源数据联合精细建模关键技术研究”（项目编号：201512009）；973项目“文化遗产数字化保护的理论与方法——复杂几何对象高精度数字化重建理论与方法”（项目编号：2012CB725300）；国家测绘局科技司科技发展项目“基于深度图像二三维集成空间数据模型的研究”（项目编号：2013-CH19）；北京市自然科学基金项目“古建筑精细化测绘关键技术研究”（项目编号：8142014）；北京市教育委员会科技发展计划项目面上项目（项目编号：KM201510016016, KM201810016013）；北京建筑大学科研基金（项目编号：KYJJ201724）；北京市属高校基本科研业务费项目（项目编号：X18050）。

本书根据作者近年来主持或参与的科研项目所取得的研究成果编著而成，在完成这些科研项目的过程中，代表性建筑与古建筑数据库教育部工程中心、北京建筑大学测绘与城市空间信息学院遗产数字化研究所的许多老师和硕士研究生做出了贡献，值此专著出版之际，谨向他们表示衷心的感谢。

本书第1、2章由王晏民、王国利、张瑞菊、胡春梅联合撰写，第3、7章由胡春梅撰写，第4、9章由王国利撰写，第5、8章由黄明撰写，第6章由黄明、张瑞菊、郭明、危双丰联合撰写，全书由王晏民统稿。

由于地面三维激光技术的不断发展，而作者受理论知识和实践工程经验的限制，因此本书所涉及的理论与关键技术及核心算法难免会有不妥和不足之处，甚至理论的不完备在所难免，恳请专家学者批评指正。

王晏民

2018年3月

于北京

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 激光雷达测量的概念	1
1.2 摄影测量的概念	6
1.3 多源数据三维重建	15
1.4 激光雷达与摄影测量三维重建的比较	18
1.5 地面激光雷达与摄影测量三维重建的应用领域	20
思考题	21
第 2 章 激光雷达点云	22
2.1 地面激光雷达测量系统	22
2.2 地面激光雷达测量数据获取	23
2.3 点云去噪	26
2.4 点云平滑	28
2.5 激光雷达测量数据	33
思考题	34
第 3 章 摄影测量	35
3.1 影像获取	35
3.2 影像匹配	42
3.3 影像点云	69
3.4 摄影数据	76
思考题	77
第 4 章 三维点云配准	78
4.1 激光点云配准的概念	78
4.2 基于几何特征配准	80
4.3 迭代最近点配准	85
4.4 多站整体配准	87
4.5 激光雷达点云自动配准	91
4.6 影像点云与激光点云配准	96
思考题	98
第 5 章 点云融合与分割	99
5.1 点云去冗	99
5.2 点云抽稀	101
5.3 点云简化	106

5.4 点云分割.....	110
思考题.....	115
<b>第6章 几何重建.....</b>	<b>116</b>
6.1 几何重建的概念.....	116
6.2 基本体素.....	116
6.3 旋转体.....	118
6.4 不规则三角网.....	129
6.5 结构实体几何.....	142
6.6 深度图像.....	154
思考题.....	164
<b>第7章 纹理重建.....</b>	<b>166</b>
7.1 影像定向.....	166
7.2 点云纹理.....	169
7.3 基于深度图像的纹理映射.....	171
7.4 纹理接边.....	173
7.5 纹理镶嵌.....	176
思考题.....	179
<b>第8章 激光雷达与摄影测量三维重建软件.....</b>	<b>180</b>
8.1 软件总体构架.....	180
8.2 总体功能设计.....	181
8.3 数据管理与可视化.....	183
8.4 软件界面设计.....	198
思考题.....	206
<b>第9章 工程应用.....</b>	<b>207</b>
9.1 国家体育场安装数字化测量与三维建模.....	207
9.2 天津西站站房工程三维建模.....	213
9.3 故宫古建筑三维重建.....	221
9.4 后母戊鼎精细三维重建.....	231
思考题.....	238
<b>参考文献.....</b>	<b>239</b>

# 第 1 章 绪 论

地面激光雷达与摄影测量是目前空间目标三维数字化的两种主要前沿手段，基于两种数据的三维重建就是在两种数据相互融合的基础上，对融合数据进行几何上及纹理上的三维重建。本章作为全书内容的纲领，主要介绍两种三维数据获取手段的概念和发展趋势、激光雷达点云与摄影测量数据的特点及对比，以及地面激光雷达与摄影测量三维重建的应用领域等。本章学习重点是三维数据获取技术的发展，以及采用三维数据进行三维重建的目的及特点等内容，从宏观上了解三维测量的技术特点及其优势。

## 1.1 激光雷达测量的概念

激光雷达是以发射激光束探测目标的位置、速度等特征量的雷达系统（熊辉丰，1994），工作波段在红外线与可见光波段，一般由激光发射机、光学接收机、转台和信息处理系统构成。

本书中的激光雷达（light detection and ranging, LiDAR）是近年来发展起来的一项高新测量技术，可全天候、快速、直接、高精度地采集测量目标的三维几何信息，部分设备还能获取到目标的反射强度信息。

激光雷达最初只是用于一维测距，到 20 世纪末，激光雷达测量技术获得了巨大的发展，实现了激光测距从一维测距向二维、三维扫描发展，使测量数据（距离和角度）由传统人工单点获取变为连续自动获取数据。特别是近些年来，欧、美、加、日等国家和地区几十家高新技术公司开展了对三维激光扫描技术的研究开发，激光雷达硬件设备（三维激光扫描仪）发展迅速，在精度、速度、易操作性、轻便、抗干扰能力等性能方面逐步提升，而价格则逐步下降，这些因素都使激光雷达测量技术逐步成为快速获取空间数据的主要方式之一。到 20 世纪 90 年代中后期，三维激光扫描仪已形成了颇具规模的产业，其产品精度、速度、易操作性等方面达到了很高的水平。国内在激光雷达硬件的研究起步于 20 世纪 90 年代中期，稍落后于西方。近些年来，三维激光扫描技术在我国已经逐步实现国产化，杭州中科天维科技有限公司及广州中海达卫星导航技术股份有限公司等都推出了国产激光扫描仪。

激光雷达测量技术的出现和发展，是测量技术的重大突破，掀起了一场立体测量技术的新革命。它克服了传统测量技术的局限性，能够对立体实物进行扫描，将立体世界的信息快速地转换成计算机可以处理的数据。它速度快、实时性强、精度高、主动性强、具有全数字特征、性能更强，可以极大地降低成本、节约时间。近年来，随着三维激光扫描技术在测量精度、空间解析度等方面的进步和价格的降低，以及计算机三维数据处理、计算机图形学、空间三维可视化等相关技术的发展和空间三维场



景模型的迫切需求, 三维激光扫描测量技术越来越多地用于获取被测物体表面的空间三维信息, 其应用领域日益广泛。

### 1.1.1 激光雷达基本原理

普通雷达一般放在飞机、卫星或山顶上, 扫描的范围比较大, 精度比较低, 一般用于小比例尺测图和目标搜寻。人们通常把大范围、远距离的三维激光扫描看成激光雷达, 而把近距离、小范围的激光雷达称为三维激光扫描, 这是一种误解。实际上, 普通雷达是无线电三维扫描, 激光雷达是激光三维扫描, 不存在距离远近和范围大小的区别。

激光雷达获取数据的仪器称为三维激光扫描仪, 该仪器利用激光作为信号源, 对三维目标按照一定的分辨率进行扫描。激光雷达测量由测距和测角两部分组成: 在测距上, 利用激光探测回波技术获取激光往返的时间差或相位差等, 进而计算目标至扫描中心的距离  $S$ ; 在测角上, 由精密时钟控制编码器同步测量每个激光信号发射瞬间仪器的横向扫描角度观测值  $\alpha$  和纵向扫描角度观测值  $\theta$ 。可由空间三维几何关系通过一个线元素和两个角元素计算空间点位的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标, 空间点位的关系如图 1.1 所示。

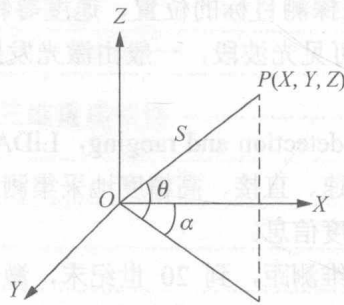


图 1.1 坐标测量原理

空间点位的计算模型如下:

$$\begin{cases} X = S \cos \theta \cos \alpha \\ Y = S \cos \theta \sin \alpha \\ Z = S \sin \theta \end{cases} \quad (1-1)$$

还有少部分激光扫描仪采用激光发射和接收两个装置与目标点构成的角度来测量距离, 这类激光扫描仪主要用于短距离目标测量。激光扫描系统一般使用仪器自己定义的坐标系, 部分扫描仪器可以通过输入控制坐标来设定仪器坐标系 (如 Leica 的 ScanStation 系列地面激光扫描仪)。

基于不同的测距原理, 地面激光扫描仪存在较大差异, 主流的地面激光扫描仪主要包含 3 种测距原理, 即基于脉冲飞行时间差测距原理、基于相位差测距原理、基于三角测距原理。

#### 1. 基于脉冲飞行时间差测距原理

此类三维激光扫描仪利用激光脉冲发射器周期地驱动一个激光二极管向物体发射

近红外波长的激光束，然后由接收器接收目标表面反射信号，利用一稳定的石英时钟对发射与接收时间差计数，确定发射的激光光波从扫描中心至被测目标往返传播一次需要的时间  $t$ ，又因为光的速度  $c$  是常量，所以可由式 (1-2) 计算被测目标至扫描中心的距离  $S$ ，精密时钟控制编码器同步测量每个激光脉冲横向扫描角度观测值  $\alpha$  和纵向扫描角度观测值  $\theta$  (图 1.2)。

$$S = \frac{1}{2}ct \quad (1-2)$$

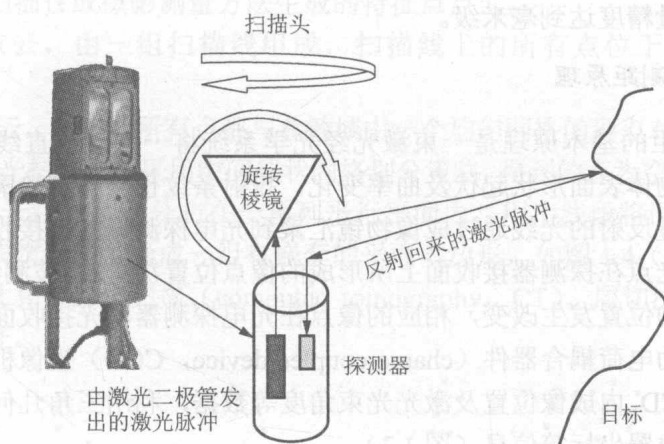


图 1.2 激光雷达扫描原理

由于采用的是脉冲式的激光源，通过一些技术可以很容易得到高功率的脉冲，所以飞行时间法适用于超长距离的距离测量。其测量精度主要受到脉冲计数器的工作频率与激光源脉冲宽度的限制，精度可以达到米级。

## 2. 基于相位差测距原理

此类系统将发射光波的光强调制成正弦波的形式，通过检测调幅光波发射和接收的相位移来获取距离信息。正弦光波振荡一个周期的相位移是  $2\pi$ ，发射的正弦光波经过从扫描中心至被测目标的距离后的相位移为  $\varphi$ ，则  $\varphi$  可分解为  $2\pi$  的整数周期和不足一个整数周期的相位移  $\Delta\varphi$ ，即有

$$\varphi = 2N\pi + \Delta\varphi \quad (1-3)$$

正弦光波振荡频率  $f$  为光波每秒的振荡次数，则正弦光波经过  $t$  s 振荡后的相位移为

$$\varphi = 2\pi ft \quad (1-4)$$

由式 (1-3) 和式 (1-4) 可解出  $t$  为

$$t = \frac{2N\pi + \Delta\varphi}{2\pi f} \quad (1-5)$$

将式 (1-5) 代入式 (1-2)，可得从扫描中心至被测目标的距离  $S$  为

$$S = \frac{c}{2f} \left( N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) = \frac{\lambda_s}{2} \left( N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \quad (1-6)$$

式中， $\lambda_s$  为正弦波的波长； $c$  为光速。由于相位差检测只能测量  $0 \sim 2\pi$  的相位差  $\Delta\varphi$ ，当

测量距离超过整数倍时,测量出的相位差是不变的,即检测不出整周数  $N$ ,因此测量的距离具有多义性。消除多义性的方法有两种:一是事先知道待测距离的大致范围;二是设置多个不同调整频率的激光正弦波分别进行测距,然后将测距结果组合起来。

由于相位以  $2\pi$  为周期,所以相位测距法会有测量距离上的限制,测量范围数十米。由于采用的是连续光源,功率一般较低,所以其测量范围也较小。其测量精度主要受相位比较器的精度和调制信号的频率限制,增大调制信号的频率可以提高精度,但测量范围也随之变小,所以为了在不影响测量范围的前提下提高测量精度,一般设置多个调频频率。通常的测量精度达到毫米级。

### 3. 基于三角测距原理

基于三角测距的基本原理是一束激光经光学系统将一亮点或直线条纹投射在待测物体表面,由于物体表面形状起伏及曲率变化,投射条纹也会随着轮廓变化而发生扭曲变形,被测表面漫反射的光线通过成像物镜汇聚到光电探测器的光接收面上,被测点的距离信息由该激光点在探测器接收面上所形成的像点位置决定。当被测物体表面移动时,光斑相对于物镜的位置发生改变,相应的像点在光电探测器的光接收面上的位置也将发生横向位移。借助电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)摄像机摄取激光光束影像,即可依据 CCD 内成像位置及激光光束角度等数据,利用三角几何函数关系计算出待测点的距离或位置坐标等信息(图 1.3)。

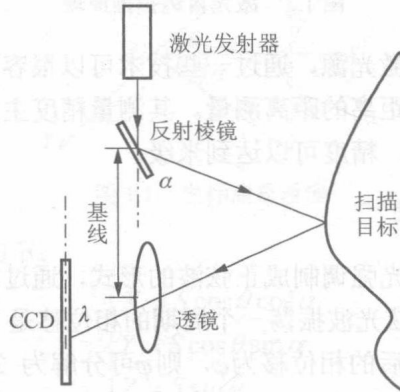


图 1.3 三角测距原理

采用该原理的三维激光扫描仪的精度可以达到微米级,但对于远距离测量,必须要加长发射器与接收器间的距离,所以三角测距不适于远距离测距。

#### 1.1.2 激光雷达测量数据

通常将三维激光扫描仪所获得的三维空间的点集称为点云(point cloud),这类数据有如下特点。

- 1) 数据量大。一站扫描得到的点云数据中可以包含几十万到上百万个扫描点。
- 2) 密度高。扫描数据点的平均间隔在测量时可由仪器设置,一些仪器设置的最小平均间隔可达  $1\sim 2\text{mm}$ 。

3) 带有扫描物体光学特征信息。由于三维激光扫描技术可以接收反射光的强度,因此扫描得到的点一般具有反射强度信息,有些三维激光扫描仪还可以获得点的色彩信息。这些特点使三维激光扫描数据具有十分广泛的应用,同时也使数据处理变得复杂和困难。

依据扫描方式的不同,得到点云的分布情况也存在差异。根据点云的分布特征(如排列方式、密度等),可将点云分为以下4类(戴静兰,2006)。

1) 散乱点云,其特点为没有明显的几何分布特征,呈散乱无序状态,如图1.4(a)所示。这是由于扫描过程中,扫描仪并非按照固定的线路或方法去获取三维数据得到点云,如由关节臂扫描仪或摄影测量方法生成的特征点点云。

2) 扫描线点云,由一组扫描线组成,扫描线上的所有点位于扫描平面内,如图1.4(b)所示。

3) 网格化点云,点云中所有点都与参数域中一个均匀网格的顶点对应,如图1.4(c)所示。许多地面激光扫描仪都采用空间球状网格划分策略,得到的点为空间网格阵列格式。

4) 多边形点云,测量点分布在一系列平行平面内,用小线段将同一平面内距离最小的若干相邻点依次连接可形成一组有嵌套的平面多边形,如图1.4(d)所示,莫尔等高线测量、工业计算机断层扫描(computed tomography, CT)、层切法等系统的测量点云呈现多边形特征。

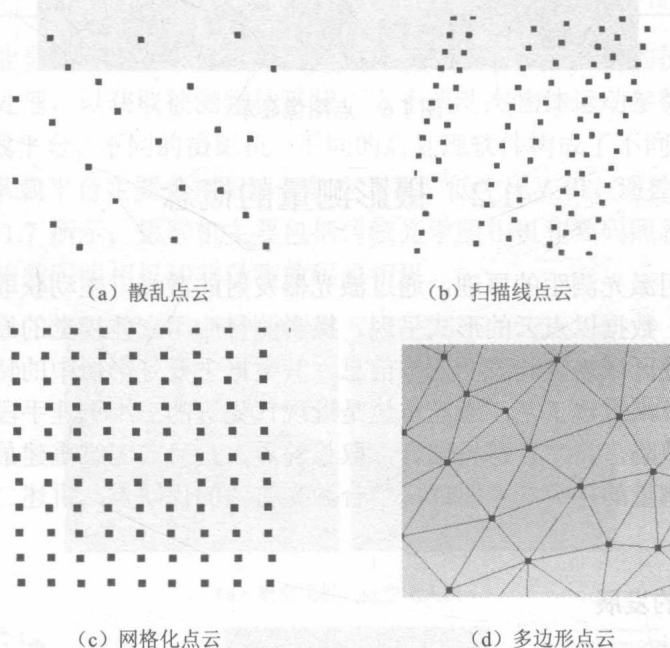


图 1.4 不同样式的点云

激光雷达仪器根据设计的不同有不同的原始数据格式,包含极坐标系、球坐标系、柱坐标系等多种数据存储类型,一般显示采用反射强度影像或者点图像方式。

图 1.5 为反射强度影像示例,该图像由穹形地面激光扫描系统获得建筑内部数据,将阵列点云的反射强度按照一定的数学法则展开到矩形区域构成一幅全景的灰度影像。

图 1.6 为点图像示例,直接将三维点阵按照一定的投影法则输出到屏幕显示终端,一般三维点云数据处理采用此种显示方式。



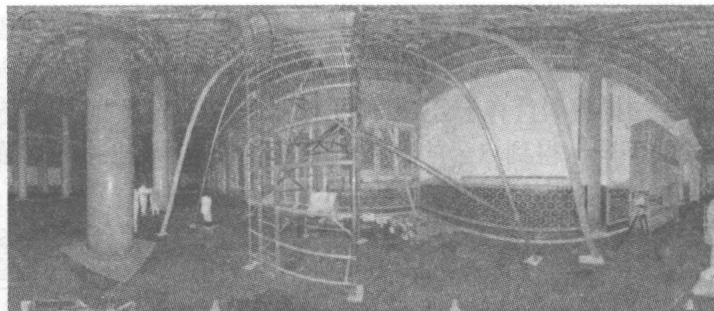


图 1.5 反射强度影像



图 1.6 点图像显示

## 1.2 摄影测量的概念

激光雷达应用激光测距的原理,通过激光器发射的激光,主动获取对象表面一定分辨率的三维坐标,数据以点云的形式呈现。摄影测量应用立体视觉的原理,通过被摄对象二维影像的重叠区域恢复其表面三维信息,其数据主要是影像中的特征点集。摄影测量是一门传统的三维重建工艺,激光雷达是近现代先进的三维重建手段,但单独使用均存在不可避免的缺陷,将二者有机结合,取长补短,是目前三维重建最有效的方法。本节主要介绍摄影测量的相关基本原理,结合激光雷达的优缺点,讲述二者结合三维重建的必要性。

### 1.2.1 摄影测量的发展

19世纪中叶,摄影技术一经问世,便应用于测量。摄影测量是从非接触成像系统通过记录、量测、分析与表达等处理,获取地球及其环境和其他物体的可靠信息。摄影测量通过有重叠的二维影像恢复被摄物体的三维信息,是三维重建的有效手段。

按照成像距离的不同,摄影测量可以分为航天摄影测量、航空摄影测量、低空摄影测量和近景摄影测量。

按照研究对象的不同,摄影测量可以分为地形摄影测量和非地形摄影测量。地形摄影测量的研究对象是地区表面的形态,最终根据摄影照片测绘出摄影区域的地形图。非

地形摄影测量一般是指近景摄影测量,摄影机到摄影目标的距离较近,测量的精度要求较高,测量成果为对象一系列特征点的三维坐标值,即研究对象的数字模型,可绘制所摄物体的立面图、平面图和显示立体形态的等值图。随着各行各业对三维重建需求的提高,非地形摄影测量的测量成果慢慢地开始以密集的三维点云为主体。

按照数据处理手段的不同,摄影测量经历了模拟摄影测量、解析摄影测量和数字摄影测量3个阶段,如今摄影测量已经进入全数字的自动化时代。数字摄影测量是经典摄影测量与计算机科学的一门交叉学科,既充分利用了经典摄影测量的优点,又结合当前飞速发展的计算机科学与技术,形成了一套严密而完整的理论。综合而言,摄影测量的3个阶段产生于特定的背景,具有各自的特点。表1.1简要列出了摄影测量3个阶段的特点。

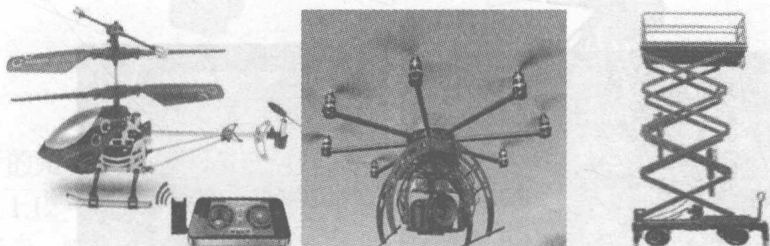
表 1.1 摄影测量 3 个阶段的特点

发展阶段	原始资料	投影方式	仪器	操作方式	产品
模拟摄影测量	照片	物理投影	模拟测图仪	作业员手工	模拟产品
解析摄影测量	照片	数字投影	解析测图仪	机助作业员操作	模拟产品、 数字产品
数字摄影测量	照片、数字化 影像	数字投影	计算机	自动化操作+ 作业员干预	模拟产品、 数字产品

摄影测量作业全过程大体可分为两个阶段:获取被测物体影像的摄影摄像阶段,以及对影像进行再处理,以获取被测物体形状、大小或动态物体运动参数的摄影测量处理阶段。不同的承载平台、不同的摄影机、不同的后处理软件构成了不同的摄影测量系统。目前,摄影测量承载平台主要包括卫星、航空飞机、低空无人机、遥控直升机、旋翼机、升降机等,如图1.7所示;摄影机主要包括传统光学照相机和数码照相机,其中数码照相机又被分为量测数码照相机和非量测数码照相机。



(a) 航空飞机、低空无人机



(b) 遥控直升机、旋翼机、升降机

图 1.7 不同承载平台

目前，非量测数码相机是近景摄影影像获取的主要工具，其以价格低廉、获取影像速度快、操作灵活方便、可更换不同的焦距、没有底片变形问题等优点而得到广泛应用，如 Canon 5D 和 Canon 5D II 等。图 1.8 为目前常用的几款非量测数码相机。在摄影测量数据处理方面，非量测数码相机已从最初的 Virtuoso、JX4 等发展到近几年出现的 DPGrid、PixelGrid、LensPhoto、PhotoScan 和 ContextCapture 等。

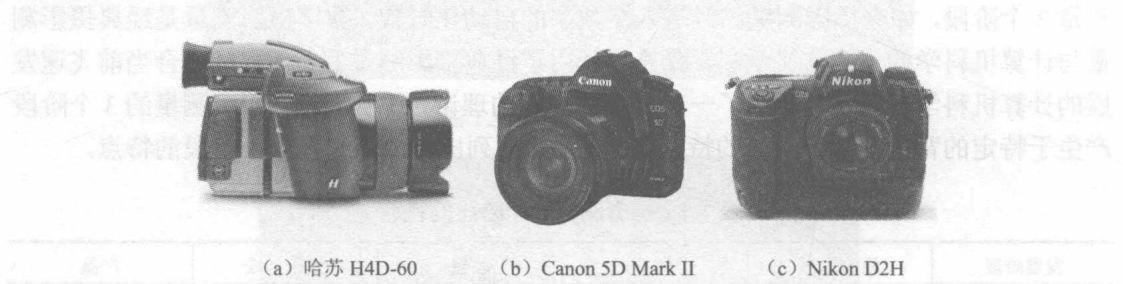


图 1.8 非量测数码相机

近年来国际测绘领域发展起来的一项高新技术——倾斜摄影测量技术，打破了以往正射影像只能从垂直角度拍摄的局限，通过在同一飞行平台上搭载多台传感器，同时从垂直、前方、后方、左侧、右侧 5 个不同的角度采集影像（图 1.9 和图 1.10），将用户引入了符合人眼视觉的真实直观世界，相应的数据处理软件如像素工厂、Smart3D 等能够全自动地建立真彩色三维模型。



图 1.9 倾斜影像与正射影像对比

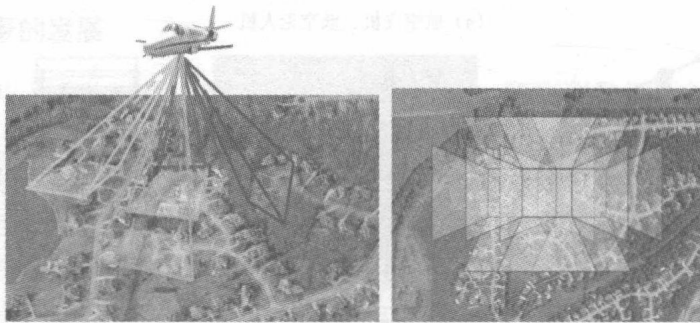


图 1.10 倾斜摄影数据采集与排列形式

## 1.2.2 摄影测量的定义

摄影测量的本质是通过摄影进行测量,对于测绘学科而言,摄影测量来自于普通测量中的前方交会、后方交会。如图 1.11 所示,在 1、2 两已知点上安置经纬仪,对未知点  $A$  测定水平角和垂直角,进行前方交会,测量位置点  $A$  的坐标  $(X, Y, Z)$ 。

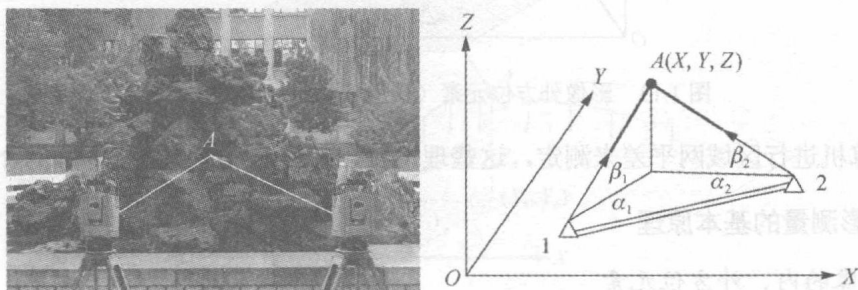


图 1.11 前方交会示意图

摄影测量的过程如图 1.12 所示,在两个已知点上摄取两张影像,量测影像上同名点的坐标  $a_1(x_1, y_1)$ 、 $a_2(x_2, y_2)$ ,通过解算,求得对应空间点  $A$  的坐标  $(X, Y, Z)$ 。依据上述描述,摄影测量是通过量测两张影像上的同名点确定对应空间点的三维坐标的,它的一个重要特点是可以测定影像上所有点的空间信息,是从二维影像到三维空间的一门学科。

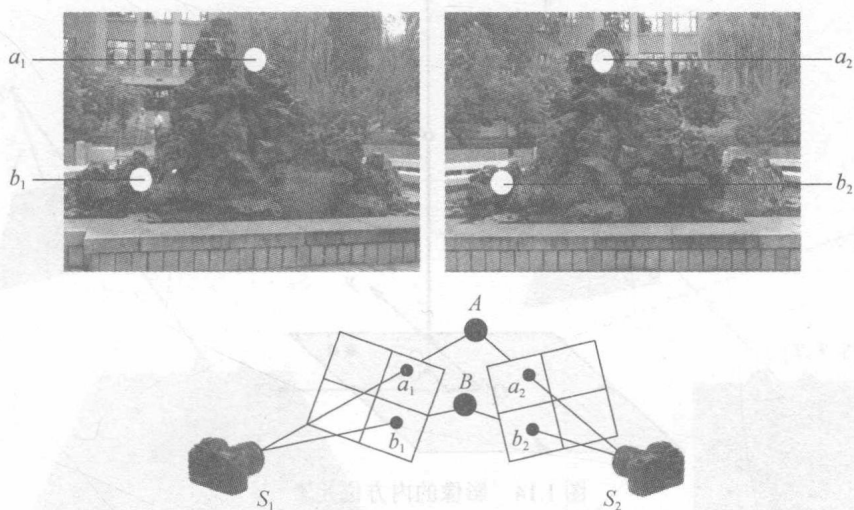


图 1.12 摄影测量示意图

从解析的角度讲,摄影测量包含两个最重要的关系:第一个是对应关系,即测量同名点,如图 1.12 中的物方点  $A$ 、 $B$  对应的像方同名点  $(a_1, a_2)$ 、 $(b_1, b_2)$ ;第二个是几何关系,如图 1.13 所示,欲准确交会出  $A$ 、 $B$  物方点的坐标,除同名点条件外,还要已知两个摄影站点的物方坐标及摄影光线束的姿态。对于以上两种关系,在不同的阶段处理方式不同。在当下的数字摄影测量阶段,同名点的对应关系应用影像自动匹配的方式来获取,几何关



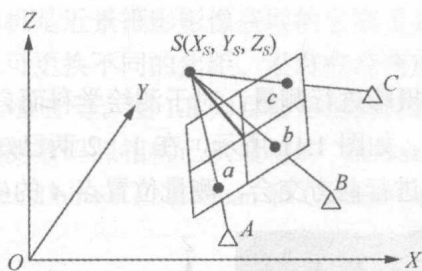


图 1.13 影像外方位元素 (摄影测量的几何关系)

系通过计算机进行区域网平差来测定，这些理论将在后续的章节中进行详细的介绍。

### 1.2.3 摄影测量的基本原理

#### 1. 影像的内、外方位元素

##### (1) 影像的内方位元素

确定摄影机镜头中心相对于影像位置关系的参数，称为影像的内方位元素。内方位元素包括以下 3 个参数：像主点（主光轴在影像面上的垂足）相对于影像中心的位置  $x_0$ 、 $y_0$  及镜头中心到影像面的垂距  $f$ ，如图 1.14 所示。对于航空影像， $x_0$ 、 $y_0$  即像主点在框标坐标系中的坐标。

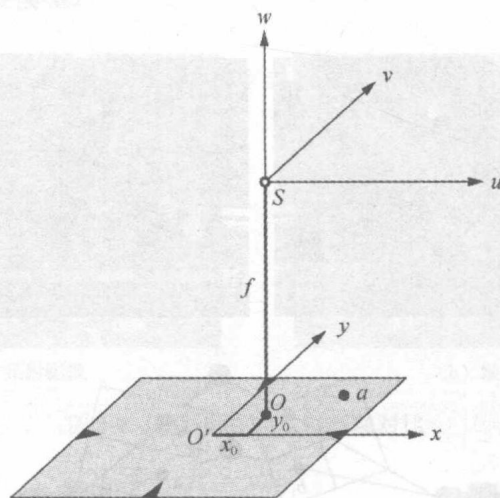


图 1.14 影像的内方位元素

##### (2) 影像的外方位元素

影像或摄影光束在摄影瞬间的空间位置和姿态参数，称为影像的外方位元素，如图 1.15 所示中摄影照片  $p$  及其投影中心  $S$  在摄影测量坐标系 ( $O$ - $XYZ$ ) 中的位置 ( $X_s, Y_s, Z_s$ ) 和方向  $\varphi$ - $\omega$ - $\kappa$  的元素。图 1.15 是以  $Y$  轴为主轴的  $\varphi$ - $\omega$ - $\kappa$  系统：以  $Y$  轴为主轴旋转  $\varphi$  角，然后绕  $X$  轴旋转  $\omega$  角，最后绕  $Z$  轴旋转  $\kappa$  角。如果已知影像的外方位元素，就可以通过两张照片的同名点，前方交会获取像点对应的物方点的三维坐标。