



新世纪高等学校规划教材·地理科学系列

空间测量与制图

陈云浩 邓磊 沈蔚 李京◎主编

KONGJIAN CELIANG
YU ZHITU



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

规划教材·地理科学系列

空间测量与制图

陈云浩 邓磊 沈蔚 李京◎主编

KONGJIAN CELIANG
YU ZHITU



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

空间测量与制图 / 陈云浩等主编. — 2 版. — 北京:
北京师范大学出版社, 2017.3
新世纪高等学校规划教材. 地理科学系列
ISBN 978-7-303-22097-7

I. ①空… II. ①陈… III. ①空间测量—高等学校
—教材②宇宙制图学—高等学校—教材 IV. ①P236
②P282

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 028015 号

营销中心电话	010-62978190 62979006
北师大出版社科技与经管分社	www.jswsbook.com
电子邮箱	jswsbook@163.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com
北京市海淀区新街口外大街 19 号
邮政编码: 100875

印 刷: 三河市东兴印刷有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 730 mm × 980 mm 1/16
印 张: 17.5
字 数: 234 千字
版 次: 2017 年 3 月第 2 版
印 次: 2017 年 3 月第 2 次印刷
定 价: 35.00 元

策划编辑: 毛 佳 雷晓玲	责任编辑: 毛 佳 雷晓玲
美术编辑: 刘 超	装帧设计: 刘 超
责任校对: 李 茵	责任印制: 李 啸 赵非非

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-62978190

北京读者服务部电话: 010-62979006-8021

外埠邮购电话: 010-62978190

本书如有印装质量问题, 请与出版部联系调换。

印制管理部电话: 010-62979006-8006

《空间测量与制图》

编委会名单

主 编：陈云浩

副主编：邓 磊 沈 蔚 李 京

编委会：（按拼音排序）

陈云浩 邓 磊 杜培军 段福洲 宫阿都

李 京 李长春 刘纯波 沈 蔚 苏 伟

张爱武 张松梅

内 容 简 介

本书是一本面向研究生测量与制图学教学需求,全面介绍空间测量技术基本原理、技术体系、方法应用以及发展前沿的教材,全书分为四篇,共16章内容。

第一篇(第1~3章)为摄影测量基础,在介绍摄影测量学发展简史的基础上,论述了解析摄影测量和数字摄影测量的基本原理,总结了数字地面模型建立方法和应用。第二篇(第4~8章)为雷达摄影测量,在介绍雷达摄影测量概念和雷达图像特点的基础上,重点剖析了雷达图像的构像模型、雷达立体摄影测量原理,结合实例介绍了利用雷达摄影测量获取DEM的方法体系和应用实践。第三篇(第9~12章)为激光雷达遥感,包括对激光雷达概述,以“地形数据提取—城市地物提取—地物三维重建—虚拟城市构建”为主线,详细介绍了激光雷达数据处理、信息提取和三维表达的全过程。第四篇(第13~16章)为低空近景空间测量。包括近地数字航空摄影测量系统—低空无人遥感系统—车载三维数据测量系统—地面三维激光扫描系统,构建从空间到低空再到地面的立体空间测量系统,本篇着重介绍了以上空间测量系统的系统构建、数据采集、数据处理及信息重建的过程和方法。

本书既立足基础知识、基本原理与基本方法,又面向学科前沿、发展趋势与研究热点,着重阐述空间测量技术体系与应用进展。本书既可作为测绘、环境、资源、地学等学科领域的研究生教材和本科生参考书,也可作为有关高校师生及空间信息科学工作者的参考资料。

前言

不断探索和发展各种技术与方法来认识这个纷繁复杂世界的种种尝试，是人类文明不断发展的动力。当前所谓的“对地观测系统”，正是人类认识这个赖以生存的地球最为重要的工具之一，也是记录、观测、发现、研究地球系统科学和地表过程以及其次生现象的重要手段和方法。

在这个庞大的“对地观测系统”中，既有各种遥感卫星，又有机载传感器系统；有低空无人平台，也有车载近景的观测手段；既有光学传感器，又有雷达系统。不同的空间平台、多样的传感器类型，共同促进了空间测量技术与学科的发展和演变。不论是长时间序列的全球变化研究，还是“5·12 汶川地震”的应急抢险工作，无不凸显出现代空间测量技术的重要作用。

空间测量是一门新兴的交叉学科，探讨其学科体系与发展前沿是一项复杂同时又极具挑战性的工作。空间测量课程在“测绘科学与技术”“地理学”一级学科覆盖的二级学科以及其他一些学科研究生培养中发挥着重要作用。尽管近年来国内外出版了大量测绘类的优秀著作，但作为研究生教学的教材相对缺乏，特别是以完整体系介绍空间测量技术的基本原理、方法体系、学科前沿、发展趋势等问题。无论是掌握学科发展的趋势，还是开展科学实践都迫切需要补充和更新

空间测量相关知识。如何针对空间测量技术的最新发展,编写全新的、针对研究生教学的教材,体现学科前沿与发展动向,并与本科教材与教学内容形成互补,是研究生空间测量教育所面临的一个重要课题,这也正是本教材编写的动因和目的所在。

有鉴于此,我们在“北京师范大学硕士研究生学位基础课程建设项目”的资助下,开始编写《空间测量与制图》教材。本教材编写的指导思想是:(1)突出研究生教材的特点,在基础知识论述方面进行概括归纳与提升,减少与本科生教材的简单重复,在保持体系完整的同时突出重点和主线;(2)面向技术发展前沿,将当前空间测量技术发展的前沿作为教材的重要组成部分;(3)充分吸收和借鉴国内外优秀教材和研究成果,保证教材的综合性和先进性;(4)融入编写组的最新科研成果,面向教学需求与未来科研特点开展教材内容的组织。

因此,我们在内容组织方面采取了一种全新的方式,将教材分为以下四篇。

第一篇为空间测量的基础理论,主要回顾了解析摄影测量和数字摄影测量的经典原理,介绍了数字地面模型的建立方法及其应用,这也是后续各章的基础。

第二篇为雷达摄影测量,这是近年来发展起来的依托星载雷达进行立体测量和地形制图的方法。在介绍雷达摄影测量概念和雷达图像特点的基础上,重点剖析了雷达图像的构像模型、雷达立体摄影测量原理。结合马来西亚热带雨林地形制图实例,介绍了开展雷达摄影测量的具体技术方法和应用模式。

第三篇为激光雷达遥感,这也是近年发展起来的地形制图特别是城市地形制图的有效技术方法。本篇以地形数据提取—城市地物提取—地物三维重建—虚拟城市构建为主线,详细介绍了激光雷达数据处理、信息提取和三维表达的全过程。

第四篇为低空近景空间测量。本篇内容包括近地数字航空摄影测量系统、低空无人遥感系统、车载数据测量系统和地面三维测量系统,构建起从空间到低空再到地面的立体空间测量体系。本篇着重介绍了上述各空间测量系统的系统构建、数据采集、数据处理及信息重建的过程和方法。

本书由北京师范大学陈云浩、李京、官阿都，首都师范大学邓磊、张爱武、段福洲，上海海洋大学沈蔚，中国科学院遥感应用研究所刘纯波，中国矿业大学杜培军，中国农业大学苏伟，国家遥感中心张松梅，河南理工大学李长春等联合编著。由陈云浩拟定教材大纲，各章具体编写分工为：第一篇由邓磊、李京、官阿都编写；第二篇由邓磊、陈云浩、杜培军编写；第三篇由沈蔚、苏伟编写；第四篇由张松梅、刘纯波、张爱武、段福洲编写；全书由陈云浩、邓磊、李长春进行统稿。

本书的部分内容来源于作者主持和参加的国家科技支撑计划课题(2006BAJ05A01, 2006BAJ09B06)，国家高技术研究发展计划(2007AA120306, 2007AA120205)，国际科技合作计划项目(2007DFA20640)，霍英东教育基金(1111017)以及对发展中国家科技援助项目的相关研究成果。部分内容来源于作者的学位论文，少部分阶段成果已在国内外有关刊物发表，本书以此为基础进一步系统组织、修订提高。在作者进行本书主要内容研究过程中，得到了国土资源部科技与国际合作司单卫东博士，科学技术部国际合作司徐捷博士，国家遥感中心金逸民博士、李加洪博士、景贵飞博士，马来西亚国家遥感中心 Niki, Jasmi 等人的无私帮助。北京师范大学史培军教授、李晓兵教授、首都师范大学官辉力教授、赵文吉教授等对本书的编撰给予了大量的指导和帮助。此外，北京师范大学的占文凤、易文斌、孙洪泉、何孝莹等同学参与编写了本书中的部分章节，在此一并对以上人员表示衷心的感谢。

本书编写过程中参考了国内外大量优秀教材、研究论文和相关网站资料，在此我们表示衷心的感谢。虽然作者试图在参考文献中全部列出并在文中标明出处，但难免有疏漏之处。本书虽几易其稿，但不当之处仍在所难免，我们诚挚希望各位同行专家和读者提出宝贵意见。

本书的出版得到了地表过程与资源生态国家重点实验室、北京师范大学研究生院、北京师范大学资源学院、北京师范大学出版社和编辑毛佳女士的大力支持，在此表示感谢。

《空间测量与制图》研究生教材编写组

目 录

第一篇 摄影测量基础

第 1 章 摄影测量解析基础 /3

1.1 摄影测量学简介 /3

1.1.1 摄影测量学的定义和任务 /3

1.1.2 摄影测量发展简史 /4

1.1.3 摄影测量的特点与分类 /5

1.2 基本概念 /6

1.2.1 航空摄影和摄影比例尺 /6

1.2.2 中心投影的基本知识 /7

1.3 坐标系统 /7

1.3.1 常用坐标系及内外方位元素 /7

1.3.2 共线方程 /9

1.4 单张像片解析 /11

1.4.1 内定向 /11

1.4.2 后方交会 /11

1.5 立体像对解析 /11

1.5.1 立体观察 /11

1.5.2 双像解析摄影测量的几种方法 /12

第2章 数字摄影测量 /13

2.1 概述 /13

2.1.1 数字摄影测量的定义 /13

2.1.2 数字摄影测量存在的若干问题 /13

2.2 数字影像解析基础 /15

2.2.1 影像数字化 /15

2.2.2 数字影像内定向 /15

2.2.3 数字影像采样及重采样 /16

2.3 核线 /17

2.3.1 核线的几何关系解析 /17

2.3.2 核线的应用 /18

2.4 影像匹配 /18

2.4.1 影像匹配的基本原理 /18

2.4.2 影像匹配的算法 /18

2.5 数字摄影测量系统 /19

2.5.1 主要的数字摄影测量系统 /19

2.5.2 数字摄影测量主要功能和流程 /20

第3章 数字地面模型基础 /21

3.1 数字地面模型的定义 /21

3.1.1 定义 /21

3.1.2 模型 /22

3.2 DEM 数据获取 /26

3.2.1 外业测量 /26

3.2.2 通过传感器获取 /26

3.2.3 从现有的地形图上采集 /27

3.3 DEM 内插 /27

3.3.1 整体内插 /27

- 3.3.2 分块局部内插 /28
- 3.3.3 逐点内插 /28
- 3.4 DEM 的存贮和管理 /28
 - 3.4.1 DEM 的数据存贮 /28
 - 3.4.2 DEM 的数据压缩 /28
 - 3.4.3 DEM 的管理 /30

第二篇 雷达摄影测量

第4章 雷达遥感与雷达摄影测量/33

- 4.1 雷达遥感简介 /33
 - 4.1.1 雷达遥感的历史 /34
 - 4.1.2 雷达遥感的应用 /35
- 4.2 雷达摄影测量的定义与发展概况 /36
 - 4.2.1 雷达摄影测量的定义 /36
 - 4.2.2 雷达摄影测量的发展概况 /37

第5章 雷达图像的特点/40

- 5.1 雷达遥感基础 /40
 - 5.1.1 电磁波理论 /40
 - 5.1.2 频率与频段 /41
 - 5.1.3 分贝 /41
 - 5.1.4 合成孔径原理 /42
- 5.2 雷达图像的空间分辨率 /42
 - 5.2.1 距离分辨率 /43
 - 5.2.2 方位分辨率 /43
- 5.3 雷达斑点噪声 /44
 - 5.3.1 相干斑产生机理 /44
 - 5.3.2 滤波算法 /45

第6章 雷达图像构像模型 /49

- 6.1 距离—多普勒模型 /49
- 6.2 等效共线方程模型 /50
- 6.3 轨道/飞行参数估计 /51
 - 6.3.1 斜距 R /51
 - 6.3.2 位置矢量的计算 /52
 - 6.3.3 图像每行的成像时间 /53

第7章 雷达立体摄影测量原理与方法 /54

- 7.1 基本原理 /54
- 7.2 影响 DEM 精度的因素 /55
 - 7.2.1 地形 /56
 - 7.2.2 观测方式 /56
 - 7.2.3 地面控制点 /57
 - 7.2.4 分辨率 /57
 - 7.2.5 斑点噪声 /58
 - 7.2.6 立体影像之间的时间间隔 /58
 - 7.2.7 成本效益 /58
- 7.3 立体像对选取的一般规律 /58
- 7.4 DEM 生产流程 /59
 - 7.4.1 概述 /60
 - 7.4.2 影像输入 /60
 - 7.4.3 裁剪 /61
 - 7.4.4 滤波 /61
 - 7.4.5 重采样 /61
 - 7.4.6 配准 /62
 - 7.4.7 影像匹配 /62

7.4.8 再次重采样 /65

7.4.9 生成 DEM /65

第8章 利用雷达摄影测量方法获取 DEM /66

8.1 研究区概况 /66

8.2 数据准备 /66

8.3 地面控制点测量 /68

8.4 DEM 提取 /68

8.4.1 技术路线 /68

8.4.2 轨道校正 /68

8.4.3 影像匹配 /70

8.4.4 DEM 编辑与修改 /71

8.5 精度分析与评价 /71

8.5.1 DEM 的精度 /71

8.5.2 DEM 精度评价方法 /73

8.5.3 DEM 精度评价 /75

第三篇 激光雷达(LIDAR)遥感

第9章 LIDAR 系统概述 /81

9.1 LIDAR 系统的定义与组成 /81

9.1.1 LIDAR 系统的定义 /81

9.1.2 LIDAR 系统的组成 /82

9.2 激光测距 /83

9.3 激光扫描 /87

9.4 定位定向参数 /89

9.5 激光脚点的解算 /90

9.6 LIDAR 系统数据及表达 /91

9.6.1 LIDAR 数据特点 /91

- 9.6.2 LIDAR 数据表达 /92
- 9.7 LIDAR 系统国内外研究进展 /94
 - 9.7.1 国外相关研发进展 /94
 - 9.7.2 国内相关研发进展 /97
- 9.8 LIDAR 技术的应用 /98

第 10 章 地形数据提取与地形恢复 /101

- 10.1 基本概念 /101
- 10.2 地形数据的滤波算法 /102
 - 10.2.1 数学形态学方法 /102
 - 10.2.2 基于坡度的滤波算法 /103
 - 10.2.3 移动窗口滤波法 /104
 - 10.2.4 线性迭代最小二乘内插法 /104
 - 10.2.5 移动曲面拟合法 /105
 - 10.2.6 基于数据分割的滤波算法 /105
 - 10.2.7 其他方法 /106
 - 10.2.8 滤波算法的比较与讨论 /106
- 10.3 移动窗口拟合曲面法地形滤波 /107
 - 10.3.1 算法原理 /107
 - 10.3.2 算法流程 /112
 - 10.3.3 滤波策略 /112
 - 10.3.4 实验结果 /113
 - 10.3.5 误差评估 /115
- 10.4 地形恢复 /116

第 11 章 基于 LIDAR 数据的城市地物提取 /117

- 11.1 基于 LIDAR 数据的地物信息提取 /117
 - 11.1.1 基于多回波的植被提取 /117

- 11.1.2 聚类分割算法提取地物信息 /119
- 11.1.3 等值线分割方法提取建筑轮廓线 /120
- 11.1.4 基于 NDSM 的地物分割提取 /120
- 11.1.5 基于数据融合算法的地物信息提取 /121
- 11.2 建筑轮廓线提取及规范化 /122
 - 11.2.1 建筑轮廓线提取主要算法 /122
 - 11.2.2 基于 α -shapes 模型提取建筑轮廓线 /124
 - 11.2.3 轮廓线的简化与规则化 /131
- 11.3 树冠信息提取 /137
 - 11.3.1 树冠信息提取研究综述 /138
 - 11.3.2 CIEM 算法简介 /141
 - 11.3.3 试验结果与分析 /145
 - 11.3.4 精度评价 /146

第 12 章 地物三维重建 /148

- 12.1 城市三维空间信息的获取 /148
 - 12.1.1 DEM 数据获取 /148
 - 12.1.2 建筑物高度数据获取 /149
 - 12.1.3 建筑物三维几何要素数据获取 /149
 - 12.1.4 纹理数据获取 /150
- 12.2 三维城市建模方法 /151
 - 12.2.1 基于二维地图数据的三维城市建模方法 /151
 - 12.2.2 基于影像的三维城市建模 /152
 - 12.2.3 基于激光扫描的三维城市建模 /154
 - 12.2.4 CAD 建模方法 /156
- 12.3 基于 LIDAR 数据的建筑三维重建 /157
 - 12.3.1 建筑模型三维重建 /157
 - 12.3.2 基于轮廓线的平顶建筑三维重建 /159

- 12.3.3 非平顶建筑的三维重建 /161
- 12.3.4 LIDAR 数据提取建筑模型的缺陷 /170
- 12.4 基于 LIDAR 数据的树木三维重建 /171
 - 12.4.1 树木三维建模方法综述 /171
 - 12.4.2 基于机载 LIDAR 数据的树木建模 /176
- 12.5 虚拟城市构建 /179
 - 12.5.1 研究区介绍 /179
 - 12.5.2 数据与材料 /181
 - 12.5.3 建设方法 /182
 - 12.5.4 建设成果 /188

第四篇 低空近景空间测量

第 13 章 近地数字航空摄影测量系统 /191

- 13.1 航空摄影测量系统的发展 /191
- 13.2 近地轻型数字航空测量系统的发展 /191
- 13.3 数字航空相机的发展 /193
- 13.4 近地轻型数字航空相机的发展 /196
- 13.5 近地轻型航空摄影测量系统实践与应用 /199
 - 13.5.1 航摄任务设计 /200
 - 13.5.2 进场安装与实验 /202
 - 13.5.3 航飞作业 /203
 - 13.5.4 影像前处理 /204
 - 13.5.5 产品生成 /205

第 14 章 低空无人遥感系统 /206

- 14.1 低空无人遥感概述 /206
- 14.2 低空无人航空遥感系统构成 /207
 - 14.2.1 低空无人航空遥感平台 /208

- 14.2.2 传感器及测控系统 /210
- 14.2.3 空地无线通讯单元 /212
- 14.2.4 地面测控与作业控制工作站 /213
- 14.2.5 地面数据接收处理工作站 /214
- 14.3 低空无人遥感作业过程 /214
- 14.4 低空无人遥感系统数据处理 /217
- 14.5 低空无人遥感系统典型应用 /218

第15章 车载三维数据测量系统 /220

- 15.1 车载三维数据采集系统 /220
- 15.2 车载三维数据采集概况 /221
- 15.3 车载三维信息采集系统的关键技术 /222
 - 15.3.1 多传感器硬件集成 /222
 - 15.3.2 多传感器空间配准 /223
 - 15.3.3 多传感器时间配准 /223
 - 15.3.4 GPS与IMU联合导航 /224
 - 15.3.5 激光点云数据和纹理数据的处理 /224
 - 15.3.6 三维模型快速建模 /224
- 15.4 车载三维信息采集系统的实现 /224
- 15.5 车载三维数据采集系统应用与实践 /225

第16章 地面三维激光扫描系统 /229

- 16.1 地面三维激光扫描系统的概念 /229
 - 16.1.1 地面三维激光扫描系统 /229
 - 16.1.2 地面三维激光扫描系统工作原理 /229
- 16.2 地面三维激光扫描系统的特点 /232
 - 16.2.1 地面三维激光扫描系统的特点 /232
 - 16.2.2 地面三维激光扫描测量与近景摄影测量的比较 /233