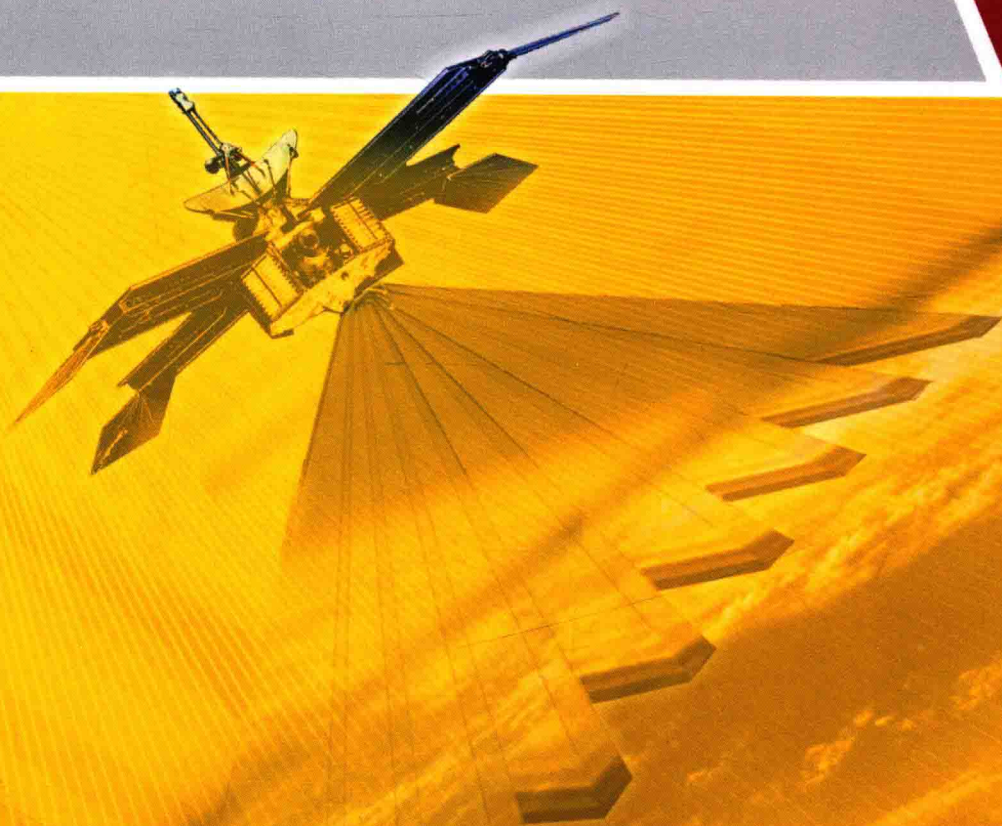


高等学校教材

# 摄影测量学

Photogrammetry

王双亭 主编



测绘出版社

高等学校教材

# 摄影测量学

Photogrammetry

王双亭 主编

测绘出版社

·北京·

©王双亭 2017

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

### 内 容 提 要

本书系统地介绍了摄影测量的基本原理、技术和最新成果。全书共分为6章:第1章介绍了摄影测量的基本概念、发展过程及所面临的问题;第2章介绍了摄影像片的获取原理与技术;第3章介绍了中心投影的概念与特性;第4章介绍了立体观察的原理和方法;第5章介绍了摄影像片的系统误差来源和改正方法;第6章简要介绍了数字影像的获取方法,特征提取、特征定位、影像匹配的理论和技术,DEM的获取与应用及数字微分纠正的原理和方法。

本书可作为测绘各专业大学本科的教材,也可供其他相关专业的师生、工程技术人员和研究人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

摄影测量学 / 王双亭主编. —北京: 测绘出版社, 2017. 2

高等学校教材

ISBN 978-7-5030-4021-4

I. ①摄… II. ①王… III. ①摄影测量学—高等学校—教材 IV. ①P23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 319066 号

责任编辑	雷秀丽	封面设计	李 伟	责任校对	石书贤	责任印制	陈 超
执行编辑	王佳嘉						
出版发行	测绘出版社	电 话		010—83543956(发行部)			
地 址	北京市西城区三里河路 50 号			010—68531609(门市部)			
邮政编码	100045			010—68531363(编辑部)			
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址		www.chinasmp.com			
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司	经 销		新华书店			
成品规格	184mm×260mm						
印 张	15.25	字 数		370 千字			
版 次	2017 年 2 月第 1 版	印 次		2017 年 2 月第 1 次印刷			
印 数	0001—1000	定 价		38.00 元			

书 号 ISBN 978-7-5030-4021-4

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

# 编 委 会

主 编：王双亭

副主编：郭 辉 柏春岚

编 委：卢晓峰 韩瑞梅 成晓倩 杨磊库

# 前 言

摄影测量学作为一门学科,诞生于19世纪中叶。经过180多年的发展,摄影测量已从模拟摄影测量、解析摄影测量,步入到当代数字摄影测量时代,实现了摄影测量从全人工操作到半自动化、智能化处理的转变。随着摄影测量理论和技术的不断发展,其应用领域已从早期单纯的地形测绘拓展到了军事侦察、工业制造、土木工程、医学、考古、刑事侦查、文物保护、人工智能、虚拟现实等领域,形成了航天、航空、近景、工业、显微、倾斜、刑侦、考古等诸多摄影测量分支。目前,摄影测量仍在不断涌现新理论、新装备、新技术,仍在不断拓宽应用领域。可以说,摄影测量学不但是一个正在蓬勃发展的学科,而且在国民经济和国防建设中有十分重要的地位和不可替代的作用。鉴于此,我们编写了《摄影测量学》一书,以期系统地 will 摄影测量的基本原理、方法、技术和最新成果展现给广大读者。

本书是在总结多年摄影测量学的教学经验及科研成果基础上,经反复酝酿和讨论,由河南理工大学、安徽理工大学、河南城建学院的七名专业教师合力编写而成。河南理工大学王双亭教授完成了第1章的编写;第2章由河南理工大学卢晓峰执笔;第3章由河南理工大学韩瑞梅完成;第4章由安徽理工大学郭辉编写;第5章由河南理工大学成晓倩完成;第6章由河南城建学院柏春岚和河南理工大学杨磊库共同编写;全书的统稿工作由王双亭完成。

本书全面系统地介绍了摄影测量的基本原理、技术和最新成果。全书共分为6章。第1章主要介绍摄影测量的基本概念、发展过程及当代摄影测量所面临的问题。第2章介绍了摄影像片的获取原理与技术,主要包括普通照相机和航空摄影仪的组成与特点,航空摄影的基本术语、技术要求和航空摄影的技术流程。第3章介绍了中心投影的概念与特性、摄影测量常用坐标系、摄影像片的内外方位元素、共线条件方程、摄影像片的基本特性和空间后方交会的原理与过程。第4章介绍了立体观察的原理和方法,立体像对基本概念和特点,标准式立体像对,立体像对的相对定向、空间前方交会、绝对定向,利用立体像对获取地面点坐标的主要方法,核线解析和核线影像生成的原理与方法。第5章介绍了摄影像片的系统误差来源和改正方法,着重介绍航带法、独立模型法和光束法区域网平差的原理、过程和自检校平差方法以及GPS、POS辅助空三的理论和技术。第6章简要介绍了数字影像的获取方法、特征提取、特征定位、影像匹配的理论和技术,DEM的获取与应用,及数字微分纠正的原理和方法。

本书的出版获得了河南省基础与前沿项目(152300410098)和国家测绘地理信息局测绘地理信息公益性行业科研专项(201412020)的资助。在编写过程中得到了很多专家、教授、同行、同事及测绘出版社的大力支持与帮助,书中也引用了一些文献资料。在此,一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中错误之处在所难免,恳请读者批评指正,以便进一步修订,批评与建议请致信 [wst@hpu.edu.cn](mailto:wst@hpu.edu.cn)。

作 者

2016年10月

# 目 录

<b>第 1 章 绪 论</b> .....	1
1.1 摄影测量学概述 .....	1
1.2 摄影测量学的发展 .....	2
习题与思考题 .....	10
<b>第 2 章 摄影与航空摄影</b> .....	11
2.1 普通照相机 .....	11
2.2 航空摄影机 .....	22
2.3 航空摄影 .....	33
习题与思考题 .....	44
<b>第 3 章 单张像片解析</b> .....	45
3.1 中心投影与透视变换 .....	45
3.2 共线条件方程 .....	52
3.3 摄影像片的几何特性 .....	64
3.4 单像空间后方交会 .....	69
习题与思考题 .....	75
<b>第 4 章 立体摄影测量</b> .....	77
4.1 立体像对和像对立体观察 .....	77
4.2 标准式立体像对 .....	86
4.3 立体像对的相对定向 .....	89
4.4 立体像对的空间前方交会 .....	102
4.5 立体像对的绝对定向 .....	106
4.6 地面点坐标的直接解法和立体像对的一步定向法 .....	112
4.7 核线几何关系解析与核线影像 .....	114
习题与思考题 .....	119
<b>第 5 章 解析空中三角测量</b> .....	121
5.1 概 述 .....	121
5.2 像点的系统误差及其改正 .....	122
5.3 航带法区域网平差 .....	126
5.4 独立模型法区域网平差 .....	133
5.5 光束法区域网平差 .....	136

5.6	自检校光束法区域网平差 .....	145
5.7	GPS 辅助空中三角测量 .....	150
5.8	POS 系统辅助空中三角测量 .....	153
5.9	粗差探测与可靠性理论 .....	158
	习题与思考题 .....	159
<b>第 6 章</b>	<b>数字摄影测量 .....</b>	<b>162</b>
6.1	数字影像及其获取 .....	162
6.2	数字影像特征提取与定位 .....	167
6.3	数字影像匹配 .....	189
6.4	数字高程模型 .....	210
6.5	数字微分纠正 .....	226
6.6	数字摄影测量工作站概述 .....	230
	习题与思考题 .....	233
	<b>参考文献 .....</b>	<b>235</b>

# 第1章 绪论

摄影测量学作为一门学科,其发展过程可追溯到19世纪中叶。1837年银板摄影技术被成功发明,标志着摄影术的真正诞生,从此也开始了摄影测量发展历程。180多年来,摄影测量学从模拟摄影测量开始,走过解析摄影测量,进入到当代数字摄影测量,实现了摄影测量从全人工操作到半自动化、智能化处理的转变。

随着摄影测量理论和技术的不断发展,其应用领域也在不断拓宽,已从早期单纯的地形测绘渗透到了军事侦察、工业制造、土木工程、医学、考古、刑事侦查、文物保护、人工智能、虚拟现实等领域,不但得到了成功应用,而且产生了航天摄影测量、航空摄影测量、近景摄影测量、工业摄影测量、显微摄影测量、倾斜摄影测量、刑侦摄影测量等诸多摄影测量分支。因此,摄影测量学不但是一个正在蓬勃发展的学科,而且在国民经济和国防建设中有十分重要的地位和不可替代的作用。

## 1.1 摄影测量学概述

摄影测量学(Photogrammetry)源于light、writing和measurement三个英文单词,即将来自目标物体反射的光线通过某种方式进行记录,然后基于记录的结果(像片或影像)进行量测和解译,因此摄影测量学的基本含义是基于像片的量测和解译。

传统的摄影测量学是利用光学摄影机获取的像片,经过处理以获取被摄物体的形状、大小、位置、特性及其相互关系的一门学科。它研究的内容涉及被摄物体的影像获取方法、影像信息的记录和存储方法、基于单张或多张像片的信息提取方法、数据的处理与传输、产品的表达与应用等方面的理论、设备和技术。其主要任务是测制各种比例尺的地形图、建立地形数据库,为地理信息系统和各种工程应用提供基础测绘数据。

随着计算机技术以及模式识别技术等相关技术的发展和引入,摄影测量技术开始向数字摄影测量时代转变。同时,由于国际上空间技术和遥感技术的发展,摄影测量事业迎来了一个新的发展时期,摄影测量开始向航空、航天遥感技术发展。20世纪60年代初,摄影测量从侧重于影像解译和应用的角度,又提出了“遥感”一词。随着摄影测量的发展,摄影测量与遥感之间的界限越来越模糊。换句话说,摄影测量学与遥感的结合越来越紧密,用王之卓先生的话说,“摄影测量学的发展历史就是遥感的发展历史,它们的目的相同,只是各自所处的科技发展历史时期不同,可以说摄影测量学发展到数字摄影测量阶段就是遥感”。由此,出现了一个崭新的学科——摄影测量与遥感,也就是现代摄影测量学。1988年,国际摄影测量与遥感协会(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS)在日本京都第16届大会上给出了摄影测量与遥感的定义是:摄影测量与遥感是从非接触成像或其他传感器系统,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可靠信息的工艺、科学与技术(Photogrammetry and Remote Sensing is the art, science and technology of obtaining reliable information from non-contact imaging and other sensor systems about the Earth and



its environment, and other physical objects and processes through recording, measuring, analyzing and representation)。其中,摄影测量侧重于提取几何信息,遥感侧重于提取物理信息。也就是说,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几何、属性等可靠信息的工艺、科学与技术。

摄影测量的特点之一是在像片上进行量测和解译。其主要工作是在室内进行,无须接触物体本身,因而很少受气候、地理等条件的限制;所摄影像是客观物体或目标的真实反映,信息丰富、形象直观,人们可以从中获得所研究物体的大量几何信息和物理信息;可以拍摄动态物体的瞬间影像,完成常规方法难以实现的测量工作;适用于大范围地形测绘,成图快、效率高;产品形式多样,可以生产纸质地形图、数字线划图、数字高程模型、数字正射影像等。摄影测量具有如下优点:①量测工作绝大部分在室内进行,可以不受自然地理等条件的限制;②量测工作和信息获取在时间和空间上是独立的;③机械化和自动化程度较高;④从所获信息中可以任意选择所需要测量和处理的对象;⑤全部信息都可以作为文献储存。

由于现代电子技术、通信技术和航天技术等飞速发展,摄影测量学科领域的研究对象和应用范围也不断扩大。可以这样说,只要目标物体能够被摄影成像,都可以使用摄影测量技术解决某一方面的问题。这些被摄物体可以是固体的、液体的,也可以是气体的;可以是静态的,也可以是动态的;可以是极近的、微小的(如电子显微镜下放大几千倍的细胞),也可以是遥远的、巨大的(如宇宙星体)。这些灵活性使得摄影测量学成为多领域广泛应用的一种测量手段和数据采集与分析的方法。所以,按照成像距离的不同,摄影测量可分为航天摄影测量、航空摄影测量、地面摄影测量、近景摄影测量和显微摄影测量。

由于影像是客观物体或目标的真实反映,其信息丰富、形态逼真,可以从中提取所研究对象大量的几何与物理信息,因此摄影测量广泛用于各个方面。按照用途的不同,摄影测量可分为地形摄影测量与非地形摄影测量:前者的主要任务是测绘各种专题图,建立地形数据库,为各种地理信息系统提供三维的基础数据;而后者主要用于工业、建筑、考古、医学、生物、体育、变形监测、事故调查、公安侦破与军事侦察等各方面。其对象与任务千差万别,但主要方法与地形摄影测量一样,即从二维影像重建三维模型,在重建的三维模型上提取所需的各种信息。这是摄影测量的第二个特点。

传统的摄影测量三维模型重建也应考虑物体表面纹理的表达,例如,地面的正射影像就是地表的真实纹理,但在大多数的应用中,较少考虑物体表面纹理的表达。随着社会、经济与科技的发展,三维模型真实纹理的重建在摄影测量的任务中变得非常重要。在一些应用中,需要利用不同的摄影方法完成真实纹理的重建,如城市的三维建模可能需要航空摄影与近景摄影相结合才能完成。

就摄影测量处理技术手段而言,有模拟法、解析法与数字法。随着摄影测量技术的发展,摄影测量也经历了模拟摄影测量、解析摄影测量和数字摄影测量三个发展阶段。

## 1.2 摄影测量学的发展

早在 18 世纪,数学朗伯(也译为家兰贝特)(J. H. Lambert)在他的著作(Frege Perspective, Zurich, 1759)中就论述了摄影测量的基础——透视几何的理论。若从 1837 年涅普斯(J. N. Niepce)和达盖尔(Louis Jacques Mand Daguerre)发明摄影术算起,摄影测量学已有 180 多年的历史了,而 1851—1859 年法国陆军上校艾米·洛瑟达(Aime Laussedat,被认为

是“摄影测量之父”)提出了交会摄影测量并测绘了万森纳城堡图,这被称为摄影测量学的真正起点。由于当时飞机尚未发明,摄影测量的几何交会原理仅限于处理地面的正直摄影,主要用来做建筑物摄影测量,而并不是用来进行地形测量。

已知的第一张航空像片是由一位名为纳达尔(Nadar,原名 Gaspard Felix Tournachon)的巴黎摄影师于1858年乘坐一个离地80米的气球拍摄的。目前,保存的最早的一幅航空像片,是1860年由美国人布莱克(James Wallace Black)利用湿板拍摄的波士顿航空像片。

1903年,莱特兄弟发明了飞机,使航空摄影和航空摄影测量成为可能。1906年,美国人劳伦仕用17只风筝吊着巨型相机拍摄了旧金山大火的珍贵历史性大幅照片。第一次世界大战期间,首台航摄仪的问世标志着摄影测量的真正开始,也使航空摄影测量成为20世纪以后测绘大面积地形图最有效、最快速的方法。我国航空摄影测量开始于1930年,但进入兴旺发达时期是1949年新中国成立以后。

### 1.2.1 模拟摄影测量(1851—1970年)

摄影测量的起源实际上就是模拟摄影测量的开端。最初,洛瑟达测的万森纳城堡图采用了图解法逐点测绘。直到20世纪初,由维也纳的军事地理研究所按照奥雷尔的思想制成了自动立体测图仪。后来由德国蔡司厂进一步研发,成功地制造了实用的立体自动测图仪(stereo autograph)。经过了半个多世纪的发展,到20世纪六七十年代,这种类型的仪器发展到了顶峰。由于这些仪器均采用光学投影器或机械投影器或是光学机械投影器“模拟”摄影过程,用它们交会被摄物体的空间位置,所以我们称之为模拟摄影测量仪器。著名摄影测量学者U. V. Helava于1957年在他的论文中谈到:能够用来解决摄影测量主要问题的现有的摄影测量测图仪,实际上都是以同样的原理为基础的,这个原理可以称为模拟的原理。这一发展时期也被称为模拟摄影测量时代。

这里所讲的模拟摄影测量,指的是用光学或机械方法模拟摄影过程,使两个投影器恢复摄影时的位置、姿态和相互关系,形成一个比实地缩小了的几何模型,即所谓摄影过程的几何反转,在此模型上的量测即相当于对原物体的量测。所得到的结果通过机械或齿轮传动的方式直接在绘图桌上绘制出各种图件来,如地形图或各种专题图,模拟法立体测图如图1.1所示。

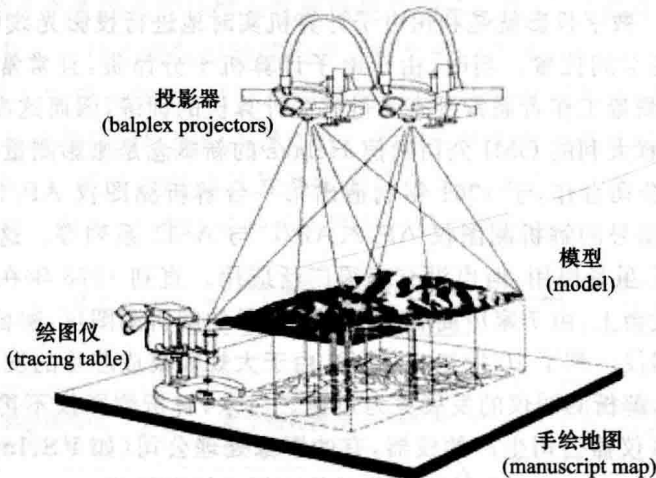


图 1.1 模拟法立体测图

在模拟摄影测量的漫长发展阶段中,摄影测量科技的发展可以说基本上是围绕着十分昂贵的模拟立体测图仪进行的。它是利用光学机械模拟投影的光线,由双像上的同名像点进行空间前方交会,获得目标点的空间位置,建立立体模型,进行立体测图。用于模拟投影光线的光机部件,称为光机导杆。根据投影方式的不同,模拟立体测图仪可以分为光学投影、光学-机械投影与机械投影三种类型。图 1.2 和图 1.3 是各种不同类型的模拟立体测图仪。

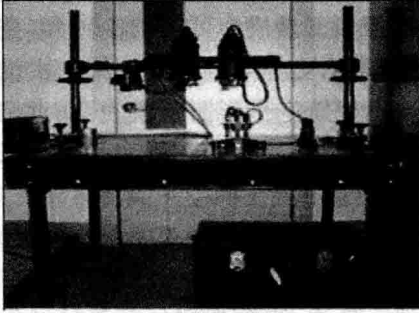


图 1.2 多倍仪

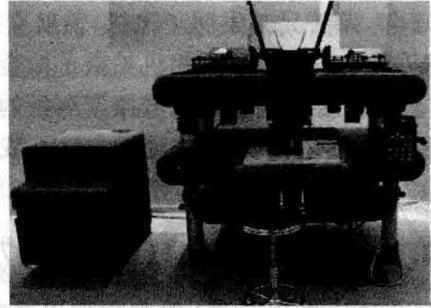


图 1.3 AMH 立体测图仪

由于航空摄影比地面摄影有明显的优越性(如视场开阔、无前景挡后景、可快速获得大面积地区的像片等),使得航空摄影测量成为 20 世纪以来大面积测制地形图最有效最快速的方法。如果说在 1901 年研制的立体坐标量测仪和 1909 年研制的 1318 立体自动测图仪还不是主要针对航空摄影测量的话,那么从 30 年代到 50 年代末,各国主要测量仪器厂所研制和生产的各种类型模拟测图仪器——光学和机械投影仪器、分工型和全能型仪器、简易型和精密型立体测图仪器——均完全是针对航空地形摄影测量的。这个时期是模拟航空摄影测量的黄金时代,在我国,它一直延续到 70 年代末。

### 1.2.2 解析摄影测量(1950—1980 年)

随着模数转换技术、电子计算机与自动控制技术的发展,Helava 于 1957 年提出了摄影测量的一个新概念,就是数字投影代替物理投影。所谓物理投影就是上述光学的、机械的或光线-机械的模拟投影。数字投影就是利用电子计算机实时地进行投影光线(共线方程)的解算,从而交会被摄物体的空间位置。当时,由于电子计算机十分昂贵,且常常受到电子故障的影响,加上实际的摄影测量工作者通常没有受过有关计算机的训练,因而这没有引起摄影测量界很大的兴趣。但是,意大利的 OMI 公司确信 Helava 的新概念是摄影测量仪器发展的方向,他们与美国的 Bendix 公司合作,于 1961 年制造出第一台解析测图仪 AP/1。后来经过不断改进,生产了一批不同型号的解析测图仪 AP/2、AP/C 与 AS11 系列等。这个时期的解析测图仪多数为军用,AP/C 虽是民用,但也没有获得广泛应用。直到 1976 年在赫尔辛基召开的国际摄影测量协会的大会上,由 7 家厂商展出了 8 种型号的解析测图仪,解析测图仪才逐步成为摄影测量的主要测图仪。到了 20 世纪 80 年代,由于大规模集成芯片的发展,接口技术日趋成熟,加之微机的发展,解析测图仪的发展更为迅速。后来,解析测图仪不再是一种专门由国际上一些大的摄影测量仪器公司生产的仪器,有的影像处理公司(如 I<sup>2</sup>S、Intergraph 公司等)也生产解析测图仪。图 1.4 和图 1.5 是几种著名的解析立体测图仪。

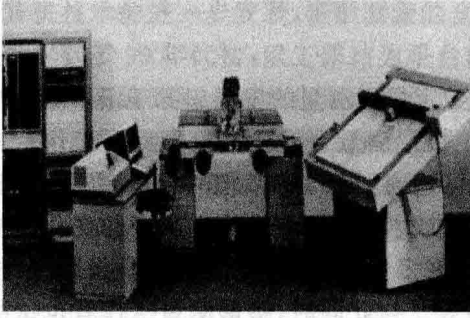


图 1.4 C-100 型解析测图仪

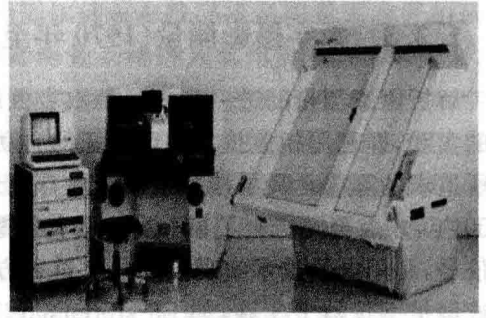


图 1.5 DSR-1 型解析测图仪

由于正射影像比传统的线划地图形象、直观、信息量丰富,受到了广泛的欢迎。解析摄影测量时期的另一类仪器是生产正射影像的数控正射投影仪。图 1.6 和图 1.7 是两种使用最广泛的数控正射投影仪。

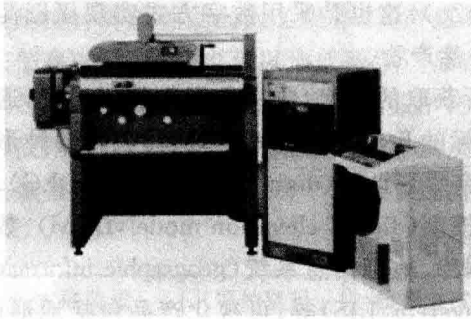


图 1.6 OR-1 型数控正射投影仪

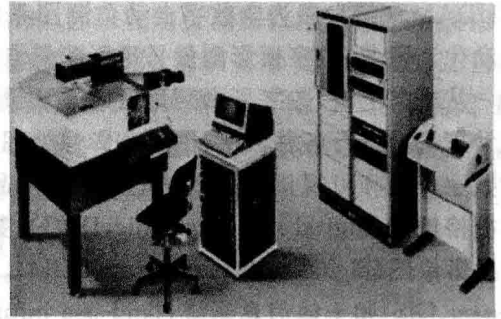


图 1.7 Z-2 型数控正射投影仪

这个时期受益最多、效果特别显著的还是以电子计算机为基础的解析空中三角测量,这是一项不小的改革。解析空中三角测量是用摄影测量方法快速、大面积地测定点位的精确方法,它经历了航带法、独立模型法和光束法平差三种方法的发展。在解析空中三角测量的长期研究中,人们解决了像片系统误差的补偿和观测值粗差的自动检测,从而保证了成果的高精度和高可靠性。摄影测量与各种非摄影测量观测值进行严密的整体平差和数据处理已成为一种高精度定位方法,用于大地控制加密、坐标地籍测量、航空和航天摄影测量及非地形摄影测量。摄影测量的这一发展时期为解析摄影测量时代。所谓的解析摄影测量即以电子计算机为主要手段,通过对摄影像片的量测和解析计算方法的交会方式来研究和确定被摄物体的形状、大小、位置、性质及其相互关系,并提供各种摄影测量产品的一门科学。具体流程如图 1.8 所示。

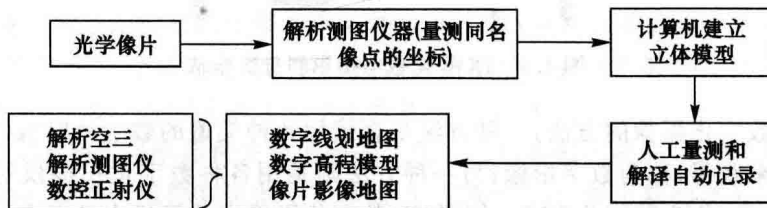


图 1.8 解析摄影测量的实现流程

### 1.2.3 数字摄影测量(1970 年至今)

解析摄影测量的进一步发展是数字摄影测量。数字摄影测量的发展起源于摄影测量自动化的实践,即利用相关技术实现真正的自动化测图。摄影测量自动化是摄影测量工作者多年来所追求的理想。最早涉及摄影测量自动化的专利可追溯到 1930 年,但并未付诸实施。直到 1950 年,才由美国研制了第一台自动化摄影测量测图仪。当时是将像片上灰度的变化转换成电信号,利用电子技术实现自动化。这种方法经过了许多年的发展,先后在光学投影型、机械型或解析型仪器上实施,如 B8-stereomat、Topomat 等。与此同时,摄影测量工作者也试图将由影像灰度转换成的电信号再转变成数字信号(即数字影像),然后由计算机来实现摄影测量的自动化过程。美国于 20 世纪 60 年代初研制成功的 DAMC 系统就是属于这种全数字的自动化测图系统。它采用 Wild 厂生产的 STK-1 精密立体坐标仪进行影像数字化,然后用一台 IBM7094 型电子计算机实现摄影测量自动化。原武汉测绘科技大学王之卓教授于 1978 年提出了发展全数字自动化测图系统的设想与方案,并于 1985 年完成了全数字自动化测图系统 WUDAMS(后发展为全数字自动化测图系统 Virtuozo),这也是采用数字方式实现摄影测量自动化。因此,数字摄影测量是摄影测量自动化的必然产物。

从广义上讲,数字摄影测量指的是从摄影测量所获取的数字/数字化影像数据出发,通过在计算机上进行各种数值、图形和影像处理,研究目标的几何和物理特性,从而获得各种形式的数字产品和可视化产品。这里的数字产品包括数字线划地图(digital line graphic,DLG)、数字栅格地图(digital raster graphic,DRG)、数字高程模型(digital elevation model,DEM)、数字正射影像图(digital orthophoto map,DOM)、测量数据库、地理信息系统(geographic information system,GIS)和土地信息系统(land-use information system,LIS)等;可视化产品包括地形图、专题图、纵横剖面图、透视图、正射影像图、电子地图、动画地图等。

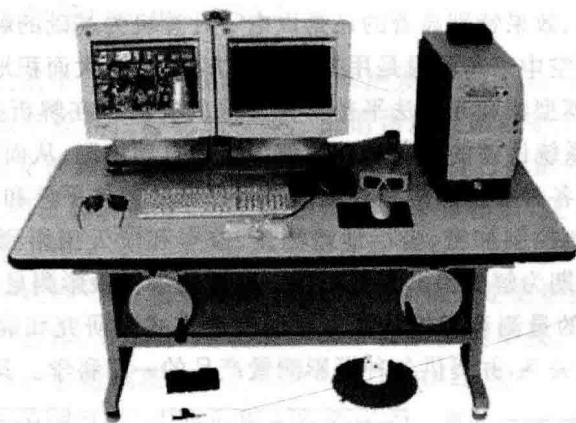


图 1.9 JX4C 全数字摄影测量工作站

获得数字/数字化影像的方法,一种方法是直接用各种类型的数字摄影机(如 CCD 阵列扫描仪或摄影机)来获得,称为数字影像;另一种方法则是用各种数字化扫描仪对胶片记录的像片进行扫描来获得,称为数字化影像。对数字/数字化影像在计算机中进行全自动化数字处理的方法又称为全数字化摄影测量(full-digital photogrammetry)。进入 20 世纪 80 年代后,随

随着计算机技术的进一步发展,摄影测量的全数字化处理软件——数字摄影测量系统开始研究和发展。到了90年代初,以工作站为平台的数字摄影测量系统进入实用阶段,90年代末,数字摄影测量系统开始全面替代传统的模拟摄影测量仪器,摄影测量生产真正步入了全数字化时代。由于全数字化摄影测量处理流程从原始数据的输入,到中间环节的数据处理,直至最后产品的输出都是数字形式的,因此在美国的摄影测量界又称之为软拷贝摄影测量(soft copy photogrammetry)。王之卓教授称之为全数字摄影测量(all digital photogrammetry 或 full digital photogrammetry)。

概括而言,摄影测量学经历了模拟法、解析法和数字法三个发展阶段,这在国际摄影测量界已达成共识。三个阶段都具有自身的特点:模拟摄影测量阶段主要依靠一些庞大的测图仪来实现地面点位的获取,采用的是模拟的物理投影方式,并且是完全的手工操作,使用的像片都是摄影的正片(或负片),是一些光学影像,得到的产品大部分都是描绘在纸上的线划地图或印在相纸上的影像图及模拟产品;解析摄影测量阶段则是利用计算机控制的解析测图仪或正射投影仪,采用数字投影的方式来实现地面点位的解算,与模拟阶段不同的是,它的数据处理过程是由计算机辅助的人工操作,其产品可以是模拟的,如果在解析测图仪上以数字形式记录相关信息的话,那么也可以形成数字产品;数字摄影测量与模拟、解析摄影测量最大的区别在于它处理的原始资料是数字影像或数字化影像,它最终是以计算机视觉代替人的立体观测,因而所使用的仪器最终将只是通用计算机及其相应外部设备,其产品是数字形式的,传统的产品只是该数字产品的模拟输出。表1.1列出了摄影测量三个发展阶段的特点。

表 1.1 摄影测量三个发展阶段的特点

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	光学像片	物理投影	模拟测图仪	作业员手工	模拟产品
解析摄影测量	光学像片	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	数字化影像 数字影像	数字投影	计算机+ 外围设备	自动化操作+ 作业员的干预	数字产品 模拟产品

#### 1.2.4 当代数字摄影测量面临的主要问题

随着计算机技术以及数字影像处理、模式识别、计算机视觉和人工智能等相关技术的不断发展,摄影测量与计算机学科相互渗透交叉,摄影测量在经历模拟摄影测量、解析摄影测量两个发展阶段后,现已进入数字摄影测量阶段,这对摄影测量的发展产生了极其深远的影响。从测绘学科而言,传统的摄影测量已发展为新兴的信息产业;从摄影测量学科而言,经典的摄影测量已发展为摄影测量与计算机视觉。数字摄影测量所使用的设备最终将是计算机加上相应的标准化外围设备,它的产品形式是全数字化的数字产品。

科技的进步使得当代摄影测量正在不断的变化。摄影手段的提高,影像种类的多样化,测量对象种类的增加,是当代摄影测量的一个新特点。同时,它也提出新的要求:提高测量精度、降低成本、加快速度,以及丰富测量成果等。

当代摄影测量尽管在很多方面都取得了惊人的进步和发展,但仍然存在许多典型的问题

或困难,主要表现在以下几个方面。

### 1. 辐射信息

当代数字摄影测量与解析摄影测量、模拟摄影测量根本的差别之一,在于对影像辐射信息的计算机数字化处理。在此之前,影像的辐射信息是利用光机设备及由人眼与大脑进行处理的,因而它在摄影测量的模拟与解析理论中没有一席之地,而在当时,我们也无法精确地测定它。随着科技的发展和航空遥感影像自动化处理的迫切需要,这种情况得到了完全改变,辐射信息在摄影测量中也变得非常重要,不利用辐射信息是无法实现摄影测量自动化的。在解析摄影测量中,一个目标点向量  $X_P$  是三维的,即

$$X_P = [X \ Y \ Z]^T \quad (1.1)$$

而在数字摄影测量中,目标点向量  $X_P$  变成四维的了,即

$$X_P = [X \ Y \ Z \ D]^T \quad (1.2)$$

式中,  $D = D(X, Y, Z)$  是该点的辐射量(灰度值或色彩量),集合  $\{D\}$  即目标的纹理信息,它在影像上的投影  $d = d(x, y)$  就是数字影像。

现在我们可以利用各种传感器精确获取多种频带多时域的辐射信息,即直接获取数字影像,也可以利用影像数字化仪将像片上的影像数字化获取数字化影像。由于数字影像的运用,许多在传统摄影测量中很难甚至不可能实现的处理,在全数字摄影测量中都能够处理甚至变得极为简单。例如,消除影像的运动模糊,按所需要的任务方式进行纠正、反差增强,多影像的分析与模式识别等。由于数字摄影测量直接使用的原始资料是数字影像,特别为摄影测量设计的传统光学机械型模拟仪器已不再是必须的了,其硬件系统实际上是一套计算机或工作站。因此,它更加适合于当前的发展,即与遥感技术和地理信息系统结合完成影像信息的提取、管理与应用。

随着虚拟现实与可视化需求的迅速增长,快速确定目标的纹理  $\{D\}$  已经成为当代数字摄影测量的一项重要任务。也就是说,当代数字摄影测量不仅要自动测定目标点的三维坐标,还要自动确定目标点的纹理。

### 2. 数据量与信息量

20世纪60年代发展起来的遥感技术对摄影测量的数据获取带来了很大的变化。在遥感技术中除了使用可见光的框幅式黑白摄影机外,还使用彩色、彩红外摄影、全景摄影、红外扫描仪、多光谱扫描仪、成像光谱仪、CCD线阵列扫描和面阵摄影机以及合成孔径侧视雷达等手段获取大量地球表面多时相、多光谱、多分辨率的影像数据。进入80年代后,遥感技术的新跃进再次显示了它对摄影测量的巨大作用。首先是航天飞机作为遥感平台或发射手段,可重复使用和返回地面,大大提高了遥感应用的性能,更重要的是许多新型传感器的地面分辨率(空间分辨率)、温度分辨率、光谱分辨率和时间分辨率都有了很大提高。例如,1986年和1990年法国发射的SPOT-1、SPOT-2卫星,利用两个CCD线阵列构成数字扫描仪,可获取空间分辨率为10m的地面全色波段影像。进入90年代,由于高分辨率长线阵、大面阵CCD传感器的问世,使得卫星遥感影像的地面分辨率大大提高。例如,法国研制的SPOT-5采用新的3台高分辨率几何成像仪器(high-resolution geometric imaging instrument, HRG),能提供地面分辨率5m/2.5m的影像;美国于1999年9月发射成功的IKONOS-2以及随后发射的“Quick Bird”,能提供空间分辨率为0.61m的全色影像和4~15m的多光谱影像。因此,传感器及其平台的迅速发展,大大增加了空间数据获取的途径和来源。

在全数字摄影测量阶段,处理的原始资料是数字影像。数字影像的每一个数据代表了被摄物体(或光学影像)上一个点的辐射强度(或灰度),这个点称为像元素,通常简称像素。像素的灰度值常用8位和12位二进制数表示。对于8 bits 全色影像,在计算机中正好占用一个字节(byte)。若是彩色影像,则需要3个字节分别存放红、绿、蓝或其他色彩系统的数值。像素的间隔即采样间隔根据采样定理由影像的分辨率确定。当采样间隔为0.02 mm时,一张23 cm×23 cm的影像包含大约120兆字节(1 MB=10<sup>6</sup> B)。直接由传感器获取的高分辨率遥感影像的数据量甚至更大,如一幅IKONOS影像可能包含1.6千兆字节(1 GB=10<sup>9</sup> B)。因而“数据量大”是全数字摄影测量的一个特点与问题。

传统的航空摄影,在航向上的重叠率一般是60%,旁向重叠率一般是30%,这对于人工作业是足够了。但是,对于计算机来说,几乎没有多余观测。由于信息量偏少,对自动化处理(如房屋的自动提取)非常不利。在许多非地形摄影测量的应用中,由于摄影重叠率小,连相邻影像的匹配也很困难。因此,当代数字摄影测量在摄影时,要尽量加大重叠率,甚至要获取序列影像。在交向摄影时,虽然影像的重叠率可能会很大,但因摄影的角度相差很大,因而物体的影像变形很大,影像匹配的难度也很大,此时也应该在其间增加摄影,构成多基线摄影测量。

如何高效、快捷、准确地处理这些种类繁多、形式多样的海量数据,成为摄影测量所面临的新的技术挑战。首先,这必然要依赖于计算机的发展,而目前的计算机已经能够在一定程度上达到这一要求。利用计算机的软硬件技术,寻求切实可行的海量数据处理的方式和方法,最大程度地实现自动化,将作业员从烦琐的工作中解脱出来,应是我们的主攻目标。所以,首先要考虑对这些海量数据的处理速度问题。

### 3. 速度与精度

数字摄影测量虽然仍处在不断的发展中,但它已经创造了惊人的奇迹,无论在量测的速度还是可达到的精度方面,都大大超过了人们最初的想象。例如,利用一台普通的计算机,其匹配速度一般可达500~1 000点每秒,利用全数字摄影测量自动立体量测数字地形模型(DTM)的速度可达100~200点每秒甚至更高,这是人工量测无法比拟的。但是数字摄影测量中量测与识别的计算任务是如此巨大,目前的计算机速度还不能实时完成,对于许多需要实时完成的应用,快速算法依然是必要的。

对影像进行量测是摄影测量的基本任务之一,它可分为单像量测与立体量测,这同样是数字摄影测量的基本任务。在提高量测精度方面,用于单像量测的高精度定位算子和用于立体量测的高精度影像匹配的理论与实践是数字摄影测量的重要发展,也是摄影测量工作者对数字影像处理所做的独特贡献。例如,对采样间隔50 μm的数字影像进行相对定向,其残差的中误差(均方根误差)可达±(3~5) μm,这相当于在一台分辨率为2 μm的解析测图仪上进行人工量测的结果。现在,无论是高精度定位算子还是高精度影像匹配,其理论精度均可高于1/10像素,达到所谓子像素级的精度。

### 4. 自动化与影像匹配

自动化是当代数字摄影测量最突出的特点,是否具有自动化(或半自动化)的能力,是当代数字摄影测量与传统摄影测量的根本区别。如果一套数字摄影测量工作站几乎没有自动化(或半自动化)的能力,而只是处理数字影像,那么除了其价格便宜以外,与解析测图仪也就没有很大的区别了。自动化(或半自动化)的能力的强弱,是评价数字摄影测量工作站性能最重要的指标。



在现实世界,我们所面对的是一个动态过程,即它在不停地变化,为保障数据的现势性,就需要实现从采集到处理再到更新的快速循环。尤其是应急情况需要快速响应,实现实时摄影测量已势在必行。为此,我们需探索新的硬件设施,如并行处理、格网计算和云计算等。

自动化处理大大节省了时间。以一幅  $2\text{ km} \times 2\text{ km}$  正射影像计算为例,手工处理约需 4 小时,而半自动处理仅需 1 小时 20 分钟,其生产效率提高了 3 倍。

影像匹配的理论与实践,是实现自动立体量测的关键,也是数字摄影测量的重要研究课题之一。影像匹配的精确性、可靠性、算法的适应性及速度均是其重要的研究内容,特别是影像匹配的可靠性一直是其关键之一。早期提出的多级影像匹配与从粗到细的匹配策略至今仍是提高其可靠性的有效策略,而近年来发展起来的整体匹配是提高影像匹配可靠性极其重要的手段。从单点匹配到整体匹配是数字摄影测量影像匹配理论和实践的一个飞跃。多点最小二乘影像匹配与松弛法影像匹配等整体匹配方法考虑了匹配点与点之间的相互关联性,因而提高了匹配结果的可靠性与结果的相容性、一致性。

### 5. 影像解译

到目前为止,数字摄影测量主要用于自动产生数字高程模型与正射影像图及交互提取矢量数据,但随着对影像进行自动解译的要求以及城镇地区大比例尺航摄影像、近景等工业摄影测量中几何信息提取需利用基于特征匹配与关系(结构)匹配的要求,全数字摄影测量领域很自然地展开了影像特征提取与进一步处理、应用的研究。各种特征提取算法很多,可分为点特征、线特征与面特征的提取。各种点特征提取算子中有的可以定位,有的还可以确定该点的性质(独立点、线特征点或角点等);面特征提取中有的采用区域增长法,有的则基于点特征采用线跟踪法再构成线与面;线特征提取也可利用 Hough 变换进行或利用 Fourier 变换、Gabor 变换(短时傅里叶变换或窗口傅里叶变换)及后来发展起来的 Wavelet 变换(小波变换)进行。这些特征提取方法与基于特征匹配与关系(结构)匹配的方法均与影像分析、影像理解紧密的联系,它们是数字摄影测量的另一个基本任务——利用影像信息确定被摄对象的物理属性的基础。常规摄影测量采用人工目视判读识别影像中的物体,遥感技术则利用多光谱信息辅之以其他信息实现机助分类。数字摄影测量中对居民地、道路、河流等地面目标的自动识别与提取,主要依赖于对影像结构与纹理的分析,这方面已经有了一些较好的研究成果。

数字摄影测量的基本范畴还是确定被摄对象的几何属性与物理属性(即量测与理解)。前者虽有很多问题尚待解决,需继续不断研究,但已开始达到实用程度;后者则离实用阶段还有很大的距离,尚处于研究阶段,但其中某些专题信息(如道路与房屋)的半自动提取将会首先进入实用阶段。

## 习题与思考题

1. 什么是摄影测量?
2. 简述摄影测量发展的三个阶段。
3. 如何理解摄影测量所面临的问题。