

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校摄影测量与遥感系列教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家精品课程教材

(第二版)

摄影测量学

张剑清 潘励 王树根 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校摄影测量与遥感系列教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家精品课程教材

摄影测量学

(第二版)

张剑清 潘励 王树根 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

摄影测量学/张剑清,潘励,王树根编著. —2版. —武汉:武汉大学出版社,2009.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校摄影测量与遥感系列教材

ISBN 978-7-307-06955-8

I. 摄… II. ①张… ②潘… ③王… III. 摄影测量—高等学校—教材 IV. P23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 044063 号

责任编辑:王金龙 责任校对:王 建 版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:通山金地印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:19.75 字数:473千字

版次:2003年6月第1版 2009年5月第2版

2009年5月第2版第1次印刷

ISBN 978-7-307-06955-8/P·146

定价:30.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

19 世纪中叶,摄影技术一经问世,便应用于测量,摄影测量学也就诞生了。摄影测量从模拟摄影测量开始,经过解析摄影测量阶段,现在已经进入数字摄影测量阶段,实现了摄影测量从人工操作到半自动化、自动化处理的过渡。20 世纪 80 年代以来,随着摄影测量的发展,摄影测量的专业课程也从一门课程分成了三门课程:基础摄影测量、解析摄影测量与数字摄影测量。在王之卓院士著名的《摄影测量原理》一书出版之后,与摄影测量三门课程相对应,已出版了《基础摄影测量学》、《解析摄影测量学》与《数字摄影测量学》等多套教科书。这些教科书虽然具有丰富的内涵并包括了近 20 年来摄影测量新的研究成果,但其中一部分教科书包含了相当数量的陈旧理论、仪器、工艺与方法,如果继续使用这些教材,势必影响本科生的学习、应试研究生的考学和教师的授课。为了剔除陈旧过时的内容,介绍当代摄影测量的最新研究成果,培养学生的综合素质和创新能力,急需在原有教材的基础上重新编写一本新的《摄影测量学》教科书,以真正反映当代摄影测量的基本原理、方法与内涵,以利于承前启后,加速摄影测量学科的发展,为教师教学、学生自主学习提供完整的教学方案,最大限度地满足教学需要,这就是编写本书的主要目的之一。

本书可作为测绘工程专业大学本科和函授的教材,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。

本书共分九章。第一、九章由张 4 编写;第二、三、七章由王树根编写;第四、五、六、八章由潘励编写,全书由张剑清统稿。

由于水平所限,书中可能存在不足与不妥之处,敬请读者不吝指正。

张剑清 潘 励 王树根

2002 年 12 月于武汉大学

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 摄影测量学的定义与任务	1
§ 1.2 模拟摄影测量	2
§ 1.3 解析摄影测量	5
§ 1.4 数字摄影测量	7
§ 1.5 当代数字摄影测量的若干典型问题	9
一、辐射信息	9
二、数据量与信息量	10
三、速度与精度	10
四、自动化与影像匹配	11
五、影像解译	11
习题与思考题	12
第二章 单幅影像解析基础	13
§ 2.1 空中摄影的基本知识	13
一、航空摄影机	13
二、空中摄影	17
§ 2.2 中心投影与透视变换	20
一、中心投影和正射投影	20
二、透视变换中的特殊点、线、面及特性	21
三、透视变换作图的基本方法	23
§ 2.3 共线方程	26
一、摄影测量常用的坐标系	26
二、影像的内外方位元素	27
三、空间直角坐标系的旋转变换	27
四、共线方程	28
五、有理函数模型	30
§ 2.4 航摄像片的像点位移与比例尺	32
一、像点位移	32
二、像片比例尺	35
§ 2.5 单幅影像解析基础	35

一、影像内定向	35
二、单像空间后方交会	36
习题与思考题	43
第三章 双像立体测图	46
§ 3.1 人眼的立体视觉和立体观测	46
一、人眼的立体视觉	46
二、人眼的分辨能力与观察能力	47
三、人造立体视觉	48
四、观察人造立体的条件	49
五、立体效应的转换	49
六、像对的立体观察	51
§ 3.2 立体像对相对定向与核线几何	54
一、相对定向元素与共面方程	54
二、连续像对相对定向	55
三、单独像对相对定向	59
四、核面与核线	60
§ 3.3 立体像对空间前方交会	64
一、利用点投影系数的空间前方交会方法	64
二、利用共线方程的严格解法	65
§ 3.4 单元模型的绝对定向	66
一、空间坐标的相似变换方程	66
二、空间相似变换公式的线性化	67
三、坐标的重心化	68
四、绝对定向的解算	69
§ 3.5 立体影像对光束法严密解	71
一、立体影像对的光束法严密解法(一步定向法)	71
二、双像解析摄影测量三种解法的比较	72
习题与思考题	73
第四章 解析空中三角测量	74
§ 4.1 概述	74
一、解析空中三角测量的目的和意义	74
二、解析空中三角测量的分类	75
三、进行解析空中三角测量所必需的信息	75
§ 4.2 影像连接点的类型与设置	76
一、人工转刺点	76
二、仪器转刺点	76
三、标志点	76

四、利用地面明显地物点(自然点)	77
五、数字影像匹配转点	77
§ 4.3 像点坐标量测与系统误差预改正	77
一、像点坐标的量测	78
二、摄影材料变形改正	78
三、摄影机物镜畸变差改正	78
四、大气折光改正	79
五、地球曲率改正	79
§ 4.4 航带法空中三角测量	80
一、自由航带网的构成	80
二、航带模型的绝对定向	82
三、航带模型的非线性改正	82
四、航带法区域网平差	83
§ 4.5 独立模型法区域网空中三角测量	85
一、独立模型法区域网空中三角测量的基本思想	85
二、独立模型法区域网空中三角测量的主要内容	86
三、独立模型法区域网空中三角测量的数学模型	86
§ 4.6 光束法区域网空中三角测量	87
一、光束法区域网空中三角测量的基本思想与内容	87
二、误差方程式和法方程式的建立	88
三、两类未知数交替趋近法	89
四、三种区域网平差方法的比较	90
五、解析空中三角测量的精度分析	91
§ 4.7 系统误差补偿与自检校光束法区域网平差	94
一、影像坐标系统误差的特性	94
二、补偿系统误差的方法	94
三、利用附加参数的自检校法	95
§ 4.8 摄影测量与非摄影测量观测值的联合平差	98
一、联合平差的概念	98
二、联合平差的发展过程	99
三、联合平差中非摄影测量观测值条件方程的建立	100
§ 4.9 GPS 辅助空中三角测量	102
一、全球定位系统(GPS)简介	102
二、GPS 辅助空中三角测量的兴起与发展	103
三、GPS 辅助空中三角测量的基本原理	105
四、试验举例	107
五、对方法的评价与展望	108
§ 4.10 自动空中三角测量	109
一、在线空中三角测量的概念	109

二、自动空中三角测量	110
三、GPS/POS 辅助全自动空中三角测量	110
§ 4.11 机载 POS 系统对地定位	111
一、POS 系统简介	112
二、POS 与航空摄影系统的集成方法	113
三、POS 系统在航空摄影测量中的应用	114
四、POS 系统对地定位的主要误差源	115
§ 4.12 解析摄影测量中粗差检测原理概述	117
一、粗差的概念	117
二、粗差检测理论	117
三、可靠性理论	118
习题与思考题	119
第五章 数字影像与特征提取	121
§ 5.1 数字影像采样与重采样	121
一、数字影像采样	122
二、影像重采样理论	123
三、核线的重排列(重采样)	126
§ 5.2 点特征提取算法	128
一、Moravec 算子	128
二、Forstner 算子	129
三、Harris 角点提取算法	130
§ 5.3 线特征提取算子	131
一、微分算子	132
二、二阶差分算子	133
三、特征分割法	135
四、Hough 变换	135
§ 5.4 定位算子	136
一、Wong-Trinder 圆点定位算子	137
二、Forstner 定位算子	137
三、高精度角点与直线定位算子	138
习题与思考题	141
第六章 影像匹配基础理论与算法	143
§ 6.1 影像相关原理	143
一、相关函数	143
二、电子相关	144
三、光学相关	144
四、数字相关	146

§ 6.2 影像相关的谱分析	148
一、相关函数的谱分析	148
二、金字塔影像相关(分频道相关)	150
§ 6.3 数字影像匹配基本算法	152
一、常见的五种基本匹配算法	152
二、基于物方的影像匹配(VLL法)	157
三、影像匹配精度	159
§ 6.4 最小二乘影像匹配	161
一、最小二乘影像匹配原理	161
二、单点最小二乘影像匹配	164
三、最小二乘影像匹配的精度	167
§ 6.5 特征匹配	168
一、基于特征点的影像匹配的策略	168
二、跨接法影像匹配	170
三、SIFT算子	173
习题与思考题	179
第七章 数字地面模型的建立与应用	180
§ 7.1 概述	180
一、数字地面模型的发展过程	180
二、数字地面模型的概念及形式	180
§ 7.2 数字高程模型的数据获取及预处理	182
一、DEM数据点的采集方法	182
二、数字摄影测量的DEM数据采集方式	183
三、DEM数据预处理	185
§ 7.3 数字高程模型的内插方法	186
一、移动曲面拟合法	187
二、多面函数法DEM内插	188
三、有限元法DEM内插	189
§ 7.4 DEM的精度及存贮管理	191
一、估计DEM的精度方法	191
二、DEM的存贮管理	192
§ 7.5 三角网数字地面模型	195
一、三角网数字地面模型的构建	195
二、三角网数字地面模型的存贮	196
§ 7.6 数字地面模型的应用	198
一、基于矩形格网的DEM多项式内插	198
二、三角网中的内插	199
三、等高线的绘制	200

四、立体透视图	204
五、DEM 的其他应用	208
习题与思考题	210
第八章 数字微分纠正	212
§ 8.1 数字微分纠正的概念	212
§ 8.2 框幅式中心投影影像的数字微分纠正	212
一、数字微分纠正的基本原理	213
二、反解法(间接法)数字微分纠正	213
三、正解法(直接法)数字微分纠正	215
四、数字纠正实际解法及分析	216
§ 8.3 线性阵列扫描影像的数字纠正	217
一、间接法纠正	218
二、直接法纠正	219
三、直接法与间接法相结合的纠正方案	220
四、多项式纠正	220
五、基于有理多项模型的高分辨率遥感影像参数的解算	221
§ 8.4 立体正射影像对的制作	223
一、基本思想	223
二、立体正射影像对的制作方法(斜平行投影法)	223
三、立体正射影像对的高程量测精度	225
四、适合高程量测的立体正射影像对制作(对数投影法)	226
五、立体正射影像对的应用	228
§ 8.5 真正射影像的概念及其制作原理	229
一、遮蔽的概念	229
二、正射影像上遮蔽的传统对策	230
三、真正射影像的概念及其制作原理	230
§ 8.6 正射影像的质量控制	233
一、正射影像质量控制的主要内容	233
二、正射影像的匀光处理	234
§ 8.7 景观图的制作原理	237
一、模拟灰度景观图	237
二、真实景观图(Landscape)	239
习题与思考题	240
第九章 计算机辅助测图(数字测图)	241
§ 9.1 矢量数据采集	241
一、矢量数据采集设备与过程	241
二、矢量数据采集与存贮	242

三、矢量数据采集基本算法	244
§ 9.2 矢量数据编辑	245
一、矢量数据的图形显示	246
二、图形编辑	247
三、字符编辑	250
§ 9.3 矢量数据的图形化输出	250
一、绘图基本算法	251
二、图板定向	255
三、图式符号的绘制	256
四、裁剪与注记	258
习题与思考题	259
第十章 数字摄影测量系统	261
§ 10.1 概述	261
§ 10.2 数字摄影测量工作站的组成与功能	262
一、数字摄影测量工作站的组成	262
二、数字摄影测量工作站的功能	263
§ 10.3 数字摄影测量工作站的作业与产品	265
一、数字摄影测量工作站的作业方式	265
二、数字摄影测量工作站的工作流程	266
三、数字摄影测量工作站的产品	267
§ 10.4 数字摄影测量工作站简介	267
一、混合型(Hybrid)数字摄影测量工作站	268
二、第一台数字摄影测量工作站 DAMC(Digital Automatic Map Compiler)	272
三、第一台商品化的数字摄影测量工作站 DSP1(Digital Stereo Photogrammetric System)	273
四、LH的数字摄影测量工作站 DPW770	276
五、中国的数字摄影测量工作站 VirtuoZo	278
六、部分商用数字摄影测量工作站现状(引自 Heipke 教授的论文)	281
§ 10.5 数字摄影测量系统	287
一、数字摄影测量网格(DPGrid)系统	289
二、像素工厂系统(Pixel Factory)	296
习题与思考题	299
参考文献	300

第一章 绪 论

摄影测量学有着较悠久的历史,19世纪中叶,摄影技术一经问世,便应用于测量。它从模拟摄影测量开始,经过解析摄影测量阶段,现在已经进入数字摄影测量阶段。当代的数字摄影测量是传统摄影测量与计算机视觉相结合的产物,它研究的重点是从数字影像自动提取所摄对象的空间信息。基于数字摄影测量理论建立的数字摄影测量工作站和数字摄影测量系统正在取代传统摄影测量所使用的模拟测图仪与解析测图仪。

§ 1.1 摄影测量学的定义与任务

国际摄影测量与遥感协会 ISPRS(International Society of Photogrammetry and Remote Sensing)1988年给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和其他传感器系统,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 noncontact 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。

摄影测量的特点是对影像进行量测与解译等处理,无需接触物体本身,因而较少受到周围环境与条件的限制。被摄物体可以是固体、液体或气体;可以是静态或动态;也可以是遥远的、巨大的(宇宙天体与地球)或极近的、微小的(电子显微镜下的细胞)。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、近景摄影测量和显微摄影测量等。

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物体大量的几何信息与物理信息,因此,摄影测量可以广泛应用于各个方面。按照应用对象的不同,摄影测量可分为地形摄影测量与非地形摄影测量。地形摄影测量的主要任务是测绘各种比例尺的地形图及城镇、农业、林业、地质、交通、工程、资源与规划等部门需要的各种专题图,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。非地形摄影测量用于工业、建筑、考古、医学、生物、体育、变形观测、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,但其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。

传统的摄影测量三维模型重建也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了。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,例如城市的三维建模,可能需要航空摄影与近景摄影相结合才能完成。

摄影测量的技术手段有模拟法、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、解析摄影测量与数字摄影测量三个发展阶段。

§ 1.2 模拟摄影测量

早在 18 世纪,数学家兰勃特(J. H. Lambert)在他的著作(Frege Perspective, Zurich, 1759)中就论述了摄影测量的基础——透视几何理论。1839 年法国 Nièpce 与 Daguerrein 发明了摄影技术以后,摄影测量学开始了它的发展历程。19 世纪中叶,劳塞达(A Laussedat, 被认为是“摄影测量之父”)利用所谓“明箱”装置,测制了万森城堡图,当时一般采用图解法进行逐点测绘。直到 20 世纪初,才由维也纳军事地理研究所按奥雷尔(Orel)的思想制成了“自动立体测图仪”。后来由德国卡尔蔡司厂进一步发展,成功地制造了实用的“立体自动测图仪”(Stereoautograph)。经过了半个多世纪的发展,到 20 世纪 60~70 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(摄影光束的几何反转),所以称其为“模拟摄影测量仪器”。著名摄影测量学者 U. V. Helava 于 1957 年在他的论文中谈道:“能够用来解决摄影测量主要问题的现有的全部的摄影测量测图仪,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”。在这一时期,摄影测量工作者们都在自豪地欣赏着 20 世纪 30 年代德国摄影测量大师 Gruber 的一句名言,那就是:“摄影测量就是能够避免繁琐计算的一种技术。”有些仪器冠以“自动”二字,其含义也仅在于此,即利用光学机械模拟装置,实现了复杂的摄影测量解算,但是,它并不意味着不需要人工的立体观测,而真的实现“自动测图”。

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。立体测图的基本原理是摄影过程的几何反转,模拟立体测图仪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。用以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,模拟立体测图仪可分为光学投影、光学-机械投影与机械投影三种类型。图 1-2-1 至图 1-2-8 是各种不同类型的模拟立体测图仪。

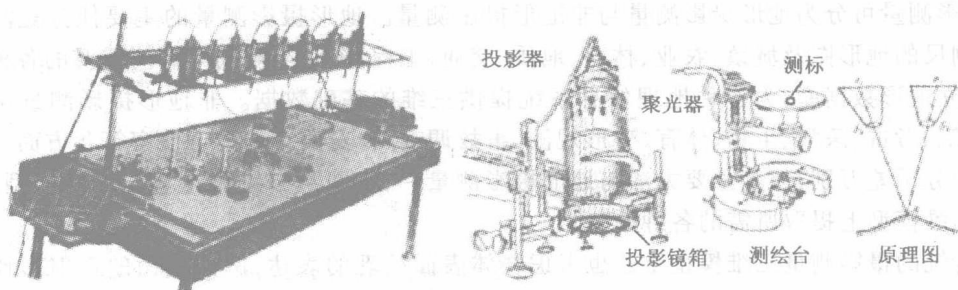


图 1-2-1 多倍仪(光学投影)

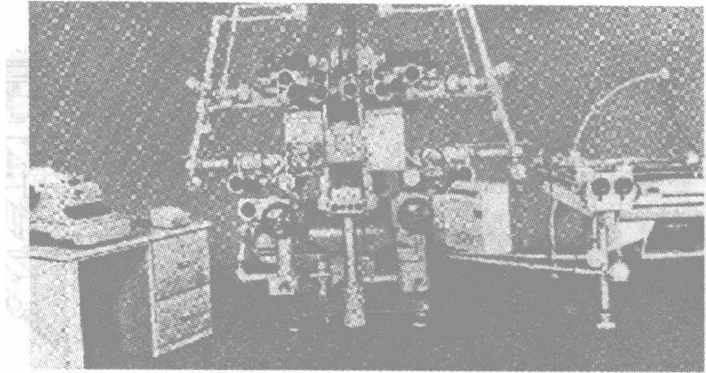


图 1-2-2 Stereoplanigraph C8 立体测图仪(光学投影)

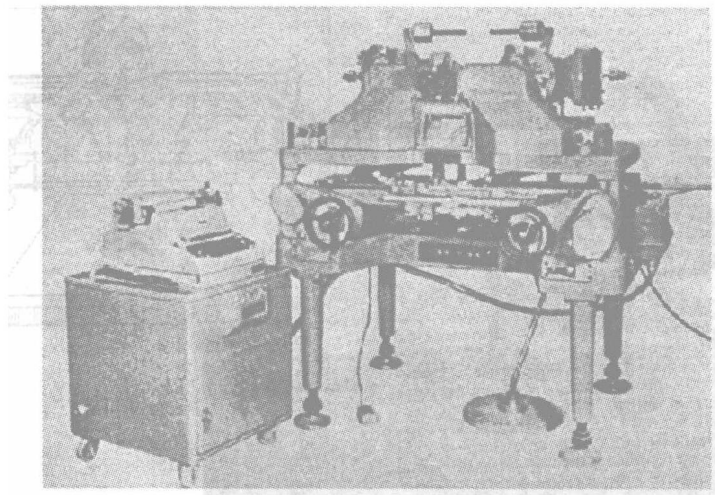


图 1-2-3 Stereoplanigraph B 立体测图仪(光学-机械投影)

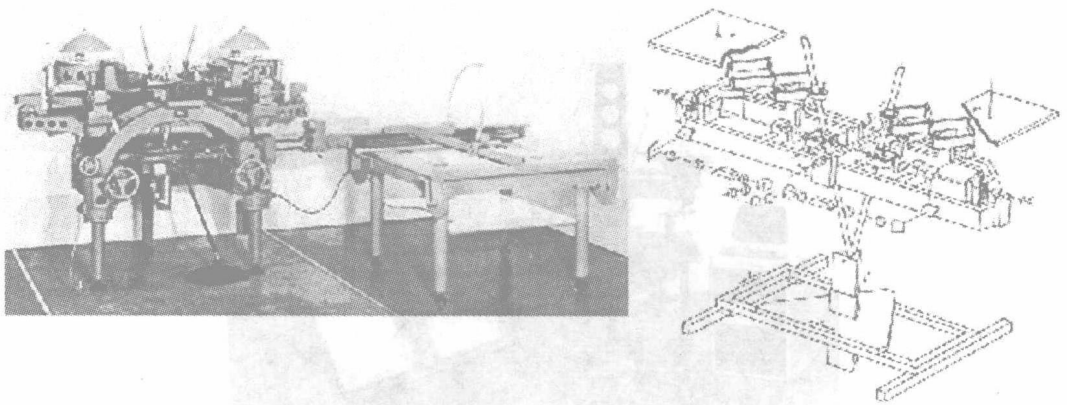


图 1-2-4 A8 Autograph 立体测图仪(机械投影)

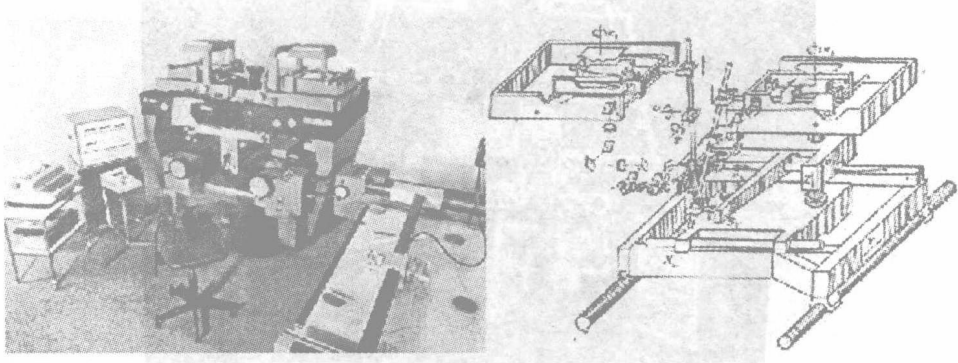


图 1-2-5 A10 立体测图仪

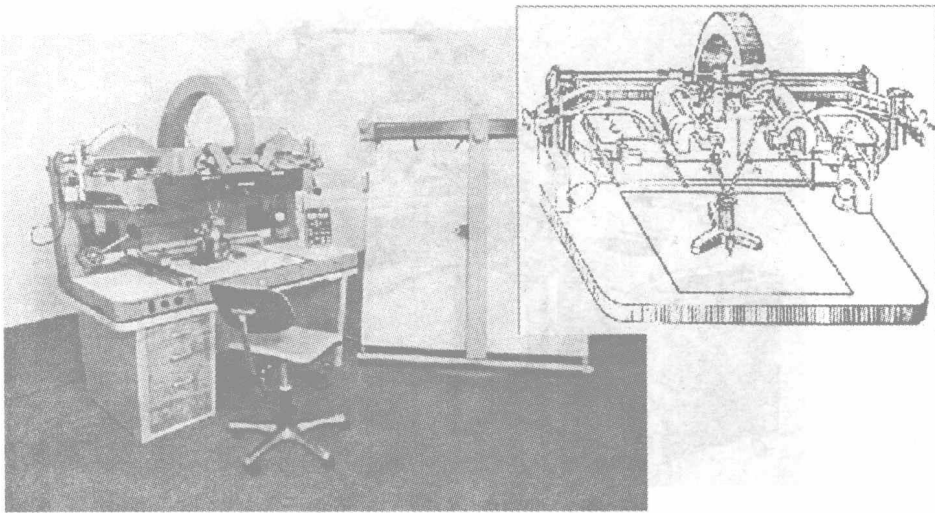


图 1-2-6 B8(S) 立体测图仪

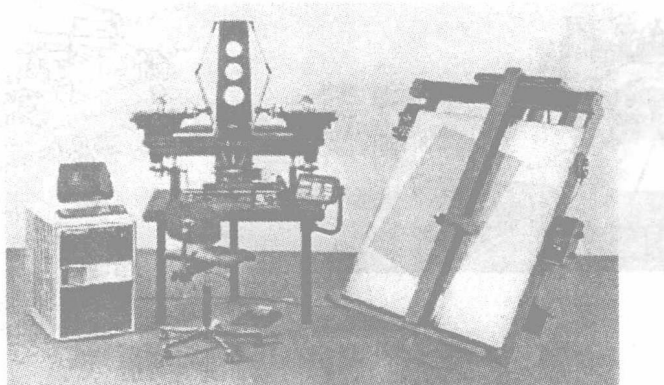


图 1-2-7 AG1 立体测图仪

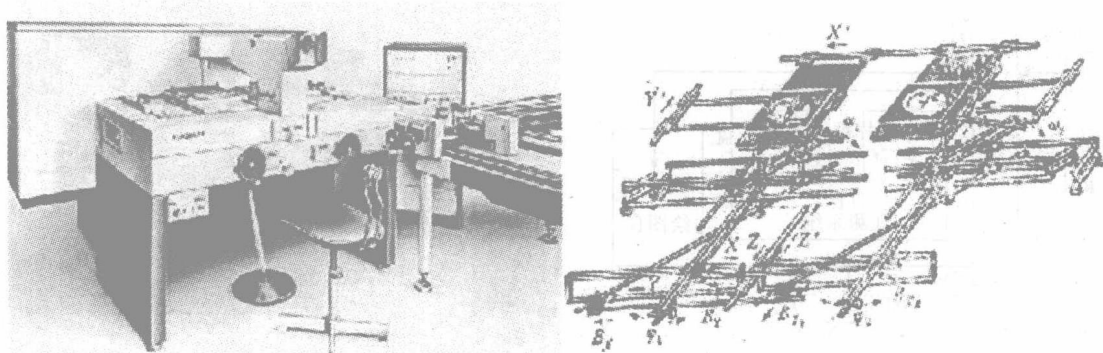


图 1-2-8 Topocart 立体测图仪

§ 1.3 解析摄影测量

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“用数字投影代替物理投影”。所谓“物理投影”就是上述“光学的、机械的或光学-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。后来又不断改进, 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, 有的图像处理公司(如 I²S, Intergraph 公司等)也生产解析测图仪。摄影测量的这一发展时期有代表性的仪器设备就是“解析立体测图仪”。图 1-3-1 所示的是解析立体测图仪的原理图, 图 1-3-2 至图 1-3-6 是几种著名的解析立体测图仪。

由于正射影像比传统的线画地图形象、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 1-3-7 与图 1-3-8 是两种使用最广泛的数控正射投影仪。

在这个时期受益最多、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。我们称摄影测量的这一发展时期为“解析摄影测量时代”。解析测图仪与模拟测图仪的主要区别在于: 前者使用的是数字投影方式; 后者使用的是模拟的物理投影方式。由此导致仪器设计和结构上的不同: 前者是由计算机控制的坐标量测系统; 后者使用纯光学、机械型的模拟测图装置。还有操作方式的不同: 前者是计算机辅助的人工操

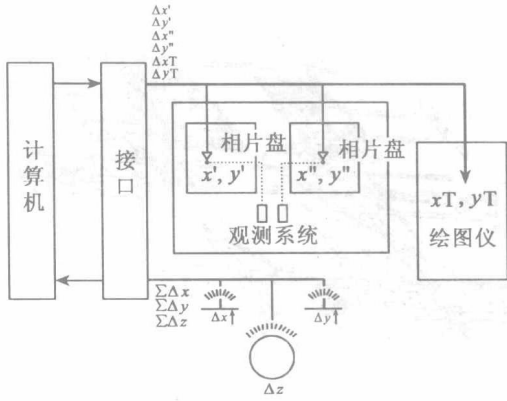


图 1-3-1 解析立体测图仪原理图

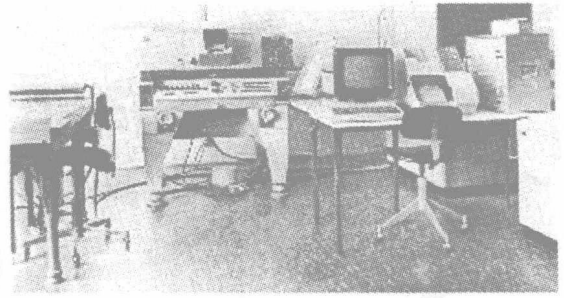


图 1-3-2 AP/C3 解析立体测图仪

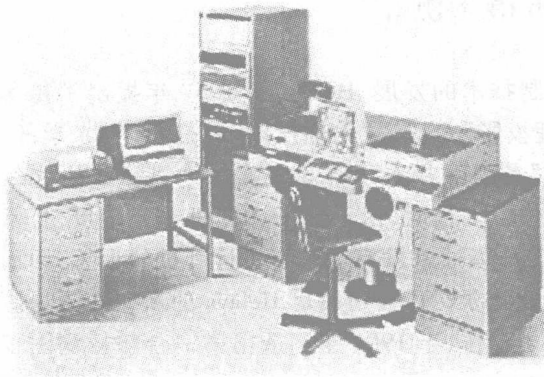


图 1-3-3 C100 解析立体测图仪

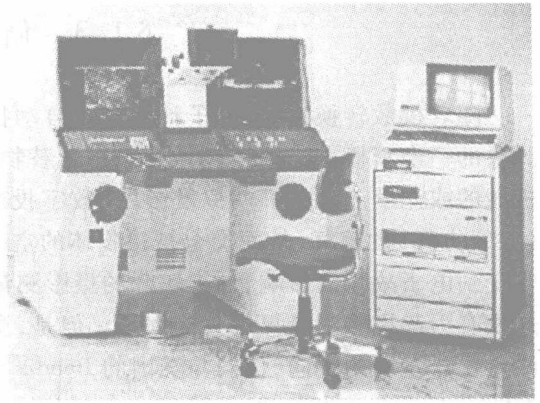


图 1-3-4 DSR11 解析立体测图仪

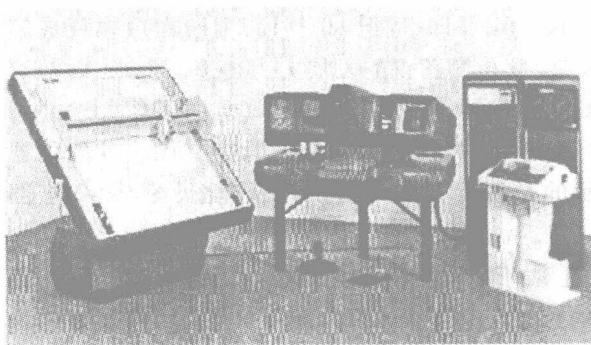


图 1-3-5 AC1 解析立体测图仪

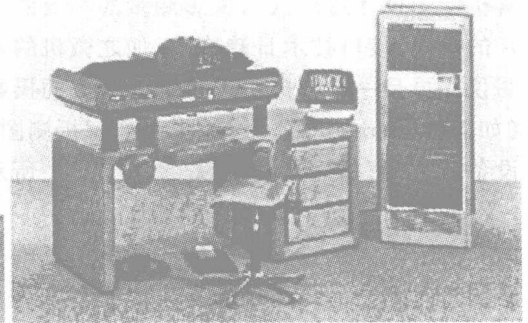


图 1-3-6 BC1 解析立体测图仪

作；后者是完全的手工操作。由于在解析测图仪中应用了电子计算机，因此，免除了定向的繁琐过程及测图过程中的许多手工作业方式。但它们都是使用摄影的正片（或负片）或相片，并都需要人用手去操纵（或指挥）仪器，同时用眼进行观测。其产品则主要是描绘在纸