



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



测绘科技专著出版基金资助

CEHET KEJI ZHUANZHU CHUBAN JIJIN ZIZHU

数字摄影测量学

Digital Photogrammetry

耿则勋 张保明 范大昭 编著



测绘出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
测绘科技专著出版基金资助

数字摄影测量学

Digital Photogrammetry

耿则勋 张保明 范大昭 编著

测绘出版社

·北京·

© 耿则勋 张保明 范大昭 2010

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

本书系统介绍了数字摄影测量的理论基础、基本过程及其所涉及的理论与算法,以及数字摄影测图软件系统与工作站等。内容包括数字影像获取与处理基础、数字影像的特征提取与定位、数字影像定向、数字影像匹配、数字高程模型、数字微分纠正、数字矢量地图测制,以及数字摄影测量工作站。全书力争用通俗的语言叙述相关内容,对相关的理论模型与算法有深入的分析 and 连贯的推导,每一过程和算法都有具体的实现步骤。本书不仅通俗易懂、便于自学、易于工程实现,而且通过对各种理论模型和算法设计依据的分析,本书还能使读者在分析问题、解决问题方面得到启示。

本书可作为高等院校与科研机构摄影测量与遥感、测绘工程、地理信息系统等专业的本科生和研究生的教材,也可供有关遥感影像信息获取与处理专业的工程技术人员和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字摄影测量学 / 耿则勋, 张保明, 范大昭编著

—北京: 测绘出版社, 2010. 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5030-2106-0

I. ①数… II. ①耿…②张…③范… III. ①数字
摄影测量—高等学校—教材 IV. ①P231.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 156234 号

责任编辑 杨蓬莲 执行编辑 万茜婷 封面设计 李 伟 责任校对 董玉珍 李 艳

出版发行 测绘出版社

地 址 北京市西城区三里河路 50 号

邮政编码 100045

电子信箱 smp@sinomaps.com

印 刷 北京金吉士印刷有限责任公司

成品规格 184mm×260mm

印 张 17

版 次 2010 年 8 月第 1 版

印 数 0001—3000

电 话 010—68531160(营销)

010—68531609(门市)

网 址 www.sinomaps.com

经 销 新华书店

字 数 410 千字

印 次 2010 年 8 月第 1 次印刷

定 价 38.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-2106-0/P·482

本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。

序

摄影测量有着悠久的发展历史。自 19 世纪中叶,摄影技术在欧洲发明以来,通过摄影这种非接触方式对物理目标和现象进行观察和量测的技术一直得到不断的发展。从 1858 年法国的 Laussedat 利用气球摄影制作最早的地图以来,摄影测量经历了由模拟摄影测量、解析摄影测量直到今天的数字摄影测量的发展过程。

模拟摄影测量是以光学投影及光学、机械交会的摄影测量仪器为代表的摄影测量。由此设计、制造的形形色色的纠正仪、测图仪器,使摄影测量发展成为测绘学科的重要分支与测绘生产的重要组成部分。摄影测量是摄影过程的几何反转,因而模拟摄影测量不仅为各种全能立体测图仪提供了基础,而且也是建立摄影测量空间关系的思维方法的基础。模拟摄影测量的摄影测量近似关系(一次项公式)还解决了模拟摄影测量仪器定向迭代过程的问题,至今仍是数字摄影测量进行“估算”的重要工具。因此,虽然它与今日的以计算机为标志的数字摄影测量不能同日而语,但是模拟摄影测量是摄影测量的基础。

1957 年,芬兰摄影测量学家 Helava 提出了摄影测量的一个新的概念,就是“用数字投影代替物理投影”,开创了解析摄影测量时代。解析测图仪、正射投影仪、严密的摄影测量解析关系、摄影测量与非摄影测量数据严密处理、光束法平差成为解析摄影测量的代表,所有这一切都是当今数字摄影测量的基础。

无论是模拟摄影测量、解析摄影测量,影像间的对应性(同名点)问题都是由人工目视确定。而解决影像间的对应性问题、自动化问题一直是摄影测量工作者追求的目标。随着计算机运算能力的提高,利用计算机解求影像间的对应性问题成为可能。20 世纪 60 年代美国研制成功的 DAMC 系统就是一个全数字的自动化测图试验。王之卓院士也于 1978 年提出了研究“全数字化自动测图系统”的课题,为我国的数字摄影测量及其在生产中的应用开辟了广阔的前景。

摄影测量起源于摄影,摄影技术发展必将促进摄影测量的发展。真是无独有偶,40 年前——1969 年,韦拉德·博伊尔与乔治·史密斯于贝尔实验室,合作发明了世界上第一个电荷耦合器件(CCD)而获得 2009 年诺贝尔物理学奖,由此足见 CCD 器件对当今人类的意义。而由 CCD 构建的数字相机,已经给摄影测量带来了一个质的飞跃。由于数字相机的 CCD 后背与银盐胶片相比有其无可比拟的优点:没有颗粒噪声、没有压平误差,这些特征极大地提高了摄影测量自动化、匹配的可靠性与精度,使得摄影测量直接获得比 LiDAR 密度更高的点云成为可能;又如:过去无法想象的,利用一台非量测数字相机通过无协作目标全站仪测定控制,就能达到两万分之一的精度;也正是由于它无须扫描就能获得数字影像,才使摄影测量能用于抗震救灾的应急响应。

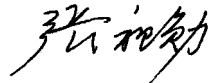
随着 21 世纪数字相机等传感器的迅速发展与广泛应用,以及计算机网络、集群处理的能力的发展,对应的摄影测量理论也在不断发展,与数字摄影测量密切相关的计算机视觉、计算机图形学也在影响着摄影测量的发展,它们的结合不仅正在迎来数字摄影测量新一轮的发展,同时也拓展了数字摄影测量的应用领域。大到嫦娥工程利用三线阵相机测绘月球三维表面,

小到 LBS(基于位置服务)每个 POI(兴趣点)的自动测定,都与摄影测量密切相关。

本书正是恰逢其时、应运而生,它是作者多年数字摄影测量课程讲授成果的体现。全书的内容安排由浅入深,通俗易懂。在数字摄影测量相关基础理论与算法方面,作者对原始文献进行了充分的消化吸收,然后提炼为说理充分、逻辑严谨的教材内容。书中对数字影像匹配等核心内容建立起了较严格的基本概念和逻辑关系,并使相关概念紧密联系,环环相扣。作者在阅读分析国内外大量最新研究文献的基础上,还对一些内容的新进展,如相关系数匹配的算法改进、Forstner 点特征提取算子的子像素精度推广等进行了讨论与介绍。书中还包含了作者的研究结果,如核线几何分析、核线影像分块快速生成等。此外,全书各章后还附有大量紧扣重点的思考题。

本书是一本较系统地介绍数字摄影测量的理论模型、算法设计与数字摄影测量系统及工作站的著作,是对本科或研究生进行摄影测量教学的理想教材与参考书,对从事数字摄影测量理论研究和工程实现的技术人员也有较好的参考价值。我相信本书的出版,将会对在该领域从事研究的工作者有所帮助,也会对从事数字摄影测量研究和设计的工程技术人员有所启示。

中国工程院院士



2009 年 10 月

前 言

摄影测量就是通过影像获取被摄对象的几何属性与物理属性的一门技术,经过模拟和解析等阶段的发展,已经进入到数字摄影测量时期。虽然摄影测量有着 160 多年的发展历史,但数字摄影测量还是一门相对年轻的、快速发展的学科,其在国民经济的许多领域,如数字化基础地理信息数据的获取、工业和工程测量、大型和复杂工业设备的安装、建筑和遗产保护、司法调查、地球外部空间测量等,都有重要的应用。

本书是在作者多年讲授数字摄影测量课程的基础上完成的。全书内容的撰写与安排力争做到如下几点。第一,通俗易懂,便于自学。书中的内容安排顺序与取舍由浅入深,按照数字摄影测量的基本过程安排内容,叙述方式与结构均是在长期教学过程中所积累经验的基础上形成,与学生或其他初学者的学习模式和思路吻合较好,适宜于自学。第二,阅读分析并提供丰富翔实的原始参考文献,书中所涉及的理论与算法,均是在作者充分阅读原始文献、分析并理解理论模型的基础上,消化吸收原文献算法和明了计算过程后再转化而成的教材内容。第三,对相关理论分析透彻,算法步骤推导详细,易于工程实现。所介绍的理论模型、过程算法都有合理的设计依据分析,并希望读者能从相应的问题分析中学到解决问题的思路和启示;相关算法均有详细可实现的具体步骤,便于学习者自学和软件编程实现。第四,逻辑严谨,说理充分。尤其是对数字影像匹配这部分内容,在阅读参考大量中外文献的基础上,建立起了严格的基本概念、逻辑关系,以及近似的公理化结构,使得所涉及的共轭实体、匹配实体、相似性测度、匹配方法与匹配策略,连同相应匹配问题描述等概念环环相扣、协调一致,思路清晰。此外,全书还附有数量丰富的思考题,便于学生课后检查自评及进一步深入思考。

全书共分十一章。其中第一、二、三章,第四章的第三、五节,第五、六、七章,第十一章的第一至第四节由耿则勋教授编著。第四章的第一、二、四节,第八章的第一至第四节,第十章由张保明教授编著。第八章的第五节,第九章,第十一章的第五、六节由范大昭副教授编著。全书由耿则勋教授统一成稿。

本书的完成得益于许多人的指导和帮助。衷心感谢中国工程院张祖勋院士多年来在本书编著过程中始终给予的指导和关爱,并为本书写了序言。感谢解放军信息工程大学测绘学院训练部张卫强部长、张晓森副部长,以及郭延斌主任对本书出版的关心与支持。感谢解放军信息工程大学测绘学院遥感信息工程系姜挺主任的指导和帮助,以及所提出的宝贵意见;感谢徐青教授给予的指导、支持,以及所提出的宝贵意见;感谢张永生教授,他为本书的写作提供了有关 Leica ADS80 的最新文献。感谢解放军信息工程大学遥感信息工程系航空航天摄影测量教研室主任龚志辉教授给予的支持和关心;感谢马秋禾教授、王慧教授对教材写作的帮助与有益讨论。硕士生王洛飞、魏小峰录入了几乎全部书稿,他们还与硕士生赵震磊一起绘制了大量插图,付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢。本书在撰写过程中参考借鉴了大量国内外同行的研究成果及文献,谨在此表示诚挚的敬意与真诚的感谢。

由于作者学术视野、专业水平和研究深度所限,书中难免出现错误或不严谨之处,敬请专家同行以及广大读者批评指正。

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 摄影测量的发展阶段与特点	1
§ 1-2 数字摄影测量的定义与研究内容	7
§ 1-3 数字摄影测量产品	10
§ 1-4 数字摄影测量有待进一步研究的问题	13
思考题	16
第二章 数字影像获取与处理基础	17
§ 2-1 数字影像的定义	17
§ 2-2 数字影像处理基础	20
§ 2-3 模拟影像数字化	24
§ 2-4 数字影像重采样	30
§ 2-5 数字成像传感器	35
§ 2-6 航空数字影像获取系统及其特点	38
§ 2-7 航天数字影像获取系统及其特点	46
思考题	51
第三章 数字影像的特征提取与定位	52
§ 3-1 点特征提取算子	52
§ 3-2 线特征提取算子	63
§ 3-3 数字影像的点特征定位	72
§ 3-4 数字影像的线特征定位	77
思考题	85
第四章 数字影像定向	87
§ 4-1 数字影像内定向	87
§ 4-2 单像空间后方交会	89
§ 4-3 数字影像相对定向	92
§ 4-4 数字立体模型绝对定向	100
§ 4-5 核线几何解析与核线影像生成	104
思考题	112
第五章 数字影像匹配基础	114
§ 5-1 数字影像匹配的基本概念	114
§ 5-2 数字影像匹配的基本问题	117
§ 5-3 数字影像匹配基本问题的解决方案	121
§ 5-4 影像相关的谱分析	124
思考题	127
第六章 基于灰度的影像匹配	128
§ 6-1 基于灰度的影像匹配概述	128

§ 6-2 基于相关系数的灰度匹配	133
§ 6-3 最小二乘影像匹配	138
§ 6-4 直接生成 DEM 的影像匹配	147
思考题	150
第七章 基于特征的影像匹配与整体匹配	151
§ 7-1 特征匹配概述	151
§ 7-2 点特征匹配	160
§ 7-3 线特征匹配	169
§ 7-4 跨接法影像匹配	176
§ 7-5 整体影像匹配	180
思考题	185
第八章 数字高程模型	186
§ 8-1 数字高程模型概述	186
§ 8-2 数字高程模型数据获取与预处理	189
§ 8-3 数字高程模型的构建	191
§ 8-4 数字高程模型的应用	196
§ 8-5 数字表面模型	199
思考题	203
第九章 数字微分纠正	204
§ 9-1 数字微分纠正的基本原理	204
§ 9-2 线阵列扫描影像的数字微分纠正	207
§ 9-3 基于有理函数模型的数字微分纠正	212
§ 9-4 真正射影像生成	217
思考题	222
第十章 数字矢量地图测制	223
§ 10-1 数字矢量地图	223
§ 10-2 数字矢量地图数据采集	224
§ 10-3 数字矢量地图数据编辑	227
思考题	230
第十一章 数字摄影测量工作站	231
§ 11-1 数字摄影测量工作站的概念	231
§ 11-2 DPW 的组成及产品	233
§ 11-3 基于 DPW 的自动定向	237
§ 11-4 基于 DPW 的自动 DEM 提取与正射影像生成	242
§ 11-5 常见的商业化数字摄影测量工作站	246
§ 11-6 “像素工厂”简介	251
思考题	254
参考文献	256

第一章 绪 论

摄影测量有着悠久的发展历史。自 19 世纪中叶摄影技术在欧洲发明以来,通过摄影这种非接触方式对物理目标和现象进行观察和量测的技术一直得到不断的发展。到了 19 世纪后期,在欧洲出现了 photogrammetry 即摄影测量这一术语。该术语来自三个希腊词汇:photo、gramma 及 metron。photo 代表光,gramma 表示画或者写出的东西,而 metron 则是测量的意思。这些词根结合在一起就形成了对利用光形成的图片进行测量,即摄影测量这一词语。1966 年,成立于 1934 年的美国摄影测量协会(American Society for Photogrammetry, ASP)出版的《摄影测量手册(第三版)》(Manual of Photogrammetry)将摄影测量定义为:“The science or act of obtaining reliable measurements by means of photographs”(通过像片获得可靠量测信息的科学或艺术)。

在 20 世纪 60 至 70 年代,由于计算机的问世、美国陆地卫星的升空等航天技术的发展,产生了遥感(remote sensing)这一技术与学科。由于相机本身就是一种遥感系统,因而通过相机获取的像片测量物理目标和现象的摄影测量学科也就与遥感具有密不可分的关系。于是出现了“摄影测量与遥感”(photogrammetry and remote sensing)这一新名词。1975 年,ASP 主办的官方杂志《摄影测量工程》更名为《摄影测量工程与遥感》。1980 年,国际摄影测量协会(International Society for Photogrammetry, ISP)也将协会的名称改为国际摄影测量与遥感协会(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS),并一直沿用至今。摄影测量侧重于重建物体的几何表面,并进行量测;而遥感则侧重于重建物体的物理表面,感知物体的物理属性。概括地说,摄影测量与遥感是研究影像的获取、处理、加工并进行定量定性理解的学科与技术。同年出版的《摄影测量手册(第四版)》将摄影测量的定义扩充为:“Photogrammetry is the art, science and technology of obtaining reliable information about physical objects and environment through the process of recording, measuring, and interpreting photographic images and patterns of electromagnetic radiant energy and other phenomena”(摄影测量就是通过记录、量测和解译由电磁辐射能量或其他现象所形成的图像和模式的过程,获取物理目标和环境可靠信息的艺术、科学和技术)。

在近 160 年的发展过程中,摄影测量从模拟摄影测量开始,经过解析摄影测量发展到今天的数字摄影测量。但在不同的发展阶段,这一学科具有不同的特点与不同的研究内容,同时也有不同形式的产品。

§ 1-1 摄影测量的发展阶段与特点

摄影测量虽然经过三个阶段的发展形成今天的数字摄影测量,但无论是哪个阶段,本质上都是一门学科或技术,都是从影像重建目标的空间几何模型并对其进行量测和识别。但是在摄影测量不同的阶段,它的研究内容、特点以及用于生产和任务管理的仪器设备都有很大的不同。对模拟摄影测量来说,人们采用的是基于精密光学和机械的绘图仪等模拟仪器,而在解析

摄影测量阶段,则出现了将精密光学原理与计算机相结合的集成式解析仪器。到了数字摄影测量,上述全部功能都被高度集成到计算机中,所有数据及产品均可以数字形式出现,形成了数字摄影测量工作站(digital photogrammetry workstation,DPW)。从本质上讲,DPW 是以实现摄影测量功能的软件系统为核心,再配以计算机及其他辅助性硬件设备的统一体,主要处理数字影像(或软拷贝影像)与其他辅助数据,最后形成摄影测量产品。所以,DPW 又称为软拷贝摄影测量工作站(softcopy photogrammetry workstation)。摄影测量的最初时期及三个发展时期的时间阶段如图 1-1-1(Schenk,1999)所示。

一、模拟摄影测量

1849 年,法国陆军工兵团的一位上校军官 Laussedat 经过长期的研究发现,像片可以用来绘制地图。到了 1858 年,Laussedat 就利用气球摄影制作了最早的地图。但由于当时气球摄影难以在一个空中位置获取足够多的覆盖某一区域的像片,Laussedat 的工作主要还是利用摄影经纬仪(phototheodolite)在地面进行摄影。Laussedat 利用像片编制地图的思想,最初并没有受到人们的重视,直到后来他成功地提出将重叠区域的中心投影变换为任意平面的正射影像的数学模型,并发表了用于地图绘制的仪器和方法的研究结果才被人们所接受。Laussedat 在这一领域所提出的已被实践证明的原理至今仍然在使用(McGlone,2004)。由于 Laussedat 在摄影测量方面所做出的开创性工作,他被誉为摄影测量之父。

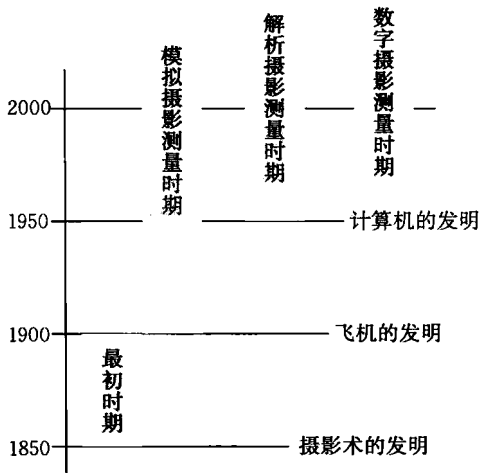


图 1-1-1 摄影测量发展的不同时代

人们在设计如何获取像片的同时就开始研制对像片进行精确量测并绘制地图的仪器。继 1892 年的浮标(floating mark)原理之后,德国物理学家 Pulfrich 发明了用浮标进行测量的实用方法,在此基础上形成了立体摄影测量(stereo photogrammetry)并开始实际应用。1849 年至 1900 年的这一摄影测量发展时期,被 Schenk(1999)称为摄影测量的最初时期(如图 1-1-1 所示)。19 世纪与 20 世纪之交,维也纳地理研究所的 Hubl 和 Orel 分别发明了立体坐标量测仪(stereocomparator)和自动立体测图仪(stereoautograph)。1901 年,Pulfrich 也独立地研制出了立体坐标量测仪,同时形成了蔡司平行四边形(Zeiss parallelogram)这一名称。今天,所有现代摄影测量制图仪器都利用了立体摄影测量的这一原理。

1921 年,德国的 Hugershoff 制造出了第一台全能型模拟测图仪(universal analog plotter)。1923 年,蔡司厂生产出了按照德国摄影测量学家 Gruber 光学投影设计思想的全能型绘图仪器,被称为蔡司精密立体测图仪(Zeiss stereoplanigraph)。这种测图仪得到了广泛的应用,到 1965 年全世界具有超过 250 台这种仪器在生产中使用。精密立体测图仪的一种简化改进型换代产品就是多倍仪(aeroprojector multiplex),这是一种体积小可移动的模块化设计绘图仪器,可以对相互重叠的垂直摄影像片进行连续的航带地形图绘制。Gruber 也由于其标志性的著作《空间单点与双点交会》(Single and Double Point Resection)和《空中三角测量理论与实践》(Theory and Practice of Aerotriangulation)而享有盛名。

这一时期的所有仪器和设备均采用光学投影器或光学加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,所以称其为“模拟摄影测量仪器”。1957年,芬兰著名摄影测量学者 Helava 在他的论文中谈到:“能够用来解决摄影测量主要问题的全部摄影测量测图仪器,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烦琐计算的一种技术”。有些仪器冠以“自动”(auto)二字,其含义也在于此,即利用光学机械模拟装置实现或完成复杂的摄影测量计算。这一时期主要研究摄影测量的基本原理(如摄影过程的几何反转原理、恢复光束和变换光束原理以及影像变形的规律等)、各种模拟仪器的结构,以及操作方法与过程(如测图仪、纠正仪等)。

二、解析摄影测量

解析摄影测量时代是随着计算机的发明开始的。计算机技术的进步对摄影测量发展有非常大的影响。当模拟摄影测量已经成为第二次世界大战后航空摄影测量和制图的成型手段时,电子计算机的迅速发展也使得用解析的方法处理摄影测量问题成为可能。融入数学模型的计算机辅助坐标仪(computer assisted comparators)与制图仪,改善了摄影测量生产的速度、精度和经济效益。其中所采用的数学模型的基础就是用解析的方式表达基于透视几何数学原理的目标点、投影中心以及像点之间的几何关系。尽管直到 20 世纪中叶计算机器(computing machinery)的出现,才使得用解析方法处理摄影测量问题得以实现,但有关解析方法的概念在此之前很早就被人们认识到并开始研究。

20 世纪初,德国地理学家和数学家 Finsterwalder 的一系列论文为解析摄影测量奠定了基础,他利用矢量的概念研究空间单点和双点交会、利用气球照片测制地图以及相对、绝对定向的公式等问题。从 1930 年开始的 20 年间,美国 Syracuse 大学应用数学系教授 Church 和他的学生发表了一系列有关空间交会、定向、纠正以及控制扩展等的论文、报告(McGlone, 2004)。1932 年,德国摄影测量学家 Gruber 在一次假期摄影测量课程讲座中,推导了投影方程及其微分这一解析摄影测量的基本问题,但他本人则否定解析摄影测量的思想,并直接负责 Zeiss 精密立体测图仪的研发。Gruber 评论的一句名言(经常被人们所引用)就是“The calculation of resection in space, by either the direct or the differential method, is merely a waste of time and is of minor importance”(利用直接的或微分的方法进行空间交会计算都只不过是浪费时间,没有任何意义)。美国数学与摄影测量学家 Brown 在摄影测量领域的工作是从气球相机数据空中三角测量开始的。Brown 关于空中三角测量的公式被全世界范围内广泛采用,并且对摄影测量作出了大量贡献,包括完美的最小二乘平差处理与误差传播、成像系统内部和外部摄动的解析公式、大型方程系统的有效求解算法、高精度近景摄影测量的开创性应用,以及传感器校正技术等(McGlone, 2004)。这一时期的摄影测量,理论上侧重于研究和解决通过解析的方式,用数学模型表达摄影测量中的几何关系,用基于计算机的数字计算方式实现摄影测量的部分功能,并研究平差的方法、粗差检测和误差的传播理论,以提高结果的精度和可靠性。

20 世纪 50 年代后期,加拿大图像研究协会的 Schut 推导了空中三角测量的公式,并在发表的论文中分析比较了当时已有的解析三角测量方法之间的特点与优势。此后的若干年中,

制图机构的大量活动都是进行开发和实现用于空中三角测量的实用平差算法。在解析空中三角测量发展期间,加拿大国家研究委员会(National Research Council of Canada, NRCC)的芬兰摄影测量学家 Helava 发明了立体解析测图仪(analytical stereoplotter);该仪器是计算机控制下的精密立体测图仪,作业员在立体模型中选定特殊的点进行量测并消除这些位置上的视差(McGlone, 2004)。冷战期间研发解析摄影测量的美国空军军事实验室——罗姆航空发展中心(Rome Air Development Center, RADC)支持了解析立体测图仪的改进和立体影像量测技术的开发。该研发过程的先驱型人物除了立体解析测图仪的发明者 Helava 外,还有意大利的 OMI(Ottico Meccanica Italiana)公司的主席 Nistri,他是领军型摄影测量仪器的设计者和美国 Bendix 公司的 BRL(Bendix Research Laboratories)的计算机专家。两家共同合作,于 1961 年制造出第一台解析测图仪 AP-1,后来又不断改进,生产了系列产品 AP-2, AP/C 与 AS-11 等。这个时期的解析测图仪多数为军用,直到 1976 年在赫尔辛基召开的国际摄影测量大会上,由 7 家厂商展出了 8 种型号的解析测图仪。

摄影测量的这一发展时期被称为“解析摄影测量时代”,其明显的标志是提出了定量处理观测值的先进方法。这些观测值包括影像和目标空间的坐标,以及其他测量传感器方位的辅助数据。这一时期代表性的产品就是“解析测图仪”,它与模拟测图仪的主要区别在于:后者使用的是模拟的物理投影方式,前者使用的则是数字投影方式;由此导致仪器设计和结构上的不同:后者是纯光学机械型的模拟测图,而前者是计算机控制的坐标量测系统;在操作方面,后者是完全的手工操作,而前者则是计算机辅助的人工操作。这一时期在仪器方面的另一个重要成就是形成了微分纠正系统或微分纠正仪,用以生产正射影像。

三、数字摄影测量

尽管在解析摄影测量阶段,集成了辅助定向传感器的先进相机设计,使影像获取系统变得越来越复杂,但是以全数字格式获取影像的概念直到 20 世纪末才被人们普遍接受。这就为通过引入全数字处理技术促进解析摄影测量发展并过渡到数字阶段提供了机遇。摄影测量从开始到全数字方法的这种发展与过渡,标志了摄影测量进入了一个新的时期——数字摄影测量时期。数字摄影测量的发展起始于 20 世纪 80 年代后期,它是利用计算机的强大计算功能,对数字影像进行处理以自动或交互的方式完成摄影测量的功能,得到摄影测量产品的过程。数字摄影测量时期的主要特点是数字影像、计算机以及实现摄影测量功能的软件系统。因此,数字摄影测量的发展历史与数字影像和数字传感器、计算机、摄影测量功能软件三方面的发展密不可分。

(一)数字影像与数字传感器的发展

虽然计算机的出现及广泛应用使模拟摄影测量仪器由结合了专用计算机的解析型仪器所取代,但是无论解析计算方法与仪器的应用怎样先进,影像本身仍然是硬拷贝的像片是限制解析摄影测量进一步发展的一个主要因素。记录图像的技术对摄影测量学科的形成和发展起着非常关键的作用,但到后来却成了该学科进一步发展的障碍。因此,在 20 世纪末期,许多发明和研究都致力于将硬拷贝的像片转化成计算机可处理的数字影像。1983 年,人们将面阵 CCD(charge coupled device)相机同解析测图仪结合,用于局部像片的数字化,主要用于自动生成数字地面模型(digital terrain model, DTM)和数字表面模型(digital surface model, DSM)。尽管解析测图仪可以提供精确的机械定位,但是像照明、滤波、光学部件、传感器和其他电子部件成分必须集成到已有的系统中,从而导致这种复杂的集成系统代价昂贵、精度下降。因此,基

于解析测图仪的影像数字化仪没有得到广泛的应用。1984年, Geodetic Service 公司研制出了 AutoSet-1, 一种单像坐标量测仪(monocomparator)用于近景胶片图像上的特征点的自动量测, 精度达到 $0.42 \mu\text{m}$ 。与 AutoSet-1 的思路类似, 但是用于航空影像, Helava 主持研制的数字相关系统(digital comparator correlator system, DCCS), 利用影像匹配进行自动点量测, 从而实现单航带空中三角测量。该系统的扫描数字化部分是一单独的设备, 称为 HAI-100(1991年重新命名为 DSW100), 可以看做今天数字摄影测量扫描仪的先驱。其他早期的扫描仪还有 Zeiss/Intergraph 的 PS1 和 Vexcel 公司的 VX3000(1989年)。自 1989年主流的摄影测量扫描仪引入以来, 相继出现了多种不同型号的产品: Leica/Helava 的 DSW 100/200/300/500/700, Zeiss/Intergraph 的 PS1, Zeiss/Intergraph SCAI 的 PhotoScan TD, Z/I Imaging 的 PhotoScan 2000/2001/2002, UltraScan 500 等。在上述将模拟影像转化为数字影像的数字化仪(或扫描仪)的研制和发展的同时, 直接获取数字影像的传感器即数字相机也在研制与发展的过程中, 这都为数字摄影测量提供数字形式的数据源——数字影像奠定了基础, 提供了保障。到目前为止, 已形成相当数量并可用于数字摄影测量商业化生产的航空航天数字相机, 有关数字相机的介绍见 § 2-5。

(二) 计算机的发展及在摄影测量中的应用

尽管德国的摄影测量大师 Gruber 曾经说“摄影测量就是能够避免烦琐计算的一种技术”, 但表面上不用计算的模拟型测图仪器本身实质上是一种模拟的计算器, 它用光学加机械的物理器件代替或掩盖了摄影测量的计算过程。在解析摄影测量阶段, 计算机不仅承担了大多数的计算工作, 并且可实时求解共线方程, 形成数字导杆, 控制立体坐标量测仪进行解析测图。但是不论在模拟或解析阶段, 人工观测是必需的。随着计算机的存储容量和计算速度的提高, 数字影像代替模拟影像, 使得在模拟和解析阶段必须由人工完成的操作, 如点的位置选取与坐标量测、转点等可以用数字图像处理的软件程序通过计算机来实现, 从而实现摄影测量影像坐标的自动量测。数字摄影测量处理的是数字影像而非模拟像片, 直到第五代计算机才具有必需的硬件和软件, 可用于处理大尺寸的数字影像以及解决匹配、分类、检索等涉及的计算问题。计算机的发展过程及其对摄影测量发展的作用和影响、数字摄影测量学科的形成见表 1-1-1 (Schenk, 1999)。摄影测量的不同发展阶段更像是计算机在摄影测量学科中不断扩大应用的过程, 计算机技术的发展极大地影响了摄影测量学科的前进步伐。

表 1-1-1 计算机发展与摄影测量学科的形成

阶段	时间	计算机硬件	计算机软件	摄影测量学
第一代	1946—1958	真空管	机器码	解析摄影测量 空中三角测量 相关 解析测图仪
第二代	1958—1964	译码器 磁核内存	高级语言 (Fortran, Cobol)	
第三代	1964—1970	IC 内存 微计算器 磁盘存储	分时 操作系统 虚拟内存	
第四代	1971—1974	微处理器, PC 机 VLSI 网络	新一代语言 (PASCAL, MODULAR IGS, DBMS)	计算机辅助 摄影测量
第五代	1974 至今	并行处理 RISC 结构 VHSIC 光盘存储	基于知识的软件 专家系统 自然语言	数字摄影测量 实时摄影测量

(三) 数字摄影测量功能软件的发展

高性能的数字化仪及后来的数字相机为数字摄影测量提供了适宜于计算机处理的数字影像,计算机的发展又为数字摄影测量的海量数据提供了大容量的存储能力和快速处理的平台,因而用于实现摄影测量部分或全部功能的软件模型和系统也就具备了发展的条件。

最早的摄影测量功能软件是 1982 年软拷贝立体测图仪(digital stereo comparator/complier, DSCC)中的数字相关模块(Case, 1982)。除了完成现代解析测图仪的任务外, DSCC 具有强大的自动图像相关能力。原武汉测绘学院的王之卓教授于 1978 年提出了发展全数字自动化测图的设想与方案,并于 1985 年完成了全数字自动化测图软件系统 WUDAMS(该系统后来被命名为 VirtuoZo)。目前的商业化市场上,有许多不同类型的摄影测量软件系统,这些系统间的主要区别在于其功能自动化程度以及价格。最著名的几家商业化软件系统有 Z/I Imaging 系统、Leica/Helava 摄影测量系统;除了武汉大学的 VirtuoZo 外,国内著名的全数字摄影测量软件系统还有中国测绘科学研究院 JX-4 数字摄影测量系统。多数的摄影测量软件系统,主要用于处理标准的航空测绘影像,这是因为软件系统起源于传统的模拟或解析型测图仪器,在使用这些仪器的过程中许多的人工操作现在已被计算机处理所代替。随着星载数字立体相机的出现,一些摄影测量软件已经设计得可以处理这些新型航空航天数字传感器数据(如 SPOT, IKONOS, QuickBird 及 ASTER)。对非量测数字相机,类似于焦距、传感器几何稳定性等变量也可以模型化在软件系统中。有些软件系统还支持视频影像数据。数字摄影测量软件系统的进一步发展,主要需解决的问题包括:①多源数据的使用:数码相机数据,三线阵航天影像数据、立体的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据和干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)数据等;②面向区域的数据生产:自动跨像对的影像漫游量测,区域的数字高程模型(digital elevation model, DEM)和数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM)的自动生成;③基于网络的无缝测图;④高密度数字高程模型、数字表面模型数据的自动生成,既可以处理双影像数据,同时也可以处理多幅影像数据;⑤基于数据库的全部生产过程管理与数据维护(李德仁等, 2008)。

数字摄影测量过程的自动化软件的发展往往与相应的硬件设备以及计算机的集成联系在一起,形成一种整体集成的完整平台,最后发展成为数字摄影测量工作站(DPW)。DPW 的概念最早由 Sarjakoski(1981)提出。这一概念下的第一个工作站就是 DSCC(Case, 1982)。Miller(1992)在其关于软拷贝摄影测量工作站的介绍文章里认为, DSCC 是第一台实用的软拷贝立体测图仪(softcopy stereoplotter)。此后,随着计算机技术、立体显示技术等的发展, DPW 已由最初基于 SUN、SGI 工作站(Unix 操作系统模式),发展到基于微机与 Windows 操作系统的灵活高效产品。到 2007 年还出现了 DPGrid,这是比 DPW 更智能、更高效、更抽象的新一代 DPW,是未来 DPW 的发展方向。这种新一代的 DPW 已经在生产中获得了成功的应用(张祖勋, 2007)。

数字摄影测量与模拟、解析摄影测量这三个不同时期的特点与比较见表 1-1-2。(张祖勋等, 1996)。数字摄影测量并没有改变摄影测量的基本原理、解析关系,以及基本处理流程,只是淘汰那些与模拟或解析仪器有关的理论和方法。正是由于数字摄影测量引入了数字图像处理、模式识别等学科中的理论和技术,为摄影测量的(半)自动化开辟了广阔的前景。

表 1-1-2 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	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	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	像片 数字化影像 数字影像	数字投影	计算机	自动化 作业员干预	数字产品 模拟产品

§ 1-2 数字摄影测量的定义与研究内容

一、数字摄影测量的定义

张祖勋等(1996)给出了数字摄影测量的两种定义,一种定义强调了数字或软拷贝的特点,与国际上定义软拷贝摄影测量(softcopy photogrammetry)更接近,也更符合中国著名摄影测量学者王之卓教授曾给出的全数字摄影测量(all digital photogrammetry)这一概念。在这一定义下,认为在数字摄影测量中,不仅其产品是数字的,而且其中间数据的记录及处理的原始资料均是数字的。另一种定义则只强调了数字摄影测量的中间数据记录和最终产品是数字形式的,而对于原始数据源,即使不是数字形式的模拟资料(如硬拷贝影像数据),也认为是数字摄影测量本身应该包含的数据源之一,而不必加以强调。该两种定义分别如下。

定义一:数字摄影测量是基于数字影像与摄影测量的基本原理,应用计算机技术、数字影像处理、影像匹配、模式识别等多学科的理论与方法,提取所摄对象用数字方式表达的几何与物理信息的摄影测量学的分支学科。

定义二:数字摄影测量是基于摄影测量的基本原理,应用计算机技术,从影像(包括硬拷贝、数字影像或数字化影像)提取所摄对象用数字方式表达的几何与物理信息的摄影测量学的分支学科。

《中国军事百科全书(军事测绘学分册)》中也给出了另一种关于数字摄影测量的定义。

定义三:以数字影像为数据源,根据摄影测量原理,通过计算机软件处理获取被摄物体的形状、大小、位置及其性质的技术。

虽然上述定义的表达方式各异,但体现数字摄影测量本质特点的三个方面是不变的、一致的,那就是:数字(软拷贝)形式的数据源(数字影像)、基于摄影测量的数学模型或原理、利用计算机软件自动(或半自动)获取被摄对象的几何与物理信息。但上述三种定义中都忽略了一点,即所处理的数字影像必须满足一定的视觉立体条件(不考虑有 DEM 支持并结合全球定位系统和惯性测量单元的条件)。基于此,本书给出的数字摄影测量的定义为:

基于摄影测量基本原理,利用计算机对满足视觉立体条件的数字影像进行处理,获取被摄对象在目标空间的几何或物理信息的摄影测量学的分支学科。

正是由于这些不变的特性,数字摄影测量的生产过程或基本流程相对于模拟或解析摄影测量来说,仍然没有大的变化。图 1-2-1 给出了数字摄影测量的典型作业流程(Lothhammer, 2005)。

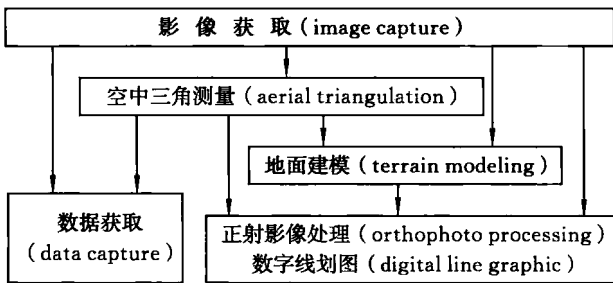


图 1-2-1 数字摄影测量典型作业流程

由于使用了数字影像和实现数字摄影测量功能的软件系统,并基于由计算机或高性能工作站与其他辅助设备所形成的集成平台(即数字摄影测量工作站),使上述任务模块可以通过自动或半自动的方式实现,从而使得摄影测量制图发生了巨大变化。基于此,在有些文献里将数字摄影测量定义为:利用数字影像,根据摄影测量基本原理,通过计算

机软件处理以自动或交互的方式获取被摄物体的几何与物理信息的学科或技术。对数字摄影测量中的自动化,按 Gulch(2000)的定义可以分为三类:

(1)半自动方式(semi-automatic):在这种方式下,算法的实现或处理过程需要作业员的控制,要通过计算机和作业员之间的交互完成。

(2)自动化方式(automated):在这种方式下,作业员只需要在程序运行之前定义必需的输入参数,而在过程结束之后还要由作业员完成质量评价与控制。

(3)全自动方式(automatous):这是一种完全独立于任何人工干预的处理过程,其功能相当于黑匣子。

很明显,目前数字摄影测量作业流程中,很少有全自动化的过程,大多数模块仍然停留在半自动或自动化的阶段。

二、数字摄影测量的研究内容

(一)数字摄影测量的基本研究内容

由图 1-2-1 的数字摄影测量的作业流程可以看出,数字摄影测量的经典研究内容主要包括三个方面,即数字影像预处理、数字影像自动定向以及数字摄影测量的产品生成等阶段所涉及的理论与技术。

数字影像预处理方面,主要研究数字影像的灰度自动调整、局部几何畸变纠正、噪声滤除与影像增强,数字影像的重采样,以及数字影像的特征提取与定位。在数字影像定向方面,主要研究基于模板匹配的框标自动识别和精确定位,数字立体像对的自动相对定向及自动或交互式绝对定向。关于数字立体像对的自动相对定向,目前常用的是基于兴趣点的自动相对定向。张祖勋(2007)提出了“广义点”摄影测量,已将“广义点”成功应用于确定目标的姿态角、数字影像的内外方位元素;Habib 等(2003)还提出了线特征摄影测量,并将线特征应用于数字影像的各种自动定向过程中。在数字摄影测量的产品生成,如 DEM 的自动提取、正射影像纠正以及属性特征提取等方面,主要研究数字影像的匹配理论与算法。到目前为止,对区域开阔并且起伏不大的地形影像,自动匹配算法比较有效,都能取得满意的结果。但对大比例尺的影像,特别是城市、居民区、森林、水域以及纹理缺乏区域,自动影像匹配算法都不能完全解决问题,总会出现相当数量的匹配失败。

(二)面向航空数字传感器与辅助导航仪器的研究内容

进入 21 世纪以来,高分辨率卫星数字相机、线阵与面阵航空数字相机、激光测距(light detection and ranging, LiDAR)、定位定姿系统(position and orientation system, POS)等新一

代传感器系统的迅速发展与广泛使用,使数字摄影测量又迈上了一个新的台阶,但也给数字摄影测量提出了一些挑战。数字摄影测量除了上述传统的研究任务外,还需要研究新型传感器的模型、新型传感器数据所涉及的理论与算法的变化以及新型传感器的性能评价。航空数字成像是多光谱、全色数字摄影系统,以及全球定位系统(global positioning system, GPS)与惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)的系统集成,所有这些新的特点都为数字影像的全自动化处理,以及传统的数字摄影测量数据处理算法的修改和优化提供了可能性。可以预测航空数字成像是将逐步取代传统航空摄影机,成为航摄仪器的主流,这将改变传统的航空摄影测量数据获取方式和数据处理模式。关于数字航空成像是及其数据处理也成为国内外一个重要的研究热点,其主要的研究方向可以概括如下(陈军等,2008):

(1)直接利用 IMU 与差分 GPS(differential GPS, DGPS)的组合系统所获得的外方位元素,或采用少量地面控制点(像控点)进行 IMU/DGPS 辅助区域网平差后获取外方位元素,再以立体模型、区域或图幅为基本作业单元,进行 DEM、DOM、数字线划图(digital line graphic, DLG)和地表覆盖专题图的生产,从而可以大量减少外业控制的工作量;另外,也可以进一步推动使用小型、低空无人/有人航空数据采集系统所获取数据进行准实时、自动高效的处理。

(2)研制针对中/大幅面框幅式航空数字成像是系统、机载三线阵系统和航空激光雷达系统的集成系统,从而做到对成像是区域 DEM/DSM 及影像的快速获取和纠正,形成大比例尺机载准实时测图系统,推动航空遥感在快速成图、地理信息更新、灾害监测等方面的应用。

(3)集成激光雷达数据、大比例尺航空数字影像、低空飞行平台数字影像、地面数码相机数据,发展激光雷达数据和影像数据的融合算法,从而满足大比例尺数码城市和 3 维场景可视化的需求。

(4)针对航空数字成像是系统可获取高影像重叠率数字影像的特点,开发和基于多基线处理(多目视觉)的航空数字影像测图关键技术及算法,解决传统的基于立体像对的航空数字影像测图所存在的困难和问题,例如较短的基线引起的高程测量精度降低、较大地面覆盖重叠率造成的模型数增多等;进一步提高航测内业数据处理的自动化程度,实现 DEM/DSM 和 DOM 的全自动及等高线数据和地物要素的半自动提取,高效地进行中、大比例尺基础地理信息(包括真正射影像等新型产品)的采集及更新。

(5)研究基于多影像、多匹配基元(特征点、特征线)高精度影像匹配算法的半自动地物提取和测量技术;在保证几何精度的前提下,研究基于多影像匹配技术的半自动地物提取和量测技术,重点解决人工地物(如房屋、道路等)在影像中的高精度特征定位和影像之间的高精度配准;研究解决各种困难条件(诸如部分遮挡、重复纹理等)下人工地物的半自动量测问题。

(三)面向航天数字传感器的研究内容

目前,对于中低分辨率遥感影像的数字摄影测量处理技术已比较成熟,而利用高分辨率航天遥感影像提取大比例尺基础地理信息的处理技术还较滞后。因此,基于高分辨率遥感数据处理技术集成的测绘技术保障能力建设迫在眉睫。卫星影像的无控制点或少量控制点高精度区域网平差定向,全自动数字地面模型的生成,高分解率正射影像图的制作,以及数字线划图的立体量测等是高分辨率卫星测图的关键技术。关于数字航天成像是及其数据处理,概括起来主要包括(陈军等,2008):

(1)卫星成像是系统一般采用 CCD 线阵成像是技术,根据高分辨率线阵 CCD 传感器飞行高度高、成像是光束窄、接近平行投影的特点,可以计算和采用统一的几何成像是模型,即有理多项式成