

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校测绘工程系列教材

数字摄影测量学基础

徐芳 邓非 编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校测绘工程系列教材

数字摄影测量学基础

徐芳 邓非 编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

数字摄影测量学基础/徐芳,邓非编. —武汉:武汉大学出版社,2017.8
高等学校测绘工程系列教材
ISBN 978-7-307-19591-2

I. 数… II. ①徐… ②邓… III. 数字摄影测量—高等学校—教材
IV. P231.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 187081 号

责任编辑:王金龙 责任校对:李孟潇 版式设计:马 佳

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:湖北民政印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:19.25 字数:474千字

版次:2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷

ISBN 978-7-307-19591-2 定价:39.00元

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

前 言

从 20 世纪 90 年代开始进入数字摄影测量时代，至今已有 20 多年，这期间数字摄影测量的发展迅速而具有活力，无论是在数据获取、数据处理还是在信息应用等方面，都发生了翻天覆地的变化。

笔者从 2003 年起为本科生讲授数字摄影测量学课程，一直关注数字摄影测量的发展，其间收获颇多，也影响了笔者的一些授课观念。例如，张祖勋院士将摄影测量问题归纳为两个基本关系式：解析(几何)关系和对应性关系，处理这两个基本关系的不同方式则将摄影测量划分成了三个阶段，这样的描述使我们对摄影测量本质的理解更加深刻，也优于传统教学中按照摄影测量发展进程讲授三个阶段的平铺直叙。再如，共线方程是摄影测量解析关系的基本数学模型，将其用于后方交会等问题时，传统教学中强调初值赋值对计算迭代收敛问题的影响，使得在实际应用中面临初值遴选的困难，而同济大学的陈义教授提出了一种共线方程的新解法，将未知数中的角元素用余弦函数来代替，解决了初值设置的难题。另外，计算机视觉、模式识别、人工智能等领域中的一些方法对数字摄影测量中问题的解决提供了很好的助力，并已被广泛使用，特别是研究生在课题研究中经常使用，但是这些方法分散在各种文献或书籍中，使用时经常需要查阅多篇文献或书籍。最初编者将这些方法的相关材料分发给学生，后来编写了讲义用于教学。在此基础上，笔者编写了本教材，希望本书方便教学使用，也方便需要的读者查阅。

全书共分 8 章，第 1 章主要叙述了摄影测量的本质、不同发展阶段的处理方式以及数字摄影测量的定义与现状，该内容得益于聆听张祖勋院士的多次讲座。第 2 章介绍了各种数据获取的传感器平台，包括数字成像仪、高分辨率遥感卫星的数字成像技术，合成孔径雷达、LiDAR 的主动式遥感技术以及自动定位定向技术等。第 3 章主要讲述了新的摄影测量解析方法，涉及共线方程、相对定向、相机检校的新解法，直线摄影测量，广义点摄影测量等。第 4 章对自动单像量测的内容进行了阐述，介绍了一些目前常用的、有效的方法。第 5~7 章阐述了影像匹配的理论与方法。第 5 章从灰度出发，分别介绍了基于像方和基于物方的基本匹配方法，以及既可以基于像方也可以基于物方的最小二乘影像匹配的原理与方法。第 6 章介绍了基于特征的影像匹配方法，包括了一些其他领域中的有效方法、摄影测量中解决实际问题的线特征匹配方法以及粗差剔除的解决方法。第 7 章介绍了整体影像匹配方法，其中含有广泛使用的半全局匹配方法。第 8 章介绍了数字微分纠正的相关内容，对纠正原理、纠正过程中的匀光匀色、数字真正射影像和立体正射影像对的制作进行了介绍。编者对书中的许多经典方法进行了重新整理，使之更易于初学者理解和掌握。

由于编者水平有限，书中难免存在一些不足与不妥之处，敬请读者不吝指正。

作 者

2017 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数字摄影测量的定义	2
1.2 数字摄影测量的现状与发展	2
习题与思考题	8
第 2 章 数字影像获取与处理	9
2.1 数字影像	9
2.2 数字影像采样	10
2.3 数字影像重采样	16
2.4 航空数字影像获取——数字航摄仪	20
2.5 机载定位定向系统 POS	29
2.6 机载激光扫描系统(LiDAR)	33
2.7 航天数字影像获取系统及其特点	39
2.8 微波遥感影像	46
2.9 倾斜摄影测量	47
2.10 数字摄影测量系统简介	49
习题与思考题	62
第 3 章 摄影测量解析方法	64
3.1 共线条件方程式的空间后方交会解法	64
3.2 相对定向的解法	78
3.3 核线几何关系解析与核线排列	88
3.4 数码相机检校的典型方法	98
3.5 直线摄影测量	114
3.6 广义点摄影测量	117
3.7 摄影测量处理的相关坐标系	123
3.8 有理函数模型	131
3.9 自动空中三角测量	133
3.10 框幅式数码影像的 POS 辅助区域网平差	134
3.11 ADS40 影像的几何处理	138
习题与思考题	146
第 4 章 影像特征量测	147
4.1 影像特征与信息量	147

4.2	点特征提取	149
4.3	线特征提取	156
4.4	面特征提取	167
4.5	圆点特征定位	168
4.6	角点特征定位	170
	习题与思考题	174
第5章	基于灰度的影像匹配	176
5.1	数字影像匹配基础	176
5.2	基于灰度的影像匹配基本算法	183
5.3	基于物方的影像匹配	194
5.4	最小二乘影像匹配	197
	习题与思考题	212
第6章	基于特征的影像匹配	213
6.1	特征匹配概述	213
6.2	跨接法影像匹配	216
6.3	SIFT 影像匹配	221
6.4	SURF 影像匹配	229
6.5	线特征匹配	233
6.6	关系匹配	240
6.7	RANSAC 估计	248
	习题与思考题	254
第7章	整体影像匹配	255
7.1	多点最小二乘影像匹配	256
7.2	松弛法影像匹配	259
7.3	半全局影像匹配	262
	习题与思考题	267
第8章	数字微分纠正	269
8.1	框幅式中心投影影像的数字微分纠正	270
8.2	线性阵列扫描影像的数字微分纠正	274
8.3	数字真正射影像	281
8.4	数字正射影像的匀光匀色	285
8.5	立体正射影像对的制作	289
	习题与思考题	295
	参考文献	296

第1章 绪 论

摄影测量学有着悠久的历史,从19世纪中叶至今,它从模拟摄影测量开始,经过解析摄影测量阶段,现在已进入数字摄影测量发展阶段。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。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,只是淘汰了那些与模拟或解析仪器有关的理论和方法。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已经取代了传统摄影测量所使用的模拟测图仪和解析测图仪。

摄影测量的本质是通过影像进行量测,在两个已知点(摄站)上摄取两张影像,通过人的眼睛量测两张影像上同名点的坐标 $a_1(x_1, y_1)$ 、 $a_2(x_2, y_2)$,就能通过前方交会计算出对应空间点的坐标 $A(X, Y, Z)$,见图1-1。在这个过程中,需要处理两个基本关系式,第一个是对应性关系,第二个是解析(几何)关系。在不同的发展阶段,处理这两个关系的方式是不同的。在模拟摄影测量和解析摄影测量中,仅仅考虑摄影测量的几何关系(模拟摄影测量)或解析关系(解析摄影测量),均不考虑摄影测量的对应性关系(由人眼确定同名点),进入数字摄影测量时代,摄影测量的解析关系和对应性关系都利用计算机实现,其中对应性关系是摄影测量自动化的关键。表1-1列出了在摄影测量三个发展阶段中,处理两种基本关系的不同方式。

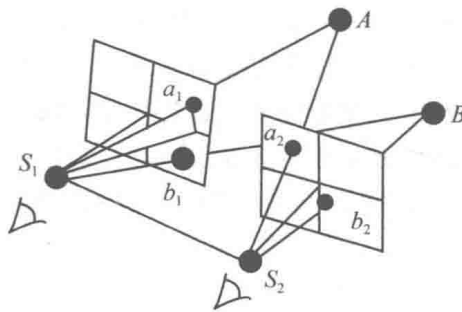


图 1-1 前方交会计算物方点空间坐标

表 1-1 摄影测量三个发展阶段, 处理两种基本关系的不同方式

发展阶段	模拟摄影测量	解析摄影测量	数字摄影测量
解析/几何关系	光/机仪器	光/机仪器+计算机	计算机
对应性关系	人眼	人眼	人眼/计算机

1.1 数字摄影测量的定义

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能力，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。

对数字摄影测量的定义，目前有几种观点。

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、数字图像处理技术、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。

这两种定义是张祖勋院士于 1996 年给出的。第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院士曾给出的全数字摄影测量(all digital photogrammetry)这一概念。这一定义认为，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。第二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。

《中国军事百科全书(军事测绘学分册)》中也给出了另一种定义。

定义三：数字摄影测量是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的是一致的，那就是：数字形式的数据源(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。

由于上述三种定义忽略了所处理数字影像须满足一定的视觉立体条件(不考虑有 DEM 支持并结合 GPS 和 IMU 的条件)，张祖勋教授也给出了一种定义。

定义四：数字摄影测量是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。

1.2 数字摄影测量的现状与发展

从 20 世纪 90 年代开始进入数字摄影测量时代至今，经过 20 年的发展，数字摄影测量无论是在信息获取、数据处理还是在信息应用等方面，其理论和实践都发生了巨大的变化，而且这种变化还在持续，并将进一步深入下去。

虽然摄影测量最基本的基础及原理变化不大，但当代摄影测量的理论和方法与模拟摄影测量阶段、解析摄影测量阶段相比已大不一样，特别是在摄影测量的数据获取、数据处理方法、应用等方面发生了根本性的变化。

1.2.1 数据获取技术的发展

数字成像技术(包括数字航摄仪及高分辨率遥感卫星)、主动式遥感技术(如合成孔径雷达 SAR、机载激光雷达 LiDAR)、IMU/DGPS 自动定位定向(POS)技术、自动化和智能化数据处理技术的快速发展,开创了摄影测量发展的新时代,也为摄影测量的发展带来了新的机遇。

现代摄影测量技术集多种观测平台(卫星、飞机、无人机等)、多种传感器(主动、被动)、地面观测系统、通信设备、数据存储技术、计算机技术等多种设备和计算手段于一体,通过多学科联合,进行空天地多平台、多传感器的协同观测,实现空天地一体化观测,大大拓宽了摄影测量技术的数据获取手段及应用范围。

1. 数字成像技术——航空数码成像系统

在 2000 年 ISPRS 阿姆斯特丹大会上航空数码相机开始出现,在 2004 年伊斯坦布尔大会上航空数码相机成为一个热点。航空数码相机可获得高质量(高信噪比、高反差)、高空间分辨率(地面分辨率可达到 5cm)、高辐射分辨率(辐射分辨率均大于 8 比特/像素,可达 12 比特/像素)和高影像重叠度(航向 80%~90%,旁向 60%~80%)的影像信息,减轻了天气和地形条件对影像获取的限制,开创了利用航空摄影测量进行大比例尺测图的新时代。

目前航空数码相机主要有三种类型:①三线阵航空数码相机,即在成像面安置前视、下视、后视三个 CCD 线阵,推扫式成像,集成 POS 系统提供外方位元素,摄影时获取三条航带影像,Leica 的 ADS40/80 就是其中的典型代表。②大面阵航空数码相机,Z/I 公司的 DMC 与美国 UCD 都属于此类航空数码相机。由于技术上的原因,直接生产相幅为 230mm×230mm 的大幅面的面阵 CCD 还有困难。这两种航空数码相机都由多个小面阵 CCD 组成,因此它们的几何关系比常规的基于胶片的航空相机复杂。另外,由于面阵相机 CCD 一般为矩形,限制了基线长度,使得该类航空影像比基于胶片的航空影像的影像视场角小,基高比小,对高程精度有一定的影响,可以利用大重叠度影像的多光线立体来提高精度。③面阵扫摆式航空数码相机,以色列的 A3 数字航摄仪由两个数码相机刚性固定组合后,相机围绕中心轴高速旋转和拍照,以获取超宽幅影像图,该相机的几何关系更加复杂。

2. 数字成像技术——高分辨率卫星成像系统

目前,光学卫星影像的空间分辨率已经达到亚米级,各种光学卫星影像形成了覆盖全球的各种空间分辨率的卫星影像序列。光学卫星影像是一种高质量的影像数据,具有高信噪比、高辐射分辨率(11 比特/像素)、全色同轨或异轨立体、高地面覆盖率等特点。

卫星遥感影像为推扫式成像,外方位元素高度相关,传统的适用于线阵影像的共线方程不再适用,取而代之的是有理多项式函数模型,用以直接建立起像点和物方点之间的关系,影像供应商提供有理函数模型参数,即 RPC 参数。

商业光学卫星影像的空间分辨率最高已达 0.31m(WorldView-3),我国高景一号也达到了 0.5m,特别是随卫星一起分发的 RPC 参数,极大地提高了几何定位的精度,只要极少量的外业地面控制点,就能迅速产生 1:5000~1:10000 比例尺的正射影像图。

3. POS 系统

POS 系统(Position and Orientation System)由全球定位系统 GPS 和惯性测量装置 IMU

组成。将 POS 系统和航摄影集成在一起，可用于直接测定影像的外方位元素。通过 GPS 载波相位差分定位获取航摄影的位置参数及惯性测量单元 IMU 测定航摄影的姿态参数，经 IMU、DGPS 数据的联合后处理，可直接获得测图所需的每张像片 6 个外方位元素。基于 POS 系统获取的外方位元素可以直接进行地物目标三维坐标的解算。POS 系统的应用可以减少甚至不需要外业控制测量，开创了稀少或无地面控制点影像测图的新时代。

4. 主动遥感技术——LiDAR 系统

20 世纪 90 年代发展起来的新型传感器，它集激光扫描、POS 系统于一体，可直接获得数字表面模型 (Digital Surface Model, DSM)。利用机载 LiDAR 可以直接获得地表的 DSM，其精度可达 15~20cm，甚至更高。LiDAR 技术可以快速获取作业区域内详细、高精度的三维地形或景观模型，它能以比基于影像的摄影测量更快的速度，精确地获取城市中心区域的三维模型，目前在数字城市等领域得到了广泛的应用。我国于 2007 年向月球发射的嫦娥一号利用激光高度计和 CCD 相机(见图 1-2)快速获得了全月地形地貌图。

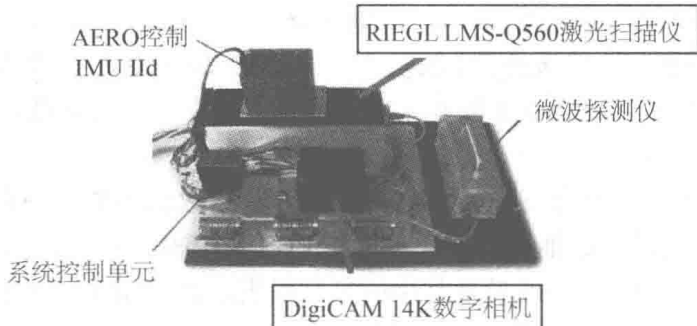


图 1-2 嫦娥一号激光高度计和数码相机探测设备

5. 主动遥感技术——合成孔径雷达

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种主动式微波传感器，SAR 具有不受光照和气候条件等限制实现全天时、全天候对地观测的特点，SAR 具有穿透性，使它能够提供可见光和红外遥感不能提供的信息。雷达干涉测量 (synthetic aperture radar interferometry, INSAR) 技术成功地综合了合成孔径雷达 SAR 成像原理和干涉测量技术，利用传感器的系统参数、姿态参数和轨道之间的几何关系等精确测量地表某一点的三维空间位置及其微小变化。INSAR 技术在地面上以面的形式测定地表形变，提取高程的精度可达数米，而差分干涉 D-INSAR 量测高程的变化 (地表的形变) 可达厘米级甚至毫米级。

从 20 世纪 60 年代以来，INSAR 技术发展迅速，应用十分广泛，已用于冰川和冰缘的变化以及地表形变的监测，城市沉降、火山喷发、地震、滑坡等地质灾害的监测。

6. 低空摄影测量

低空摄影测量通常指航高在 1000m 以下的航空摄影测量，是高空 (遥感、航天) 摄影测量、中空 (航空) 摄影测量、地面 (近景) 摄影测量的有效补充。常用的摄影平台有无人机、飞艇等。低空摄影测量具有灵活机动、使用方便、时效性强、任务周期短、成本低廉、低高度飞行等优势，同时也有一些不足，包括采用非量测相机、像幅小、数量多、基高比小、姿态稳定性差、影像的重叠度和飞行航线不符合规范、POS 数据精度较低、后处理复杂等。

目前,低空摄影测量在测绘、资源调查与监测、应急突发事件处理等方面已得到了广泛应用。特别是在2008年5月的汶川地震救灾中,应用微型无人机遥感系统对重灾区北川县进行了航拍,经过图像拼接和判读,在第一时间评价了北川县城的受灾情况,为制订抗震救灾方案提供科学依据。

7. 移动测量系统

基于多传感器集成的移动测量系统(mobile mapping systems, MMS)由搭载平台、POS系统、任务荷载传感器(如相机、LiDAR、SAR等),能高效获取载体轨迹、全景影像和激光三维点云等多类空间数据,并通过对海量空间数据的自动智能化处理和深度挖掘,建立被测对象的高精度三维模型,构建数字化互联网化地图,从而满足面向个人、面向事件和面向管理等不同层次上的位置服务需求。

MMS搭载平台可分为车载MMS、船载MMS、铁路MMS、简易MMS(自行车或人背)等多种形式。MMS的广泛应用极大地提高了外业数据采集效率,降低了外业劳动强度,丰富了地图数据表达形式,缩短了地图更新周期。

1.2.2 理论发展

随着21世纪数码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学的发展,它们的结合不仅迎来数字摄影测量新一轮的理论发展,同时也拓宽了数字摄影测量的应用领域。

1. 灭点理论

灭点是空间一组平行线的无穷远点在影像上的构像,即该组平行线在影像上的直线交点,可以认为该空间的无穷远点与对应的灭点是一对“对应点”,它们满足共线方程。例如航空影像,除“底点”(空间一组铅垂线的灭点)位于影像内,一般的灭点不是“明显点”,且多数位于影像外,当航空影像接近水平时,水平方向的灭点几乎在“无穷远”处。因此,在模拟、解析摄影测量中,灭点没有任何实用意义,除了其定义外,它的理论也没有多少研究。但是,在数字摄影测量、计算机图形学中,对空间平行线的自动分类、灭点的提取、应用是一个重要的研究方向。灭点不仅仅是单张影像(非量测相机拍摄)进行建筑物三维重建的基础,也成为城市大比例尺地形图进行空中三角测量控制的信息,被用于城市大比例尺地形图的数据更新。

2. 广义点理论

由于摄影测量起源于测量学中“测点”的前方交会与后方交会,因此共线方程(即物点、像点、投影中心位于一条直线上)是整个摄影测量的核心。点的共线性是摄影测量的基本概念,但是摄影测量所涉及的点仅仅是物理的点或可视的点,如圆点、角点、交点等,无论是在模拟摄影测量阶段还是在解析摄影测量阶段,抑或是数字摄影测量阶段,可以由人工量测的基本特征是物理的点,因而可以称为“点的摄影测量”。

在人工与自然界的物体上有大量的直线,还有圆、圆弧和任意的曲线,特别是在建筑摄影测量、工业摄影测量中对建筑物、工业零件的提取,影像中大量存在的是“直线”,直线就成为一个非常重要的要素,因此基于直线的摄影测量(即“共面方程”)得到了深入的研究与应用。

但是现实世界中,大量存在的是“曲线”,例如地面上的道路、河流、湖泊等,建筑

测量、工业测量中的圆、圆弧、曲线等。另外，在实际生产(特别是利用影像进行地图修测)中，由于明显点(独立点、角点)较少，也难以精确“配准”，在地形图与影像之间确定对应“点”作为控制，是一项比较困难的任务。而地图与影像上存在着大量的“线”，将其作为控制信息进行配准，将具有重大的理论和现实意义。为此，张祖勋院士等提出了广义点的理论。广义点是“数学”意义上的点，因为任何一条“线”都是由“点”组成。由广义点理论可知，曲线(或直线)上任意一个点都可以被用作“控制点”，而且可以直接应用于共线方程，但是只能在两个共线方程中选取一个(x 或 y)。因此很容易将点、直线、圆、圆弧、任意曲线归纳为一个数学模型——共线方程，进行统一平差。

3. 多基线立体

随着数码相机的广泛应用，短基线、多影像匹配技术日益成熟，多基线立体在近景摄影测量中得到了广泛应用。多基线相对于单基线有许多优势：“交会角”愈小，影像变形愈小，影像匹配更容易，可以提高影像匹配的可靠性；“交会角”愈小，精度愈低，多目立体存在多余观测，可以提高测量精度。

采用旋转摄影的多基线立体，实质上增加了视场角、交会角，同时由于旋转摄影过程中保持了较大的重叠，确保了传递的稳定性。因此，利用旋转多基线摄影方式构建的区域，即使按非量测相机进行自检校区域网平差，只用周边四个控制点也能够达到很高的精度。

4. 影像匹配理论发展

影像匹配是数字摄影测量的“核心”，也是评价自动化程度的关键。基于影像灰度匹配是摄影测量中经常采用的一种匹配方法，但它对影像的亮度变化、几何变形等比较敏感，致使在低反差、信息贫乏区域等匹配的成功率不高，可靠性较差。随着计算机视觉技术的发展，基于特征的匹配(如基于点特征、线特征)可以克服灰度匹配存在的适应性差的问题，在影像匹配中应用得越来越广泛。

随着大(多)重叠度数码摄影、三线阵相机的应用，多基线、多光线、多视点的影像匹配将由过去的单基线(两度重叠)影像匹配(病态解)转化为多基线(多度重叠)影像匹配的“确定解”。该理论发展使得摄影测量与激光扫描一样能够产生密集的点云，并且由影像产生的点云是基于特征点匹配的，点云多位于影像特征点上，如运动场的跑道、道路的车行线、建筑物边缘等。

大重叠度的航空影像与低空影像的获取，从影像生成点云的密集匹配技术日渐成熟。最新的密集匹配技术的发展使得从影像中得到三维点云的技术已经可以有效地取代 LiDAR 系统。除多源传感器外，点云是信息化时代摄影测量中最重要的进展。

5. 目标自动识别

目标的自动识别是自动单像量测的基础，为追求更高的定位精度，摄影测量界研究获得了一些很有价值的成果，例如“高精度定位算子”、“椭圆拟合”等算法能使定位的精度达到“子像素”级的精度。随着数字摄影测量理论研究与技术的发展，目前已经有很多研究集中在各种摄影测量过程中使用更高级的特征，如线特征和面特征。

1.2.3 应用上的发展

随着数据采集手段的多样化和摄影测量理论的发展，数字摄影测量的应用领域更加广泛，以下是几个典型应用。

1. 灭点应用实践

相机标定是摄影测量与计算机视觉领域中的关键问题,国内外许多学者都锲而不舍地研究针对不同应用的相机标定方法。基于灭点的相机标定方法,不需要控制场,可以用于人工规则建筑物三维重建中的在线标定。

基于多像灭点的相机标定方法将相机的内外方位元素纳入到标定模型中,通过灭点直接建立待标定参数与观测值(直线)之间的关系,平差获得的参数可用于后续三维目标建模。当利用的是长焦距相机时,可采用无位移、多方位的旋转摄影方式。多方位、多像的灭点定标方法可得到高精度、稳定的相机标定结果。在没有高精度控制场的情况下,基于灭点的自定标方法有着其他方法不可比拟的优势,对于可变焦的非量测型数码相机定标有着很广泛的应用前景。

2. 广义点摄影测量的应用

张祖勋院士提出的广义点摄影测量理论是对基于点的摄影测量理论的扩展,它将点、直线、圆、圆弧、任意曲线以及灭点归纳为一个数学模型进行统一平差。

GIS 数据更新,可利用已有地图上的控制信息,对新的影像进行配准和影像定位,发现变化、进行更新,缩短更新工作量。除传统的人工选取点(GCP)作为控制点外,还可以基于广义点理论,利用地图上大量存在的河流、道路等线状地物要素作为控制信息。

对制造过程中的零件快速准确地检测,是提高工业质量的关键之一。通过基于广义点摄影测量理论的光束法平差,不仅可以量测直线,而且可以高精度地量测圆孔乃至由直线与小圆弧构成的方孔。由于边缘上每一个像元均参与了最小二乘法高精度匹配,即使零件有很大缺陷,仍能确保高精度的检测结果。最终建立精确、可量测的钣金件几何模型。

飞机在高速飞行过程中难以识别飞机上的任意标志点(线),只能提取到飞行中飞机的轮廓线。飞机的位置可以用激光跟踪并进行摄影,获取其影像,提取飞机轮廓线,按广义点理论利用共线方程测定飞机的姿态。

3. 数码城市建模

数字城市是将城市的一切要素与人类活动有关的信息进行数字化、存储、管理、应用的综合结果,在计算机上实现城市景观模拟,已经获得了广泛的应用。针对不同应用需求进行几何建模,包括利用不同的数据,如 LIDAR 数据、地图数据、航空影像、卫星影像、地面影像,实现房屋几何建模的半自动化、房屋墙面纹理映射的半自动化、房屋墙面纹理遮挡分析和数据压缩等。对城市真三维景观的需要,建立镶嵌有影像纹理的真实感城市三维模型正凸显出较高的经济价值和应用前景。

4. 数据处理新算法

摄影测量的数据获取从单一的光学传感器已扩展到合成孔径雷达、高分辨率卫星、低空摄影、激光雷达等。多数据源的空间分辨率、影像质量都得到了极大的提升,从而产生了海量数据。如数字摄影测量网格 DPGrid 由基于刀片机的集成处理系统和基于网格的全无缝测图系统组成,引入了数字摄影测量发展的新的理论研究成果,使数字摄影测量具有更高的自动化能力;将计算机网络、集群处理的发展引入了数字摄影测量;将摄影测量自动化与人机交互完全分开,使摄影测量具有更高的生产效率。

习题与思考题

1. 摄影测量有哪几个发展阶段？
2. 摄影测量的两个基本关系是什么？在各个发展阶段中，处理这两个基本关系的方式有什么不同？
3. 数字摄影测量的不同定义有共同点吗？是什么？
4. 当代数字摄影测量的现状与发展体现在几个方面？各是什么？

第 2 章 数字影像获取与处理

数字摄影测量是对数字影像的自动测图处理,其原始资料是数字影像。数字影像的来源有两种方式,一种是对模拟影像进行采样与量化以获取数字影像,另一种是利用数字传感器直接获取数字影像。

当代新型数字传感器技术、全球定位技术、通信技术及计算机技术等的发展为数字摄影测量的发展提供了新的机遇和广阔的前景。摄影测量的新型传感器不仅能获取数字影像,而且能获得影像的位置与姿态,甚至直接获得 DSM。

新型摄影测量传感器主要有:框幅式数码航空相机、三线阵数码相机、机载定位定向系统(POS)、机载激光扫描系统(LiDAR)、航天数字相机系统和干涉雷达等。

2.1 数字影像

数字影像一般表达为由空间的灰度函数 $g(i, j)$ 构成矩阵形式的阵列,即一个灰度矩阵 g :

$$g = \begin{bmatrix} g_{0,0} & g_{0,1} & \cdots & g_{0,n-1} \\ g_{1,0} & g_{1,1} & \cdots & g_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m-1,0} & g_{m-1,1} & \cdots & g_{m-1,n-1} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

矩阵中的每个元素 $g_{i,j}$ 是一个灰度值,对应着光学影像或实体的一个微小区域,称为像元素或像元、像素(pixel = picture element)。各像素的灰度值 $g_{i,j}$ 代表其影像经采样与量化了的“灰度级”。

若 Δx 与 Δy 是光学影像上的数字化间隔,则灰度值 $g_{i,j}$ 随对应的像素的点位坐标 (x, y) 而异,通常 $\Delta x = \Delta y$ 。 x, y 如下:

$$\begin{cases} x = x_0 + i \cdot \Delta x, & i = 0, 1, \cdots, n-1 \\ y = y_0 + j \cdot \Delta y, & j = 0, 1, \cdots, m-1 \end{cases} \quad (2-2)$$

式中, i, j 分别表示像素所在的行、列数; m, n 分别为影像的高和宽。

灰度影像是一个灰度矩阵,灰度值是整数,其大小范围由量化的比特数确定;彩色影像由三个同样大小的灰度矩阵组成,分别表示 R、G、B 三个分量;对于多波段的数字影像,则有多种存储方式,如 BSQ(波段顺序格式)、BIL(波段按行交叉格式)、BIP(波段按像元交叉格式)等。

数字影像的数据文件组织有多种方式,常用的有 BMP、JPEG、TIFF 等。

数字影像的空间域表达方式与真实影像是相似的,但也可以通过变换用另一种方式来表达,其中最主要的方式就是傅里叶变换,把影像的表达由“空间域”变换到“频率域”

中。在空间域内是表达像点在不同位置 (x, y) (或 (i, j))处的灰度值,而在频率域内则表达像点在不同频率 (u, v) 中(像片上每毫米的线对数,即周期数)的振幅谱(傅里叶谱)。

频率谱的表达对数字影像处理是很重要的。因为变换后矩阵中元素的数目与源影像相同,但其中许多是零值或数值很小。这就意味着通过变换,数据信息可以被压缩,使其能更有效地存储和传输。此外,在频域内进行影像分解力分析和许多影像处理过程可以更为简便,例如滤波、卷积和一些相关运算。

在摄影测量中所使用的影像的傅里叶谱可以有很大的变化,例如在任何一张航摄影像上总可以找到有些地方只包含有很低的频率信息,而有些地方则主要包含高频信息,偶然地有些地区有一个狭窄范围的频率。航摄像片有代表性的傅里叶谱如图 2-1 所示。

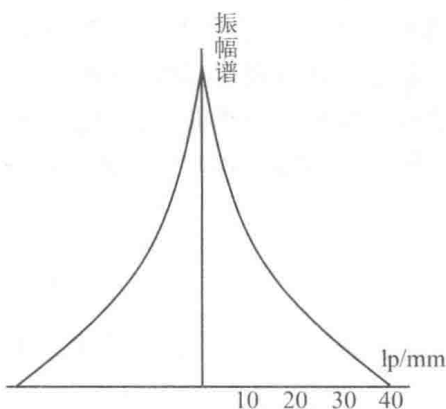


图 2-1 航摄像片傅里叶谱

2.2 数字影像采样

尽管数字相机在摄影测量任务中得到了越来越广泛的应用,但是还有相当多的任务是基于模拟的航空影像的数字化完成的。将传统的光学影像数字化得到的数字影像或直接获取的数字影像,不可能对理论上的每一个点都获取其灰度值,而只能将实际的灰度函数离散化,对相隔一定间隔的“点”量测其灰度值。这种对实际连续函数模型离散化的量测过程就是采样,被量测的点称为样点,样点之间的距离即采样间隔。在影像数字化或直接数字化时,这些被量测的“点”也不可能是几何上的一个点,而是一个小的区域,通常是矩形或圆形的微小影像块,即像素。现在一般取矩形或正方形,矩形(或正方形)的长与宽通常为像素的大小(或尺寸),它通常等于采样间隔。因此,当采样间隔确定了以后,像素的大小也就确定了。采样间隔越小,所形成的数字影像对原始像片的近似就越精确,但太小的采样间隔也会带来巨大的数据量,给处理和传输带来不便。那么,采样间隔如何确定呢?在理论上采样间隔应由采样定理确定。

2.2.1 采样定理

影像采样通常是等间隔进行的。如何确定一个适当的采样间隔,可以对影像平面在空

间域内、频域内用卷积和乘法的过程进行分析。

以一维的情况为例说明采样间隔应满足的条件，其结果可以推广到二维。为分析采样定理，首先引入几个特殊函数。

1. 单脉冲函数(δ -函数)

单脉冲函数(δ -函数)即强度为1的脉冲函数，定义为

$$\begin{cases} \delta(x) = \infty, & x = 0 \\ \delta(x) = 0, & x \neq 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

δ -函数的强度为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1 \quad (2-4)$$

以上表明， δ -函数在原点的取值是不定的，它与哪种信号相乘，就取该信号的值(近似于该函数的筛选性质)，其他均为零，强度为1。 δ -函数有下述几个重要性质。

性质 2.1: 筛选性质。若信号 $f(x)$ 在 $x = x_0$ 处连续，则有

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \delta(x - x_0) dx = f(x_0) \quad (2-5)$$

性质 2.2: 乘积性，即

$$f(x) \delta(x - x_0) = f(x_0) \delta(x - x_0) \quad (2-6)$$

性质 2.3: δ -函数是偶函数，并可表示成 $\delta(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi ux} dx$ 。

正是由于 δ -函数的这些性质，才使得下述的采样函数具有完整的解析形式。

2. 采样函数

采样函数(sampling function)(见图 2-2(a))，又称梳状函数(comb function)。

$$s(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(x - k\Delta x) = \text{comb}_{\Delta x}(x) \quad (2-7)$$

采样函数的傅里叶变换为间隔 $\Delta f = 1/\Delta x$ 的脉冲串组成的函数，仍为采样函数(见图 2-2(b))，此时的采样间隔为空间域采样间隔的倒数。设 $F[s(x)] = S(f)$ ， $S(f)$ 在 $\pm 1/\Delta x$ ， $\pm 2/\Delta x$ ， $\pm 3/\Delta x$ ， \dots 处有值。

$$S(f) = \Delta f \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(f - k\Delta f) = \Delta f \cdot \text{comb}_{\Delta f}(f) \quad (2-8)$$

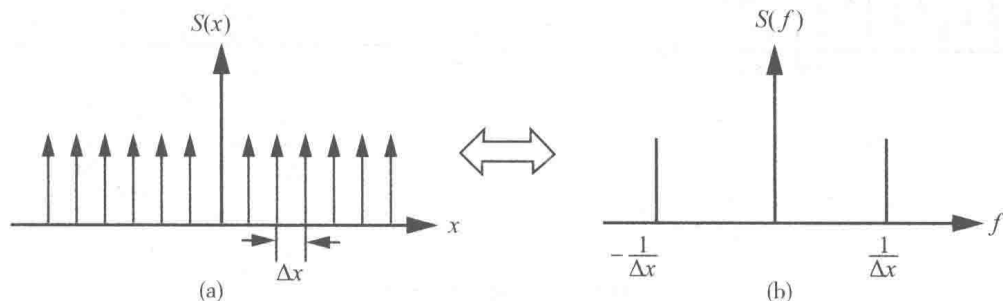


图 2-2 采样函数及其傅里叶变换

3. 有限带宽函数

一个函数 $g(x)$ ，如果其傅里叶变换的频谱 $G(f)$ 在区间 $[-f_l, f_l]$ 之外时等于零，且 f_l