

中国地质大学（武汉）

硕士学位论文

基于LIDAR和DMC的三峡库区地质灾害遥感监测航摄及数据处理

姓名：欧阳平

申请学位级别：硕士

专业：资源与环境遥感

指导教师：吴北平

20070501

基于 LIDAR 和 DMC 的三峡库区地质灾害

遥感监测航摄及数据处理

硕士生：欧阳平

导师：吴北平教授

摘 要

机载激光雷达(Light Detection and Ranging),有些文献也称之为机载激光扫描(Airborne Laser Scanner)。它是一种主动式对地观测系统,是九十年代初首先由西方国家发展起来并投入商业化应用的一门新兴技术。它集成激光测距技术、计算机技术、惯性测量单元(IMU)、差分定位技术(DGPS)于一体,该技术在三维空间信息的实时获取方面产生了重大突破,为获取高时空分辨率地球空间信息提供了一种全新的技术手段。它具有自动化程度高、受天气影响小、数据生产周期短、精度高等特点。机载激光雷达传感器发射的激光脉冲能部分地穿透树林遮挡,直接获取高精度三维地表地形数据,具有传统摄影测量和地面常规测量技术无法取代的优越性,因此引起了测绘界的浓厚兴趣。该技术在地形测绘、环境检测、三维城市建模等诸多领域具有广阔的发展前景和应用需求,有可能为测绘行业带来一场新的技术革命^[1]。

2002年10月初,世界上第一套装备有高分辨率彩色数码相机(4096像素×4096像素),超光谱成形相机和激光扫描测高计的航空数码摄影系统问世。“美国航空遥感协会激光雷达委员会”主席 Martin Flood 先生高度评价这一成果,他认为这项技术的应用将对未来激光雷达数据的处理和GIS的应用产生划时代的影响,该系统配备着当今世界上最高分辨率的彩色数码相机(已进入商业领域)和超光谱成形相机,同时集惯性测量仪IMU和全球定位装置GPS于一身,当飞机机载该系统飞越地球表面时,能在获取图像及数码数据的同时,直接测定航片的外方位元素,从而大大减少或不用野外控制点,从而简化和加速航片定向乃至整个测图工作,带来航测生产的又一次革命,与此同时,基于GPS+IMU技术和激光测距技术,LIDAR开辟了由空中直接获取高精度三位地面信息的新途径,获取数据的速率和精度大大提高,数据的应用范围更加广泛^[2]。

LIDAR数据与数字航空摄影相机(DMC)所拍航空影像这两种数据有各自优缺点,二者的互补性很强。LIDAR系统虽然能够直接获得目标的三维空间点云,但是它却难以直接获得物体表面的语义信息(材质和结构等);而从DMC航空像片中提取的表面,却包含丰富的语义信息。另一方面,要想通过重叠图像之间的自动匹配来获得足够密度的三维点仍然是一个困难的问题,而且直接依赖匹配结果也存在着潜在的风险。因此,利用机载LIDAR提供的精确的三维点云信息并结合数字影像,进行相关的数据处理技术是摄影测量与遥感领域的一个新的研究热点^[3]。

三峡水利工程具有防洪、发电、航运、环保等巨大综合效益。对库区地质灾害做好

监测和防治工作,确保三峡库区水资源、土地资源和生态环境的合理开发利用和可持续发展采用LIDAR系统快速获取库区的数字地面模型,采用DMC摄取地面高分辨率数字影像,从而获取库区地质灾害严重地区的现势、完整、高精度地形测量数据,以满足库区地质灾害监测预警的需要^[4]。

本文主要研究机载激光雷达数据处理的理论和方法,在全面理解和分析机载激光雷达技术的原理和特点的基础上,探讨机载激光雷达数据处理的一些关键技术,并形成完整的处理流程;LIDAR和DMC这两种新技术在航摄数据处理中的应用,综合利用LIDAR和DMC相关理论与处理手段,对LIDAR数据进行地物分类提取、生成数字地面模型、利用Imagestation SSK航空摄影处理软件对DMC影像的处理进行较深入的研究;并提出了用LIDAR点来做地面控制点,进行空三加密,绝对定向的无地面控制的航摄影像处理的新方法;研究WGS84坐标系UTM投影与西安80坐标系高斯投影之间的转换问题。主要内容包括:

1. 介绍了机载激光雷达系统、数字航空摄影测量的发展及国内外现状,分析了机载激光雷达技术面临的机遇和挑战,以及目前研究的热点和难点。对前几种商用数字航空摄影测量的软硬件进行了详细比较;详细研讨了机载激光雷达系统的基本理论、工作模式及系统构成以及地面激光点坐标的详细计算;分析机载激光雷达技术的优越性和其广泛的应用领域,并对当今主要商业化激光雷达系统进行了归纳和比较。

2. 研究了机载激光雷达的数据处理过程,详细阐述了标准las格式点的生成,滤波,分类,数字高程模型的生成以及机载激光雷达系统的误差传播规律、分析其精度,提出了相应的提高精度的方法。

3. 用工程实例对LIDAR数据地面点的平面、高程精度分析、评定。

4. 结合实例介绍了LIDAR数据、DMC影像制作正射影像的过程。

5. 提出了用LIDAR点来做地面控制点,进行空三加密,绝对定向的无地面控制的航摄影像处理的新方法,并且将该方法应用到实际生产中,产生了一定的经济价值。

6. 详细研究了LIDAR和DMC这两种新技术在线划图制作中的应用。

7. 结合实例对正射影像、线划图的平面精度进行分析评定;对点位三维精度进行分析评定,并给出提高精度的方法。

8. 研究了空间直角坐标系之间、平面直角坐标系之间的坐标转换;不同投影之间的投影转换;结合工程实例研究WGS84 UTM投影—西安80 高斯投影之间的坐标转换,并建立自定义的坐标系统,利用多个航空摄影数据处理软件, GIS软件来制作实际项目要求的正射影像和线划图。

本文主要研究机载激光雷达与摄影测量的集成数据处理技术,研究机载激光雷达与航空影像的融合处理,以提高生产产品的速度以及产品的精度。本文提出的LIDAR点做地面控制点的无地面控制的航空影像处理方法是机载激光雷达与摄影测量技术集成处理的一次成功尝试,为后续的研究提供了一定的参考意义。

关键词: 机载激光雷达 数字航摄相机 地质灾害监测

Aerophotography and data processing in the geological calamity monitoring of Three Gorges reservoir area based on LIDAR and DMC

Master Candidate: OUYANG Ping

Supervisor: WU Beiping

ABSTRACT

Light Detection And Ranging(LIDAR) is called Airborne Laser Scanner in some document. It is an active observe system to the ground and a new developing technology first used in commercialization by the western countries at the beginning of the 1990s. It integrates Laser range technology,computer technology and inertia Measure Unit (IMU) /Differential Globe Position System(DGPS). Little influenced by the weather,it is a new technology to obtain space information of the earth in high precision. The laser pulse can pierce directly through the woods to the ground to obtain the high-accuracy three-dimensional topographical data of the earth's surface. This technology has been widely used in many fields such as topography surveying and drawing, environment measuring,three-dimensional city modeling and so on. It will be a new technical revolution for surveying and drawing.

In the early of October 2002, the first digital photography system which was compounded of color digital camera,ultra spectrum camera and laser scanning appeared. When the plane with this system flies over the earth surface , we can get both pictures and their exterior orientation data, thus we can reduce or cancel ground control point and save money. Meanwhile, based on the GPS and IMU technology and laser,LIDAR has opened a new way to obtain the information of three-dimensional of ground in high precision quickly and effectively.

LIDAR can obtain some point clouds of three-dimensional data of the goal directly, but it is difficult to attain the surface information such as material and structure.On the contrary, DMC pictures include abundant surface information.Moreover, it is difficult to get enough three-dimensional points by overlapping pictures.And we could not rely on the result of automatic matching directly. So, LIDAR data combined with DMC image is a new research in photogrammetric and remote sensing.

The Three Gorges water conservancy has enormous comprehensive benefits, such as preventing flood, generating electricity, shipping and protecting environment. We should monitore the geological calamity and guarantee the reasonable use and sustainable

development of the water resource in the reservoir area of the Three Gorges , land resource and ecological environment. Expediently, we can obtain the digital ground model of the reservoir quickly by LIDAR and get the digital images of the ground by DMC, thus gaining integrated and high-accuracy topographical measurements. These data will play an important part in geological disaster prediction and supervision of reservoir area of the Three Gorges.

This thesis mainly studied the data processing theory and method, comprehended LIDAR technical principle and characteristics, discussed some key techniques in LIDAR data processing, and summarized the integrated LIDAR data processing; LIDAR and DMC, two kinds of new techniques , were integrated in aerophotography. Using the theories and the processing means related to LIDAR and DMC, we could classify LIDAR data on the ground , create the digital elevation model and research utilization of ImageStation SSK software in DMC images processing. Then it put forward a new method which uses LIDAR points as ground control points. At last it studied the transformation from WGS84 coordinate system UTM projection to Xi'an 80 coordinate system Gauss projection. The main works are presented as follows:

1. Summarized the development and present condition of LIDAR and digital aerophotography at home and abroad; analyzed the opportunity and challenge of LIDAR; Compared with some softwares and hardwares which are used in digital aerophotography at present in detail.; discussed LIDAR basic theories, work mode and system compose in detail; calculated coordinates of LIDAR points; analyzed its superiority and extensive application; summarized several commercial LIDAR system .

2. Studied the LIDAR data processing process, elaborated how to generate LIDAR points in the standard las format, filter the useless points and classify ; generated the digital elevation model; analyzed error regulation and accuracy of LIDAR , then put forward a corresponding methods to increase its accuracy.

3. Analyzed the horizontal and vertical accuracy of LIDAR ground points with examples.

4. Summarized the program of creating digital orthograph maps with LIDAR data and DMC images; analyzed the accuracy of these maps.

5. Put forward a new method which used LIDAR points as ground control points in aerophotography and has certain superiority in economy.

6. Studied the effect of LIDAR and DMC which are integrated in drawing digital line maps.

7. Analyzed the accuracy of digital orthograph maps and digital line maps, and researched a method to raise the accuracy.

8. Studied the transformation between different coordinate systems and projection; provided transform operation from WGS84 coordinate system UTM projection to Xi'an 80 coordinate system Gauss projection.

Key Words: Light Detection And Ranging Digital Mapping Camera geological calamity monitoring

研究生学位论文原创性声明

我以诚信声明：论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了诚挚的谢意。

学位论文作者（签字）： 欧阳平

签字日期：2007 年 5 月 29 日

作者简介

欧阳平，男，汉族，1978年11月出生于湖南省汝城县。1997年考入中国地质大学，就读测绘工程本科专业；2001年7月—2004年5月在广东省基础工程公司工作；2004年6月—2005年8月在南昌工程学院任教；2005年9月考上中国地质大学资源与环境遥感专业硕士研究生，研究方向为激光雷达系统和数字摄影测量系统。在校期间学习刻苦，积极参加科研工作。在导师吴北平教授的严格要求和精心指导下，顺利地完成了各门必修课和选修课的学习以及毕业论文的研究和写作。硕士在读期间，修完16门课程，30.5个学分，平均成绩82.6分。

在学习专业知识和计算机知识的同时，注重培养自己的实际工作能力和综合素质。积极承担助教、助研等工作。两年来在科研及工程实践中所做的工作有：

1. 2005.10 长沙市自来水管线测量，课题类型：横向项目。
2. 2006.4—2007.5 三峡库区地质灾害遥感监测航摄数据处理，课题类型：横向项目。
3. 2006.11 汉阳污水处理控制网布设（部分），课题类型：横向项目。
4. 2006.9—2007.1 担任《控制测量学》助教

公开发表论文有：

△《盾构隧道贯通误差分析》，湖南工程学院学报，2006（2）第一作者。

△《几种盾构机姿态测量方法的精度比较》，工程地球物理学报，2006（4），第一作者。

△《高斯投影正反算与换带计算 Ture BASIC 程序》，铁道勘察，2006（10），第三作者。

△《基于离散数据点的等高线的绘制及其程序实现》，工程地球物理学报，2006（6），第四作者。

△《Analysis of holing-through survey errors in shield tunnel》,Geophysical solutions for environment and engineering, 2006.6, 第三作者

第一章 绪 论

§ 1.1 研究的背景和意义

从空中和太空观测地球获取影像是 20 世纪的重大成果之一,短短几十年,遥感数据获取手段迅猛发展。在信息时代,测绘已发展成为地球空间信息学。地球空间信息学所获取和处理的是随时间和空间分布和变化的信息。摄影测量与遥感是获取这种信息的主要手段^[5]。随着技术的进步,人们不断研究和改进遥感数据采集技术,并将其投入应用研究和生产实践。如今,集成了 GPS 技术、惯性导航技术、激光测距技术等先进技术的机载激光雷达技术具有很强的市场竞争力和广阔的应用前景,其综合性价比要强于传统的遥感数据获取技术,具有一定的技术优势,正日益成为遥感数据采集技术的一种重要的方式。近几年,随着相关技术的不断成熟,机载激光雷达技术得到了蓬勃发展,欧美等发达国家许多公司和科研机构投入了大量的人力物力和财力进行相关技术和系统的研究,并先后研制出多种机载激光雷达系统,相继投入商业运作。机载激光雷达在测绘市场所占的份额不断扩大,其应用的领域和深度也日益拓宽和加深。我国的学者也投入到了激光雷达技术的研究中,也有一些公司从国外引进了机载激光雷达设备用于商业运作。但总体而言,我国在机载激光雷达的硬件研制及理论研究和实践应用等方面都落后于国际发达国家,为使这项高新技术能够在我国的国民经济建设中发挥其应有的作用,开展机载激光雷达技术的理论和应用研究具有非常重要的理论价值和现实意义^[6]。

同时,随着数字摄影测量技术的进一步发展,数字正射影像图(DOM)正发挥越来越广泛越来越显著的作用,在土地管理、城市建设域规划、林业、农牧业、旅游、环境保护、水文水资源等行业可用作土地详查、城市变迁、资源调查、环境监测的原始资料;还可用作很多测绘新产品如城市三维模型、立体景观图、计算机动画、计算机方针、虚拟现实、数字影像库等的基础数据^[7]。

作为数字地球、国家空间数据框架的重要信息之一的数字正射影像,因具有经济适用、“最容易快速更新”、管理动态性强、以及应用上的广泛性、内容上的详细性等特点,必然改变传统单一线划地图(DLG)独揽测绘产品的局面。事实上,在遥感技术及空间信息技术飞速发展的推动下,当前我国国家空间数据的核心正从以矢量为主的地图空间数据库变为以数字正射影像为特征的空间数据框架,数字正射影像图作为“地理信息最直观的表达”必将成为 GIS 基础地理框架数据的必备数据源。

传统的数字高程模型(DEM)是通过航摄前布设的平面,高程控制点进行空三加密而得到,其精度和密度都不能和 LIDAR 系统相比,所以在航片处理中导入 LIDAR 生成的精密 DEM,能够快速、简洁地得到高精度的 DOM。

本文研究 LIDAR 数据与数字航摄的综合应用,对于推动机载激光雷达技术在地球空间信息学中的发展与应用也具有十分重要的意义。

1.1.1 机载激光雷达技术简介

三维激光雷达扫描技术是随空间点阵扫描技术和激光无反射棱镜长距离快速测距技术发展而产生的一项新测绘技术,是继 GPS 空间定位系统之后又一项测绘技术新突破,是一种崭新的革命性的测量工具^[8]。

作为一项数据采集技术,按其载体的不同,又可以分为:机载和地面两种激光雷达数据采集系统^[8]。由于研究对象的不同,本文只研究机载激光雷达技术及其数据处理方法。

LIDAR 即 Light Detection And Ranging,也叫机载激光扫描测高或激光雷达,是一种安装在飞机上的机载激光探测和测距系统,可以量测地面物体的三维坐标。LIDAR 数据经过相关软件数据处理后,可以生成高精度的数字高程模型(DEM)、等高线图及正射影像图(DOM)。机载激光雷达技术的商业化应用,使航测制图如生成 DEM、等高线和地物要素的自动提取更加便捷,其地面数据通过软件处理很容易合并到各种数字图中。

目前,激光雷达技术实际上有两个明显的分支^[9]:①小光斑脉冲测时激光雷达。②大光斑脉冲测时激光雷达。这些系统主要是用于获取地球森林植被参数以及激光测深等。目前,绝大部分的激光雷达商用系统都是基于小光斑的激光测高,对于这种激光测高系统,激光光斑越小,激光脉冲重复频率越高越好。不同文献会出现不同的称呼,归纳起来主要有以下几种^[10]:机载激光测高(Airborne Laser Altimetry,ALA)^[11];激光雷达(Light Detection And Ranging, LIDAR);机载激光地形测绘(Airborne Laser Topographic Mapping, Airborne Laser Terrainmapping,ALTM);机载激光测量系统(Airborne Laser Mapping,ALM);机载激光扫描测量系统(Airborne Laser Scanning, ALS)^[12];激光测高(Laser Altimetry, LA),文中不对其作区分,称为机载激光雷达(LIDAR)。

1.1.2 数字摄影测量简介

从 19 世纪中叶到 20 世纪六七十年代,模拟摄影测量历了漫长的发展过程,摄影测量技术的发展可以说基本围绕着十分昂贵的立体测图仪进行的。随着模数转换技术、计算机技术和自动控制技术的发展,Helava 于 1957 年提出了“用数字投影代替物理投影”的概念后,意大利的 OMI 公司与美国的 Bendix 公司合作,于 1996 年制造出世界上第一台解析测图仪 AP-1。之后,到七八十年代,由于微电子技术的进步,使电子计算机体积变小、性能增强、价格低廉,解析测图仪逐步成为摄影测量的主要测图仪器。然而,摄影测量工作者并没有就此满足,1978 年,武汉测绘科技大学王之卓教授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测图软件系统 WUDAMS。进入 90 年代,数字摄影测量工作站获得迅速发展并步入实用化阶段。1996 年后,全数字摄影测量工作站又在功能和服务作了重大的改进。VirtuoZo 依托由武汉测绘科技大学、国际数据集团(IDG, USA)和 Inter 公司合资的适普公司,开发出了适合我国国情的微机版软件,积极参与国际竞争,取得巨大成功;中国测绘科学研究所所属的中国四维测绘技术北京公司陆续研制开发了数字化测图系列产品,包括 JX-4A 全数字摄影测量工作站、JSH6080 激光扫描绘图仪、HX-23 影像数字化仪、MapED 地图编辑工作站和自动数字空中三角测量软件等,这些产品也出口到日本、巴基斯坦等国。

由于科学技术的进步,摄影测量中以节省外业控制、缩短成图周期为目的的 GPS 辅助空中三角测量技术,在 90 年代已在我国获得生产性推广应用。我国自行研制的 DDKIN

和 WuCAPS 软件已用于海南中澳合作项目中越边界测图,在北京、东北、天津等测区也得到应用。

数字摄影测量是以数字影像为基础,通过计算机分析和处理,获取数字图形和数字影像信息的摄影测量技术。具体地说,它是以立体数字影像为基础,由计算机进行影像处理和影像匹配,自动识别相应像点及坐标,运用解析摄影测量的方法确定所摄物体的三维坐标,并输出数字高程模型和正射数字影像,或图解线划等高线图和带等高线的正射影像图等。数字摄影测量是以数字影像为基础,用电子计算机进行分析和处理,确定被摄物体的形状大小和空间位置及其性质的技术。数字摄影测量与模拟、解析摄影测量的区别在于:它处理的原始信息不仅可以是像片,也可以是数字化影像;它所使用的仪器最终将只是运用计算机及相应的外围设备^[13]。

计算机的不断发展,使摄影测量中最困难的测图部分得以用计算机来解决,从而使摄影测量步入数字摄影测量时代,令摄影测量经历了前所未有的巨大变化,这种变化主要反映在下列四个方面:

1. 测量仪器的彻底改变

高精度像片数字化仪或扫描仪和基于计算机的处理系统便可实现航测生产的全过程,与原来仪器相比,具有结构简单、体积小、重量轻、价格低、效率高等特点。将来数码像机用于航空摄影直接获取数字影像,那么只需利用基于计算机的一些处理系统便可实现地形图等测绘产品的生产。

2. 产品形式的改变

由于计算机的发展,测绘生产的产品模式发生了根本变化,由过去的模拟表达方式改为全数字形式,即 4D 产品。在数字时代,利用计算机管理,公用数据可以上网,用户从网上直接下载数据。在管理上更为科学,使用更为方便。

3. 生产工艺的改变

模拟产品生产中一个重要缺陷是绘图结果不能有效利用,从生产原图到出版须重复扫描多次,而在数字产品生产中该问题就不存在,由此也导致航测与制图无明确分界。现在的生产工艺流程主要包括航片数字化(把模拟图像变为数字影像)、影像处理和信息提取(影像几何纠正及产品信息的提取与编辑)、建立数据库(把数字产品入库并进行检索和查询,实现数据的有效管理)。

4. 理论和方法上的改变

过去,摄影测量主要着重模型的研究,目的是为了提高测量精度。而现在的计算机水平对摄影测量计算而言已根本解决,可以用最严密的公式计算,解算精度能得到完全保证。由于计算机的发展,使得测绘生产工具发生了彻底变革。例如航测成图生产中所使用的全能测图仪将要进入历史博物馆,基于计算机的各种处理和管理系统已登上历史舞台。由于生产工具的改进,使得传统的生产方式得到彻底的改变。

§ 1.2 国内外的研究现状

1.2.1 机载激光雷达技术现状

20 世纪 90 年代,随着相关技术的不断成熟,机载激光雷达技术得到了蓬勃发展,欧美等发达国家先后研制出多种机载激光雷达系统,如 TopScan, Optech, Top Eye, Saab, Fli-map, TopoSys, Hawk2Eye 等多种实用系统。Leica 公司也推出了机载激光雷达 Leica ALS40 和 Leica ALS50。据统计,截至 2001 年 7 月,全球约有 75 个商业组织使用 60 多种类似的系统,从 1998 年起,以每年 25% 的速度递增^[14]。

随着机载激光雷达技术的不断成熟,其应用范围不断扩大。美国、加拿大、澳大利亚、瑞典等国为浅海地形测量发展的低空机载系统,使用了机载激光测距设备、全球定位系统(GPS)、陀螺稳定平台等设备,飞行高度为 500~600m,直接进行测距与定位,最终得到浅海地形(或 DEM)。比较典型的是美军现用的一种独具特色的激光扫描水下地形测量系统(Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey, SHOALS)^[15],它采用激光雷达技术实施远距离量测浅海深度并测绘海岸地带的地形,监测海岸侵蚀等。该系统于 1994 年 3 月正式投入使用。美国 HARC(houston advanced research center)的激光雷达地形测量系统,1994 年做了飞行试验,飞行高度 600m,最终产品的飞行高度预计为 1600~1700m,采用扫描激光测距方式,利用 GPS 定位,姿态测量装置据估计是惯性导航系统。据了解,这种系统标称能“隔夜”提供 DEM,显然生成 DEM 的速度比常规方法要快若干倍,并可实现准实时遥感信息的定位并生成 DEM,效率将比现有信息获取技术提高约几十倍。德国联邦政府测绘局于 1994 年开始研究利用激光雷达技术获取数字地形模型,获取地面真实正射影像,通过对数据进行滤波和分类,将地面点跟建筑物或植被点分开。现在德国已有几个州进行了用激光数据生成高质量 DTM 的试验,结果都很理想,特别是在林区,所达精度甚至优于摄影测量立体编辑法获得的精度。芬兰已经用 LIDAR 成功进行了森林管理研究,该系统可用于推算植被参数和森林垂直结构。荷兰已在全国范围内利用机载激光雷达技术建立数字高程模型(DEM),采集数据的空间分辨率已达到每 16points/mz^[16]。美国 NASA2003 年 1 月 13 号发射星载激光测高卫星(Ice cloud and land elevation satellite, ICESat),该卫星可用于测量两极冰面地形及其随时间的变化,预测未来两极冰盖变化趋势以及海平面变化提供基础数据,研究全球气候的变化;可应用于大气科学研究,研究大气层的垂直结构等,从而为研究整个大气圈的变化和中长期的气候变迁提供科学的数据;用于测绘陆地地形图,进行全球植被覆盖率的调查和动态监测,获取全球数字高程模型。美国 NASA 还开发研制了机载激光植被成像传感器(laser vegetation imaging sensor, LVIS)系统,该系统可用于森林资源调查和管理,包括推算植被参数和森林垂直结构,如树高、树冠直径、树木密度、植被生长情况、木材量、树种等。机载激光植被成像传感器实际上是 NASA 地球遥感卫星 VCL(vegetation canopy lidar)计划的预研项目。

机载激光雷达技术在国内的研究应用也已经逐步展开。中国科学院遥感应应用研究所李树楷教授等研究的机载三维成像系统 1996 年完成了该系统原理样机的研制^[17],该系

统还有别于目前国际上流行的机载激光扫描测高系统,它将激光测距仪与多光谱扫描成像仪共用一套光学系统,通过硬件实现了 DEM 和遥感影像的精确匹配,直接获取地学编码影像,但由于国内目前尚无法生产高精度 IMU 和激光扫描装置,以至于该系统激光点密度很低,平面和高程精度无法达到大比例尺成图要求。因此该系统离实用还有一段距离。武汉大学李清泉教授等开发研制了地面激光扫描测量系统,但还没有将定位定向系统集成到一起,目前主要用于堆积测量^[18]。

虽然国内 LIDAR 系统的硬件研制还处于起步、测试阶段,但是 LIDAR 的应用越来越广泛。2005 年,北京星天地信息科技有限公司首次引进了加拿大 Optech 公司的 ALTM3100 激光雷达系统并在国内投入生产使用,先后制作了上海浦东新区、江苏昆山、常州机场、三峡库区的 4D 产品^[19];山西亚太数字遥感新技术有限公司利用 LIDAR 系统对部分电力布线范围,进行全部激光和数码影像数据获取的生产性实验,2006 年,广西桂能信息工程有限公司运用激光雷达测绘系统完成了“数字长城”项目,在国家测绘局组织的项目鉴定会上,陈述彭、刘先林、王任享等中外专家,对这一成果给予了高度评价^[20];2007 年,中国海监北海支队承担的“908 专项海岛、海岸带航空遥感调查项目”的顺利展开,标志着我国 LIDAR 应用达到了一个新的高度,据统计,国内现在有 10 套不同类型的 LIDAR 系统在投入使用。

1.2.2 数字摄影测量技术现状^[21]

1. 影像获取设备

随着摄影测量技术的发展,航空摄影测量技术已成为地形图成图的重要手段之一。数字摄影测量工作站的不断完善,用航空摄影测量技术成图周期缩短,成本低,精度高的优点得以充分的体现。但是,在传统的航空摄影中,由于在航摄时采用的胶片式的相机,因此不仅受天气的影响很大,而且在飞行时受压片的影响,以及数据传输过程受胶片的影响,同时因在作业过程中要通过扫描仪将底片扫描后才得到数字影像,所以它还依赖高精度扫描仪。各种厂商的不同胶片冲洗时需严格按照各自对应的药剂配方和冲洗方法操作,扫描仪的性能也会影响影像的质量。中间环节越多,信息损失的程度就越大。随着光电技术和计算机传输技术的发展,很多公司研究开发了数字航测相机,这些高分辨率、高精度的数字航空摄影系统,兼顾了小比例尺和大比例尺航摄业务的需求,同时也为恶劣气候作了特殊的设计,能以不同的曝光时间在不同的光线条件下曝光,解决了传统航摄方式的缺陷。中国首台 DMC 由北京星天地信息科技有限公司于 2003 年 10 月份引进,与常州市测绘院等参加实验,通过了江苏省测绘产品检验站的质检^[22]。表一为几种主流航摄数码相机的比较表。

表一: 世界主要三种数码航摄相机性能对比表

产品名称及生产厂家	ADS40	DMC	UCX
	Leica / DLR (瑞士 / 德国)	Z/I (美国)	VEXCEL (奥地利 / 美国)
投影方式和类型	多中心投影, CCD 三线阵	虚拟中心投影, CCD 面阵	垂直中心投影, CCD 面阵
CCD 像素尺寸	$7.5 \mu\text{m}$	$12 \mu\text{m}$	$7.2 \mu\text{m}$
等效幅面	$240 \text{ mm} \times$	$276 \text{ mm} \times 153 \text{ mm}$ (20μ)	$289 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$ (20μ)
黑白 (全色) 影像像数	12,000 三线阵	$13,824 \times 7,680$ (12μ)	$14,430 \times 9,420$ (7.2μ)
最大地面分辨率 GSD (Stereo)	15 cm	5 cm	3.6 cm (2.2 cm)
多光谱彩色 (R, G, B, NIR) 影像像数及分辨率	12,000 三线阵 15 cm	$3,000 \times 2,000$ 14.25 cm	$4,992 \times 3,328$ 6 cm
RadioMetric 解像度 (影像位数)	14 bit	12 bit	14 bit
影像精度	± 0.5 像素	± 0.3 像素	± 0.25 像素
焦距 (全色)	62.77 mm	120 mm	100 mm
焦距 (R, G, B, NIR)	62.77 mm	25 mm	28 mm
像场角 FOV	前 28.4° 中 2.0° 后 14.2°	航向 42.0° 旁向 69.3°	航向 37° 旁向 55°
影像重叠度及重叠次数	全色 (3 次)	60% 2~3 次	60%~90% 2~8 次
曝光时间及最短间隔	1.2 ms / 行 (或 1/800 秒)	1/300~1/50 秒 ≥ 2 秒每景	1/500~1/32 秒 ≥ 1.3 秒每景
飞行像移补偿 (FMC)	无	有 (TDI)	有 (TDI)
色彩还原能力	光通量不可控 色彩还原不可控	多光谱与全色 融合 比 1: 4.5 色彩还原良好	多光谱与全色 融合 比 1: 3 色彩还原良好
机载存贮容量	500 Gb	864 Gb (2200 张无压缩影像)	1.7 Tb (3,900 张无压缩影)
是否需用搭配 POS 系统	必须	不必, 可自选	不必, 可自选
传感器重量	66 kg	80 kg	45 kg ($0.45 \text{ m} \times 0.45 \text{ m} \times 0.60 \text{ m}$)

控制装置重量	43 kg	30 kg	35 kg (0.40 m×0.55 m×0.65 m)
稳定平台 (Mount)	PAV-30 (Leica)	Z/I	Leica、Z/I 均可
影像合成方式	必须根据 POS 系统采集的数据, 对 CCD 线阵数据进行纠正和重采样后, 重新生成带状影像。	用 4 台相机同步进行倾斜摄影, 然后根据倾斜影像重采样模拟生成中心投影影像, 几何关系的稳定受地面高差影响较大——称外扩法合成影像。	用 4 台相机逐个在同地点摄影, 再合成影像。相机的主点是一样的, 只有一个投影中心——称内含法合成影像 (或称共主点成像)。
合成影像几何的严密性	一般	一般	优
产品主要优点及缺点	全色波段的前视, 下视和后视影像能构成 3 对立体以供观测; 相机上集成了 GPS 和惯性测量装置 (IMU), 可以在四角控制或无地面控制的情况下完成对地面目标的 3 维定位; 无缝航线; 没有像移补偿, 实际分辨率被限制在 20 厘米。不适用于大比例尺制图和工程应用; 不能使用传统空三算法;	直接取代航空胶片/扫描仪; 地面分辨率高; 电子像移补偿 FMC 技术消除了传统航空摄影的局限性; 适用于传统空三计算; 可利用目前绝大多数标准测图系统处理, 生产的幅度小, 影像的处理的工作量较大; 拍摄到产出的周期短; 多光谱 CCD 分辨率较低; 拍摄速度慢 (大于 2 秒), 不能拍摄大重叠度影像 (大于 80 %)。	直接取代航空胶片/扫描仪; 单个坐标系, 垂直投影中心; 可拍摄高达 90% 的高航向重叠度影像, 极大的减少建筑、山体等高大地物产生的投影差、遮挡等; 地面极限分辨率可达 2.2 厘米; 电子像移补偿 (FMC); 适用于传统空三计算; 适用于目前绝大多数数字摄影测量系统; 设备兼容性强; 后处理时间较长; 机载控制存储装置体积较大。
应用领域	应用于一般平地、中、小比例尺航摄成图与正射影像的制作生产	应用于一般平地、大、中、小比例尺航摄成图与正射影像的制作生产。	适用于大、中、小比例尺航摄成图与正射影像的制作。

2. 影像处理系统

数字摄影测量无论在理论或是实用系统方面都已日趋完善, 国内外相关的应用软件很多, 它们一般都能生成数字正射影像 (DOM)、数字地面模型 (DEM)、数字线划图 (DLG)、数字栅格图 (DRG) 等所谓的 4D 产品以及根据用户特别要求衍生出的其他专题产品。而且这类数字测图系统生成数字正射影像一般都是采用数字影像立体测量的方

法,先生成像对 DEM,再由 DEM 分别对左右片进行微分纠正从而得到 DOM。

下面是国内外主要产品及其主要功能介绍:

① 国外数字摄影测量系统

ImageStation SSK 数字摄影测量系统^[23]:美国 Z/I 公司的数字摄影测量相机 (DMC) 的配套处理软件系统。该系统具备处理传统航测数据、数字航测数据、卫星影像数据以及近景摄影测量数据能力;具备针对生产的优化设计、批命令、高效数据压缩和自动化作业能力,从空三加密到 DTM 采集到正射影像制作,贯穿整个作业流程,与 GIS (地理信息系统)以及 DTM (数字地形模型)在工程 CAD 中的应用紧密结合在一起,是涵盖摄影测量全领域的完全解决方案。Imagestation 包含七个基本模块和四个高级选装模块: Imagestation 项目管理模块 (ISPM); Imagestation 数字模块 (ISDM); Imagestation 立体显示模块 (ISSD); Imagestation DTM 采集模块 (ISDC); Imagestation 特征采集模块 (ISFC); Imagestation 基础纠正模块 (ISBR); IRASC 遥感图象处理模块; Imagestation 自动 DTM 采集模块 (ISAE); Imagestation 自动空三模块 (ISAT); Imagestation 卫星空三模块 (ISST); Imagestation 自动正射模块 (ISOP)。其硬件设备外观如图 1-1。



图 1-1 ImageStation SSK 数字摄影测量系统外观图

DVP 数字摄影测量系统^[24]: DVP (Digital Video Plotter) 是由加拿大 Laval 大学研制的数字摄影测量系统。它由一台 PC 机加一个立体镜构成其基本硬件,可以处理航摄、卫星及地面摄影图像。采用专用格网片及校正软件自动纠正扫描仪的机械系统误差。内定向、相对定向和绝对定向中的自动布点自动影像相关等各种丰富的功能使作业效率明显提高。每个模型定向一次后,参数存入文件,不必再做定向,便于安排流水作业。其产品包括数字地面模型,矢量化地物及正射影像,并可直接转换到 GIS 系统。

Helava 数字摄影测量系统^[21]: 包括数字扫描工作站 DSW200/300 与数字摄影测量工

作站 DPW670/770, 其扫描仪的几何分辨率为 $0.5\mu\text{m}$, 精度 $\leq 3\mu\text{m}$, 像素 $12.5\mu\text{m}$, 可以进行彩色扫描。主计算机可以选用 Sun Sparc 20 工作站, 内存 $\geq 32\text{M}$, 速度 $\geq 100\text{MHz}$ 。也可在主屏 $\geq 180\text{MHz}$, 128MBRAM , 4G HD 的 Pentium PC 机主运行。附加 Nu Vision Perceiva 21MX 立体观测系统。由 Helava 公司生产的 DPW 型数字摄影测量工作站, 其主要功能包括自动生成 DTM、等高线绘制与数字影像纠正等。

PHODIS 数字摄影测量处理系统: 由德国 Zeiss 厂生产, 其核心软件“TOPOSURF”的主要功能包括自动产生 DEM, 制作正射影像、影像镶嵌等;

此外, HJW 公司推出的数字正射影像软件包(OrthoView)的主要功能包括利用航片和 SPOT 影像以及 DEM 生产正射影像; I2S 公司 90 年代推出的数字摄影测量系统 PRI2SM, 其主要功能包括提取 DEM、生产正射影像以及处理 SPOT 影像; 很多卫星遥感处理软件也加入了摄影测量处理模块, 例如 ERDAS 的 LPS 数字摄影测量模块, PCI 的 OrthoEngine 模块都可以进行地面控制点(GCP)的添加、同名点(TP)的采集、DEM 生产、线划图制作、正射影像生成和镶嵌等。

② 国内数字摄影测量系统^[25]

WuDAMS—VirtuoZo 数字摄影测量系统如图 1-2: 1996 年, 武汉测绘科技大学创办适普公司, 其后分别于 1997 年和 1999 年得到美国的国际数据集团(IDG)及 Intel 公司的融资。其旗帜产品是根据著名摄影测量与遥感专家王之卓教授所提方案研制而成的软拷贝摄影测量系统 VirtuoZoNT, 该系统通过在美国、日本、澳大利亚、香港特别行政区等国家和地区的子公司积极参与国际竞争, 目前已取得巨大成功, 成为国际三大著名的软拷贝摄影测量系统之一。WuDAMS 以商标 VirtuoZo 注册, 软件包括: 自动空三、定向; 影像匹配与交互编辑; DEM 等高线; 正射影像; 地物量测; DEM 拼接与影像镶嵌, 立体景观与输入输出格式转换。能处理航摄、以卫星及陆摄影像。



图 1-2 VirtuoZo 数字摄影测量工作站外观图

JX4A DPS 全数字摄影测量工作站^[26]如图 1-3: 由中国测绘科学研究院所属的中国四维测绘技术北京公司研制开发的数字化测图产品 JX-4A, 与美国 Heleva 公司的 DPW770 系列以及 VirtuoZoNT 同样久负盛名, 在国际数字摄影测量界形成了三足鼎立的

局面。主要功能包括:自动空三加密;定向建模(手工/自动内定向);影像匹配与交互编辑;自动生成DEM;自动绘制等高线;生成正射影像;生成数字线划图;DEM、DOM镶嵌与裁切;立体景观与输入输出格式转换。能处理航摄、以及卫星遥感影像等。



图 1-3 JX4 数字摄影测量工作站外观图

此外,由郑州测绘学院和总参测绘研究所,西安测绘研究所也在研制简易型数字摄影测量系统,也实现了数字正射影像图的制作等功能。

近年来,中国国家测绘局的工作主要集中在两个方面^[21],即:建立建设中国国家空间基础设施(CNSDI)和为防灾减灾提供基础数据产品。产品的格式已经逐步从模拟形式向数字形式过渡。数字产品是国家基础地理信息系统(CNSDI)的主要数据源,它在CNSDI中极为关键。目前,我国已经建立了四川、陕西、黑龙江、北京、上海、广东和湖北等7个数字化测绘生产示范基地^[27],从而为中国的数字摄影测量用于生产提供了条件。

§ 1.3 本文研究内容和组织结构

1.3.1 论文研究内容

本文主要研究机载激光雷达数据处理的理论和方法,在全面理解和分析机载激光雷达技术的原理和特点的基础上,探讨机载激光雷达数据处理的一些关键技术,并形成完整的处理流程;LIDAR和DMC这两种新技术在航摄数据处理中的应用,综合利用LIDAR和DMC相关理论与处理手段,对LIDAR数据进行地物分类提取、生成数字地面模型、利用Imagestation SSK航空摄影处理软件对DMC影像的处理进行较深入的研究;并提出了用LIDAR点来做地面控制点,进行空三加密,绝对定向的无地面控制的航摄影像处理的新方法;研究WGS84坐标系UTM投影与西安80坐标系高斯投影之间的转换问题。主要内容包括:

1. 介绍了机载激光雷达系统、数字航空摄影测量的发展及国内外现状,分析了机

载激光雷达技术面临的机遇和挑战,以及目前研究的热点和难点。对前几种商用数字航空摄影测量的软硬件进行了详细比较;详细研讨了机载激光雷达系统的基本理论、工作模式及系统构成以及地面激光点坐标的详细计算;分析机载激光雷达技术的优越性和其广泛的应用领域,并对当今主要商业化激光雷达系统进行了归纳和比较。

2. 研究了机载激光雷达的数据处理过程,详细阐述了标准las格式点的生成,滤波,分类,数字高程模型的生成以及地面激光点坐标的详细计算;机载激光雷达系统的误差传播规律、分析其精度,提出了相应的提高精度的方法。

3. 用工程实例对LIDAR数据地面点的平面、高程精度分析、评定。

4. 结合实例总结了正射影像的制作流程。

5. 提出了用LIDAR点来做地面控制点,进行空三加密,绝对定向的无地面控制的航摄影像处理的新方法,并且把此方法应用到实际生产中,产生一定的经济价值。

6. 详细研究了LIDAR和DMC这两种新技术在线划图制作中的应用。

7. 结合实例对正射影像、线划图的平面精度进行分析评定;对点位三维精度进行分析评定,并给出提高精度的方法。

8. 研究了空间直角坐标系之间、平面直角坐标系之间的坐标转换;不同投影之间的投影转换;结合工程实例研究WGS84 UTM投影—西安80高斯投影之间的坐标转换,并建立自定义的坐标系统,利用多个航空摄影数据处理软件、GIS软件来制作实际项目要求的正射影像和线划图。

1.3.2 论文组织结构

第一章绪论介绍了本文研究的背景、相关技术及研究意义。回顾了机载激光雷达和数字摄影测量技术的国内外研究现状,提出了论文的主要研究内容。

第二章介绍 LIDAR 系统,对其各组成部分进行了详细的描述,并分析对比了当今主要商业化 LIDAR 系统的性能及特点。

第三章详细论述了 LIDAR 数据处理过程,详细叙述数据处理流程,分析了 LIDAR 数据特点、系统误差源、系统精度及检校方法,最后分析了 LIDAR 技术的优越性。

第四章以工程实例阐述 LIDAR 和 DMC 的综合应用,提出一种少(无)地面控制点的航摄数据处理的新方法,并进行精度分析,比较。

第五章讲述 WGS84 UTM 投影到西安 80 高斯投影的坐标转换。

第六章总结了本论文的主要工作,最后是展望和设想。

第二章 机载激光雷达系统 (LIDAR) 简介

§ 2.1 系统组成

LIDAR 以飞机作为运载平台, 由激光测高计、GPS 定位装置、IMU 惯性测量器和高分辨全数码彩色照相机组成, 是世界上第一套将数码相机与激光扫描结合在一起的设备, 具有同时采集三维地形数据和数字影像的能力。数码照相机系统, 采集的数码影像的分辨率优于 10 厘米, 与激光扫描器相匹配。在一个电子板上收集、格式化和存储飞行中所采集激光测距、照相机、GPS 和 IMU 数据, 并驱动自动化处理程序。能实时获取地形表面的三维空间信息影像, 是获取地球空间信息的有力工具。

机载激光雷达系统的主要组成部分包括: (1)动态差分 GPS 接收机, 用于确定扫描投影中心的空间位置; (2)姿态测量装置(IMU), 用于测量扫描装置主光轴的空间姿态参数; (3)激光测距仪, 用于测量传感器到地面点的距离; (4)一套成像装置(现在主要是数码相机), 用于获取对应的地面数码彩色影像, 用于最终制作正射影像^[14]。



图 2-1 机载激光雷达系统组成图

(加拿大 Optech 公司)

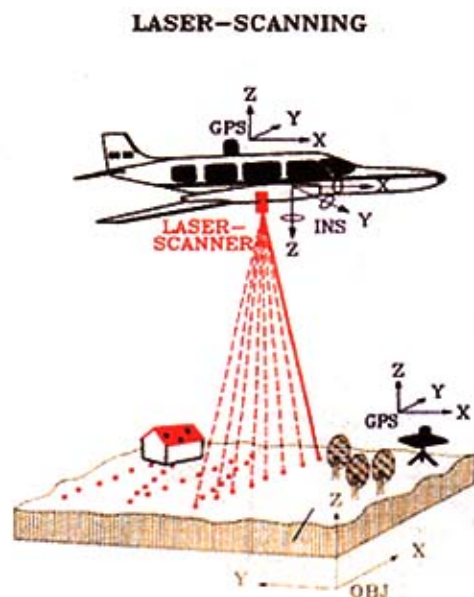


图 2-2 机载激光雷达原理图

§ 2.2 系统描述

2.2.1 激光扫描测距系统原理^[28]

激光扫描(Laser Scanning):就是采用一定的模式发射一系列激光束以实现对地面的高密度点采样^[17]。

激光测距的基本原理是利用光在空气中的传播速度已知这一特性,测定光波在被测距离上往返传播的时间来求得距离值。设光波在某一段距离上往返传播时间为 t ,待测定距离^[29]可表示为:

$$D = \frac{1}{2}ct$$

式中, c 为光波在真空中的传播速度, 约为 3×10^8 m/s。只要精确地求出时间 t 就可以求出距离 D 。具体实现方法有脉冲法, 相位法和变频法, 最常用的是脉冲法和相位法。相位法通过量测连续波(continuous wave, CW)信号的相位差间接确定传播时间; 脉冲法直接量测脉冲信号传播时间。图 2-3, 2-4 分别表示了脉冲法和相位法的基本原理。

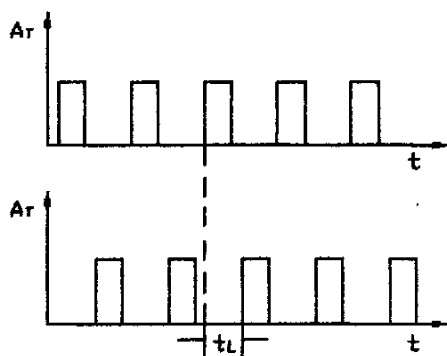


图 2-3 脉冲法

使用脉冲法测距, 其各个量的表达式如下:

$$\text{距离: } D = \frac{1}{2}c \times t_L$$

$$\text{距离分辨率: } \Delta D = \frac{1}{2}c \times \Delta t_L$$

式中, c 为光速, t 为脉冲传播时间。

使用相位法测距, 其各个量的表达式如下:

$$\left. \begin{array}{l} \text{相位差的传播时间: } T = 2\pi \\ t_L = \phi \end{array} \right\} t_L = \frac{\phi}{2\pi} \times T$$

$$\text{距离: } D = \frac{1}{2}c \times \frac{\phi}{2\pi} \times T = \frac{\lambda}{4\pi} \times \phi$$

$$\text{距离分辨率: } \Delta D = \frac{\lambda_{short}}{4\pi} \times \Delta \phi$$

式中, c 为光速, T 为周期

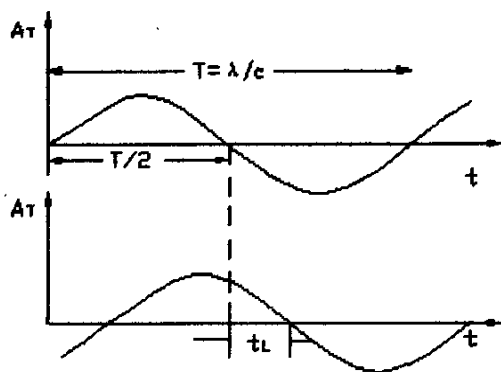


图 2-4 相位法

2.2.2 航空定位定向系统

航空定位定向系统 (Position and Orientation System-POS) 是 LIDAR 系统的关键, 也是必需包含的部件。其核心思想是采用动态差分 GPS (Differential GPS-DGPS) 技术和惯性测量装置 (IMU-Inertial Measurement Unit) 直接在航测飞行中测定探测器的位置和姿态, 并经过严格的联合数据处理 (即卡尔曼滤波), 获得高精度的探测器的外方位元素, 从而实现无或者少地面控制的探测器的定位和定向。图 2-5 为 POS 系统工作原理图, 图 2-6 为德国 IGI 公司的 POS 系统外观图。

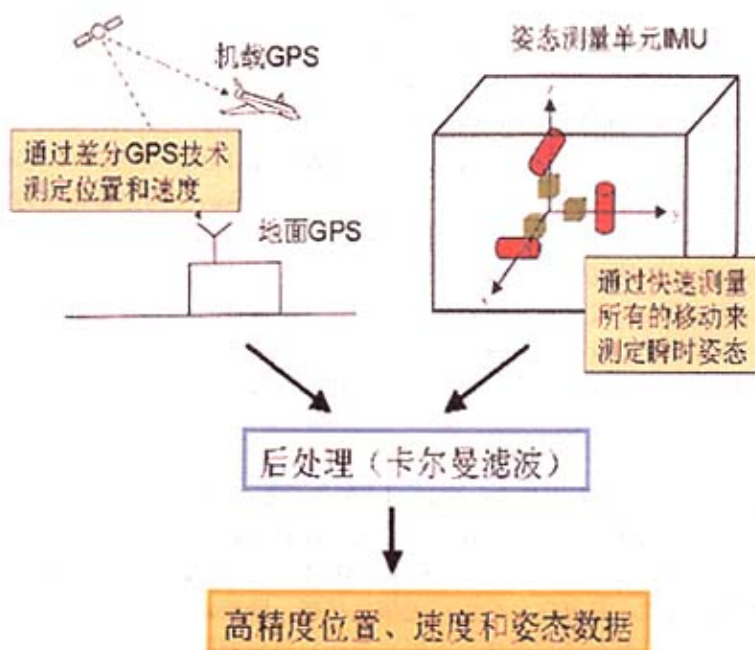


图 2-5 POS 系统工作原理图

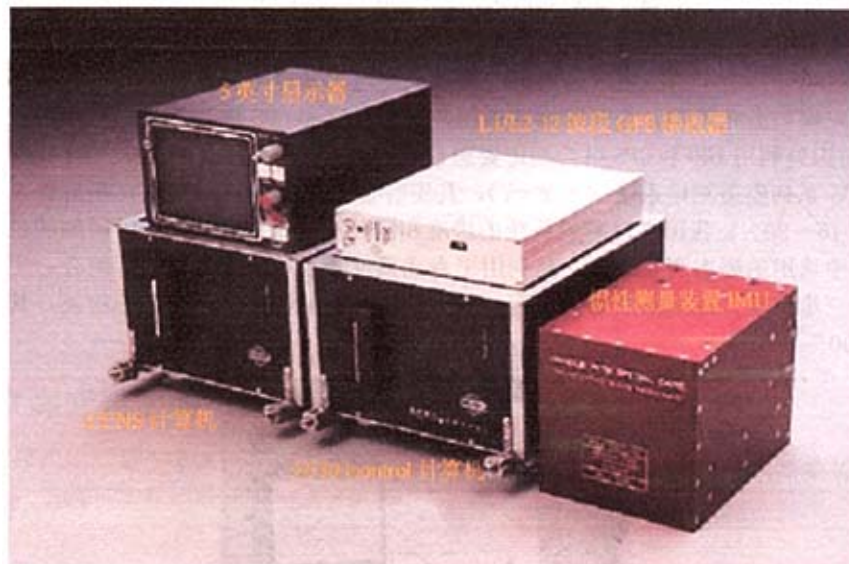


图 2-6 德国 IGI 公司的 POS 系统外观图

1. DGPS

GPS 的基本定位原理是卫星不间断地发送自身星历参数和时间信息，用户接到这些信息后，经过计算求出接收机的三维位置，三维方向以及运动速度和时间信息^[30]。载波相位测量虽不具备现时性，但具有极高的定位精度潜力，可使定位精度达到厘米级^[31]。

在精密定位应用中主要采用差分 GPS 定位 (DGPS) 技术: 将一台 (或几台) GPS 接收机安置在基准站上, 与机载接收机同步而连续地观测 GPS 卫星信号、同时记录激光脉冲发射瞬间和数码相机开启瞬间的时间标志, 通过载波相位测量差分定位技术的离线数据后处理获取 LIDAR 三维坐标, 根据基准站已知精密坐标, 计算出基准站到卫星的距离改正数, 并对机载接收机的定位结果进行改正, 从而提高定位精度。在 LIDAR 系统中主要采用 DGPS 技术, 如果采用严格的限制条件, 比如在基站距离不大于 25km、空间位置精度因子 (PDOP) 小于 2.5, GPS 信号无干扰的情况下, 该技术可使定位精度达到 0.05m-0.1m。DGPS 技术大量应用于动态需要高精度位置领域^[32]。

机载 GPS 天线安装在飞机顶部外表中轴线附近, 尽量靠近飞机重心和扫描器中心的位置。另外, 地面 GPS 接收机的数据更新频率不低于机载接收机的更新频率。如果采用实时动态差分技术, 还必须架设数据发射电台, 以便把必要的数发送送给飞机上的接收机。

2. IMU

IMU 获取的是 LIDAR 的姿态信息, 即滚动、俯仰和航偏角。

虽然 DGPS 可量测探测器的位置和速率, 具有高精度, 误差不随时间积累等优点, 但其动态性能差 (易失锁)、输出频率低, 不能量测瞬间快速的变化, 没有姿态量测功能。而 IMU 有姿态量测功能, 具有完全自主、无信号传播、既能定位、测速, 又可快速量测探测器瞬间移动, 输出姿态信息等优点, 但主要缺点是误差随时间迅速积累增长。可以看出 DGPS 与 IMU 正好是互补的, 因此, 最优化的方法是对两个系统获得的信息进行综合, 这样可以得到高精度的位置、速率和姿态数据。IMU / DGPS 数据的处理主要是通过卡尔曼滤波来实现。

IMU 已经有几十年的应用, 过去由于累计误差过大使得精度难以提高, 近年来随着各种新型陀螺如激光陀螺、光纤陀螺的应用, 尤其是它和 GPS 进行组合, 使得精度大幅提高。目前国外利用 IMU 和 GPS 组合测定姿态已经达到 15" 的精度, 如加拿大的 APPLANIX 公司的 POS 系列姿态测量系统 (图 2-7), 其实时姿态测量精度为 30", 事后处理精度可以达到 15~20"。我国惯性测量系统的进度和国外还有很大距离, 我国研制的机载三维成像仪中选用的姿态测量装置。是利用平台式惯性测量单元和 GPS 进行组合。主要利用 GPS 的三维位置、速度不断对惯性测量的漂移进行积分校正。经过实际检验, 其精度可优于 100" ^[3]。



图 2-7 APPLANIX 公司的 IMU 装置

IMU/DGPS 辅助空中三角测量是继 GPS 全球卫星定位系统在大地上取得革命性成就之后,在摄影测量与遥感领域所取得的又一具有划时代意义的成果,它将为摄影测量向自动化和智能化方向发展奠定基础^[32]。

在 LIDAR 航摄进行之前先要对 IMU 进行初始化,飞过飞行校验场 (calibration field) 获得其初始值,然后再进行航摄,如图 2-8。

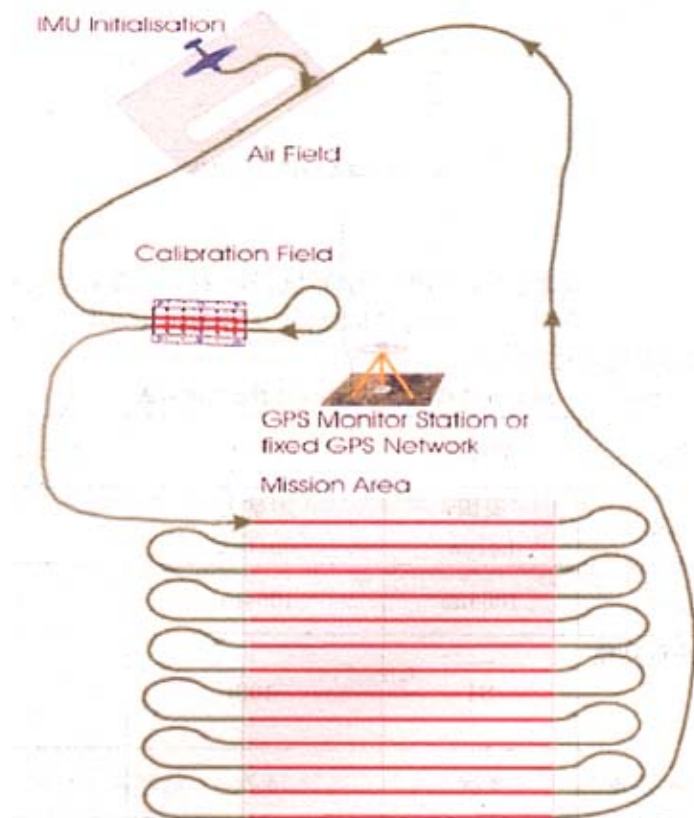


图 2-8 IMU 初始化示意图

2.2.3 激光扫描器

激光扫描器是 LIDAR 的核心,一般由激光扫描器、接收器、时间间隔测量装置、传动装置、电脑和软件组成 (如图 2-9)。

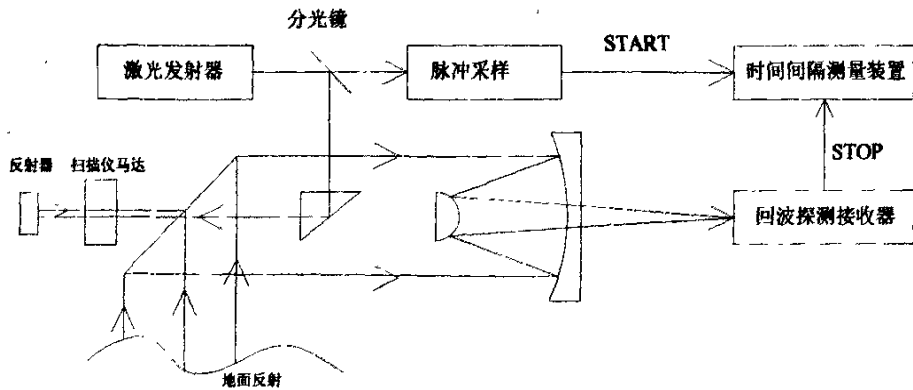


图 2-9 激光扫描器的组成

2.2.4 相关参数

根据不同的用途和设计思想,扫描器的特性也不一样,主要表现在光斑尺寸、回波记录方式和扫描方式等方面。其他指标包括波长、功率脉冲重复率等。表 2 为几种商用 LIDAR 系统性能参数的对比^{[3][18]}。

表 2 几种商用 LIDAR 系统性能参数的对比

比较项目	ASL50	ALTM	LiteMapper5600
生产厂家	美国 Leica	加拿大 Optech	德国 IGI
激光波长	1064nm	1064nm	1550nm
最大重复脉冲重复频率 (KHz)	84	100	100
脉冲回波记录模式	3 次	4 次	2 次
激光发散度	0.33mrad	0.3mrad/0.8mrad	0.5mrad/1.2mrad
激光密度 (点/m ²)	可变	20~50	3~25
侧滚、俯仰/航线姿态 精度	0.02/0.05°	0.02/0.03°	0.01/0.02°
扫描角	10~75°	±25°	±22.5° 或 ±30°
扫描模式	正弦曲线	Z 字型	平行线

航高范围	200—4000m	80—3500m	$\geq 1500m, \rho \geq 80\%$ $\geq 850m, \rho \geq 20\%$
高程精度 (cm)	6~10	$\angle 35$ (航高 3000m)	13 (航高 785m)
平面精度 (m)	1	$\frac{1}{3000} \times H$ (航高)	4 (航高 785m)
测距精度 (cm)	≤ 15	2	1
图像	4000×5000	4096×4096	5440×4080

①波长：机载 LIDAR 采用的激光波长一般位于近中红外的大气窗口，常用的有 1064nm、11047nm、1550nm 等，测深 LIDAR 系统还采用透水性较好的蓝绿激光波段，如 532nm。

②脉冲重复频率：脉冲重复周期，说明了激光脉冲序列中两相邻脉冲间的间隔。在既定的高度和扫描角的情况下，脉冲重复频率越高，所获得的地面激光点的密度越高。

③功率：设脉冲激光器输出的单个脉冲持续时间(脉冲宽度)为 t ，单个脉冲的能量为 E ，输出激光的脉冲重复周期为 T ，那么，激光脉冲的平均功率 $P_{av}=E / T$ ，(即在一个重复周期内的单位时间输出的能量)。脉冲激光讲峰值功率(peak power) $P_{pk}=E / t$ 。在扫描角一定的情况下，功率越高，激光可测距离越远。

④光斑尺寸：由于激光束发散的原因，激光束的照射会在地面形成光斑，光斑横、纵向轴的大小分别为：

$$a_L = \frac{a \times H \sec^2 \phi}{2} \quad , \quad b_L = \frac{a \times H \sec \phi}{2}$$

式中： a 是激光束发散角， H 是飞行高度， ϕ 是扫描视场范围内动态视场光轴与地面形成的倾角。

⑤扫描方式：典型的扫描方式有线扫描、圆锥扫描和光纤扫描三种^[20]。线扫描在地面上的扫描线呈“Z”字型或平行线型；圆锥扫描随飞行平台的运动，光斑会在地面上形成一系列有重叠的圆；光纤扫描在地面上形成的扫描线呈平行或“Z”字型。

⑥脉冲回波记录方式：对脉冲方式而言，有两种记录方式。其一，记录回波中一个或多个离散信号；其二，记录反射信号的波形。前者记录回波中几个特定的数据，如首末次回波信号。这种数据记录方式被现有的绝大多数商用系统所采用。记录整个波形是通过回波信号采样，在数据处理中重建来实现的。一般，采样间隔很短，如 RIGEL MS-560 系统为 1nm。采用这种工作方式的有：INIS SLICE、RIGEL MS-560。回波信号波形中包含大量的信息，通过对波形的分析可以获取更丰富的信息，并更加详细的描述对象的细节变化。另一方面，人们可以根据实际应用对数据进行二次处理，提取某些特定信息。这种灵活性对科研有显著帮助。

2.2.5 数码相机

LIDAR 直接获得点位三维坐标的功能提供了传统二维数据缺乏的高度信息, 却忽略了对对象特征的其它信息, 如光谱信息。尽管在提取空间位置信息上, 机载 LIDAR 数据有其自身的优势, 但图像数据包含光谱信息对认识物体也具有重要作用。这也是不少应用研究将 LIDAR 数据与其它光学数据结合使用的原因之一。

利用高解析度的数码相机获取地面的地物地貌真彩或红外数字影像信息, 以弥补 LIDAR 的不足, 以达到对生成 DEM 产品的品质进行评价; 或作为一种数据源, 对目标进行分类识别, 或作为纹理数据源。目前 CCD 面阵感测器还难以满足构建高解析度宽角航空相机的要求。

加拿大 Optech 公司的 ALTM 4K02 数码相机采用 4096×4096 大面阵彩色 CCD 数码相机, 焦距为 55mm, 可获取与高密度 LIDAR 数据同步的高分辨率航空影像, 可提供达到子像素精度并且带有地理坐标的真彩色或彩红外图像。可实现连续曝光, 设定参数或者自动测光拍摄, 并能自动传输数字航片至存储控制电脑。该相机为航空摄影专用量测型相机, 具有严格的几何检校模型和参数, 配备有多种航摄附属仪器设备标准介面, 可以通过航线设计软件实现定点摄影, 并具备快门动作瞬间输出信号功能, 供计算机记录, 以便和 IMU 配合。

2.2.6 中心控制器

LIDAR 系统由多个重要硬件组成, 其中关键的技术就是如何实现三个重要设备 (航空定位系统、LIDAR 系统、数码相机) 的精确同步。中心控制器一般都采用导航、定位和管理系统构成同步记录 IMU 的角速度和加速度的增量以及 GPS 的位置、激光扫描器和数码相机的数据。

2.2.7 机载激光雷达系统对地定位原理

假设地理空间中一点 O 的三维坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 已知, 称为已知点, 这已知点可在地面, 也可以在空, 这一已知点到待定点 P 的矢量 (模、方向余弦) 可准确测出, 那么待测定点的三维坐标 (X_i, Y_i, Z_i) 即可根据已知点加矢量的方法求出。

$$\begin{aligned} X_i &= X_0 + \Delta X_i \\ Y_i &= Y_0 + \Delta Y_i \\ Z_i &= Z_0 + \Delta Z_i \end{aligned} \quad (2-1)$$

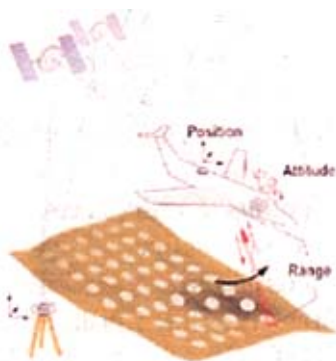
其中:

$$\Delta X_i = f_x(\omega, \alpha, \kappa, \theta, S)$$

$$\Delta Y_i = f_y(\omega, \alpha, \kappa, \theta, S)$$

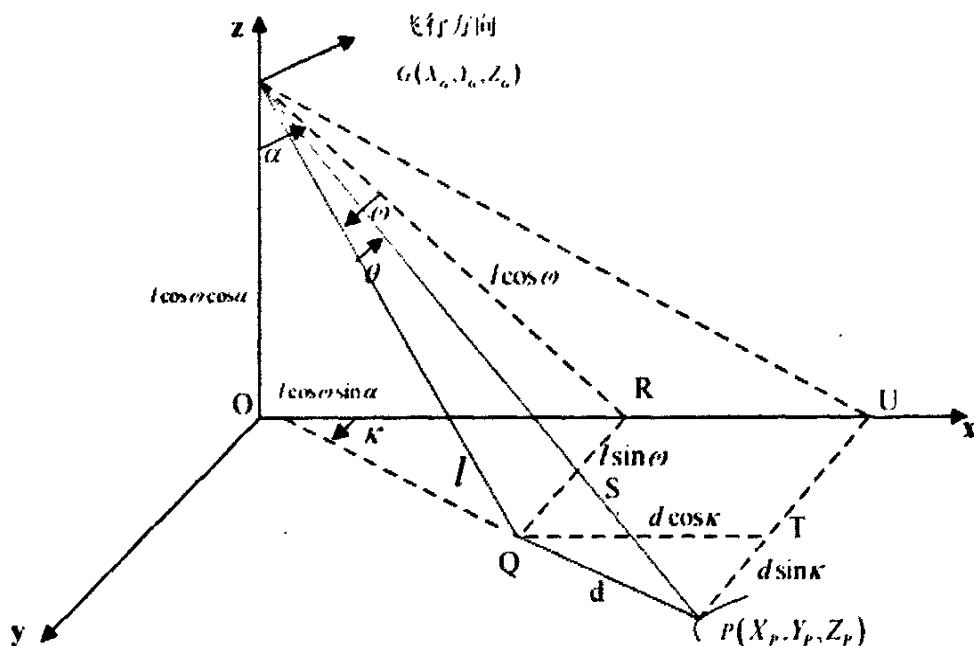
$$\Delta Z_i = f_z(\omega, \alpha, \kappa, \theta, S)$$

通常已知点 O 的三维坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 由 GPS 提供; 方向余弦由观测平台法线的俯仰角 ω 、侧滚角 α 、航偏角 κ 及观测方向与法线间夹角 θ 组成的矢量矩阵算出, 观测平台法线的 ϕ , ω , κ 由姿态测量装置给出; 矢量的模 S 由激光测距仪给出。上述 $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \alpha, \kappa, \theta, S$ 已知, 那么任意待测定点 P_i 的三维坐标 (X_i, Y_i, Z_i) 即可求出^[9]。图 2-10 为机载激光雷达系统原理图。

图 2-10 机载激光雷达(LIDAR)系统原理图^[2]

由“点”形成“线”靠行扫描技术，由“线”形成“面”靠观测平台的运动完成，最终使“点”均匀布满整个“面”。实现行扫描技术时，其 θ 角是指与光学系统主光轴之间的夹角，这个 θ 角可用角传感器测定（不等速扫描时），也可靠测点序号与瞬时视场的积得到（匀速扫描时），实现行扫描测点的前提是需要激光器具有高脉冲重复频率。这样行扫描测距点可以是一直线一直线地形成“面”，也可以是一个圆弧紧接一个圆弧扫描。

其中最常用的是线扫描方式其对地定位原理^[3]如图 2-11，遥感器在空中的投影中心 G 点由 GPS 测出位置 (X_0, Y_0, Z_0) ，POS 系统测出航偏角 κ ，侧滚角 α ，俯仰角 ω ，扫描激光测距仪测出斜距 S （即 GP 长度），同时成像光谱仪测出对应地面点的像元信息 H 。

图2-11 线扫描方式直接对地定位原理图^[3]

首先根据根据一个扫描周期内，该激光点 P 对应的像元与扫描周期内中间像元（即所谓的机下点 Q）之间的夹角 θ ，根据矢量求解原理可知地面 P 点的坐标为：

$$\left. \begin{aligned} X_p &= X_G + \Delta X \\ Y_p &= X_G + \Delta Y \\ Z_p &= X_G + \Delta Z \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

式中, ΔX , ΔY , ΔZ 为扫描投影中心 G 与地面点 P 间的坐标增量。

在图上令 $GQ=1$, $QP=d$, 则

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= l \cos \omega \sin \alpha + d \cos \kappa \\ \Delta Y &= l \sin \omega + d \sin \kappa \\ \Delta Z &= l \cos \omega \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

式中, ω , α , κ 为 3 个姿态角, 关键在于求 l 和 d 。

在直角 $\triangle QPG$ 中, 根据余弦定理可得

$$d^2 = 1^2 + S^2 - 2l \cos \theta \quad (2-4)$$

在直角 $\triangle QPT$ 中有 $QT = d \cos \kappa$, $PT = d \sin \kappa$, 在直角三角形 OQR 中有 $QR = l \sin \omega$,

$OQ = l \cos \omega \sin \alpha$, 在直线 ORU 中, $OU = OR + RU = OR + QT$, 即

$$OU = l \cos \omega \sin \alpha + d \cos \kappa \quad (2-5)$$

且

$$PU = PT + UT = PT + QR = d \sin \kappa + l \sin \omega \quad (2-6)$$

在直角 $\triangle PUG$ 中, $GU^2 = GP^2 - PU^2$, 把式 (2-6) 代入得

$$GU^2 = S^2 - (d \sin \kappa + l \sin \omega)^2 \quad (2-7)$$

在直角 $\triangle GOU$ 中, $GU^2 = OG^2 - OU^2$, 把式 (2-5) 代入得

$$GU^2 = (l \cos \omega \sin \alpha)^2 + (l \cos \omega \sin \alpha + d \cos \kappa)^2 \quad (2-8)$$

由式 (2-7) 和 (2-8) 可得

$$S^2 - (d \sin \kappa + l \sin \omega)^2 = (l \cos \omega \sin \alpha)^2 + (l \cos \omega \sin \alpha + d \cos \kappa)^2 \quad (2-9)$$

再由 (2-4) 和 (2-9) 联立可解得

$$\left. \begin{aligned} l &= S \cos \theta - \frac{S \sin \theta}{\sqrt{1-b^2}} b \\ d &= \frac{S \sin \theta}{\sqrt{1-b^2}} \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

其中, $b = \cos \omega \sin \alpha \cos \kappa + \sin \kappa \sin \omega$ 。

把式 (2-10) 代到式 (2-4) 和 (2-5) 便得到线扫描的三维定位公式:

$$\left. \begin{aligned} X_p &= X_G + \left(S \cos \theta - \frac{S \sin \theta}{\sqrt{1-b^2}} b \right) \cos \omega \sin \alpha + \frac{S \sin \theta}{\sqrt{1-b^2}} \cos \kappa \\ Y_p &= Y_G + \left(S \cos \theta - \frac{S \sin \theta}{\sqrt{1-b^2}} b \right) \sin \omega + \frac{S \sin \theta}{\sqrt{1-b^2}} \sin \kappa \\ Z_p &= Z_G + \left(S \cos \theta - \frac{S \sin \theta}{\sqrt{1-b^2}} b \right) \cos \omega \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2-11)$$

§ 2.3 优越性

LIDAR 技术发展历史虽然不长,但是引起了人们的广泛关注和应用,成为国际研究开发的热点技术之一。同其他遥感技术相比,LIDAR 技术具有自身的优越性,主要表现在以下几个方面^[33]:

1. LIDAR 系统是一种主动式测量系统,不受天气、云雾的影响。
2. 激光脉冲信号能部分穿透植被,能快速、高精度和高空间分辨率地绘制林区或山区的真实地形图,只要植被不会太密足以保证激光信号能够到底地面并被反射回去。
3. 不需要大量地面控制点,且速度快,半天就能完成 1000km² 区域面积大小的地形数据采集^[2]。
4. 作业安全,它能进行危险地区(如沼泽地带、大型垃圾场)和无法布设控制点的地区的测图工作。
5. 作业周期短,易于更新。
6. 实效性强,24 小时内就可以提取测区的 DEM 数据。
7. 将信息获取、处理及应用技术纳入同一系统中,更有利于提高自动化和高速化程度。

§ 2.4 LIDAR 主要应用领域

LIDAR 系统可以为城市、地理、资源、生态、环境、人口、经济、社会等领域提供服务,特别是国土资源、城市规划、环境保护、公共安全等部门,充分利用由 LIDAR 系统参与建立的城市数字信息系统实现办公自动化和决策科学化。其主要应用包括以下几个方面:

1. 在数字城市中获取大范围高精度的 4D 产品^[19]

LIDAR 利用激光传感器对地面进行扫描,同时利用 IMU(惯性导航系统)实时定位飞机姿态(250Hz),再加上 GPS(全球定位系统)观测坐标(采样间隔为 1 秒),还可以打开 LIDAR 携带的数码相机进行航空摄影,获取相片数据。LIDAR 地面采集精度是非常高的。高程精度,1200 米航高以下达到 15cm,1200-2000 米航高达到 25cm,2000-3000 米航高达到 35cm;平面精度可以达到航高的 3000 分之一。如图 2-12, 2-13, 2-14, 2-15。



图 2-12 DSM

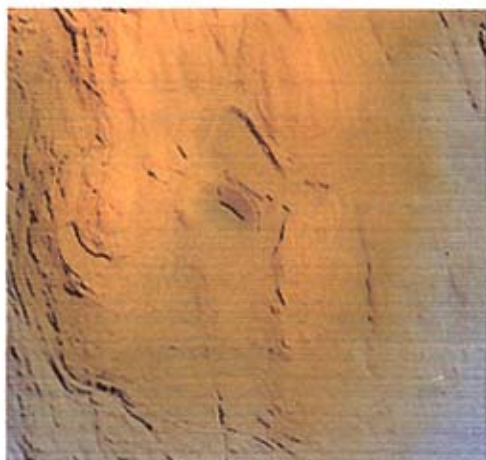


图 2-13 DEM

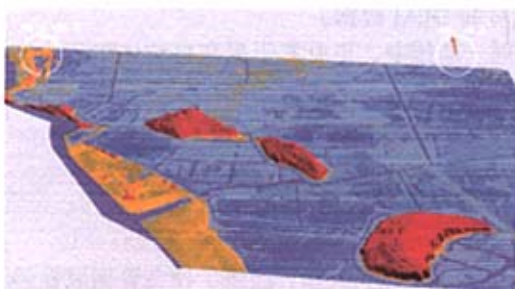


图 2-14 南通狼山地区 DEM(部分)



图 2-15 南通狼山地区 DOM(部分)

2. 城市真实三维模型构建

如果需要得到城市真实三维模型,就需要单独进行建筑物和植被的提取和建模。在对三维激光点进行分类后,可以很清楚的看到植被和建筑物,根据影像,我们可以将建筑物生成立体模型,经过人工编辑之后,就可以得到较为真实的三维城市模型。如图 2-16。

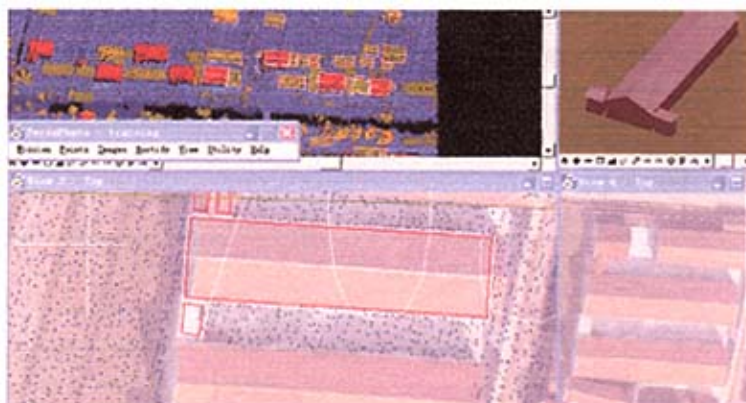


图 2-16 南通狼山地区三位模型构建(部分)

3. 数字水利、海洋建设中的应用^[34]

通过 LIDAR 系统可对水资源进行数据采集、传输、存储和处理以及数字模拟等工作,分析研究水利的自然现象,探索其内在规律,为水域治理、开发和管理提供方案和科学依据。如图 2-17。



图 2-17 淹没模拟图

4. 森林地区 DEM 的获取以及推求森林垂直结构数据

森林地区准确的地形信息对于森林业及自然资源的管理非常重要;准确的树高、森林密度等信息对林业部门非常重要。而这些数据用常规方法很难获取。LIDAR 的多次回波特性使它能够同时获取树冠和底部的地形信息和树高信息。通过数据后处理,可分析植被覆盖并对其加以分类,还可以计算树高、统计树种及木材量,还可动态监测植物生长情况,以及获取真实数字地面模型。如图 2-18, 2-19。



图 2-18 森林地区 DSM

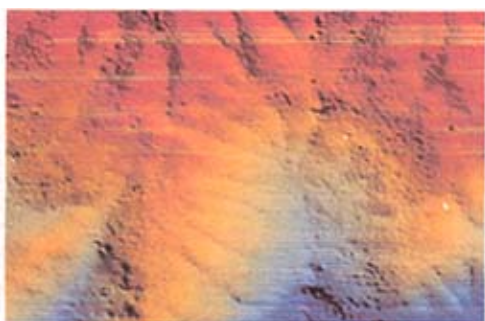


图 2-19 森林地区 DEM

5. 测制带状目标地形图^[38]

包括道路测量,道路规划和设计;输电线路,海岸侵蚀监测,海岸地带管理,交通运输,河道和水资源,交通管理;测绘铁路线路,光缆铺设,煤气管道,沟渠等。如图 2-20, 2-21。

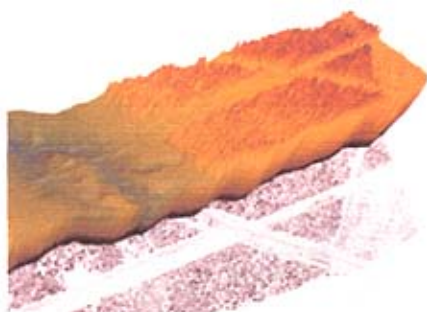


图 2-20 带状地形图

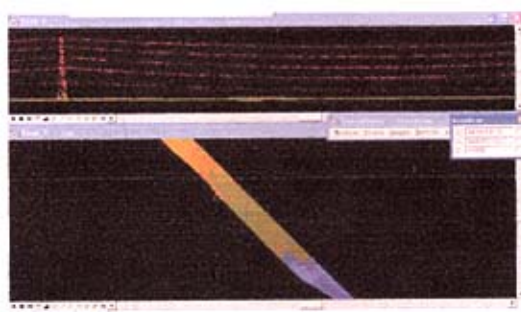


图 2-21 昌平电力线(部分)

6. 紧急事件和灾害评估

主要应用于紧急时间和自然灾害(台风、地震、洪水)的灾后评估和响应。美国 9.11 事件后,就用 LIDAR 对世贸大厦废墟进行动态监测。如图 2-22, 2-23, 2-24。



图 2-22 9.11 前的世贸大厦数字高程图

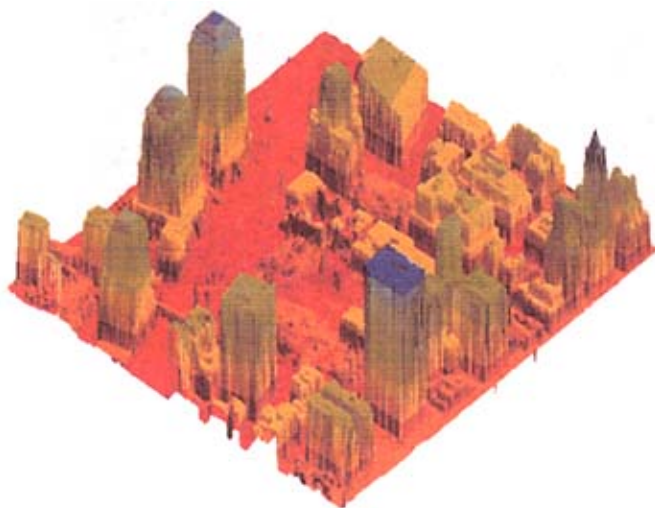


图 2-23 9.11 后的世贸大厦数字高程图



图 2-24 9.11 后的世贸大厦数字正射影像图

第三章 LIDAR 数据处理

§ 3.1 LIDAR 数据处理流程

LIDAR 系统获得的原始点 (.scn 格式) 没有三维信息, 是不能直接处理的, 只有当 POS 数据经过 IMU 数据和 GPS 数据分离, 飞机上 GPS 数据与地面 GPS 数据差分生成外方位元素之后再融合 LIDAR 原始点生成可操作的标准格式 (.las) 的 LIDAR 点云, 然后再对点云进行滤波分类处理, 生成 DEM 及其他产品。LIDAR 数据处理流程图如图 3-1。

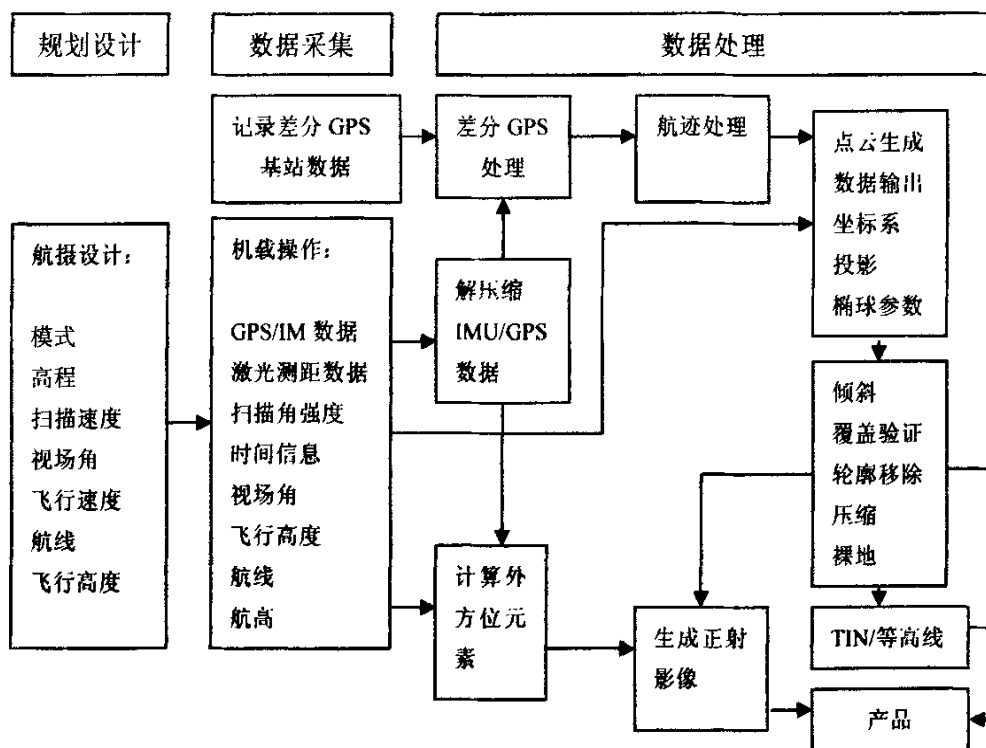


图 3-1 LIDAR 数据处理流程图

§ 3.2 LIDAR 数据数据滤波和人工编辑

3.2.1 机载激光扫描测高数据滤波原理^[18]

机载激光雷达获得的数据是在三维空间中呈不规则分布的点集, 在三维空间的分布形态呈现随机离散的数据“点云”(Points cloud)。在这些点中, 有些点位于真实地形表面, 有些点位于人工建筑物(房屋, 烟囱, 塔, 输电线等)或自然植被(树, 灌木, 草)上边。从激光脚点数据点云中提取数字地面高程模型需要将其中的地物数据点去掉, 这就是所谓的激光测高数据的滤波。研究如何从数据点云中分离出地形表面激光脚点数据子集以及区分不同地物(包括房屋、道路、植被等)激光脚点数据子集, 就是所谓的数据过滤和分类。

滤波的基本原理是基于邻近激光脚点间的高程突变(局部不连续), 一般是由地形的陡然起伏所引起。即使高程突变是由地形变化所引起的, 就一个区域来讲, 其表现形态也不会相同, 陡坎只引起某个方向的高程突变, 而房屋所引起的高程突变在四个方向都会形成阶跃边界。在同一区域, 一定范围大小内地形表面激光脚点的高程和邻近地物(房屋, 树木, 电线杆等)激光脚点高程变化显著, 在房屋边界处更为明显。局部高程不连续的外围轮廓就反映了房屋的形状。当激光扫描到枝叶繁茂的参天大树时, 激光脚点间的高程也会出现局部不连续的情况, 但其表现形态却与前者有显著差异。

两邻近点间的距离越近, 两点高差越大, 较高点位于地形表面的可能性就越小, 因此, 判断某点是否位于地形表面时, 要顾及该点到参考地形表面点的距离, 随着两点间距离的增加, 判断的阈值(threshold)也应放宽, 主要是为了同时考虑地形起伏产生的高程变化。两地面点间的距离越远, 自然高差(地形变化形成的高差)就会越大。

数据滤波和分类主要取决于所用的扫描技术、测区地形复杂程度和数据点的密度。地形平坦, 地物覆盖稀疏, 对滤波算法性能要求不高。如果测区地形复杂, 地物覆盖密集, 则对滤波算法也相应提出了较高的要求^[10]。

3.2.2 现有的 LIDAR 数据滤波方法

滤波和分类是处理机载激光雷达数据的关键。近年来, 国内外的专家学者进行了好多相关研究, 发表了众多论文和研究报告。

1. 基于回波强度信息的滤波算法

目前, 机载激光雷达系统基本上都能提供回波强度信息, 按照传统的灰度影像处理方法, 一些研究者提出了基于回波强度信息的滤波算法。算法首先统计出回波数据的直方图, 然后利用波峰法, 计算出阈值, 最后基于阈值将数据区分为地面部分和其它地物。从理论上讲, 这种方法应该能够得到 DEM。但实际上, 由于影响激光回波强度的因素很多, 即使对于同一介质, 在不同的飞行高度及不同的天气状况等不同条件下, 激光回波强度信息也不是一成不变的。即使经过了标定, 也无法根据回波强度信息精确地判断出地物的类别。因此, 单独使用这种原理的滤波算法越来越少。

2. 依据高程值的滤波算法

本方法原理比较粗略,认为地物点总是高于地面点的,认为高程大于某一阈值的像素就是地物点。首先找到该阈值,然后依照阈值进行分割,低于阈值的点的集合就是地面点集,在此基础上构建 DEM。这类算法的精度不是很高,但速度较快。

3. 自适应迭代的滤波算法^[35]。首先利用中值滤波对 DSM 影像进行滤波去噪,接着进行顾及图像均方差的自适应迭代阈值滤波算法。

单纯的激光点数据有一定的盲目性,加之自然界复杂的地形决定了不可能有一个适应所有地形的算法。因此,滤波要针对不同的地形,采用不同的算法。如果能融合影像数据、多光谱数据、地面已知 GIS 数据,采用三维立体图、晕渲图、人工编辑等模块,相互补充,充分利用各自的优势,有望取得满意的效果。当然数据源越多,处理算法就越复杂,难度就越大。这是当今该领域的一个热点和难点^[14]。在 LIDAR 数据处理软件中,往往将几种滤波方法综合应用,从而得到最真实的地表描述。图 3-2,图 3-3 为 TerraScan 软件中的几种滤波方法;图 3-4,图 3-5 为 LIDAR 滤波前后图。

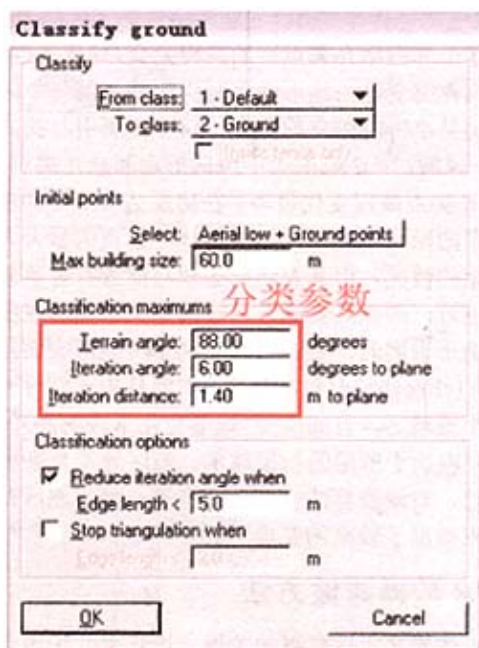


图 3-2 默认地面分类

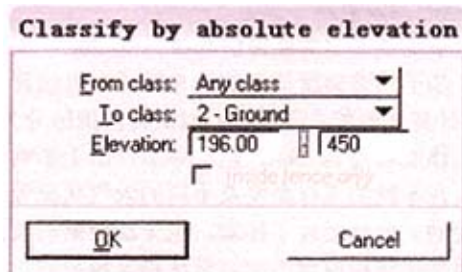


图 3-3 绝对高程地面分类



图 3-4 滤波前地面

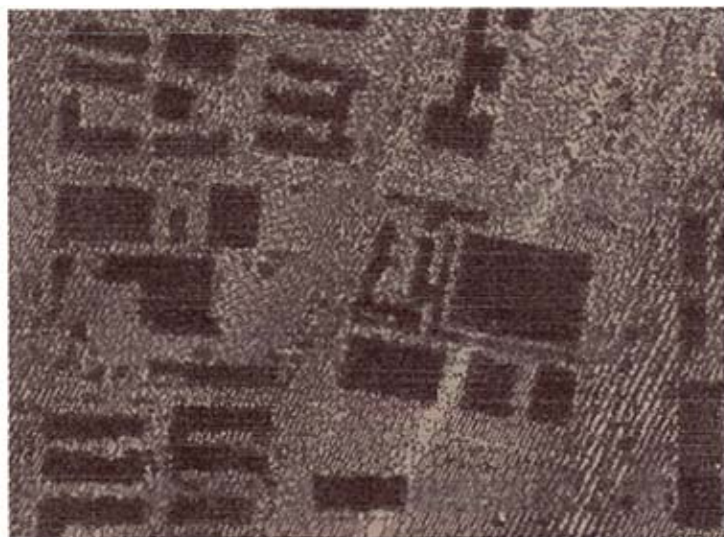


图 3-5 过滤建筑物后地面

3.2.3 生成 DEM

DEM 在测绘中被用于绘制等高线、坡度坡向图、立体透视图、制作正射影像和地图的修测；在遥感中可作为分类的辅助数据。它是地理信息系统的基础数据。只有建立高精度的 DEM，才能为后面的地形匹配过程提供准确的参照数据。LIDAR 可以快速、准确地获取 DEM 数据。LIDAR 数据滤波的首要目的就是要获取地形表面的数字信息(DTM 或 DEM)。原始数据经过初差剔除并滤波后，去掉地物激光脚点，剩下地形表面的激光脚点数据，根据其三维坐标采用人机交互式编辑 DEM。图 3-6 为 DEM 的网格显示。很多遥感、摄影数据处理软件可以直接读取 LIDAR 的三维信息生成适合软件处理的 DEM 文件，例如：

PCI10.0 可以直接读取 las 格式的 LIDAR 点, 并转换为自身的 pix 格式, 然后可以直接导入此 pix 格式的 DEM, 结合航空影像生成 DOM。

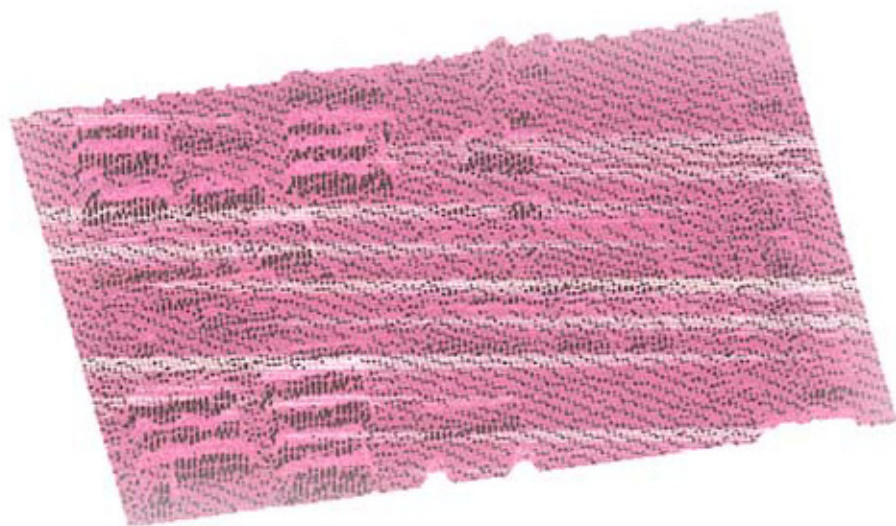


图 3-6 DEM 网格显示

3.2.4 其他产品

LIDAR 数据除了可以生成精确的 DEM 之外, 还可以生成所需的其他 4D 产品: 例如数字地面模型 (DSM); 在摄影测量处理软件中利用数码影像, 导入 LIDAR 生成的 DEM 就能生成正射影像图(DOM); 还可以采集线划图 (DLG) 等。

§ 3.3 LIDAR 数据特点

1. 海量数据

由于激光雷达系统和影像产生的数据量非常巨大, 因此需要足够大的内存和硬盘空间来存储。大范围内的激光点云构成的海量数据, 将需要大容量的磁盘阵列存储, 也对现有软件能否适应海量数据、对计算机的性能、软件的算法和速度都提出了很高的要求。

2. 缺少光谱信息

激光雷达直接获得点位三维坐标的功能提供了二维数据所缺乏的高度信息, 却忽略了反应对象特征的其它信息, 如光谱信息。尽管在获取空间位置信息上, 光谱数据不如激光雷达数据方便, 但其包含的空间、色彩属性对认识物体有同等重要的作用。这也是不少应用研究将激光雷达数据与其它光学数据结合使用的原因之一。

3. 航带覆盖面积较小

受激光雷达技术数据获取方式和硬件条件所限, 激光雷达的扫描带覆盖面积较小(三峡二期遥感监测项目中所用的 ALTM3100 扫描宽度为 1800m)。在飞行高度、速度、时间、航摄航带重叠度相同的条件下, 相机(75 度视场)覆盖面积是激光扫描仪(30 度扫描宽度)

的 2.5 倍^[2]。这意味着为获得相同的覆盖面积,需要对更多的扫描条带进行拼接等处理。

4. 获取同名点困难

同名点在摄影测量、计算机视觉的诸多应用中扮演着重要的角色。尽管激光雷达技术直接获取地面点的三维坐标,从理论上讲不需要进行匹配、纠正等处理,但由于 IMU/DGPS 仪器误差或集成的问题,相邻扫描带间的点在高程和平面位置存在一些差异,必须经过必要的处理才能获得整个测区的数据。此外,对离散的数据形式还需要开发新的处理方法。

5. 存在数据缝隙

由于遮挡、物体特性(如镜面反射)等因素,数据集中往往会出现没有数据的部分(缝隙)。一个明显的例子是“阴影”。作为一种主动式信息获取技术,激光雷达技术扫描角有限,对光照度不敏感,因而受阴影影响相对较小。但位于扫描条带边缘的建筑物仍然会产生遮挡的现象,类似于侧视雷达系统中的雷达盲区。

6. 树木高度估计偏低

研究人员早在 20 世纪 80 年代就已经注意到,在使用激光雷达量测树木高度时,测量结果低于实际高度。近期的研究结果进一步说明了这个问题^[24]。同时,这种现象随着激光脚点密度的降低更加明显。造成这种现象的原因可能是由于数据密度的原因、航摄时由于风的作用造成的树木摆动等现象,在实际情况中很难确保数据中包含植被最高点的信息^[25]。

§ 3.4 LIDAR 系统误差源

LIDAR 测量的误差来源主要有以下几个方面^[18]:

1. 固定误差

固定误差为各种仪器设备的标称误差,如 GPS 测量误差、激光扫描仪的测距误差、惯性测量系统的测量误差,计时误差等。

2. 系统误差

系统误差主要是由于人为因素或环境因素引起的,如 GPS 星况不佳、地面反射激光强度不够等。其中有些误差是可以通过事先制订严密的航飞计划加以消除的,如选择星况较好的时段,避免将 GPS 安置在飞机上收不到卫星或对卫星信号有遮挡的地方,可以适当降低航高,以增强激光的反射强度。

3. 异常误差

由于野外条件不像在实验室里,会遇到各种各样的情况,造成激光测距信号的“丢失”;有的信号可能经几次反射后反射回去,使测定的时间延迟远大于激光束真正的时间延迟,造成距离被夸大;还有可能发生图 3-6 所示的情况。

此外,地表不连续以及移动物体,如飞机下可能会有飞翔的鸟群、公路上可能有运动的汽车、地面上有密实的植被或其它物体都会影响机载激光雷达系统的测距效果,这样会测到一些高程异常点,不过这些点大部分都可以通过软件剔除掉。

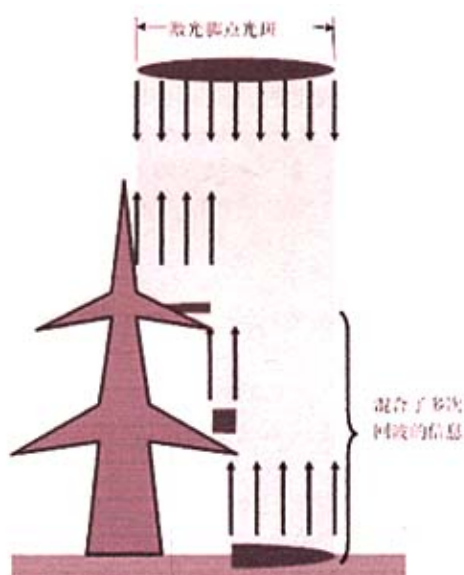


图 3-6 记录的多次回波的激光脚点示意图

4. 坐标系统转换误差

由于采用的是 WGS84 坐标系和椭球面高程系, 而工程上通常采用的是国家西安 80 坐标系和正常高高程系统^[36], 因此需要将 WGS84 坐标系和椭球面高程系转换成国家坐标系和正常高高程系统, 其中必然产生误差, 特别是高程转换过程中会产生较大的误差。

5. 数据分类处理误差

在对数据进行分类处理时, 激光本身并不能区分地面数据和非地面数据, 主要依靠作业者凭自己的知识和经验定义参数建立模型进行识别, 由于测区情况和操作者的情况千差万别, 难免会产生误差, 特别是在植被较厚的地方, 这时, 自动处理后, 还应当再进行人工编辑处理^[37]。

§ 3.5 LIDAR 数据精度

1. 标称精度

由于不同的生产厂家对各自的系统所标称的精度千差万别^[18],例如,徕卡公司的 ALS50 标称精度为:平面<1m,高程 6-10cm(航高 4000m);ALTM3100 的标称精度为:平面 1/3000×航高,高程<0.35m 航高 3000m)^[38]。

实际生产中要对某一具体型号的 LIDAR 系统,选取某些特殊地形的场地进行精度验证。

2. 高程精度检校方法

目前经常使用的高程检校办法是找一小块水平的平地,这个面上的高程应该相等。然后利用激光雷达对检校场进行实地飞行,取地面的实际高程作为真实高度,然后用每个激光点的实际观测值与真实值求差值,就可以获得每个激光点的观测值误差和中误差。

3. 平面精度检校方法

由于机载激光的观测不能完全按照要求在地物特征点上采样,也就是说,给定一个激光脚点很难同真实场景中的地物点匹配起来。为此通常是选取规则房屋的房角或屋脊,输电线等点状或线状地物米进行。为了尽量在扫描过程中能采集到这些点状或线状地物的特征点,在作业过程中要保证足够的密度。然后将激光点和影像定位,判读落在特征点上的脚点,在实地量测其精度,即可统计出激光点云的平面精度^[18]。

LIDAR 数据的精度与诸多因素有关,平坦光滑的硬物体表面,如沙土、混凝土表面测高的精度较好;非强反射物体如植被等,测高精度较差;倾斜表面激光束斑中心与周围的高程值会有差异;由 WGS 84 坐标转到地方坐标时,不同的转换方法得到的结果也会有差异;由大地高求正常高时大地水准面的精度也会影响结果的精度;地面激光反射点坐标由一个地面参考站计算时精度较好;有几个参考站时,重叠区域地面激光反射点坐标的精度还取决于参考站间坐标的相对精度;参考站间坐标误差会降低地面激光点坐标的精度。目前,激光测高绝对精度可达 15cm;相对精度能达到 5cm;平面位置的绝对精度主要取决于飞行高度(平面位置精度约为飞行高度的 1/1000)等参数,通常为 dm 级到 m 级的精度,影响机载激光对地定位精度的各因素中,影响最大的是 GPS 定位精度,如果能优化飞行作业,并提高 GPS 的定位精度,在正常情况下垂直方向精度都能达到 7~8cm 的水平。随着人们认识的不断加深,如果采取一定的模型或方法去模拟或削弱这些误差的影响,其精度指标还有望得到进一步的提高^[14]。

4. 实例分析

在三峡二期遥感监测项目中,利用 Trimble RTK 系统对 ALTM 3100 激光扫描测高系统(航高约为 3500m)的实测数据进行野外检验,对其精度进行评价^[39]。

RTK 使用仪器为 Trimble 5700 标称平面精度为 $(\pm 5 + 1\text{PPm} \times D)\text{mm}$,观测采用 1+2 的观测模式(一台基准站,两台流动站),为保证 RTK 的准确度和控制点的可靠性,在架设好基准站后,利用 RTK 对已知控制点进行检核,并用两台流动站分别在同一位置测量,以进行互相比较检核,结果表明 RTK 成果与静态成果相差不大(平面 9.5mm,高程 7mm);两台 RTK 流动站测同一点的坐标成果基本一致,由此可见,基准站数据成果可

靠, RTK 流动站工作正常, 可信度高。

高程检查: 采取在道路中线、比较宽阔的地方测得部分高程点。通过搜索每个实测点周围 5m 范围内的点云, 再由这些点云坐标通过线性内插的方式计算出测点处的点云高程, 并与实测的高程进行比较。共选择了 49 个检核样本。点云高程误差分布区间见表 3, 高程误差分布直方图见图 3-7。

表 3 点云高程误差分布区间表

区间 (m)	个数
<-1	0
-1~-0.5	2
-0.5~0.5	33
0.5~1	3
1~1.5	3
1.5~2	6
2.5~5	2

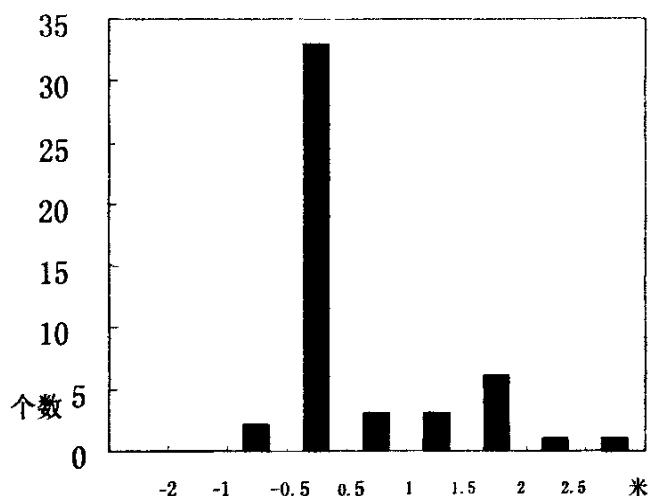


图 3-7 高程误差分布直方图

从误差的分布范围来看, 点云高程误差分布在-1m 到 3m 的范围内: 其中 33 个分布在-0.5m 到-0.5m 范围内, 占检测样本的 67%; 6 个分布在 0.5m 到 1.5m 范围内, 占检测样本的 12%; 6 个分布在 1.5m 到 2m 范围内, 占检测样本的 12%; 两个大于 2m, 占检测样本的 4%; 2 个小于-0.5m, 占检测样本的 4%。

从检核点的分布区域看, 误差较大的检核点 (大于 1m) 共 11 个, 其中有 7 个分布在山脊 (谷) 上。且“-”误差有只有 7 个, 而“+”有误差 42 个。

在选取的 49 个点云高程样本中: 有 12 个分布在比较宽阔平坦的地方, 检核点差值绝对值平均为 0.286m, 只有一个点的差值绝对值>1m, 若去除该检核点, 则剩余检核点的差值绝对值平均为 0.205m; 22 个分布在路面上及其他较平坦的地区, 检核点差值绝对值的平均为 0.526m, 有三个检核点的差值绝对值>1m, 若去除这三个点则剩余 19 个检核

点的差值绝对值的平均为 0.291m; 15 个分布在地形变化较大的区域, 检核点差值绝对值的平均为 1.087m, 其中 7 个检核点的差值绝对值 $>1\text{m}$, 5 个检核点的差值绝对值 $>1.5\text{m}$ 。

可以看出, 点云的误差分布在 -0.5m 至 0.5m 的范围内。检核点绝对值的平均误差为 0.639m; 若去除误差 $\geq 1\text{m}$ 的检核点(11 个), 用剩余的 38 个样本计算检核点误差绝对值的平均为 0.305m, 与仪器标称精度相符。

平面检查: 通过搜索实测点周围 5m 范围内的点云, 再由这些点云坐标通过线性内插的方式计算出测点处的点云高程, 再比较内插的高程和点云的高程, 将差值最小的点云的平面坐标作为实测点处的点云平面坐标, 再与实测坐标进行对比, 并分析 X 方向和 Y 方向上误差分布。点云在 Y 方向误差绝对值平均为 1.70m, X 方向误差绝对值平均为 2.22m, 总体点位精度为 2.79m。

注: 由于平面检查所采用的参考影像所摄相机(ALTM 4K02)的镜头畸变参数未知, 其影像存在明显偏移, 不具参考意义, 故此次点云的平面精度检查不列入参考。

§ 3.6 提高 LIDAR 数据精度的方法

提高 LIDAR 集成系统的精度需从下述几方面考虑^[35]:

1. 单项技术按照影像定位精度的 1/5—1/10 要求。
2. 各坐标轴系之间的平行性主要依靠准确的安装技术, 同时辅之以安装后的平行性检测技术, 检测技术应达到秒级。
3. 依照应用目的来选定瞬时视场角, 依照飞机类型及巡航速度决定的速高比来确定 IMU 的响应灵敏度和数据更新率, 决定时间同步精度, 决定 GPS 动态性能选型。
4. 飞行校验场检测, 并依检测结果的分析对系统进行调整或为数据处理提供校正参数。

第四章 LIDAR 与 DMC 的综合应用

§ 4.1 工程实例简介

在三峡二期遥感监测项目中对三峡库区长江干流两岸及移民新城区的地质灾害严重地段进行 DMC (面积 5000 平方公里) 及 LIDAR (面积 300 平方公里) 航摄, 获取黑白、真彩色、彩红外及激光点云等有关数据, 对数据进行处理, 建立 DOM、DEM、DLG、DRG, 满足第二期遥感动态区域监测信息采集及分析的需要^[40]。

4.1.1 LIDAR 航摄

1. 范围: 秭归、巴东、巫山、奉节、万州、云阳和涪陵 7 个新县城区及重要灾害分布区 (香溪—归州段), 利用 1:5 万地理图及地质灾害分布图圈定航摄监测范围。

2. 内容: 重点地段监测面积约 300 平方公里, 成图比例尺为 1:2000。该项航摄 (航测) 工作与 DMC 航摄一起进行, 采用 DMC、LIDAR 航摄仪和 IMU 惯导及 GPS 系统, 航摄监测规定范围的重点地段。飞行高度满足 1:2000 成图要求的同时还应考虑将来更大比例尺成图要求的可能, 本次飞行同时获取黑白、真彩色、彩红外数据及 LIDAR 点云等数据。

3. 数据处理: 按 1:2000 测量精度要求对航摄 (航测) 数据进行处理和提取数据, 在 Oracle 支持下, 建立正射影像数据库 (DOM)、数字高程模型数据库 (DEM)、数字线划地图数据库 (DLG)、栅格地图数据库 (DRG)。

4. 航测时的相关参数:

① 机载激光系统 (ALTM-3100 加拿大 Optech 公司)

飞行高度: 3000m

测区总面积: 300.1km²

航线总数: 103 条

航线总长度: 880.6km

脉冲频率: 70KHz

扫描频率: 32Hz

扫描角度: 20 度

扫描宽度: 1800m

旁向重叠: 40%

地面点间距: 0.68

激光类型: 窄激光

②数码相机 ALTM 4k 02 (加拿大 Optech 公司)

阵列大小 4096×4096 (垂直飞行方向) 像素

像素大小 0.009 mm 滤波器阵列

镜头 Zeiss Distagon 55.0mm 36° FOV (视场角)

曝光控制 自动: 光圈或快门优先

快门 电控快门

快门速度 1/125-1/4000 秒

曝光补偿 ±2EV in 1/3 EV 步长

曝光速率 最大为 4 秒

处理软件有: REALM 测量软件包(POSPac 4.1, ALS40 Post Processor), MicroStation TerraScan, VirtuoZo3.6, AutoCAD, PCI10.0.

4.1.2 DMC 数字航摄

1. 范围: 以长江为中心线, 两侧各延伸 3—6 公里, 从宜昌三峡大坝下游 10 公里开始逆流而上至重庆江津市城区止, 全长约 650 公里。如图 4-1

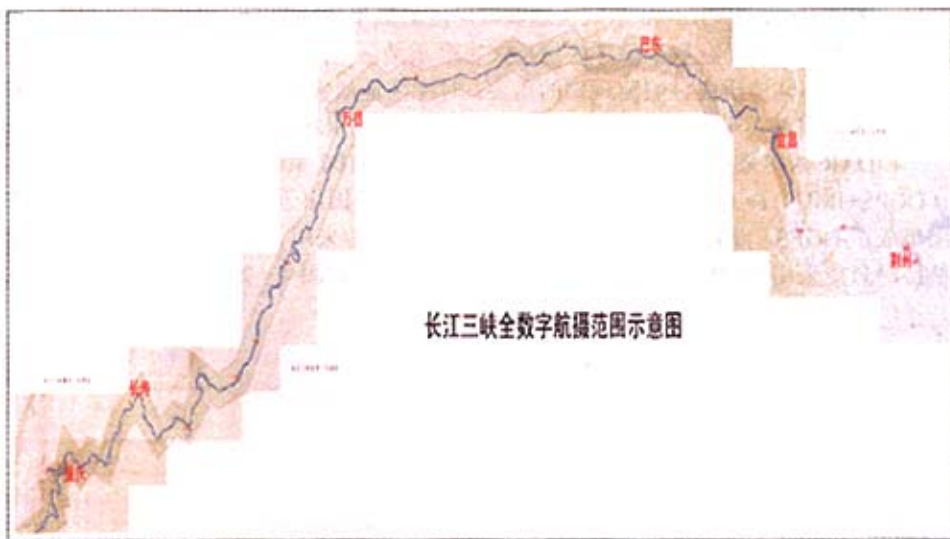


图 4-1 长江三峡 DMC 航摄范围示意图

2. 内容: 监测面积约 5000 平方公里, 成图比例尺为 1:10000。采用 DMC 全数字航摄仪及 GPS 系统, 航摄监测长江三峡库区干流及重点支流的一级岸坡地质灾害发育地区。飞行高度 2500 米, 航摄比例尺应 $\geq 1:25000$, 满足 1:10000 成图要求的同时还应考虑将来更大比例尺成图要求的可能, 本次飞行同时获取黑白、真彩色、彩红外数据。

3. 数据处理: 按 1:10000 测量精度要求, 对航摄(航测)数据进行处理和提取数据, 建立正射影像数据库(DOM)、数字高程模型数据库(DEM)、数字线划地图数据库(DLG)、栅格地图数据库(DRG)

4. 航测时的相关参数^[41]:

数字航摄相机 (DMC) 焦距 $f=120\text{ mm}$;

影像分辨率: 13824×7680 像素;

航摄比例尺: $1:20000$;

飞行高度: 3000m ;

像片重叠度: 航向 $60\% \sim 65\%$; 旁向 32% 左右;

像元分辨率为 12μ ;

像片倾斜角小于 2° , 旋偏角小于 7° ;

航线弯曲度小于 3% , 实际航线偏离设计航线不应大于像片上 3cm ;

同航线高差小于 30m , 实际与设计航高差小于 50m 。

硬件设施为: DMC (美国 Z/I 公司)

处理软件有: ImageStation SSK, VirtuoZo3.6, PCI10.0, AutoCAD, MicroStation, Geomedia5.1。

§ 4.2 工程应用

在本项目中, 采用 LIDAR 系统快速获取库区的数字地面模型, 采用 DMC 摄取地面高分辨率数字影像, 从而获取三峡库区地质灾害严重地区的现势、完整、高精度地形测量数据, 以满足库区地质灾害监测预警的需要, 对库区地质灾害做好监测和防治工作, 确保三峡库区水资源、土地资源和生态环境的合理开发利用和可持续发展。

LIDAR 系统采用加拿大 Optech 公司的 ATLM-3100 系统, 该系统集成了 POS 系统 (DGPS+IMU); 而 DMC 是美国 Leica 公司的产品, 美国出于其安全方面考虑, 只在 DMC 上集成了 DGPS, 没有集成 IMU 系统。故在 LIDAR 中采用了 IMU/DGPS 导航; 在 DMC 航摄时只能采用 DGPS 辅助航摄。航摄数据处理流程如图 4-2:

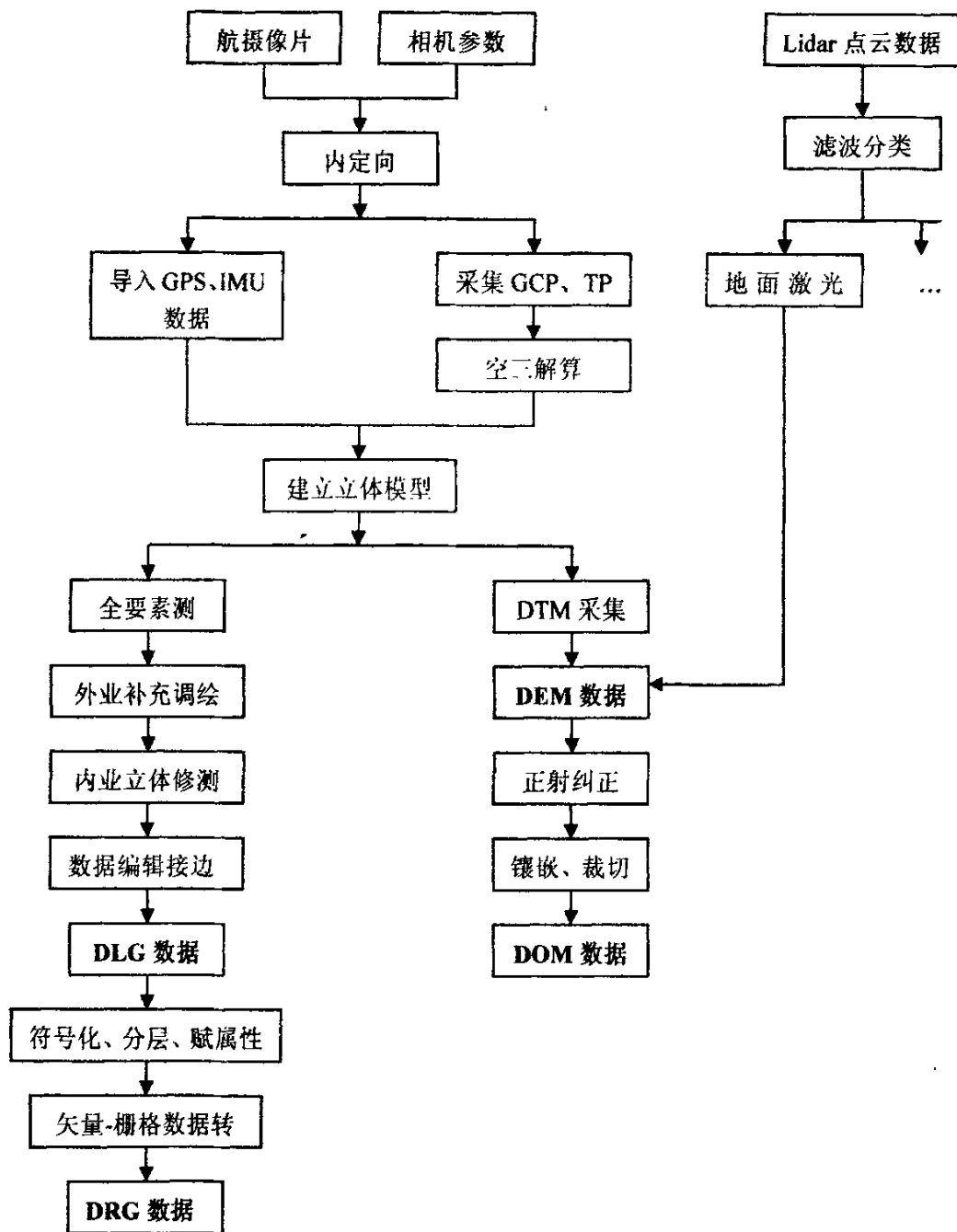


图 4-2 航摄数据处理流程图

4.2.1 DOM 制作

该项目中 DOM 制作分为两部分：

1. 利用 LIDAR 系统所带的 ALTM 4K02 数码相机（分辨率 4096×4096 像素）所摄得的影像和 LIDAR 生成的 DEM 制作外业调绘用 1:10000DOM。

此 DOM 仅仅用来做外业调绘，故没有进行坐标转换，采用 WGS84 坐标系统 UTM

投影在 PCI9.0 中进行。作业流程如图 4-3

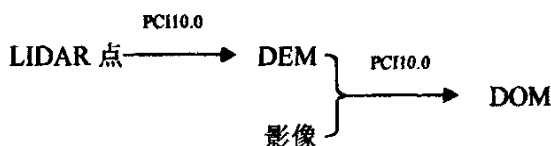


图 4-3 ALTM 4K02 影像 DOM 制作流程图

2. 利用 DMC(13824×7680 像素)拍摄的影像导入 LIDAR 生成的 DEM 制作 1:10000 的 DOM, 作为成果上交。作业流程图如图 4-4。

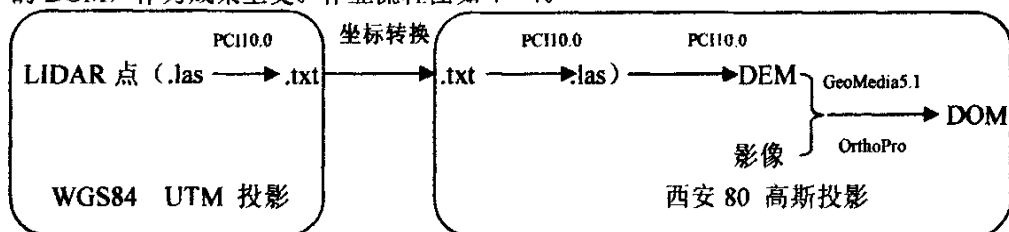


图 4-4 DMC 影像 DOM 制作流程图

此 DOM 作为成果上交,在制作之前先对 LIDAR 的坐标进行 WGS84 坐标系统 UTM 投影到西安 80 坐标系统高斯投影的转换。由于 PCI 不支持西安 80 坐标系统,在 GeoMedia5.1 软件自定义西安 80 坐标系统,调用 ImageStation OrthoPro 正射模块制作 DOM, 并进行镶嵌成图。图 4-5, 4-6, 4-7 为坐标转换时相关处理步骤截屏, 4-8 为在 GeoMedia 中的 DOM 镶嵌拷屏。



图 4-5 las 格式转化为 txt 格式



图 4-6 txt 格式转化为 las 格式

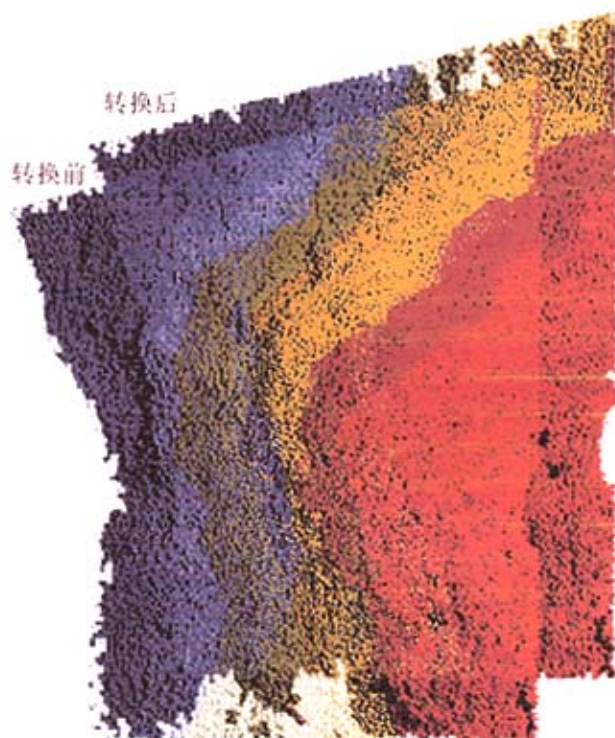


图 4-7 坐标转换前后 LIDAR 点位对比

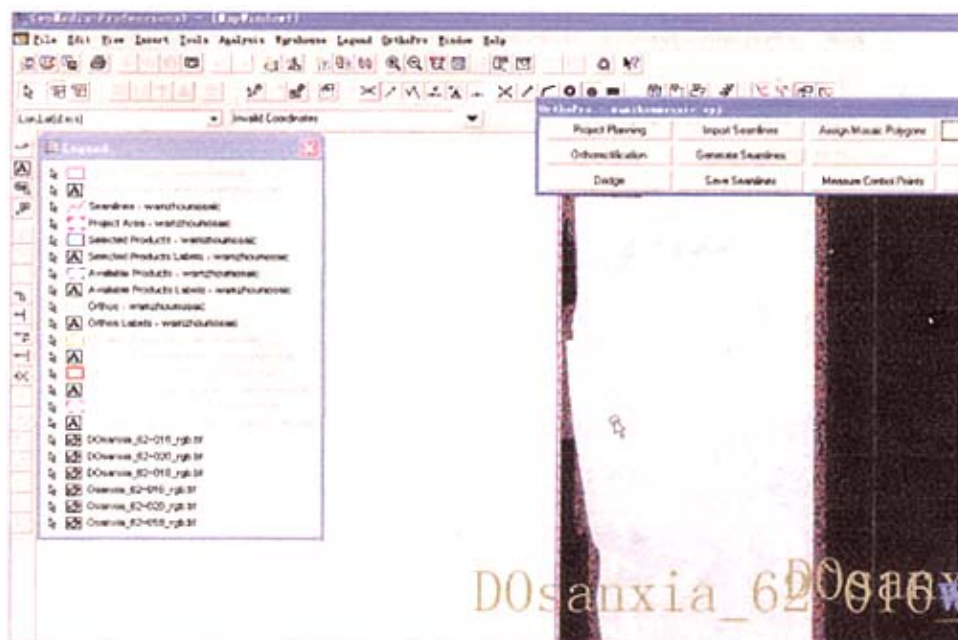


图 4-8 DOM 镶嵌图

自定义西安 80 坐标系统文件的操作过程: 首先新建一个 MicroStation 的 dgn 文件, 然后把该文件的后缀 dgn 改为 GeoMedia 可认的后缀 csf; 双击此 csf 文件在 GeoMedia 中自定义西安 80 高斯投影坐标系文件; 保存, 退出; 最后把后缀 csf 改回后缀 dgn, 这个新的 dgn 文件即为自定义的西安 80 高斯投影坐标系统文件。如图 4-9, 4-10。

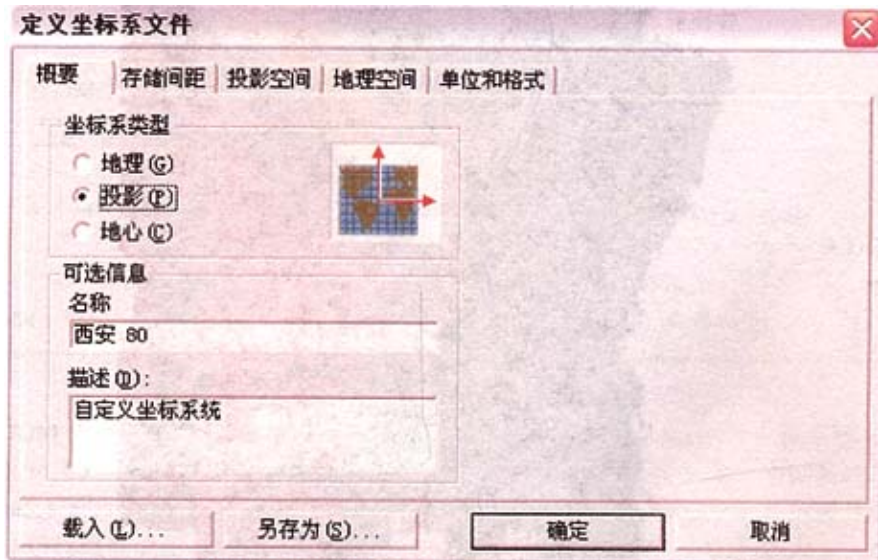


图 4-9 自定义坐标系

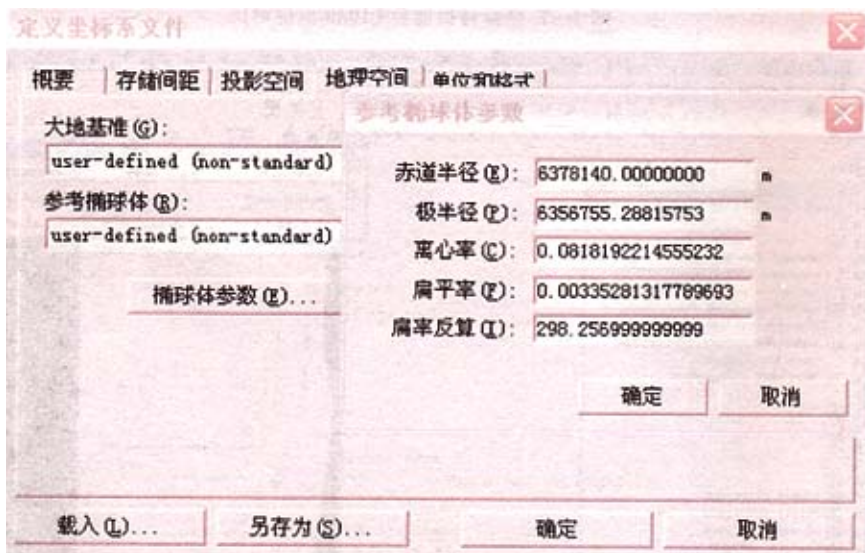


图 4-10 自定义坐标系参数设置

4.2.2 DLG 制作

本项目在 DMC 航片建立的立体模型下进行 1:10000 的线划图制作。流程见图 4-11:

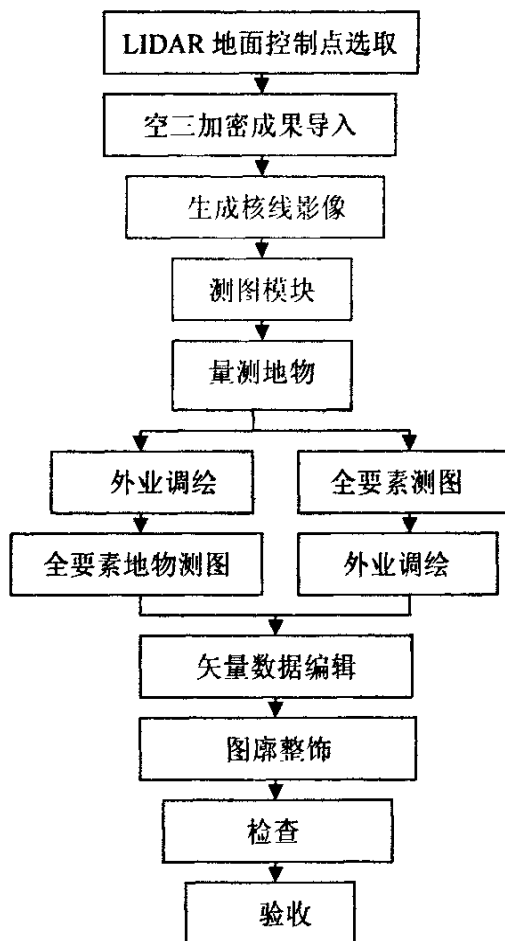


图 4-10 DLG 绘制流程图

本项目在 ImageStation Feature Collection (ISFC) 测图模块和 MicroStation 中进行 DLG 制作，如图 4-12，图 4-13:

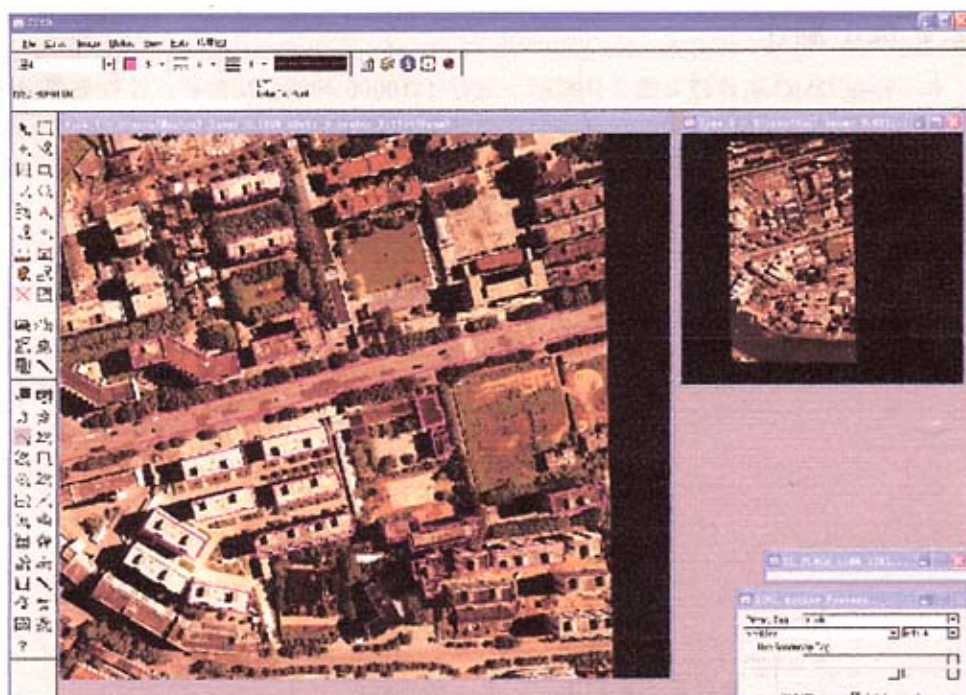


图 4-12 ImageStation Feature Collection 测图

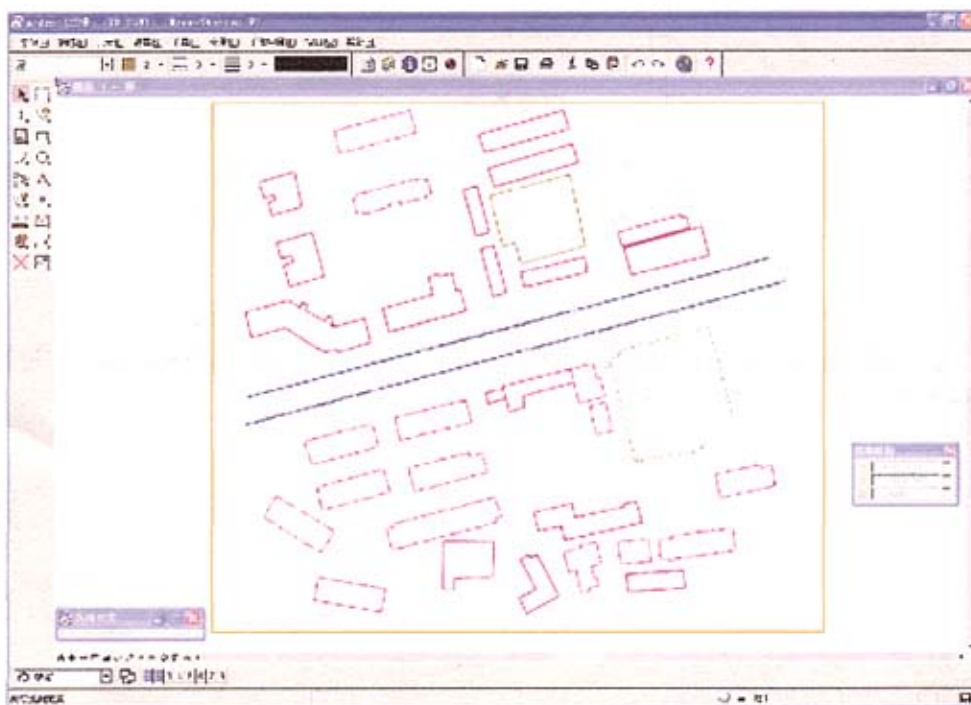


图 4-13 MicroStation 测图

4.2.3 LIDAR 点做地面控制点的 DMC 数据处理

因为 IMU 系统可以应用于军事技术, 美国严格控制 IMU 的出口, 出于其安全方面考虑, 在我国使用的 Leica 公司的 DMC 系统只集成了 DGPS, 没有集成 IMU 系统。加拿大 Optech 公司的 LIDAR 系统集成 IMU 也进行了降低精度处理, 并且加入了其他限制措施, 例如: 当 IMU 载体的加速度超过一定值时, IMU 将停止工作, 以防止其应用于导弹等加速度大的载体。

由于 DMC 系统中没有集成 IMU 设备, 只是进行 DGPS 的辅助航空摄影测量, 在 DGPS 的辅助航空摄影测量中必须在地面布设一定数量的平面和高程控制点^[32], 而在本项目中地面控制点的布设并没有列入预算, 在航拍时也未布设地面控制点。由于时间和经费的原因不允许布设地面控制点后再拍第二次, 只能采取别的方法进行补救。在此项目中提出了一种引入地面控制点的新方法: 用有三维坐标的 LIDAR 点来做地面控制点, 进行空三加密, 绝对定向, 构建立体模型, 绘制 DLG。这是在以前的工程实例中从未出现过方法, 是地面没有布设控制点而采取的后补措施。

LIDAR 点来做地面控制点要解决问题:

1. LIDAR 点的精度能否达到做 1:10000 线划图的控制点的精度要求。
2. LIDAR 控制点如何选取。
3. LIDAR 控制点如何在 DMC 航片进行刺点。

为解决上述三个问题, 在实际操作中做了大量的试验:

首先, 检验 LIDAR 点的精度

《1:5000、1:10000 地形图航空摄影测量内业规范》规定地形图平面精度中误差: 内业加密点在平地、丘陵为 0.35m, 山地、高地为 0.50m, 地物点在平地、丘陵为 0.50m, 山地、高地为 0.75m; 高程中误差内业加密点在平地、丘陵为 1.0-2.0m, 山地、高地为 3.0m。利用 Trimble RTK 系统对 LIDAR 点的精度进行野外检验, 结果显示: 高程误差绝对值的平均为 0.305m^[39] (满足 1:10000 测图高程要求^[42]); 由于 ALTM 4K02 数码相机的畸变系数未知, 其参考影像精确度未知, 故平面精度检查数据不确信。采用在立体模型下测得明显 GPS 墩的坐标与实测的坐标相比较的方法来检验其平面精度, 经过不同观测人员, 不同立体模型下的比较, 平面点位误差小于 0.5m (满足 1:10000 测图平面要求)。

第二, 布设 LIDAR 控制点

根据成图比例尺及航摄比例尺, 按传统方法进行估算, 即 5 条基线布设一个平高点, 每 3 条航线的中间航线加布高程点^[44]; 考虑到实验组合解算的需要, 我们按每条航线、5 条基线布设一个平高点来布设。DMC 数码影像中由于所使用的镜头较小, 且为多镜头影像获取后拼接而成。DMC 数码影像的边缘实际上变形不会太大, 靠近边缘的影像完全可以使用, 不应受传统航摄资料的有关规定限制^[45], 只需保证点位处于三度重叠区域。

第三, 选取 LIDAR 控制点

由于 LIDAR 点不含影像信息, 如何选取准确的激光脚点来做控制点是工作成败的关键。在 LIDAR 系统的数码相机所拍的参考影像上加载相应的位置的 LIDAR 点 (图 4-13), 尽量选择线型构造, 特征明显的点做控制点, 例如平顶房子的房角 (图 4-14), 在航片立体模型中覆盖上对应地区的 LIDAR 点, 并在参考影像上做好标志 (图 4-15), 记下三维坐标, 作为后期加密用的像控点。



图 4-13 加载 LIDAR 点的影像



图 4-14 LIDAR 控制点



图 4-15 LIDAR 控制点影像

第四, 空三加密解算

在第三步工作中, 已经把 LIDAR 控制点标记到了 ALTM 4K02 数码相机所拍的影像上, 此时只需在做 DMC 影像的绝对定向时, 按照传统做法, 人工加入控制点, 然后进行空三解算得到所有影像点的坐标。空三加密在空中三角测量软件 (Z/I 公司的 ImageStation Automatic Triangulation (ISAT) 自动空三模块下进行。

空三加密的过程是: 建立测区工程, 建立影像文件列表, 进行定向及同名点转点, 检查模型连接情况, 找出弱区域, 加测 6 度重叠点 (如图 4-17), 加强模型连接, 转刺控制点, 进行空三解算。在进行空三组合解算前, 转刺全部的外业像控点 (LIDAR 点), 检查外业像控点的精度, 剔除误差较大的点; 根据检查情况, 对部分误差较大的控制点, 在进行空三组合计算时不作为检查点使用^[6]。

空三组合解算时, 先选取全部外业像控点进行解算, 剔除误差较大的点。然后进行 5 条基线逐航线布点的空三解算, 看空三结果是否达到精度要求。通过解算, 5 条基线逐航线布点完全可以达到精度 (详见下一节)。

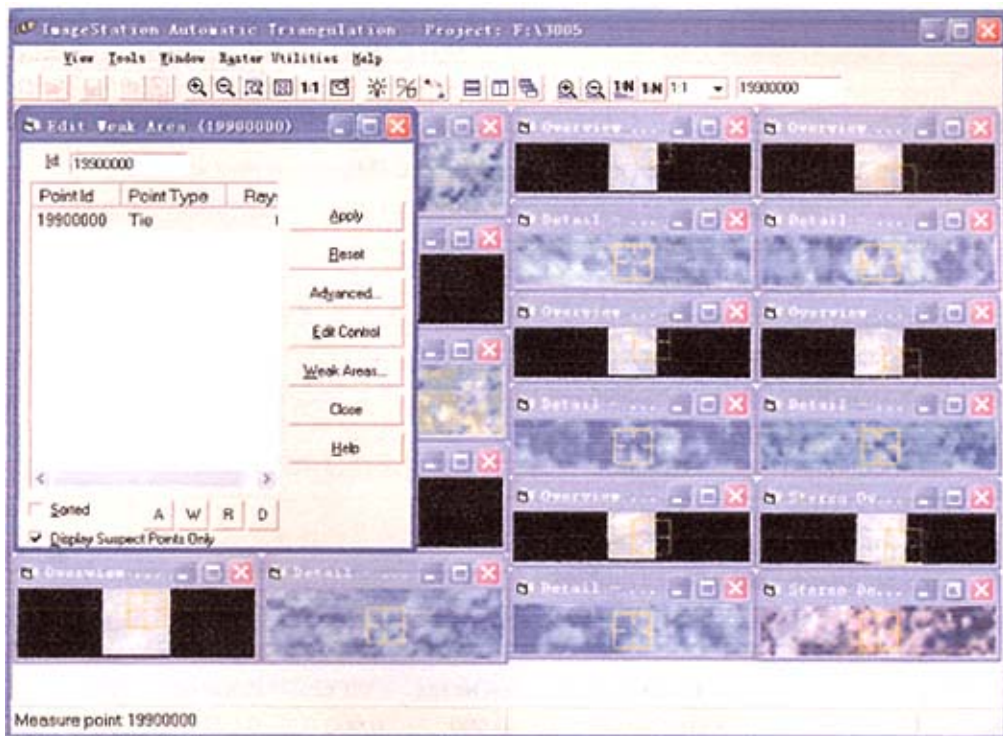


图 4-16 编辑软弱区域

4.2.4 精度分析

1. DOM 平面精度

该项目的 ALTM 4K02 数码相机拍摄的影像做成的 DOM 仅供外业调绘用, 不作为成果提交, 而且该相机镜头的畸变参数未知, 其影像存在明显系统偏移, 故其 DOM 不

进行精度评定。

DMC 影像制作的 DOM 作为成果提交, 对该 DOM 的平面精度采用以下方法评定^[47]: 第一, 在 DOM 上量测能正确定位的像控点与其外业成果进行比较, 根据其差值统计 DOM 的平面中误差(就目前统计中误差为 0.42m); 第二, 在立体模型上量测与 DOM 上量测同名点进行比较, 根据其差值统计 DOM 的平面中误差(就目前统计中误差为 0.40m,如表 4)。DOM 成果通过了三峡库区地质灾害防治工作指挥部质检。

表 4 坐标精度比较表

点号	实测坐标(m)			立体模型量测坐标(m)			坐标差(m)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
1	3435557.2	435533.23	212.024	3435557.4	435533.6	212.352	-0.285	-0.37	-0.328
2	3435710	436973.08	404.78	3435710.2	436973.4	404.35	-0.181	-0.321	0.43
3	3435953.1	438600.85	506.709	3435953.3	438600.57	506.91	-0.24	0.275	-0.201
4	3435805.9	440117.34	364.283	3435805.6	440117.65	364.641	0.333	-0.311	-0.358
5	3423743.9	480696.74	278.907	3423743.7	480696.44	278.983	0.267	0.293	-0.076
6	3423515	480483.36	308.345	3423515.3	480483.41	308.011	-0.303	-0.054	0.334
7	3413118.2	483177.53	400.764	3413118.6	483177.95	400.6	-0.473	-0.424	0.164
8	3423650.3	482843.81	256.89	3423650.1	482843.38	256.35	0.29	0.429	0.54
9	3433576.6	453456.28	379.592	3433577	453456.34	380	-0.38	-0.057	-0.408
10	3431547.9	446746.66	452.749	3431547.3	446746.72	452.951	0.51	-0.062	-0.202
Σ							-0.462	-0.602	-0.105
中误差	X			Y			Z		
	0.31696			0.2374			0.302		

2. LIDAR 点做控制点进行 DMC 影像的空三加密精度

以下为空三解算报告(部分)。

Photo-T Parameters and Results for Project project

PhotoT Triangulation Options

Adjustment Mode : Absolute

Precision Computation : Enabled

Error Detection : Disabled

Camera Calibration : Disabled

Self-Calibration : Disabled

Given EO/GPS : Enabled

Antenna Offsets : Disabled

GPS Shift/Drift Correction : Disabled

INS Shift/Drift Correction : Disabled

Parameters

Parameter	X/Omega	Y/Phi	Z/Kappa	XY
RMS Control	0.000	0.000	0.001	0.000
RMS Check				
RMS Limits	0.080	0.080	0.080	
Max Ground Residual	0.003	0.003	0.015	
Residual Limits	0.160	0.160	0.160	
Mean Std Dev Object	0.014	0.014	0.062	
RMS Photo Position	0.000	0.000	0.000	

RMS Photo Attitude	0.000	0.000	0.000
Mean Std Dev Photo Position	0.000	0.000	0.000
Mean Std Dev Photo Attitude	0.000	0.000	0.001

Key Statistics

Sigma: 3.4 μm

Number of iterations: 1

Degrees of Freedom: 48940

Solution Successful.

从报告中可以看出: 空三解算的精度软件自检获得通过 (Sigma 经验值小于 $8\mu\text{m}$)

3. LIDAR 点做控制点进行 DMC 影像的空三加密后区域网平差精度

以下为区域网平差报告 (部分):

ROOTMEAN SQUARE VALUES AND CHECK VALUES OF RESIDUALS OF PHOTOGRAMMETRIC OBSERVATIONS

image points

obs x = 979 rms x = 2.42 rms x = 0.021 chv vx = 5.42

obs y = 979 rms y = 2.12 rms y = 0.020 chv vy = 5.01

ROOTMEAN SQUARE VALUES AND CHECK VALUES OF RESIDUALS OF NONPHOTOGRAMMETRIC OBSERVATIONS

control points with sds- no. 11

obs x = 12 rms x = 6.15 rms x = 0.105 chv vx = 0.48

obs y = 12 rms y = 8.23 rms y = 0.132 chv vy = 0.39

obs z = 12 rms z = 8.96 rms z = 0.185 chv vz = 0.64

从以上报告中可以看出, 像点的 x 、 y 坐标量测精度分别为 2.42μ 和 2.12μ , 控制点的 x 、 y 、 z 坐标在影像上的量测精度分别为 6.15μ 、 8.23μ 、 8.96μ 。如果控制点在影像上的量测精度远大于像点的量测精度 (如 10 倍), 说明结果中可能存在系统误差。在本试验区区域平差结果中, 控制点在影像上的量测精度为像点的量测精度的 4 倍 < 10 倍, 说明试验区区域系统误差的影响都很小, 无须进行补偿改正。

4. 实际点位精度

在立体模型下量测明显特征点的坐标与实测坐标比较, 根据日前 (2007 年 4 月, GPS 墩) 的比较结果来看平面和高程的误差都在 0.5m 以下 (表 4)。

综合 2, 3, 4 的结果可以认为此次用 LIDAR 点做控制点进行 DMC 航片的空三加密解算合格, 完全可以用 LIDAR 点来做地面控制点来完成后续工作。此精度比较和试验结果已获业主认可, 后续空三加密均用此方法进行。

第五章 坐标转换

§ 5.1 坐标基准转换

5.1.1 三维空间直角坐标系的变换

由于采用的地球椭球定位、定向不同, 产生了不同的大地坐标系, 一定的大地坐标系又对应一定的空间直角坐标系。在生产实践和科学研究中, 常常需要将不同的空间直角坐标系的坐标换算到某一规定的空间直角坐标系中。在航拍过程中 GPS、IMU 都是采用 WGS84 (椭球长半轴 $a=6378137\text{m}$, 扁率 $f=298.257223563$) 椭球大地高作为坐标参照基准, 而我国测绘、制图常采用北京 54 椭球 (椭球长半轴 $a=6378245\text{m}$, 扁率 $f=298.3$) 正常高和西安 80 椭球 (椭球长半轴 $a=6378140\text{m}$, 扁率 $f=298.257^{[48]}$) 正常高作为坐标参照基准。二者所用的空间直角坐标系并不相同, 为此必须按 Bursa-Wolf 转换模型的公式进行坐标基准变换^[48], 公式为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{XI'AN80} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+\Delta k & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1+\Delta k & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1+\Delta k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS-84} \quad (5-1)$$

其中, ΔX , ΔY , ΔZ 为 3 个原点坐标平移参数, ε_x , ε_y , ε_z 为 3 个坐标旋转参数, Δk 为尺度比参数。

这 7 个转换参数一般可从国家测绘部门获得, 也可以利用两个坐标参考系内均匀分布的已知点坐标进行反求。对于局部面积不大 (50km 范围内) 可以认为 ε_x , ε_y , ε_z , Δk 都是 0, 而变成 3 个参数的转换公式。

5.1.2 二维平面坐标系的变换

X_T, X 分别表示 $O-X_T Y_T$ 及 $O-XY$ 两平面直角坐标系中的坐标向量, 将 X 换算成 X_T 的二维坐标变换公式:

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & -\sin \varepsilon \\ \sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

式中, ΔX_0 , ΔY_0 为坐标原点平移向量, K 为缩放比例系数, ε 为坐标轴旋转角。

若上述 4 参数已知时,可以直接用(5-2)进行变换;若参数未知,则先利用两坐标系内坐标值的公共点信息求得,只需两个公共点便可解算出此 4 参数,实际上往往采用多个公共点,用最小二乘原理解出未知参数。

在进行两种直角坐标转换时,坐标转换的精度除取决于坐标转换的数学模型和公共点坐标精度外,还与公共点的几何分布有关,因此在实际变换时,公共点应该有较好的几何分布。

§ 5.2 坐标投影转换

由于 GPS 测量的结果是空间地心坐标,而制图和测绘中均以平面为基础,为此要将空间地心坐标投影成平面坐标。地图投影方法很多,我国现采用高斯投影。大地地理坐标 (φ, l) 投影转换而变成高斯平面坐标 (x, y) 的转换公式为^[49]:

$$\begin{aligned}
 x = & s + \frac{\lambda^2 N}{2} \sin \varphi \cos \varphi + \frac{\lambda^4 N}{24} \sin \varphi \cos^3 \varphi (5 - \tan^2 \varphi + 9\eta^2 + 4\eta^4) + \\
 & \frac{\lambda^6 N}{720} \sin \varphi \cos^5 \varphi (61 - 58 \tan^2 \varphi + \tan^4 \varphi) \\
 y = & \lambda N \cos \varphi + \frac{\lambda^3}{6} N \cos^3 \varphi (1 - \tan^2 \varphi + \eta^2) + \frac{\lambda^5}{120} N \cos^5 \varphi (5 - 18 \tan^2 \varphi + \\
 & \tan^4 \varphi + 14\eta^2 - 58 \tan^2 \varphi \eta^2)
 \end{aligned} \quad (5-3)$$

其中,

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}, \quad s = \frac{N}{\rho''} \lambda'' \cos \varphi, \quad \eta^2 = e'^2 \cos^2 \varphi, \quad \lambda = l - l_0$$

式中, $a = 6378245.0$; $e'^2 = 0.006738525414684$; l_0 为中央子午线经度,此公式的换算精度为 0.001m。

§ 5.3 高程转换

GPS 定位给出的高度为椭球高(又称大地高)(H_g)。它与我国的高程系统采用的海拔高(又称正常高)(H_t)不同,两者之间存在高程异常(ξ),即

$$H_r = H_g - \xi \quad (5-4)$$

高程异常是和地球重力场分布密切相关的,一般随着地点而改变,推求高程异常的方法之一就是利用大地水准面模型进行计算,但目前精度还很难优于 1m。实际应用中比较成熟的方法就是在测区利用已经知道的一定数量的正常高点上用 GPS 测出椭球高,再用拟合方法来推求测区所有点上的正常高。常用的拟合有多项式拟合、样条拟合、曲面拟合等,也有用神经网络系统进行推求的,精度一般可以达到厘米级^[50]。

§ 5.4 坐标转换实例

关于坐标转换,没有一个固定的转化参数,不同的分带有不同的转换参数^[49],本项目横跨高斯投影 3 度分带的 36, 37 两带, LIDAR 航摄获得 WGS84 UTM 投影大地高数据而需要提交的是西安 80 高斯投影正常高数据。首先在 LIDAR 点初步处理时已经把大地高转换为正常高,然后只需进行平面转换。根据三峡库区地质灾害防治工作指挥部提供的转化坐标点(同时具有 WGS84 UTM 投影和西安 80 高斯投影坐标)来计算转换模型。确定转换模型后,转换所有坐标点,本项目仅转换平面位置,故采用二维坐标系的 4 参数转换(公式 6-2),并抽样实地检查点位偏差(此项工作正在进行中)。坐标转换如图 5-1,图 5-2,图 5-3,图 5-4。坐标转换后的点位变化情况参见图 4-7。

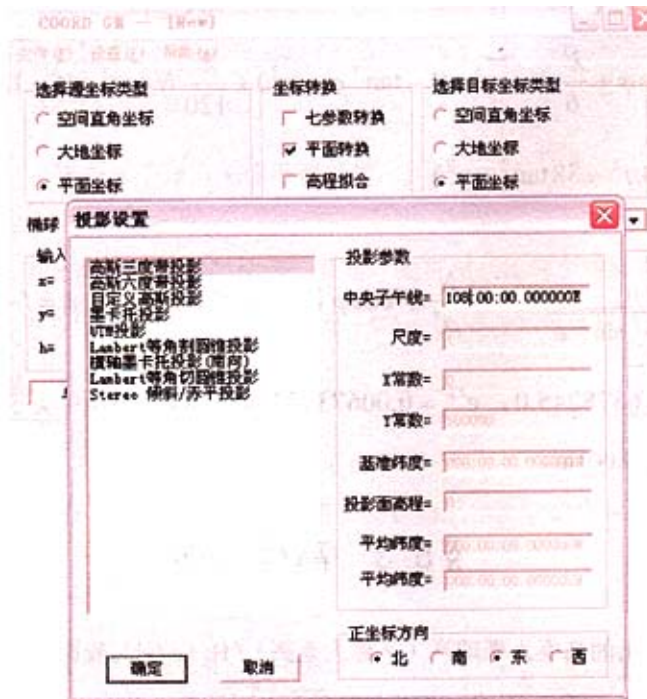


图 5-1 投影参数设置

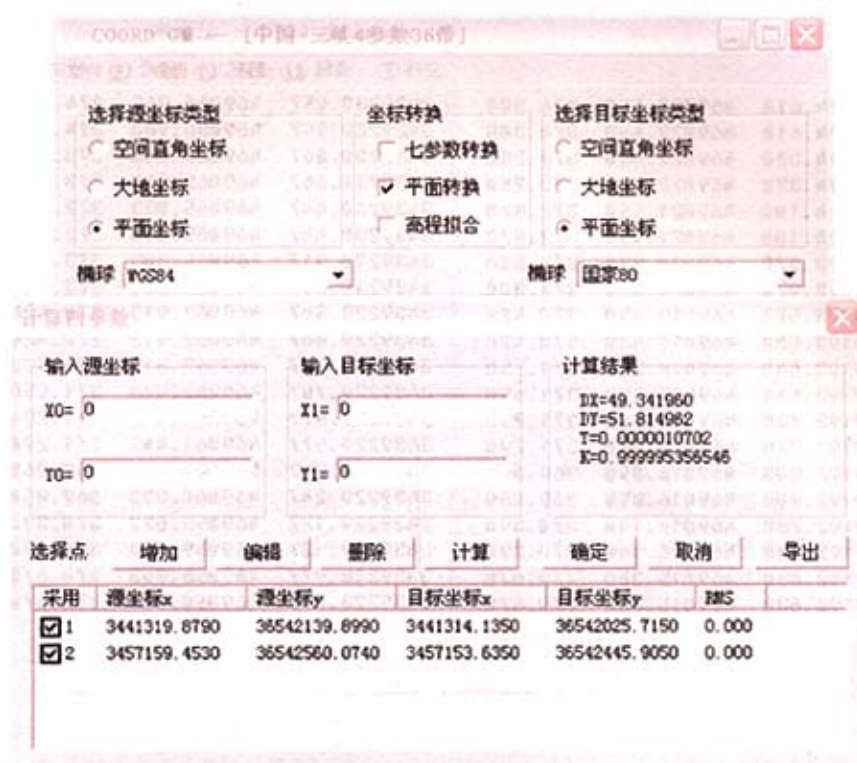


图 5-2 转换参数计算

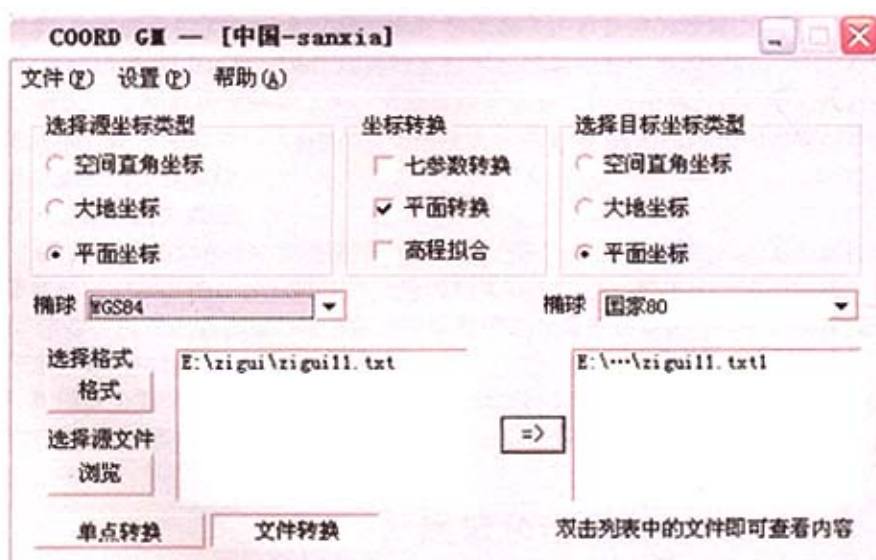


图 5-3 坐标转换

ziguill.txt - 记事本			ziguill.txt1 - 记事本		
文件(F)	编辑(E)	格式(O)	查看(V)	帮助(H)	
3439194.610	469023.480	374.300	3439230.957	469066.963	374.300
3439194.610	469023.480	374.300	3439230.957	469066.963	374.300
3439194.320	469022.460	373.280	3439230.667	469065.943	373.280
3439194.320	469022.460	373.280	3439230.667	469065.943	373.280
3439194.100	469021.550	372.820	3439230.447	469065.033	372.820
3439194.100	469021.550	372.820	3439230.447	469065.033	372.820
3439193.970	469020.820	373.300	3439230.317	469064.303	373.300
3439193.970	469020.820	373.300	3439230.317	469064.303	373.300
3439193.500	469019.430	370.420	3439229.847	469062.913	370.420
3439193.500	469019.430	370.420	3439229.847	469062.913	370.420
3439193.440	469018.830	371.550	3439229.787	469062.313	371.550
3439193.440	469018.830	371.550	3439229.787	469062.313	371.550
3439193.230	469017.960	371.290	3439229.577	469061.443	371.290
3439193.230	469017.960	371.290	3439229.577	469061.443	371.290
3439192.900	469016.850	369.860	3439229.247	469060.333	369.860
3439192.900	469016.850	369.860	3439229.247	469060.333	369.860
3439192.780	469016.140	370.390	3439229.127	469059.623	370.390
3439192.780	469016.140	370.390	3439229.127	469059.623	370.390
3439192.630	469015.380	370.670	3439228.977	469058.863	370.670
3439192.630	469015.380	370.670	3439228.977	469058.863	370.670

图 5-4 坐标转换前后比较

第六章 结论与展望

§ 6.1 本文的研究结果

机载激光雷达技术是一项正在发展的高新技术,它的应用将为摄影测量与遥感带来新的数据源^[51]。对机载激光雷达数据的处理流程和处理方法的研究是目前的难点和热点。本文对此做了一定的探讨和实验。本文的主要研究工作有:

1. 介绍了机载激光雷达系统、数字航空摄影测量的发展及国内外现状,分析了机载激光雷达技术面临的机遇和挑战,以及目前研究的热点和难点。对前几种商用数字航空摄影测量的软硬件进行了详细比较;详细研讨了机载激光雷达系统的基本理论、工作模式及系统构成以及地面激光点坐标的详细计算;分析机载激光雷达技术的优越性和其广泛的应用领域,并对当今主要商业化激光雷达系统进行了归纳和比较。

2. 研究了机载激光雷达的数据处理过程,详细阐述了标准las格式点的生成,滤波,分类,数字高程模型的生成以及机载激光雷达系统的误差传播规律、分析其精度,提出了相应的提高精度的方法。

3. 用工程实例对LIDAR数据地面点的平面、高程精度分析、评定,分析结果表明:LIDAR的高程精度达到0.3m,平面精度达到0.5m。

4. 结合实例介绍了LIDAR数据、DMC影像制作正射影像的过程。

5. 详细研究了LIDAR和DMC这两种新技术在线划图制作中的应用。

6. 研究了空间直角坐标系之间、平面直角坐标系之间的坐标转换;不同投影之间的投影转换;结合工程实例研究WGS84 UTM投影—西安80 高斯投影之间的坐标转换,并建立自定义的坐标系统。

本文的主要创新点有:

1. 提出了用LIDAR点来做地面控制点,进行空三加密,绝对定向的无地面控制的航摄影像处理的新方法,并且将该方法应用到实际生产中,产生了一定的经济价值。

2. 结合实例对正射影像、线划图的平面精度进行分析评定;对点位三维精度进行分析评定,并给出提高精度的方法。

3. 利用多个航空摄影数据处理软件(Imagestation SSK、VirtuoZo3.6、PCI, TerraScan), GIS 软件(GeoMedia)来制作实际项目要求的正射影像和线划图。

§ 6.2 展望和设想

机载激光雷达技术已经逐渐成为一种重要的信息获取技术。欧美等西方发达国家已经研制出了多种商业化硬件系统和数据后处理软件,在数据处理方面也做了大量的卓有

成效的研究,并且在多个领域内得到了成功的应用^[52]。在当前和今后一段时间,机载激光雷达数据处理和应用仍然是一个热门方向。

机载激光雷达技术是目前比较先进的技术,但还远未成熟,还处在不断的发展中,主要表现在:

1. 数据的精度不断提高。例如激光器的发射频率在不断提高使得采样率在迅速提高;GPS 和 IMU 技术的发展使定位精度不断提高^[53]。

2. 数据种类的多样化。现在先进的机载激光雷达系统大都能够接收和记录多次回波的强度和距离数据,而且还配备了数码相机,可以同时获得影像数据和红、绿、蓝等多波段的数据^[54]。

3. 没有一种公认的成熟的机载激光雷达数据处理的方案方法能够得到测绘行业的认可,这直接表现在现在还没有相关的国家技术规范和标准^[10],使这项技术在实际工程应用中还不能广泛开展。

4. 机载激光雷达技术和数字摄影测量技术的综合使用,可以取长补短,同时获取高精度的三维坐标和影像信息,目前很少有生产单位把两者结合,这是未来研究的一个重要方向。

机载激光雷达数据处理研究,最终目的都是为了生产和应用。为此今后要开展的工作有:

1. 对典型地区进行机载激光雷达技术和其他测绘技术的综合对比实验。重点分析比较各种测绘系统的特点与优势,进行基础测绘数据产品精度分析与比较。

2. 机载激光雷达技术用于基础测绘数据生产应用技术的研发,包括数据处理流程的设计、研制数据处理软件、与现有测绘生产系统的数据交换接口与规范等^[55]。

3. 机载激光雷达应用的关键技术研究,研究开发机载激光雷达数据的预处理、滤波与分割、各种典型地物的提取和 DEM 生成等技术方法^[56]。

4. 研究机载激光雷达与摄影测量的集成技术,研究机载激光雷达与其它数据源的融合处理,以提高生产产品的速度以及产品的精度。

5. 研究机载激光扫描测量系统用于测绘生产的技术规范、工艺流程设计等。

6. 研究不同地区的 WGS84 UTM 投影到西安 80 高斯投影的坐标转换模型,并且统一入库,实现资源共享。

致 谢

本论文是在导师吴北平教授的悉心指导下完成的,在此衷心感谢吴北平教授。在我研究生学习期间,自始至终得到导师的谆谆教诲,从学位课程的选学、培养计划的制定、学位论文的开题到课题方向的选定、研究,联系实习单位到论文的完成,导师都给予了精心、科学的帮助和指导,同时对作者在读期间的学习和生活给予了热心的支持和关照。导师深厚的学术造诣、严谨求实的治学态度、勤奋敬业的献身精神、高尚的学者风范和为人准则是学生终身的学习榜样。学生所取得的每一点进步,都离不开导师的教诲,再次向导师吴北平教授表示最真挚的感谢和最美好的祝愿!

感谢程新文老师、胡友健老师、陈刚老师、曾云老师、徐景田老师、陈性义老师、明祖涛老师、刘日生老师等测量工程系老师的热心关怀和支持;感谢黄莉老师多年来对作者在生活,学习等方面均给予了诸多的帮助和关怀,谢谢你们!

本论文的写作完成得到了工程学院张时忠教授,武汉地人信息科技有限公司的李立友老师和其他同事的热心帮助,他们为本文的写作提供了研究资料和实验环境,在此向他们致以诚挚的谢意!

感谢测绘工程系 07 届硕士研究生全体同学和赵礼剑博士给予的帮助;感谢欧龙硕士、石宏斌硕士、张红英硕士在我做论文期间同我进行问题的探讨和相互帮助;尤其感谢赵斌硕士、郭敏硕士、张玉方硕士在论文写作时给予的帮助。

最后,深深地感谢我的家人和朋友们,正是在他们的关爱和鼓励下,我才得以顺利完成硕士阶段的学习,并完成本论文的工作。

参考文献

- [1] 刘经南, 张小红. 激光扫描测高技术的发展与现状. 武汉大学学报信息科学版. 2003 (4);
- [2] 刘燕京. 关于新一代激光雷达系统. 测绘科学. 2003(3);
- [3] 尤红建. 激光三维遥感数据处理与建筑物重建. 北京: 测绘出版社. 2006;
- [4] 张时忠, 章超, 郭累等. 三峡库区地质灾害第二期遥感监测航摄与数据处理和建库设计. 2006.6;
- [5] 李德仁. 地球空间信息学的机遇. 武汉大学学报信息科学版. 2004, 29(9): 754-756;
- [6] 邓非. LIDAR 数据与数字影像的配准和地物提取. 武汉大学博士论文. 2006(4);
- [7] 孙柳, 宫辉力, 赵文吉. 从数字摄影测量到城市三维景观模型的建立. 首都师范大学学报. 2005(6);
- [8] 廖丽琼, 罗德安. 地面激光雷达的数据处理及其精度分析. 四川测绘. 2004(12);
- [9] 李树楷, 薛永祺. 高效三维遥感集成技术. 北京: 科学出版社. 2000;
- [10] 张小红. 机载激光扫描测高数据滤波及地物提取. 武汉大学博士论文. 2002;
- [11] Baltsavias EP. Airborne Laser Scanning: Existing Systems and Firms and Other Resources. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999. 54(2/3): 164~198;
- [12] Wehr A, Lohr U. Airborne Laser Scanning-an Introduction and Overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999. 54(2/3): 68~82;
- [13] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学. 武汉: 武汉大学出版社. 2002.6;
- [14] 刘经南, 张小红, 李征航. 影响机载激光扫描测高精度的系统误差分析. 武汉大学学报-信息科学版. 2002, 27 (2): 111-117;
- [15] 王润生. 图像理解. 国防科技大学出版社. 1995;
- [16] 张小红, 李征航, 蔡昌盛. 用双频 GPS 观测值建立小区域电离层延迟模型研究. 武汉大学学报(信息科学版). 2001 b, 26 (2): 140-143;
- [17] 刘经南, 张小红. 激光扫描测高技术的发展与现状. 武汉大学学报信息科学版. 2003 (4);
- [18] 王永平. 机载 LIDAR 数据处理及林业三维信息提取研究. 中国测绘科学研究院硕士论文. 2006;
- [19] <http://www.infoearth.com/> 武汉地大信息科技发展有限公司网站;
- [20] <http://www.ggecc.net/> 广西桂能工程咨询有限公司网站;
- [21] 吕丽萍. 基于数字地面模型的单影像的正射影像的生成及其应用. 中国地质大学研究院硕士论文. 2003;
- [22] 王勤珍, 吴俐民, 铁金平. DMC 技术在测绘领域的应用. <http://www.szkm.cn/> 数字昆明网站;
- [23] ImageStation 用户手册;
- [24] 林昌建, 苍桂华. 摄影测量学. 北京: 国防工业出版社. 2006.2;
- [25] 雷方贵. 摄影测量的现状及新世纪的摄影测量. 四川测绘. 2001;
- [26] 刘凤德, 项琳, 邱懿. 基于 JX4 数字摄影测量工作站的地理信息数据库直接更新

的方法设计.测绘科学.2005(2);

[27] 李德仁.摄影测量与遥感的现状及发展趋势.武汉测绘科技大学学报.2000(1);

[28] 尤红建, 苏林.基于机载激光扫描数据提取建筑物的研究现状.测绘科学.2005 (10);

[29] Hans-Erik Andersen, Stephen E.Reutebuch.Automated Individual Tree Measurement through Morphological Analysis of a LIDAR-based Canopy Surface Model. Proceedings of the First International Precision Forestry. Symposium, Seattle, WA, USA;

[30] 李德仁.GPS 用于摄影测量与遥感.北京:测绘出版社.1996;

[31] 刘大杰.全球定位系统(GPS)的原理与数据处理.上海:同济大学出版社.1996;

[32] 袁修孝.GPS 辅助空中三角测量原理及应用.北京:测绘出版社.2001;

[33] 刘艳华.机载激光扫描侧高数据的应用与试验.太原理工大学硕士论文.2006.5;

[34] 朱士才.LIDAR 的技术原理以及在测绘中的应用.现代测绘.2007(7);

[35] 李树楷著.遥感时空信息集成技术及其应用.北京:科学出版社.2003;

[36] 孔祥元, 梅是义.控制测量学.武汉:武汉大学出版社.2006.2;

[37] 程正逢, 王盛才, 石克勤, 王圣祖, 程正选.航空激光扫描测量系统在国外工程中的应用.地理空间信息.2003(10);

[38] 地大信息科技有限公司.三维激光测量系统_ALT-3100 在中国的应用.2006.1;

[39] 程新文, 陈刚, 田玉刚等.三峡 LIDAR 数据精度检核技术报告.2006.12;

[40] 武汉地大空间信息发展有限公司.三峡库区地质灾害第二期遥感监测航摄与数据处理和建库项目设计书.2006.6;

[41] 1:500 1:1000 1:2000 地形图航空摄影规范.GB/T 6962-2005;

[42] 袁修孝.GPS 辅助空中三角测量及其质量控制.武汉测绘科技大学博士学位论文.武汉:1999;

[43] 1:5000、1:10000 地形图航空摄影测量内业规范. GB 13990-1992;

[44] 俞旭升.DMC 航摄影像外业像控布点的实验研究.测绘科学.2006(6);

[45] 1:500、1:1000、1:2000 地形图航空摄影测量外业规范.GB7931-1987;

[46] 朱陈明, 郭学林.全数字空中三角测量中特殊问题的处理方法.测绘技术装备.2005(3);

[47] 韩凉, 罗永新.DMC 数字航片在苏州测绘项目中的应用.测绘与空间地理信息.2006(4);

[48] 刘基余.GPS 卫星导航定位原理与方法.北京:科学出版社.2003;

[49] 朱华统.常用大地坐标系及其转换.北京:解放军出版社.1990;

[51] 李征航.GPS 测高的研究.武汉测绘科技大学学报.1993.(3);

[51] 李清泉, 李必军, 陈静.激光雷达测量技术及其应用研究.武汉测绘科技大学学报.2000. 25 (5) :387-392;

[52] 李英成, 文沃根, 王伟.快速获取地面三维数据的 LIDAR 技术系统.测绘科学.2002(12);

[53] 李寿兵.航空摄影新技术推动数字摄影测量的发展.铁道工程学报.2005(8);

[54] 隋立春, 张宝印.Lidar 遥感基本原理及其发展.测绘科学技术学报.2006(4);

[55] 赖旭东.机载激光雷达数据的建筑物提取及可视化.武汉大学博士论文.2006(4);

[56] 袁旸.对从 LIDAR 点云数据中生成 DEM 方法的研究.武汉大学硕士论文.2006(5);