

福州市地理信息行业技术创新中心(2014-PF-93)资助

基于SWDC的 数码航空摄影测量研究与应用

张建霞 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

基于 SWDC 的数码航空 摄影测量研究与应用

张建霞 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统地论述了基于国产 SWDC 数字航摄仪的数码航空摄影测量基本理论和关键技术,以及其典型测区应用。通过数字相机的高精度几何标定、SWDC 数字航摄仪的技术集成研究以及 SWDC 的典型测区应用,实现了 SWDC 数字航摄仪的高精度数码航空摄影测量,并将其应用到航测生产实践中,为我国数码航空摄影测量技术的推广与应用奠定了基础。

本书可供航空对地观测领域从事科研、教学和生产的科技人员以及高等学校师生学习参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

基于 SWDC 的数码航空摄影测量研究与应用/张建霞著.

徐州:中国矿业大学出版社,2015.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2867 - 3

I. ①基… II. ①张… III. ①航空摄影测量—研究

IV. ①P231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第242571号

书 名 基于 SWDC 的数码航空摄影测量研究与应用

著 者 张建霞

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 8.25 字数 206 千字

版次印次 2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

序

随着我国经济的快速发展和社会的全面进步,经济建设的诸多领域和方面对测绘不断提出新的、更高要求,测绘发展的机遇和挑战并存。面对新的形势和需求,必须加快信息化测绘体系建设,推进测绘信息化进程,为经济社会发展提供可靠、适用、及时的测绘保障。航空摄影测量是信息化测绘的基本技术组成部分,在地理空间信息数据的获取与更新中发挥着基础性的重大作用。随着测绘技术的不断进步,我国逐步实现了由传统测绘向数字测绘的跨越,目前正处于信息化测绘建设阶段。测绘数据获取的技术手段主要有地面测绘、航空测绘、航天测绘三种,我国目前正迫切需要高分辨率、高精度的数码航空测绘手段,该技术手段也是当前航空对地观测领域中研究与应用的热点。

本书基于摄影测量的经典理论,研究利用数码相机实施高精度航空摄影测量的原理、方法与应用。全书以技术研究与应用研究为主线,主要研究内容包括以下几点:

第一,大面阵非量测数码相机的高精度几何标定研究。非量测数码相机的高精度几何标定是实施数码航空摄影测量的前提和基础,本书分析了非量测数码相机的主要误差来源及其对航测的影响,介绍了数码相机几何标定的常用方法。提出了基于室外几何标定场的间接摄影测量标定原理与方法,并建立了高精度的室外几何标定场。数码相机几何标定的实例表明,基于本书的标定方法,其几何标定的实际精度达 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。

第二, GPS 技术集成研究。GPS 可提供高精度的精密空间三维定位信息,逐渐被应用到摄影测量领域,本书研究集成了 GPS 精密单点定位技术 (PPP) 和双天线 GPS 实时定向技术。

集成的测量型 GPS 在摄影测量外业航摄的同时采集定位数据,利用实时输出的伪距坐标 (精度 $3\sim 5\text{ m}$) 实现空中航摄的精确定点曝光,克服了传统航摄定时曝光的缺点;利用 GPS 采集存储的定位数据 (采样频率 10 Hz) 联合 IGS 提供的精密星历进行基于精密单点定位技术的后处理解算,获得高精度的影像摄站坐标 (精密 $5\sim 10\text{ cm}$), 参与摄影测量的联合平差 (GPS 辅助数码空中三角测量), 从而大大减少了摄影测量地面控制的工作量。

航摄时,影像旋偏角是影响影像间重叠的主要因素,利用集成的双天线 GPS 实时定向技术可以实现对航摄旋偏角的实时纠正,实时旋偏纠正的精度约 1° 。

第三,多面阵影像组合拼接研究。SWDC 航空数码相机是由 4 个独立的 CCD 相机经外视场组合拼接而成。本书介绍了 4 个 CCD 相机外视场组合拼接的基本原理,研究了 4 个单相机之间独立曝光的同步性控制,实现了亚毫秒级的同步曝光控制技术。本书对 4 幅 CCD 单面阵影像间的影像虚拟拼接进行了算法设计,等效大像幅 4 拼虚拟影像的生成包括子影像畸变纠正、平台检校、子影像粗纠平、子影像间同名点匹配、子影像精纠平、单幅虚拟影像

生成等环节,通过以上算法,实现了子像元级($1/3\sim 1/4$ 个像元)的影像拼接精度。

第四,SWDC 理论精度分析。本书从理论上分析了 SWDC 的误差来源及其对摄影测量的影响,通过理论精度估算,在地面控制点采用布标的方式下,SWDC 的理论摄影测量精度为 $1/2\sim 1/3$ 个像元。本书提出了全数字摄影测量系统的像点量测几何精度检测方法,并以 JX-4G 工作站为例进行了实验,实验表明该工作站的像点量测几何精度约为 $1/3$ 个像元。

第五,SWDC 精细航测研究与探索。精细航测是指利用航测手段实施高精度的地籍界址点测量(影像地籍)。影像地籍具有大面积、高效率、劳动强度低等优势,本书在我国首次开展了 SWDC 精细航测应用研究,通过齐齐哈尔测区的生产性试验表明:在航摄 GSD 为 4 cm 的情况下,航测界址点测量精度优于 4 cm,满足我国地籍界址点测量的规范要求。

第六,SWDC 地形测绘典型应用与探索。通过甘肃、新疆、山东三个测区的航测实例,验证了 SWDC 应用于 $1:500$ 地形测绘(高程精度优于 15 cm)的可行性与优势;通过重庆和拉萨两个测区的少控制/无控制航测试验,探索了 SWDC 在我国西部困难地区和无图区地形测绘中应用的可行性与适用性。

本书对 SWDC 航空摄影技术的研究在非量测大面阵数码相机的高精度几何标定、GPS 技术集成应用研究以及精细航测应用研究与探索方面有较强的创新价值和实际意义。

纵观全书,内容详实、结构严谨、说理透彻、系统性强,尤其在理论与实践相结合方面阐述得很到位,水平很高,这本书在精细航测探索以及基于 GPS 辅助数码航测的极少控制测绘方面目前尚属于首次探索研究,对数码航测生产的指导意义重大。由此可见,本书确实是一部理论与实践结合很好的著作。相信这本书的出版将推动我国数码航测的广泛应用与普及,并有助于从事相关研究工作的人们更好地理解和掌握数码航测这一高新技术。



中国工程院院士
2015 年 7 月于北京

前 言

随着测绘技术的快速发展,我国逐步实现了由传统测绘向数字测绘的跨越,现正处于信息化测绘建设阶段。航空摄影测量是信息化测绘的基本技术组成部分,在地理空间信息数据的获取与更新中发挥着基础性的重大作用。近年来,数码相机应用到航测领域,给航空摄影测量带来了前所未有的发展机遇,出现了当前国内外对数码航空摄影测量研究与应用的热潮,我国已进口近百台航空数码相机,但从试验及生产的实践看,进口的航空数码相机具有焦距长、基高比小、高程精度低等缺点,与我国的国情不相适应。本书是对笔者博士论文的充实和提炼,是笔者所完成的一系列科研项目研究与实践较为系统的总结,旨在通过对具有我国自主知识产权的 SWDC 航空数码相机的关键技术攻关,研究适合于我国国情的数码航空摄影测量。

全书共分 9 章。第 1 章绪论,主要介绍 SWDC 数字航空摄影仪的研究背景、意义及本书的主要研究内容;第 2 章介绍了数码摄影测量的基本知识,着重阐述了当前的数码航空摄影测量,包括航摄飞行平台与航空数码相机;第 3 章论述了非量测数码相机的几何标定;第 4 章研究了 SWDC 数字航空摄影仪的关键技术;第 5 章对 SWDC 的理论几何精度进行了分析与研究;第 6 章专门论述了基于 SWDC 的 GPS 辅助数码空中三角测量技术;第 7 章阐述了基于 SWDC 的精细航空摄影测量研究与探索;第 8 章阐述了 SWDC 典型测绘生产应用与探索;第 9 章对本书的研究成果进行总结并提出进一步研究的方向。

在本书出版之际,首先衷心感谢本人尊敬的导师刘先林院士对我多年来的指导、培养和帮助,本书的研究工作是在刘院士的具体而悉心的指导下完成的。导师的远见卓识、治学严谨、淡泊名利、博大精深、孜孜不倦的工作热情、平易近人和谦虚宽厚的作风永远是我学习的榜样。

在本书的写作和有关科研项目研究过程中,感谢中国测绘科学研究院的左建章研究员、刘宗杰研究员、钟裕标研究员、王当根高级工程师、杨海东工程师,以及已经参加工作的同学们对我的帮助与指导。感谢我的博士同学江横彪、苏耀明、孙永华以及师妹韩友美等,他们的帮助让我体会到浓浓的同学情。感谢北京大学遥感所高光谱课题组的张立福老师、李博博士等,本书的穿雾航摄试验得到了他们的大力支持,在此表示衷心的感谢。

在本书的完成之际,感谢工作单位闽江学院及地理科学系对本书出版的支持,并对所有关心和提供帮助的单位和个人表示衷心的感谢。

由于时间较为仓促,加上笔者水平所限,书中错误在所难免,敬请广大读者批评指正!

作 者

2015 年 7 月于福州

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外相关领域研究基础	3
1.3 本书主要研究内容	4
1.4 本书研究思路	6
1.5 本书组织结构	7
第 2 章 航空摄影测量综述	8
2.1 摄影测量概述	8
2.2 航摄飞行平台	10
2.3 胶片航空摄影测量	12
2.4 数码航空摄影测量	13
第 3 章 非量测数码相机的几何标定	18
3.1 CCD 影像记录原理	18
3.2 数码相机误差来源	19
3.3 几何标定原理	20
3.4 几何标定场的建立	23
3.5 几何标定	25
3.6 几何标定可靠性验证	30
3.7 标定项对精度的影响	32
3.8 几何标定总结	33
第 4 章 SWDC 关键技术研究	34
4.1 穿雾摄影探索	34
4.2 GPS 双天线定向测量技术	39
4.3 GPS 精密单点定位技术	45
4.4 精确定点曝光技术	48
4.5 多面阵影像组合拼接	56

第 5 章	SWDC 理论精度分析	66
5.1	精度影响因素与分析	66
5.2	摄影测量理论精度分析	70
5.3	像点量测误差检测	72
5.4	理论精度总结	78
第 6 章	GPS 辅助数码空中三角测量	79
6.1	空中三角测量基本原理	79
6.2	联合平差	79
6.3	GPS 精密单点定位	80
6.4	GPS 辅助空中三角测量	82
6.5	GPS 辅助空中三坐标系统	85
第 7 章	SWDC 精细航测生产性试验研究	88
7.1	地籍测量	88
7.2	我国地籍测量现状	88
7.3	界址点测量	89
7.4	精细航测试验	89
7.5	试验总结	97
第 8 章	SWDC 地形测绘典型应用与探索	100
8.1	大比例尺典型应用实例	100
8.2	少/无控制航测探索	106
8.3	应用总结	116
第 9 章	总结与展望	117
9.1	研究工作总结	117
9.2	主要创新点	118
9.3	研究展望	118
参考文献		119

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

随着我国经济的快速发展和社会的全面进步,经济建设的诸多领域和方面对测绘不断提出新的、更高的要求,测绘发展的机遇和挑战并存。面对新的形势和需求,必须加快信息化测绘体系建设,推进测绘信息化进程,为经济社会发展提供可靠、适用、及时的测绘保障^[1,2]。航空摄影测量是信息化测绘的基本技术组成部分,在地理空间信息数据的获取与更新中发挥着基础性的重大作用。本书通过对具有我国自主知识产权的 SWDC 航空数码相机的高新技术攻关,研究适合于我国国情的数码航空摄影测量。

1.1.1 数据获取技术手段发展的需要

随着测绘技术的不断进步,我国逐步实现了由传统测绘向数字测绘的跨越,现正处于信息化测绘建设阶段。测绘数据获取的技术手段主要有地面测绘、航空测绘、航天测绘三种,我国目前正迫切需要高分辨率、高精度的数码航空测绘手段,该技术手段也是当前航空对地观测领域中研究与应用的热点。

1.1.1.1 航天测绘

随着遥感空间分辨率、时间分辨率的不断提高,近年来航天测绘发展迅速,在大范围地理空间数据的获取与更新中发挥着重要作用。在测绘领域,当前航天测绘主要是利用遥感影像进行无(少)地面控制的中小比例尺测绘数据生产,但在大比例尺高精度测绘数据提供方面,航天遥感测绘因其存在低分辨率、长周期、对天气条件的依赖性强等缺点而受到应用限制^[3,4]。

1.1.1.2 航空测绘

航空测绘是当前测绘数据获取与更新的主要技术手段。改革开放以来,随着我国经济建设的快速发展,地表形态发生了剧烈的改变,经济建设的各行业对地理空间信息数据的获取与更新提出了更高的需求,从而推动了我国航空测绘的迅猛发展,航空测绘也因其独特的优势而成为当前测绘领域的应用热潮,尤其在大比例尺、高分辨率和高精度等数据获取与更新领域形成了航空测绘研究与应用的热点。

1.1.1.3 传统测绘

传统测绘属于接触式的点测量,即传统测绘数据的获取是逐点进行测量,且测量每个点的数据基本上都需要进行测量仪器的人工安置。传统测绘因其接触式的点测量方式,从而导致其数据获取的劳动强度大、周期长、成本高及小范围等缺点。

1.1.2 航空摄影测量发展的需要

航空摄影测量为测绘数据的获取与更新提供了新方法和新手段。随着摄影测量全数字时代的到来,航空摄影测量应用的广度和深度日益拓展。航空摄影测量具有高空间分辨率、高几何精度、周期较短等优点。当前航空摄影测量朝着低空、轻小型、摄影的数字化、数据处理的集成与自动化、实时化等方向发展,航空摄影测量因其非接触式的面测量以及高分辨率、高精度等独特的优势而形成了其在测绘技术领域中的基础地位,当前空中测绘形成了航天卫星遥感、普通大航空遥感、轻小型低空遥感三分天下的局面^[5-7]。我国传统航空摄影测量长期以来以胶片摄影为主,随着数码相机的出现与发展。胶片航摄的缺点已愈发突出,传统航空摄影测量的低几何精度、飞行天气少、数据生产周期长等缺点严重制约了航空摄影测量的发展。近年来,数码相机应用到航测领域,给航空摄影测量带来了前所未有的发展机遇,极大地推动航测的应用与发展,出现了当前国内外对数码航空摄影测量研究与应用的热潮,我国已进口了近 30 台航空数码相机,并应用于航测试验与生产,从试验及生产的实践来看,进口的航空数码相机高程精度低,不适合于我国国情。传统胶片航摄的典型缺点以及进口航空数码相机的低高程精度成为当前我国航空摄影测量发展的瓶颈。考虑到我国资源环境、地势地貌等特点,尤其急需发展轻小型航空遥感,但受核心技术瓶颈制约,目前我国轻小型航空遥感仅占 5%,难以满足快速响应和高精度大比例尺测图精度要求^[8-10]。因此,急需自主研制满足高精度、高效率遥感数据获取需要的高精度轻小型航空遥感系统,本书所研究的基于 SWDC 的数码航空摄影测量技术正是满足我国当前航空遥感领域的这一迫切需求。

1.1.3 地理空间数据建设的需要

“数字中国”、“数字城市”、“数字国土”作为 21 世纪我国社会经济、资源环境可持续发展的一个重要战略思考,地理空间数据是其规划、建设、管理、服务以及信息化的基础。当前最突出的问题是没有数据(如西部)或没有准确的数据,且由于认识、投入不足以及技术装备落后等原因,使得空间基础数据的现势性非常差,基本地形图的更新周期超过 10 年,造成经济建设和社会发展对数据信息的需求与现势性差的矛盾愈加突出^[9,10]。只有保持数据的现势性,才能够使各种信息系统成为实际可以使用的系统。要改变这种状况,就需要在自主的数据信息获取技术支持下建立更加快速有效的数据信息更新机制,而传统测绘与航天测绘在数据实时性获取方面存有不足,很难满足地理空间数据快速建设的需要。

1.1.4 数码航摄技术发展的必然

数码相机具有快速影像获取、体积小、质量轻、高分辨率、高几何精度等优点,而且对天气条件要求不再苛刻,能够阴天云下摄影,其经济效益远优于传统航空摄影^[11];航空数码相机是现代数码航空摄影测量的关键设备,国外相关领域的研究开展较早,当前,国外航空数码相机的发展已趋于成熟,其独特的优势已经得到广泛重视并迅速拓展应用,形成了巨大的市场冲击力。而进口一台航空数码相机,价格昂贵,且其性能特点与我国国情不相适应,若要普及我国的航空摄影测量,从而实现我国航测领域由贵族走向普及,则更不能依赖进口。因此,急需开展我国相关领域的研究与应用。

1.1.5 数据表达形式的需要

随着测绘技术的发展与进步,直观形象的测绘数据表达形式成为当前的迫切需要。传统的纸质地图以符号形式表达,是地表形态的间接表现,需要具备相关的专业知识才能读懂。摄影测量可以通过影像数据进行表达,是地表形态的直接表现,具有直观、自然、形象等特点,尤其当前较为热门的三维虚拟现实(3D-VR)表达方式更加离不开影像数据,且许多领域(如灾害应急、环境检测、土地变更调查等)都急需影像数据,因而,由影像来提取信息(物理信息和几何信息)成为当前研究的热点领域之一(影像数据挖掘)。

1.2 国内外相关领域研究基础

1.2.1 航空数码相机

数码相机是数码航空摄影测量的关键设备,数码相机的核心是面阵 CCD 芯片。从 1993 年美国德州仪器公司报道 $1\,024 \times 1\,024$ 像素开始,目前面阵 CCD 像素数目已从 100 万像素提高到 1 亿像素左右。CCD 成像技术最初是由美国柯达公司,日本富士公司、尼康公司、佳能公司、索尼公司和荷兰的飞利浦公司等六家大公司共同发起的,并进行了在光学、电子和计算机技术领域的联合开发研制。近年来,德国的禄莱公司、徕卡公司、爱克发公司,日本的奥林巴斯公司、爱普生公司、美能达公司、卡西欧公司、理光公司、东芝公司、日立公司、松下公司、夏普公司和美国的飞思公司、IBM 公司、威达公司、宝丽来等公司也都相继投入了数码相机的开发研制,并不断有普及机型或专业机型出现^[11]。

普及机型的 CCD 分辨率一般为 100 万~600 万像素,主要用于人像风景等生活摄影,难以满足数码航空遥感的需要。只有专业面阵 CCD 才可能用于航空遥感,如适配于 120 单反相机的面阵 CCD($2\,K \times 3\,K$ 、 $4\,K \times 4\,K$ 、 $4\,K \times 5\,K$ 分辨率)^[11]。

数码相机应用于航测领域国外的发展较为迅猛,2000 年 ISPRS 阿姆斯特丹大会,航空数码相机开始出现,2004 年的伊斯坦布尔大会上航空数码相机成为一个热点^[12]。目前,国外已经出现相关成熟产品,如美国的 DMC(分辨率为 $13\,824 \times 7\,680$)、奥地利的 UCD/X/XP(分辨率为 $11\,500 \times 7\,500$ 或更高)、德国徕卡公司的 ADS40/80 等,航空数码相机主要以两种方式发展:一种是基于线阵(Linear Array)的传感器方式,代表产品有 ADS40/80;另一种是基于面阵(Plane Array)的传感器方式,代表产品有 DMC、UCD/X/XP 等^[13]。

国内 CCD 的研制工作在稳步地进行,但目前还没有形成生产能力,与国际先进水平差距很大。据相关报道,目前国内面阵 CCD 实验室已研制出了 $1\,024 \times 1\,024$ 、 $2\,048 \times 2\,048$ 像素的器件,我国对航空数码相机的研制也已初见端倪,尚未出现较为成熟应用的相关产品。

1.2.2 航摄飞行平台

随着航空遥感普及应用的迫切需要,轻小型航空摄影平台成为当前应用的热点。由于经济技术力量雄厚,国外用于航空遥感摄影飞行的飞机平台多采用“赛斯纳”等超轻型飞机或更大更先进的机型,配备完整的传感器系统、GPS 导航和 POS 系统。虽然有超轻型飞机“GT500”等型可以使用,但用于专业航空遥感摄影的并不多见。我国主要以国产的运—X

系列飞机为主要平台,引进的飞机包括美国的奖状、空中国王等类型;在轻小型飞行平台方面,国内目前应用尚少,但超轻型飞机在其他领域中的使用已相当广泛,国产蜜蜂系列等超轻型飞机拥有较多用户和数量,性能优异,成本低^[11];在无人机方面,我国在 20 世纪 90 年代初期开始了无人机的研制,虽然起步较晚,但在短短的十年间取得了跨越式的发展,目前有代表性的无人机有 WZ—2000,其有效载荷 180 公斤,留空时间可达 12 h;充分发挥轻小型飞机平台的独特优势,可以弥补我国航空遥感技术体系的薄弱环节。

1.2.3 摄影测量数据处理系统

国内外传统的航空摄影测量数据处理技术相当成熟完善,在光学处理、数字化以及专题制图等方面具备先进的软硬件条件。虽然发达国家在仪器设备和处理软件上更为先进和高度集成,但国内多年积累基础条件比较好,人员和设备具有一定规模,制定了成体系的生产技术规定和产品标准。国产软件也成系列,符合国内需求,因此数据处理技术的差距不是很大,通过引进关键部件,经过研究,可以完全自主实现基于国内现有技术的数码航空影像的后处理和应用^[11]。我国自主研发的 VirtuoZo 和 JX—4 全数字摄影测量系统能完成从自动空中三角测量到测绘各种比例尺数字高程模型(DEM)、数字正射影像(DOM)、数字线划地形图(DLG)的生产,并成为国际摄影测量界公认的实用数字摄影测量系统。随着高冗余航摄(航向重叠度不小于 80%,旁向不小于 60%)对大数据量以及复杂数据关系的数据处理需求,近年来国际上研制出了许多新型软件,如 Pixel Factory、SSK、Inphon,但价格昂贵,且远不能完全有效处理国内生产的影像数据。为适应需求,国内已开始了超大规模区域、复杂姿态、多基线、多光线影像数据处理软件的研发,如武汉大学的 DP-Grid 已达到相当高的水平,但其在生产真正射影像等方面有待进一步研究。

1.3 本书主要研究内容

1.3.1 非量测数码相机的高精度几何标定

非量测数码相机的几何标定是实施数码航空摄影测量的基础,其标定精度直接决定着摄影测量成果的几何精度,相机参数采用物理方法直接标定的精度很难满足摄影测量要求,本书研究采用摄影测量原理进行非量测数码相机间接几何标定的方法。具体研究了高精度几何标定场的建立、非量测数码相机参数标定的摄影测量原理、具体的相机几何标定过程及其标定结果的精度分析、标定的可靠性分析方法、各标定参数对摄影测量精度的影响情况。

1.3.2 SWDC 关键技术研究

航空摄影测量的航摄仪不同于常规的空中影像获取传感器,为满足摄影测量的需要,特别是当前信息化测绘的数据获取需求,摄影测量的航摄仪需从测绘数据获取的实际需求出发,开展相关的技术研究,本书 SWDC 航空数码相机的关键技术研究主要包括以下几个方面:

1.3.2.1 穿雾摄影探索

我国幅员辽阔,地区差异较大,导致各地区的航摄环境有所不同。我国的西南地区(重

庆、四川、云南、贵州等)因雾天较多,导致常年的航摄飞行天气少,很难获取到航摄数据,开展穿雾摄影研究对该类地区的航摄数据获取意义重大。本书在穿雾摄影相关理论的基础上,研究利用滤光镜进行穿雾摄影,通过实验研究滤光镜穿雾摄影的效果,并对其是否影响影像的几何精度进行评价。

1.3.2.2 集成双天线 GPS 技术

航空摄影的旋偏角对航摄影影响较大,航摄的绝对漏洞与立体漏洞主要来源于旋偏角的影响,本书开展双天线 GPS 技术的集成研究,利用双天线 GPS 输出的角度,对航摄的旋偏角进行实时纠正。

1.3.2.3 集成 GPS 单点定位技术

GPS 单点定位是当前 GPS 测量中应用的热点,尤其在航空摄影测量领域有极大的应用需求,大区域内实现无地面差分基站的 GPS 辅助空中三角测量,将更大程度地减少地面控制测量的工作量,本书进行 GPS 单点定位应用于航空摄影测量领域的技术集成研究。

1.3.2.4 基于 GPS 的精确定点曝光

在 GPS 技术出现并实际应用之前,航空摄影主要采用定时曝光,即根据飞机的飞行速度、基线长度等信息事先设计好相机的曝光时间间隔,从而在空中实施定时曝光,这种曝光方式受到飞机飞行质量的影响较大。本书利用空中 GPS 进行定点曝光研究,即根据设计好的曝光点坐标,在空中利用 GPS 输出的实时坐标判断与事先设计好的曝光点的接近程度实施空中定点曝光,从而可以极大地提高航摄质量。

1.3.2.5 多中心影像的拼接算法研究

当前的单个数码相机相对于航空摄影测量,存在像幅小的问题,不能满足摄影测量的需要,因此要想达到较大的像幅,须进行多个相机(多中心)的同时对地摄影,以获取等效的大像幅影像。本书进行多中心影像的拼接算法研究,从而实现将多中心投影(四相机)影像生成一幅虚拟单中心投影的大像幅影像。

1.3.3 GPS 辅助数码空中三角测量研究

利用 GPS 测量提供的空中摄站坐标参与摄影测量数据的联合平差,可以大大地减少摄影测量地面联测的控制点,从而达到减少地面测量工作量的目的。本书在 GPS 辅助空中三角测量已有理论上,主要进行基于 GPS 精密单点定位(PPP)的辅助数码空三、空中摄站坐标的坐标系统适应性转换、摄站偏心分量的处理、理论精度估算以及作业流程等方面的相关研究。

1.3.4 基于 SWDC 的精细航测研究

数码相机具有分辨率高和高几何精度的特点。当前我国高精度的地籍测量主要采用传统的测量方式,可以称为数字地籍,而采用摄影测量的手段实施地籍界址点测量(精细航测)一直是地籍测量的向往(可称为影像地籍)。本书探讨了利用 SWDC 实施地籍界址点测量(精细航测)的可能性与可行性,并通过试验加以验证,总结出 SWDC 实施精细航测的特有工作流程。

1.3.5 基于 SWDC 的大比例尺地形测绘

传统胶片航测的平面精度较高,但基高比小,导致航测的高程精度较低,很难开展高精度的大比例尺地形测绘(如 1:500 地形图);SWDC 航空数码相机的基高比大(大于 0.6),理论上其实施地形测量的高程精度高,本书通过具体实际应用研究,阐述了 SWDC 实施大比例尺地形测绘的可行性、工作流程,并分析了其应用优势。

1.3.6 基于 SWDC 的无(少)地面控制航测探索

由于摄影测量中,影像对应的初始参数求解依赖于地面控制点,而实现无控制摄影测量,从而实现空间地理直接定位(DGR:Direct Geo-Reference)一直是摄影测量界追求的目标,高精度 GPS 空间定位技术的出现使得无(少)控制摄影测量成为可能。本书探讨了基于 GPS 精密单点定位技术实施 GPS 辅助空中三角测量在少控制或无控制情况下的精度,并通过具体试验论证了 SWDC 实施无(少)地面控制在小比例尺测绘中应用的可行性。

1.4 本书研究思路

本书基于摄影测量的经典理论,研究利用数码相机实施高精度航空摄影测量的原理、方法与应用。全书以技术研究与应用研究为主线,即在非量测数码高精度几何标定的基础上,对数码相机系统开展多项技术研究,主要包括 GPS 单点定位技术集成、GPS 双天线测角技术集成、基于 GPS 数据实时输出的空中定点曝光技术、多中心影像拼接算法研究等,在技术研究的基础上开展 SWDC 航空数码相机的高精度摄影测量应用研究,主要包括精细航测、大比例尺地形航测、无(少)控制航测等方面,具体的研究思路如图 1-1 所示。

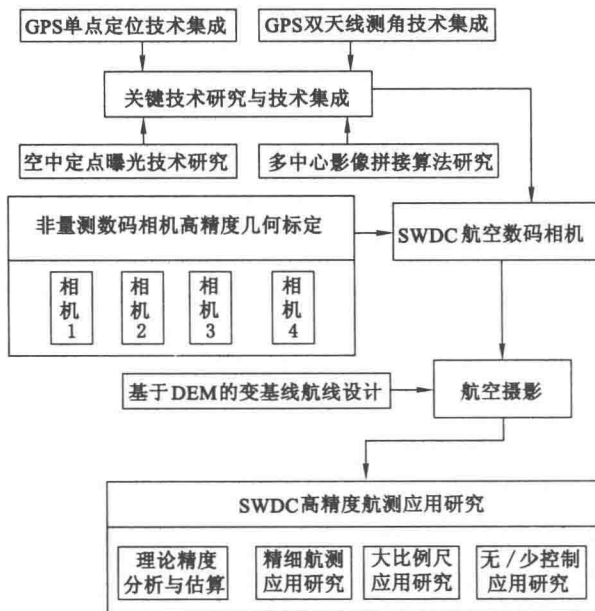


图 1-1 研究流程图

1.5 本书组织结构

本书将从现有数码航空摄影测量的现状分析开始阐述,对非量测数码相机的高精度几何标定、SWDC 关键技术研究、基于 SWDC 的 GPS 辅助空中三角测量、SWDC 的典型应用等方面展开论述,着重论述高精度几何标定、SWDC 的关键技术、基于 SWDC 的高精度摄影测量的典型应用(精细航测领域、大比例尺地形测绘领域、无(少)控制航测领域等方面)等方面的内容。本书共分九章,各章节内容安排如下:

第1章绪论——本章主要阐述研究背景、目的与意义,本书研究领域的国内外相关研究基础,以及本书主要研究思路与组织结构等内容。

第2章航空摄影测量综述——本章在阐述经典摄影测量基本原理的基础上,着重介绍了当前航空摄影飞行平台的现状与航测普及化趋势对飞行平台的需求;传统胶片航空摄影测量的现状,分析了胶片航测的优缺点;数码航空摄影测量的基本理论,当前数码航空摄影测量的发展现状,分析了国外三种典型航空数码相机(DMC、UCD/X、ADS40/80)的原理、优缺点、在我国的总体应用情况等内容。

第3章非量测数码相机的几何标定——本章主要阐述了数码相机成像的基本原理,数码相机用于航测的主要误差来源;数码相机几何参数直接物理标定方法及其所达精度;数码相机几何参数间接摄影测量标定原理、方法;间接几何标定的具体环节与标定实例;间接几何标定的可靠性检测方法;所标定各项几何参数对摄影测量精度的影响分析。

第4章SWDC关键技术研究——本章主要阐述了SWDC航空数码相机的主要关键技术,主要包括GPS精密单点定位(PPP)的集成技术;GPS双天线测角系统用于航摄旋偏角自动修正的集成技术;基于空中GPS实时数据采集的精确定点曝光技术;基于已有DEM/SRTM数据的变基线航线设计;多中心投影影像的拼接算法与实现;基于不同波段滤光镜的穿雾摄影探索。

第5章SWDC理论精度分析——本章主要阐述了影响SWDC精度的主要因素以及相关误差分析,介绍了当前测绘生产中对数字摄影测量工作站(DPW)的像点量测几何精度进行检测的通用方法;并对SWDC的理论精度进行了估算、分析和总结。

第6章GPS辅助数码空中三角测量——本章主要阐述了GPS辅助空中三角测量的基本原理;GPS精密单点定位技术应用于航空摄影测量的技术优势;GPS辅助空中三角测量的坐标系统。

第7章SWDC精细航测生产性试验研究——本章主要阐述了高精度地籍界址点测量(精细测量)的现状(数字地籍)以及SWDC实施界址点测量(精细航测)的可行性;SWDC实施精细航测的应用实例及其精度分析;SWDC精细航测作业的实际考虑因素。

第8章SWDC地形测绘典型应用与探索——本章主要阐述了传统的大比例尺地形测量方法以及胶片航测的地形测量现状;基于SWDC的大比例尺地形测量应用实例及其精度分析;基于SWDC的无(少)地面控制航测探索,并通过具体实例加以分析。

第9章结论与展望——本章主要阐述了本书的主要研究工作总结;主要创新点以及未来展望。

第 2 章 航空摄影测量综述

2.1 摄影测量概述^[14-16]

19 世纪中叶,摄影技术一经问世,便应用于测量,摄影测量也就诞生了。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,其研究的重点是从数字影像自动提取所摄对象的空间信息。

摄影测量经历了模拟摄影测量、解析摄影测量和数字测量三个阶段,现正处于数字摄影测量时代。摄影测量主要获取可见光波段的航空像片,通过经典的双目视觉理论重建像片反映区域的空间分布与变化,通过模拟共线方程获取各种空间三维数据。由于计算机的问世和美国陆地卫星升空等航天技术的发展产生了遥感技术并被引用到摄影测量中来,摄影测量学也发展成为“摄影测量与遥感”(1980 年该名称获得国际摄影测量学会的认可)。我国摄影测量学的开创者王之卓院士和著名学者李德仁院士曾多次开创性地提出,摄影测量与遥感应更名为“图像信息学”。信息学科的冲击使摄影测量快速地从解析测量时代走向数字摄影测量时代。

摄影测量是测量学科的分支,它利用摄影获取的影像进行测量,即利用在不同的位置、方向对同一个物体或地区(对于地形测量而言一般指地面)摄影的影像进行测量、测图。根据影像数据的获取方式不同,摄影测量可分为航空摄影测量、近景摄影测量与航天摄影测量等^[17]。摄影测量在应用与技术手段不断进步的同时,面临着新技术的挑战,其典型挑战就是发展中的激光测距技术,可称为激光雷达(LiDAR:Light Detection And Ranging),主要有有机载和车载两种形式,激光雷达(配合组合导航系统)能够快速获取地表空间信息数据,目前该项技术的应用主要是获取地表 DEM 数据,尚有多项技术难题有待解决。

由飞机按一定要求的航线飞行,对地面摄影,影像与影像之间有一定的重叠度,沿飞行航线方向的影像重叠(称为航向重叠)应不小于 60%,相邻航线间的影像重叠(称为旁向重叠)应不小于 20%,这就是航空摄影测量,这是目前摄影测量生产,也是国家经济、国防建设中测绘国家基本地形图与相应的地理信息系统(GIS)建设的最基本方法。

摄影测量的基本原理是利用影像上的“同名”像点(同一物点在不同影像上的成像)坐标,确定该点的三维空间坐标。其主要内容包括内定向(恢复影像内方位元素)、相对定向(恢复影像对相对方位元素)、绝对定向(恢复立体模型位置和姿态)等。除了最初的平面摄影测量(未广泛地应用于生产)外,摄影测量发展至今经历了模拟、解析、数字摄影测量三个阶段,三个发展阶段在数据处理方面的典型特征反映在三种典型的仪器上,如图 2-1 所示。

模拟摄影测量是用机械或光学投影器来“模拟”摄影过程,用它们交会确定被摄物体的空间位置。实质上,当时的模拟摄影测量仪器本身就是一台精密的、机械的模拟计算器。随



图 2-1 摄影测量发展的三种典型仪器
(a) 模拟测图仪 A8;(b) 解析测图仪;(c) 数字摄影测量工作站

着计算机及其相关技术的发展,数字投影取代了光学投影,摄影测量已经可以进行严密解算。摄影测量与计算机技术、遥感技术的交叉渗透形成了现代摄影测量—数字摄影测量,其理论基础是像点、投影中心(摄站)、相应物点在空间三点共线的共线方程数学模型,如式(2-1)^[18-20]。

$$\begin{cases} x-x_0=-f\frac{a_1(X_A-X_S)+b_1(Y_A-Y_S)+c_1(Z_A-Z_S)}{a_3(X_A-X_S)+b_3(Y_A-Y_S)+c_3(Z_A-Z_S)} \\ y-y_0=-f\frac{a_2(X_A-X_S)+b_2(Y_A-Y_S)+c_2(Z_A-Z_S)}{a_3(X_A-X_S)+b_3(Y_A-Y_S)+c_3(Z_A-Z_S)} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中 x,y ——像点坐标;
 x_0,y_0,f ——影像的内方位元素;
 X_A,Y_A,Z_A ——地面点坐标;
 X_S,Y_S,Z_S ——影像的外方位元素。

随着计算机技术及其应用的发展和数字图像处理、模式识别、人工智能、专家系统以及计算机视觉等学科不断发展,数字摄影测量的内涵已远远超过了传统摄影测量的范围,现已被公认为摄影测量的第三个发展阶段。数字摄影测量与模拟、解析摄影测量的最大区别在于:它处理的原始资料是数字影像或数字化影像,最终是以计算机视觉代替人的立体观测,因而它所使用的仪器最终将只是通用计算机及其相应外部设备;其产品是数字形式的,而传统的产品只能是该数字产品的模拟输出。表 2-1 列出了摄影测量的三个发展阶段的特点。

表 2-1 摄影测量三个发展阶段的典型特点

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	数字化影像	数字投影	计算机	自动化操作 加作业员的干预	数字产品
	数字影像				模拟产品