

中国地质调查局地质调查专报E0012号



机载 **POS** 系统 直接地理定位技术理论与实践

郭大海 王建超 郑雄伟 著



地质出版社

JIZAI **POS** XITONG ZHIJIE DILI
DINGWEI JISHU LILUN YU SHIJIAN

Guo Dahai Wang Jianchao Zheng Xiongwei

Geological Publishing House
Beijing

ISBN 978-7-116-06266-5



定价：35.00元

机载 POS 系统直接地理定位 技术理论与实践

郭大海 王建超 郑雄伟 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 摘 要

本书作者回顾了航空遥感技术的历史进展,指出了传统方法中采用大量地面控制实现航空影像对地定位方法的不利因素,深入分析了 POS 系统定位定向技术在国内外的发展现状和存在问题,系统研究了基于 DGPS/IMU 组合导航定位技术的 POS 系统工作原理、技术方法以及 POS 与航摄仪集成系统的误差来源及其改正模型,进而提出了一套完整的数据处理及精度评定方法;通过获取面积达 10 万 km² 的 POS 及航空摄影数据,实施不同方案的多架次检校飞行,研究总结了直接地理定位的数据获取流程及质量控制方法;并针对产业化应用的关键技术环节,提出了 7 项重要技术指标;自主设计开发了专门针对机载 POS 系统直接地理定位方法的软件系统,形成了一套完整的机载 POS 系统直接地理定位工程化技术方法。

本书可供从事航空遥感数据获取与处理的广大科研技术人员和有关高等院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机载 POS 系统直接地理定位技术理论与实践/郭大海等
著. —北京:地质出版社, 2009. 8
ISBN 978 - 7 - 116 - 06266 - 5

I. 机… II. 郭… III. ①航空摄影测量②遥感图像-图像识别 IV. P231 TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 127096 号

责任编辑:祁向雷 李丛蔚

责任校对:杜悦

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324577 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zhs@ gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787 mm × 1092 mm¹/₁₆

印 张:8.5

字 数:200 千字

版 次:2009 年 8 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:35.00 元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 06266 - 5

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

航空遥感是重要的对地观测手段之一，在国土资源调查、地图测绘、环境灾害监测等方面得到了广泛应用。21 世纪以来，随着光、机、电技术的发展，新型机载传感器不断涌现，航空遥感技术从经典框幅式胶片航空摄影向数字式、集成化方向飞速发展。

航空遥感技术从诞生到现在已经有 100 多年的历史，手动曝光、中心投影、框幅式成像、胶片存储、洗印航片、间接定向、模拟测图等是早期航空遥感技术的主要特征。随着科学技术的进步，一些技术方法得以改进，一些新的技术手段也应用到航空遥感技术中来，出现了自动定点曝光、线阵推扫、条带式成像、数字存储、直接定向和数字测图等新技术和方法。航空遥感的发展在数据获取与处理两个主要环节都有明显的体现，这种发展使得航空遥感技术在传统领域的应用得以深化，同时使得其应用范围不断拓展。展望未来，航空遥感技术的重要发展趋势之一是智能航空遥感技术，主要表现为自动飞行管理、实时质量检测、在线数据处理和快速下传等特征。随着计算机技术、惯性导航技术和无线通讯技术的发展，智能航空遥感技术离我们已经很近。

航空遥感的基本原理是根据物-像空间几何关系，通过量测像点来确定被摄物体的位置和形状。因此，物-像空间几何关系的建立是航空遥感的核心问题。不论是框幅式相机还是线阵推扫式相机，其成像原理是确定并已知的，所以建立物-像空间几何关系的主要问题是传感器空间位置及姿态的确定，这个问题一般简称为传感器定向。多年来，主要通过量测一定数量的地面控制点并构网平差的方法来间接实现传感器定向。差分 GPS 定位技术和 DGPS/IMU 组合导航定位技术的应用，给航空遥感技术带来了新的定向方法，即集成定向或直接定向。由于 DGPS/IMU 组合导航不仅能提供较单纯 DGPS 更高精度、更高可靠性及更高采样频率的定位参数，而且能提供高精度的姿态参数，使之在航空传感器定向方面具有十分显著的优势。机载 POS 系统正是基于 DGPS/IMU 组合导航定位技术开发的，是航空遥感传感器实现定点曝光、线阵推扫、自动飞行管理以及对航空遥感数据进行实时质量检测 and 在线数据处理的基础。

在中国地质调查局的支持下,中国国土资源航空物探遥感中心于2004~2008年开展了机载POS系统直接地理定位技术的研究工作。通过深入分析POS系统定位定向技术在国内外的发展现状和存在问题,系统研究了基于DGPS/IMU组合导航定位技术的POS系统工作原理、技术方法以及POS与航摄仪集成系统的误差来源及其改正模型,进而提出了一套完整的数据处理及精度评定方法;成功获取了面积达10万km²的POS及航空摄影数据,并实施了不同方案的多架次检校飞行,得出了直接地理定位的数据获取流程及质量控制方法;针对产业化应用的关键技术环节,提出了7项重要技术指标,自主设计开发了专门针对机载POS系统直接地理定位方法的软件系统,形成了一套完整的工程化技术流程及实施方案;在大量试验研究和生产实践的基础上,归纳总结了基于POS系统直接地理定位、快速获取1:10000与1:50000比例尺航空正射影像、基础地理信息的技术方法和工作流程,并以基于POS系统航空摄影项目的实施过程为主线,对各个工作环节质量控制方法及技术要求进行了明确的规定,对工程化应用中可能出现的技术问题给出了应对措施。

本书的研究工作得到了项目组同志的大力支持,特别感谢王建超、郑雄伟、张宗贵教授的大力支持,没有他们的辛勤工作,如此系统繁杂的研究和试验将无法完成。同时感谢吴芳、陈洁、林健、詹世富等项目组全体工作人员的理解、关心与支持。

在此,特别感谢中国地质调查局肖桂义、叶建良、张伟教授、中国矿业大学吴立新教授、武汉大学曹辉、江万寿研究员、中国国土资源航空物探遥感中心熊盛青总工、方洪宾副主任的大力支持,他们的支持与帮助使项目的研究工作得以顺利完成。

由于作者水平所限,文中错误和不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正!

郭大海

2009年2月10日

目 次

前 言

第一章 概述	(1)
第一节 机载 POS 直接地理定位技术	(1)
第二节 国内外研究现状与趋势	(2)
一、航空遥感技术进展概述	(2)
二、机载 POS 直接地理定位技术国内外研究现状	(5)
第三节 本书研究内容与实践成果介绍	(8)
一、系统工作原理及数据处理模型	(8)
二、数据获取	(9)
三、DG 方法关键技术指标研究	(9)
四、软件开发	(9)
五、机载 POS 系统直接地理定位技术的工程化应用	(9)
六、主要成果	(9)
七、成果质量评价	(11)
第二章 POS 与航摄仪的集成及其工作原理	(12)
第一节 差分 GPS 定位技术	(12)
一、GPS 系统	(12)
二、GPS 卫星信号	(12)
三、GPS 定位的基本观测量	(13)
四、测码伪距观测方程	(14)
五、测相伪距观测方程	(15)
六、GPS 定位原理	(16)
七、差分 GPS 定位	(18)
第二节 惯性导航原理	(20)
第三节 组合导航系统	(21)
一、最优估计理论	(21)
二、离散型卡尔曼滤波基本方程	(22)
第四节 摄影测量相关理论	(23)
一、中心投影构像方程	(23)
二、立体像对前方交会公式	(24)
三、光束法解析空中三角测量	(25)
第五节 POS 辅助航空摄影集成系统的工作原理	(26)
一、投影中心空间位置的确定	(26)

二、航摄仪姿态参数的确定	(28)
第六节 常用坐标系统	(28)
一、惯性坐标系	(28)
二、地球坐标系	(28)
三、导航坐标系	(29)
四、摄影测量坐标系	(30)
第三章 机载 POS 系统直接地理定位方法	(31)
第一节 系统误差分析	(31)
一、IMU/DGPS 系统的漂移误差	(31)
二、IMU/DGPS 和航摄仪集成系统误差	(32)
三、时间同步误差	(32)
四、畸变误差	(33)
五、地球曲率引起的误差	(33)
六、大气折光差	(34)
第二节 DG 数据处理方法	(34)
一、系统误差检校	(34)
二、系统误差改正	(37)
三、DG 精度评定	(37)
第三节 ISO 数据处理方法	(41)
一、误差方程式	(42)
二、法方程式及解算	(43)
三、ISO 精度评定	(43)
第四章 直接地理定位关键技术指标的研究	(44)
第一节 试验数据获取	(44)
一、POS 与航空摄影系统集成	(44)
二、系统集成安装	(46)
三、偏心分量测定	(46)
四、试验数据获取	(48)
第二节 POS 观测值精度分析	(49)
一、精度评估方法	(49)
二、试验结果	(50)
三、试验结果分析	(51)
四、POS 观测值精度指标	(51)
第三节 基站距离与 DGPS 精度的相关性分析	(53)
一、基站距离对 DGPS 精度的影响	(53)
二、参与机载 GPS 差分计算的基站选取	(55)
第四节 检校场设计及其关键指标	(57)
一、检校场的作用	(57)
二、检校参数的计算策略	(58)

三、检校场的布设方案	(64)
四、检校场飞行方案	(66)
五、检校场飞行的频度	(70)
第五节 系统误差的检校精度评估	(75)
一、系统误差检校精度的评估方法	(75)
二、试验结果	(75)
第六节 DG 实际精度评估	(76)
一、DG 实际精度的评估方法	(76)
二、试验结果	(76)
第七节 上下视差评估	(77)
一、上下视差评估方法	(77)
二、试验结果	(78)
第八节 直接地理定位关键技术指标	(78)
第五章 数据处理软件 AeroDG	(80)
第一节 系统功能	(80)
第二节 主要功能的实现方法	(82)
一、像点坐标量测	(82)
二、联合平差	(83)
三、测区 DEM/DOM 整体制作	(84)
四、坐标转换	(93)
第三节 基于 AeroDG 1.0 的数据处理方法	(95)
一、滇东南测区基本情况	(95)
二、滇东南测区数据处理	(97)
第六章 DG 工作流程及质量控制方法	(105)
第一节 参考标准及适用范围	(105)
一、技术规范	(105)
二、DG 适用范围	(105)
第二节 机载 POS 系统直接地理定位技术工作流程	(106)
一、工作方案设计	(107)
二、系统集成安装与调试	(107)
三、基站和地标点的布设与测量	(107)
四、POS 系统辅助航空摄影	(108)
五、数据处理	(108)
六、产品加工与制作	(108)
第三节 机载 POS 系统直接地理定位质量控制方法	(109)
一、系统集成	(109)
二、集成系统安装与调试	(110)
三、基站和地标点的布设	(110)
四、POS 系统辅助航空摄影	(111)

五、POS 数据处理 (112)

六、精度评估 (114)

七、产品加工与制作 (115)

第四节 工程化应用中特殊情况的处理 (116)

一、检校失败 (116)

二、POS 系统工作异常 (117)

三、上下视差超限 (117)

第七章 结论与展望 (118)

第一节 结论 (118)

第二节 应用展望 (120)

主要参考文献 (122)

第一章 概述

第一节 机载 POS 直接地理定位技术

摄影测量的基本命题是根据物-像几何关系确定各类空间物体的形状、大小和位置。其原理则是通过同名光线的交会和像点的量测来确定被摄目标。因而,必须精确确定投影光束(像片)的位置(3个线元素)和姿态(3个角元素),合称6个外方位元素。传统的摄影测量方法是利用大量的地面控制点并通过空中三角测量反求光束的外方位元素,其成图方式的主要过程包括航空摄影、外业控制、空三加密及内业成图。由于该成图过程工序复杂、工期长、费用高,导致从航空摄影计划下达到基础地理图件生成需要2~3年才能完成,得到的基础地理信息数据滞后于国民经济建设的需求;同时,该方法严重依赖地面控制点,尤其在人迹罕至的地区(如中国西南部一些地区)或地物单一、无明显地物点的地区(如沙漠、戈壁或大草原)则难以采用传统的航测方法。这些困难地区约占中国陆地国土面积的1/10。因此如何减少或无需地面控制点而直接获取投影光束(像片)的外方位元素一直是摄影测量工作者孜孜以求的目标。GPS辅助空中三角测量虽然解决了像片的定位问题,但是终因无法获取像片的姿态参数,而不能彻底摆脱地面控制。

利用机载 POS 系统,在航空摄影的同时,可以准确地获取像片的空间位置和姿态参数。这些参数的直接获取给数字摄影测量带来了深刻影响,基本可以免去地面控制工作,进而简化和加速影像定向和定位工作。部分数字摄影测量的算法,甚至是整个作业流程都面临新的改进。

机载 POS 系统测定的定位定向参数在数字摄影测量中有两种应用方法。

(1) 直接地理定位(Direct Georeferencing,简称 DG)。所谓直接地理定位,就是将 POS 系统获取的定位定向参数直接反演成像的过程,通过立体像对的前方交会,以确定像点的地面坐标达到地形图测绘或制作正射影像的目的。由于 POS 系统在与传感器集成时,存在偏心分量和姿态角误差,因此,一般需要布设检校场来对集成系统的主要误差参数进行检校,以消除其影响。DG 数据采集的示意图如图 1-1 所示。采用 DG 方法可以实现测区内无地面控制,从而极大地提高了作业效率。特别是在崇山峻岭、戈壁荒漠等难以通行的地区开展航空遥感、获取基础地理信息,DG 方法提供了唯一可行的技术手段,具有广泛的应用前景。

(2) 集成传感器定向(Integrated Sensor Orientation,简称 ISO)。所谓集成传感器定向,就是将 POS 获取的定位定向参数,引入航空摄影测量区域网平差中,采用统一的数学模型和算法,以获得精确的影像外方位元素和立体测图控制点的地面坐标。其数据采集示意图见图 1-2 所示。

比较而言,DG 方法相对简单,无须地面控制点,可以降低成本、提高作业效率;但

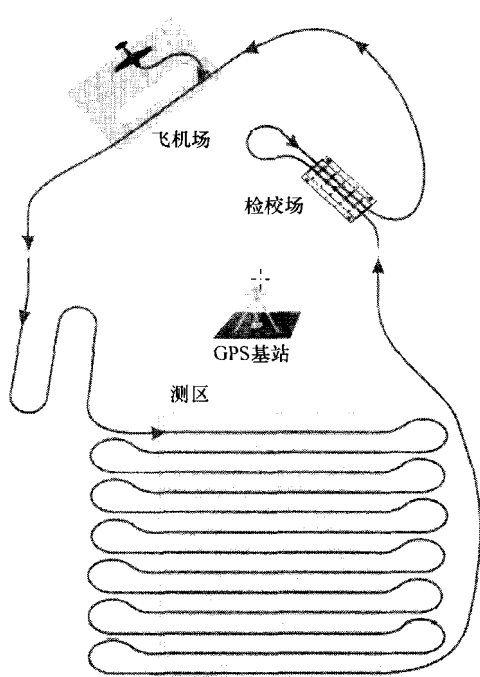


图 1-1 直接地理定位数据采集示意图

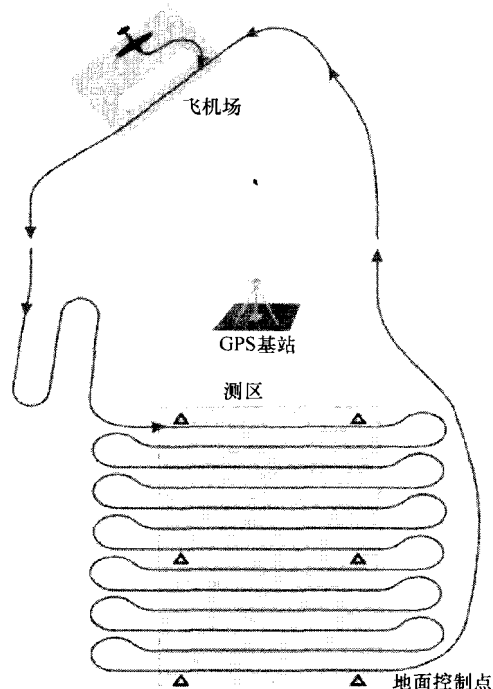


图 1-2 集成传感器定向数据采集示意图

由于集成方法还不够严密，目前还难以满足大比例尺地形图测绘的精度要求，并且这种方法要进行严格的系统参数检校。ISO 方法比较复杂，实质为摄影测量区域网联合平差，因为引入了定位定向参数，仅需利用少量的地面控制点即可获得很高的定位精度，从而大幅度降低了地面控制测量的工作强度。

第二节 国内外研究现状与趋势

一、航空遥感技术进展概述

从 19 世纪末非动力飞行平台的航空摄影到经过 20 世纪 30 年代至 80 年代初发展的胶片航空摄影，一直到目前的基于 POS 系统（Positioning Orientation System）对地定位的光学/数字、激光手段，航空遥感无论在飞行平台，还是在成像、导航、定位定向等都发生了巨大的变化，航空遥感技术朝着高空间分辨率、高光谱分辨率、全谱段和多传感器集成应用方向发展，呈现出蓬勃的生机。

1. 胶片航空摄影

航空摄影作为遥感信息获取的重要手段之一，由于具有机动灵活、高空间分辨率、成像机理简明，以及易于图像处理、信息提取、信息综合等特点，被广泛应用于农业、林业、交通、国防、城乡规划、制图等领域。

航空摄影技术的发展最早可追溯到 1839 年人类利用“摄影术”成功获取的第一张像片。20 世纪初，由于航空航天技术的发展，航空摄影开始兴起。早期的航摄仪以手持式

为主。20 世纪 50 年代,带坐架和导航设备的航摄相机开始问世并投入生产作业,其典型的代表有:RMK、RC8、AφA 等。受技术所限,其像幅均为 18 cm × 18 cm,色差消除多限制在可见光范围内,物镜畸变差较大(大于 10 μm)。70 ~ 80 年代,推出了新一代航摄影 RC10、RC20、RMK A、MRB、LMK,像幅扩大到 23 cm × 23 cm,色差消除范围达 400 ~ 900 nm,物镜畸变差均小于 7 μm,并具有影像位移补偿功能。80 年代中后期,新一代性能更优、功能更强的航摄影 RC30 和 RMK TOP 问世。与过去的相比,新型胶片式航空相机增加了陀螺稳定装置和飞行管理系统,不仅在影像分辨率和清晰度上有很大的改善,而且实现了航空摄影计划设计、导航及摄影过程的计算机控制,使航空摄影工作的自动化程度得到了极大的提高,为进一步的 GPS 辅助空三技术的推广应用奠定了良好的基础。

2. 数字航空摄影

随着对地观测信息化、数字化的发展,航空遥感数据采集方式正在加快从胶片型摄影向数字型摄影方向转变。20 世纪 90 年代初,德国 Zeiss、瑞士 Leica 等公司开始着手研发数字航空摄影系统,分别于 90 年代末期推出其首套航空测量型数字相机 DMC (Digital Mapping Camera) 和 ADS40 (Aerial Digital Sensor) (Francois Gervais, 2001)。其中,ADS40 航空数字相机采用 CCD (Charge Couple Device) 线阵扫描方式,主要由 3 条全色波段扫描 CCD (前视、垂直向下、后视) 和垂直向下的 3 条多光谱 CCD 线阵组成。全色波段的 3 条扫描线相互之间具有重叠度,可构成立体成像。DMC 航空数字相机则采用面阵 CCD 组合,并带有前移补偿改善影像质量 (Manfred Ehlers, 2005; Michael Cramer, 2005)。随后,奥地利 Vexcel 公司、德国的 Zeiss Jena 公司也先后推出 UCD (Ultra Camera Device) 面阵航空测量型数字相机和 JAS150 线阵航空测量型数字相机。此外,还有德国宇航中心 (DLR) 的 HRSC - A/AX 等。与线阵数字相机相比,面阵 CCD 的优点是具有较好的几何精度,数据可直接应用于现有的数字摄影测量系统,为后期的数据处理提供了便利。

航空专业型小像幅数字相机主要以德国 IGI 公司的 DigiCam14k/22k/39k、KODAK DCS Pro、瑞典的哈苏 (Hasselbald) 相机和德国禄莱为主,均采用面阵结构,像素介于 $(3 \times 10^3 \sim 6 \times 10^3) \times (4 \times 10^3 \sim 8 \times 10^3)$ 之间,像幅仅为 3 cm × 5 cm 左右。

航空数码相机可获取更加清晰的数字影像,但是其像幅较传统框幅式相机小;在同等条件下,为完成像片定向需要比框幅式相机更多的地面控制点。因此,采用先进对地定位手段以减少对地面控制的依赖,是航空数字相机得以大规模产业化应用的前提。

3. 机载激光扫描 LIDAR

机载激光扫描系统主要由 POS、激光扫描仪、电视摄像机组成。通过接收反射激光束可以比较理想地获取地表、植被及人工建筑物等的高程信息。扫描仪的位置和姿态由 POS 测定,光程由激光束的往返时间及扫描角确定。获取的扫描信息处理后即可获得测区 DEM/DTM 及地表、植被、森林表面模型 DSM,这些模型数据可广泛应用于国土资源调查、洪水等灾害的监测与评估、城市三维景观重建、海洋调查等领域。

LIDAR 系统的发展可追溯到 20 世纪 70 年代。以美国、加拿大、瑞典等海洋大国代表的西方先进国家为满足浅海测深和研究水下地形的需要,开发了发射波长在 540 nm 左右的绿激光航空激光测深技术。当飞行高度为 200 ~ 800 m、时速 40 ~ 200 km/h 时,测深密度为 4 m × 4 m,水体清澈时最大测深可达 70 m,水平定位精度为 ±3 m,测深精度 ±0.15 m。该系统是声呐测深系统的重要补充,在大江大河水下航道探测及沿海大陆架浅海测深领域

有广阔的应用前景 (Tim Werster, 1999)。

经过 10 余年的试验研究, 机载激光雷达技术取得了很大进展 (Aloysius Wehretal, 1999; Karl Kraus, 2003)。特别是近几年来, 由于后续处理软件开发得日趋成熟, 使之在遥感数据获取手段中占有越来越重要的地位。最具代表性的商用系统包括: 加拿大 Optech 公司的 ALTM3100EA 与 SHOALS1000、瑞士 Leica 公司的 ALS40/50-II 和德国公司 IGI 的 LiteMapper5600/2800_5 等。

4. 航空高光谱

20 世纪 80 年代以来, 成像光谱技术经历了从概念模型设计、仪器研制、关键技术攻关及产业化应用等发展阶段, 已经成为目前对地观测的主要高技术之一, 并在世界各国和一些区域联盟的科技发展计划中居于重要地位。

自 1981 年多光谱红外辐射计 (SMIRR: Multi-Spectral Infrared Radiometer) 搭载在美国“哥伦比亚”号航天飞机进行试验飞行, 1982 年美国喷气推进实验室研制成功第一台航空成像光谱仪 (AIS: Airborne Imaging Spectrometer) 以来, 成像光谱技术得到快速发展。目前, 国内外已研发了多种机载成像光谱仪, 具有代表性的有美国的 AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)、SEBASS、Probe-1, 加拿大的 CASI, 意大利的 MIVIS, 澳大利亚的 HyMap (Hyperspectral Mapper), 中国的 OMIS (Operation Modulate Imaging Spectrometer) 和 PHI (Pushroom Hyperspectral Imager) 等, 其中 HyMap 机载成像光谱仪已在美国、南非、中国等地方开展了国际性商业运营 (Robert O. Green, 1998)。

20 年多来, 以美国、加拿大和澳大利亚为代表的发达国家开展了大量航空成像光谱飞行试验、数据处理、模型研究和应用示范工作。在数据获取、辐射定标、光谱重建、数据处理、地物识别等方面取得了很大的进步, 研发了多种辐射校正、光谱重建、波形分析、光谱识别、定量反演等方法 (Golen Giser, 1996)。与此同时, 开发了一些专用处理软件, 如美国地质调查局 USGS (United States Geological Survey) 的 Tetracorder 等, 一些商业图像处理系统如 ER Mapper、ENVI、PCI 等也都开发了成像光谱数据专用处理模块 (Kruse F. A., 1993)。在地质制图、固体矿产、油气勘查、大气探测、植物长势监测和农业估产、环境监测、海水有机物探测等方面都取得了明显成效。在矿产与能源勘查领域, 航空成像光谱技术越来越受到各大矿业公司的重视, 已逐步替代多光谱遥感, 与 POS 系统集成形成了集数据采集、处理和应用于一体的商业运营能力, 使成像光谱技术进入到资源勘查前期的主流程序, 在缩小找矿靶区、提高勘查效率和减低勘查风险方面显示出巨大的应用潜力。

5. 无人机遥感

无人机航空遥感具有机动快速、成本低、操作简单、适合于危险区域空中监测和救援指挥等特点, 被作为一种理想的飞行平台而广泛应用于军事和民用的相关领域。尤其是 21 世纪初以来, 许多国家将无人机系统的研究、开发和应用置于优先发展的地位。体积小、重量轻、遥感精度高的新型传感器的不断问世, 也使无人机系统的用途迅速拓展。其中, 美国的 Predator 和 Global Hawk、日本的 RMAX-II、法国的 Eagle 2、以色列的 Hunter、德国的 DigiFly、中国的 UAVRS-II 等无人机遥感系统具有一定的代表性。

无人机遥感系统由遥感设备 (小型 CCD 数码相机或其他传感器) 及其控制系统、无人驾驶飞行平台 (无人飞机和飞艇)、飞行控制系统、无线电遥测遥控系统和遥感数据处

理系统等 5 部分组成。系统的技术优势主要体现在机动快速的响应能力、性能优异、操作简单、可靠、遥感影像数据的高空间分辨率能力和低成本的投入。

随着系统功能的不断完善,无人机遥感系统可广泛应用于土地利用动态监测、矿产资源勘查、地质环境与灾情监测、地形图更新与地籍测量、海洋资源与环境监测以及农业、林业、水利、交通等部门。尤其对车船无法到达地带的环境监测、有毒地区的污染监测、灾情监测及救援指挥等突发事件,该遥感系统具有快速响应、实时勘查的独特优势。

我国无人机遥感虽然起步较晚,但已取得了可喜的进展。可以预见,无人机遥感系统的发展将增强我国对地观测的综合技术能力,在国土资源调查与监测、灾害调查与评估、城乡规划建设等领域的信息获取与管理工作中发挥重要作用。

6. 机载 POS 系统

随着数字传感器技术的发展,对航空遥感对地定位技术提出了新的要求。基于 DGPS/IMU 集成的 POS 定位定向技术正是在这一背景下得到充分重视和发展的。POS 系统集成 DGPS (Differential GPS) 技术和惯性导航系统 (Inertial Navigation System) 技术于一体,可获取运动载体的空间位置和三轴姿态信息,满足飞机、轮船和导弹的导航定位需求。与单一 GPS 导航系统或惯导系统相比,POS 系统具有最优的导航定位能力。在单一系统中,GPS 不能直接测定传感器姿态信息,并且数据输出频率低,在高动态环境中可靠性较差;惯性导航测量单元 IMU 虽可获得包括位置、速度、姿态、加速度和角速度在内的全部导航参数,但存在着误差随时间迅速积累增长的缺陷。GPS 与 IMU 的组合可以取长补短:GPS 数据可在运动过程中频繁修正 IMU 以控制其误差的累计;同时短期内高精度的 IMU 定位结果可很好解决 GPS 在高动态环境中的信号失锁和周跳问题。因此,GPS/IMU 组合定位系统(亦称 POS 系统)可以连续提供传感器高精度的位置和姿态参数,以实现遥感影像的直接地理定位。

20 世纪 90 年代初,加拿大卡尔加里大学和美国俄亥俄州立大学的 Schwarz 等研究人员首次提出并试验了直接定向法 DG (Direct Georeferencing) 解决摄影测量核心问题。之后,许多科研机构、企业和学者对 DGPS/IMU 集成技术在航空摄影测量中的应用开展了大量试验和研究工作(Klaus - peter Schwarz, 1996; Michael Cramer 1996)。1996 年加拿大 Applanix 公司和德国 IGI 公司先后推出了商用 POS 系统 POS/AV_510 和 AEROCtrl IId,使 DGPS/IMU 集成系统的高端应用成为可能。2000 ~ 2001 年,OEEPE (The European Organisation for Experimental Photogrammetric Research) 组织 13 个摄影测量与遥感机构对两套商用 POS 系统进行了试验测试,测试结果表明:引入 POS 观测值,利用少量的地面控制或无需地面控制,采用直接定向(DG)或集成定向(ISO)数据处理方法获取的定向结果,与传统空中三角测量方法获取的定向结果基本相当(Cramer M., 2000; Christian Heipke, 2001),从而引起了摄影测量与遥感领域专家、学者的极大关注。目前,开展基于 POS 系统的多传感器集成理论与方法、基于 POS 系统数据的航空遥感对地目标精确定位等方面的相关研究是国际摄影测量界的一个研究热点(李德仁等, 2003)。

二、机载 POS 直接地理定位技术国内外研究现状

1. 国外研究状况

在 POS 系统辅助航空摄影的两种方法中,直接地理定位方法由于具有显著的优势而

占据更为重要的地位。直接地理定位方法是 20 世纪 80 年代末 90 年代初，由加拿大卡尔加里大学和美国俄亥俄州立大学在当时惯性测量装置（IMU）的基础上提出来的。即利用高精度差分 GPS 和惯性测量装置，在航空摄影的同时获得差分 GPS（DGPS）数据和姿态数据，通过事后 GPS 差分处理及姿态测量数据处理，获得摄影时刻航摄仪精确位置坐标和姿态，进而得到每张像片的外方位元素。但由于当时 IMU 发展处于初期阶段，其体积小、噪声大，难以满足摄影测量的精度要求。之后，随着军事上小 IMU 以及 DGPS 技术的发展，逐渐证明了 DG 的可行性。

1993 年 Schwarz 等人提出了应用 GPS/IMU 集成技术解决摄影测量问题（Schwarz et al., 1993）之后，许多大学机构（如德国斯图加特大学、加拿大的卡尔加里大学等）、公司和学者对 GPS/IMU 集成技术在航空摄影测量中应用开展了大量试验分析研究工作。从那时起，航空摄影测量工作者开始采用 POS 技术来直接测量每张影像的外方位元素以辅助或取代空三。这种显著降低任务后处理费用的能力是 DG 的核心价值。

商用 POS 系统推出后，国际上许多科研机构均开展了机载 POS 直接地理定位方法的试验研究。其中，较具代表性的试验研究工作主要包括：

（1）1997 年西班牙 ICC 学院两次进行了 DG 试验，试验结果见表 1-1；

表 1-1 ICC 学院 DG 试验结果

测区及航摄比例尺	X/m	Y/m	H/m
Linyola (1:32000)	0.58	0.65	0.67
Guissona (1:5000)	0.12	0.22	0.13

（2）1999 年 IFP 学院利用 IGI 公司的 AEROCtrl - IID 分别进行了摄影比例尺为 1:13000 和 1:6500 的测试试验，所达到的精度见表 1-2；

表 1-2 IFP 学院的试验结果

$\phi, \omega / (^{\circ})$	$\kappa / (^{\circ})$	XY_{RMS}/cm	Z_{RMS}/cm
0.002 ~ 0.003	0.005 ~ 0.007	5 ~ 15	8 ~ 18

（3）西班牙 ICC 学院于 2000 年下半年进行了 1:60000 航摄比例尺试验，得到的结论是：直接定位的方式可以实际应用，但必须开展检校场航摄飞行来确定用于所需参数。

（4）2000 ~ 2001 年，欧洲摄影测量实验研究组织（OEEPE）组织 13 个摄影测量与遥感机构对 Applanix POS/AV 510 及 IGI AEROCtrl - IID 两套商用 POS 系统进行了较全面的试验测试分析、数据解算和精度对比实验（实验分别采用空三、直接定向法 DG 以及 DGPS /IMU 辅助空三方法 ISO 进行比较）。直接地理定位的精度如表 1-3 所示。

参照航空摄影测量外业规范（表 1-4）上述试验成果精度均达到了相应比例尺的成图规范要求。

2. 国内研究状况

在国内，机载 POS 系统直接地理定位技术的研究表现为以下特点：

表 1-3 OEEPE 测试机载 POS 系统直接地理定位精度

POS 系统	航片数	RMS/cm			MAX/cm		
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
Applanix POS/AV	36	6.4	9.0	15.7	20.0	31.9	37.1
AEROCtrl	36	7.5	12.1	12.1	19.3	37.8	34.4

注：摄影比例尺 1:13000。

表 1-4 航空摄影测量外业规范

比例尺	平面中误差/m	高程中误差/m
1:1000	0.6	0.2
1:2000	1.2	0.5
1:5000	2.5	1.2

(1) 基本处于设备引进、试验研究并逐步应用于生产的阶段。2002 年，中国测绘科学研究院和中国国土资源航空物探遥感中心相继从德国 IGI 公司引进了 AEROCtrl - IID 系统，并开展了试验研究。其中，航遥中心以国土资源大调查项目为依托，分别在河南安阳和甘肃酒泉获取了两个试验区的机载 POS 航空遥感数据，并且对直接地理定位方法进行了研究，取得了初步成果。随后，中国科学院遥感应用研究所和武汉大学分别引进加拿大 APPLANIX 公司的 POS/AV 510 系统，也在不同地区开展了试验飞行和技术研究。

(2) 机载 POS 系统数据获取和后期数据处理的作业流程尚未形成统一的标准规范。目前，尽管国内多家单位已引进了包括德国 IGI 公司的 AEROCtrl - IID 和加拿大 APPLANIX 公司的 POS/AV 510 等 POS 系统，并开展了初步的实验研究；受研究经费和能力等条件所限，尚未开展系统的试验研究，在 POS 系统和航摄仪的集成方法、航空摄影规范、检校场的布设及飞行方案、基站的布设、后期数据处理等工作方法和技术指标方面尚未形成统一的标准。

(3) 缺乏相关的数据处理软件。机载 POS 直接地理定位数据处理工作包括 POS 观测值的解算、检校场空中三角测量、系统误差检校、测区 POS 观测值改正、前方交会和精度评定等。数据处理过程中需要计算机软件支持。目前，国内外尚无专门针对机载 POS 直接地理定位方法的数据处理软件。

3. 研究程度评价

从 20 世纪 90 年代末期开始，许多学者利用两种商用的 POS 系统在摄影测量领域开展了多次实验研究，对机载 POS 系统直接地理定位和集成传感器定向的技术方法进行探讨。主要结论认为：

(1) 采用 POS 系统进行直接对地定位将对传统的光束法平差发起挑战。机载 POS 系统测定的定位定向参数能够应用于正射影像及其他不太严格的应用领域实现直接地理定位。但由于单个模型的上下视差大，在测图方面的应用可能存在问题 (Heipke et al., 2001)。

(2) POS 系统获取的姿态数据能够增强摄影测量区域网的几何结构，应用于带状测图和单模型定向；有了 POS 系统测定的定位定向参数，可显著减少自动空中三角测量中