

密级:\_\_\_\_\_



**中国科学院大学**  
University of Chinese Academy of Sciences

# 硕士学位论文

旋翼无人机成像光谱数据几何处理技术研究

作者姓名: 李雪轲

指导教师: 王晋年 研究员 中国科学院遥感与数字地球研究所

张立福 研究员 中国科学院遥感与数字地球研究所

学位类别: 理学硕士

学科专业: 地图学与地理信息系统

培养单位: 中国科学院遥感与数字地球研究所

2014 年 5 月

**Research on Geometric Processing Technology of**  
**Rotary-wing Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imaging**  
**Spectrometer Data**

**By**  
**Xueke Li**

**A Dissertation Submitted to**  
**University of Chinese Academy of Sciences**  
**In partial fulfillment of the requirement**  
**For the degree of**  
**Master of Philosophy**

**In**  
**Cartography and Geographical Information System**  
**Institute of Remote Sensing and Digital Earth,**  
**Chinese Academy of Sciences**

**May, 2014**

**中国科学院遥感与数字地球研究所**  
**学位论文原创性声明和使用授权说明**

**原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：                    日期：    年    月    日

**学位论文使用授权说明**

本人在导师指导下完成的论文，知识产权归属中国科学院遥感与数字地球研究所。

本人完全了解中国科学院遥感与数字地球研究所关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意研究所保存或向国家有关部门及机构送交论文的印刷版和电子版，允许论文被查阅和借阅；同意授权研究所采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存和汇编本学位论文。

本人保证毕业后，以本论文数据和资料发表论文（著作）或使用论文工作成果时，第一署名单位为中国科学院遥感与数字地球研究所，并征得导师同意。

保密论文在解密后遵守此规定。

论文作者签名：                    导师签名：

日期：    年    月    日

## 课题来源和经费支持

本论文的研究得到环保公益性行业科研专项“环境污染事故航空遥感应急监测关键技术研究与应用”(2011467071) 的资助。

## 摘 要

长期以来,传统的以卫星遥感和载人航空遥感为手段的遥感数据获取技术,由于空间分辨率较低、重访周期较长、时效性较差、受空域管制等因素的制约,在应对各种突发自然灾害和日常动态监测任务时,很难提供及时有效的信息。无人机遥感技术的发展很好地解决了这一难题。但由于无人机平台不可避免地会出现抖动、倾斜等情况,姿态的变化导致获取的影像产生旋转、投影变形等畸变,因此在对无人机遥感影像进行分析和应用之前,首先需要对原始影像进行几何校正。目前,国内外学者对无人机遥感平台上搭载航空摄影相机或航空多光谱数字相机获取的 RGB 影像或多光谱影像进行几何处理的技术已日臻成熟,但对于旋翼无人机遥感平台上搭载成像光谱系统几何处理技术的研究还相对较少。本文针对旋翼无人机成像光谱系统,提出了一套完整的几何处理流程,并通过航空成像光谱系统(Aerial Imaging Spectrometer System, AISS)获取的高光谱数据对几何处理流程的可行性进行了实施和验证,初步形成了数据获取、数据预处理、几何处理方法选取及精度评价的几何处理模式,这为旋翼无人机成像光谱影像几何处理的研究提供了一定的参考标准。本文的主要研究工作包括以下几个方面:

- (1) 介绍了旋翼无人机遥感系统的组成,并利用研制的 AISS 开展飞行试验,该光谱系统配套了一系列完善的数据采集与存储系统,满足轻量化设计、传输速度快、海量数据存储的需求。
- (2) 在对成像光谱系统的成像几何原理进行深入分析后,针对旋翼无人机遥感平台,分别以系统性几何变形和非系统性几何变形为切入点,通过建立数学模型,定性地探讨了不同类型畸变对旋翼无人机遥感影像上所成像点与对应地面点之间关系的影响。
- (3) 提出了一套完整的基于旋翼无人机成像光谱系统的几何处理流程,针对不同的辅助数据集类型组合,给出了两种基于旋翼无人机成像光谱系统的几何校正方法:基于控制点的近似几何校正和基于 POS 数据的几何校正。基于控制点的近似几何校正流程中,在满足选取准则、选取方法来获取地面控制点的前提下,分析比较了剔除错误控制点的两种检测技术,并根据实验数据的特点,选取合适的错误控制点检测方法,研究表明,该方法能够有效剔除

错误控制点，提高几何校正精度，并保障了所构建控制点数据库的精确性，为研究区域几何校正控制点自动提取提供了有力的支持；基于 POS 数据的几何校正流程中，针对间接法最佳扫描行的确定提出了两种快速搜索方法，并根据试验数据的特点，选取最佳搜索策略，有效提高了搜索效率和准确性。

**关键词：**无人机遥感；旋翼无人机；成像光谱数据；几何校正

## Abstract

For a long time, using traditional technology to obtain remote sensing data such as satellite-based or manned space-based fails to provide timely and effective information when it comes to sudden natural disasters or dynamic monitoring of daily tasks, which roots in its low spatial resolution, long revisit cycle, time-poor, airspace control and so forth. Fortunately, this problem has been addressed by the arise of unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing. However, the UAV platform will inevitably result in tilting, shaking which leads to rotation and projection deformation in the acquired image, thus geometric correction is needed before analyzing and applying the UAV remote sensing data. At present, research on the geometric correction technology of UAV onboard aerial photography and aerial multispectral camera has been sophisticated from home and abroad, while relatively few studies focuses on the geometry processing of the rotary-wing UAV platform equipped with imaging spectrometer system. This thesis proposes a set of comprehensive geometric processing procedure aimed at rotary-wing UAV imaging spectrometer system. The feasibility of this process was implemented and verified through hyperspectral data which is attained by aerial imaging spectrometer system (AISS). An initial workflow of data acquisition, data preprocessing, selection of geometric approach and accuracy assessment of rectification results was formed, which provides a reference standard for the geometry of rotary-wing UAV imaging spectrometer system. The main work of this paper can be deduced as follows:

- (1) Describe the composition of the rotary-wing UAV remote sensing systems, and the flight tests was conducted using the developed AISS, which equipped with a series of comprehensive systems including data acquisition and storage to meet the high-speed transmission , massive data, and light-weight design requirements.
- (2) Analyze the imaging geometric principles of imaging spectrometer system, then specific to the rotary-wing UAV remote sensing platforms, design the mathematical model to qualitatively explore the impacts of systematic and

non-systematic geometric distortion on the rotary-wing UAV remote sensing image and its corresponding ground points.

- (3) Propose two types of geometric correction methods according to different combinations of ancillary data sets: control points based and POS data based. In the process of control points based approximate geometric correction, analysis and comparison of two kinds of detecting techniques to eliminate error control points was done under the premise of satisfying the selection criteria and selection method to get the ground control points. The appropriate error control point detection method was chosen in accord with the characteristics of the experimental data. The results show that the proposed method can effectively eliminate the error control points and improve the accuracy of geometric correction which guarantees the precision of the constructed control point database and provides strong support for automatic extraction of control point within this region; in the process of POS data based geometric correction, two fast search methods were proposed in the indirect method for determining the optimal scan lines, and according to the characteristics of the test data, best search strategy was selected to effectively improve the search efficiency and accuracy.

**Key words:** UAV remote sensing; Rotary-wing UAV; Imaging spectrometer data; Geometric correction



## 目 录

摘 要 .....	I
Abstract .....	III
目 录 .....	V
第一章 引言 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 研究现状 .....	2
1.2.1 无人机遥感发展与应用 .....	2
1.2.2 几何处理技术研究进展 .....	5
1.3 研究内容及论文结构 .....	6
第二章 旋翼无人机遥感系统 .....	9
2.1 无人机遥感系统 .....	9
2.2 旋翼无人机遥感系统 .....	12
2.2.1 旋翼无人机平台 .....	12
2.2.2 POS 系统 .....	13
2.2.3 成像光谱系统 .....	16
2.3 本章小结 .....	22
第三章 旋翼无人机遥感影像几何变形研究 .....	23
3.1 旋翼无人机遥感影像几何变形分析 .....	23
3.1.1 CCD 阵列误差的影响 .....	24
3.1.2 传感器外方位元素变化的影响,yu .....	25
3.1.3 地形起伏的影响 .....	25
3.1.4 地球曲率的影响 .....	27
3.1.5 地球自转的影响 .....	28
3.1.6 大气折射的影响 .....	28
3.2 遥感图像的几何纠正 .....	29
3.2.1 纠正方案 .....	29
3.2.2 几何纠正方法 .....	30
3.2.3 重采样方法 .....	34
3.3 本章小结 .....	36
第四章 旋翼无人机成像光谱影像几何处理技术 .....	37
4.1 旋翼无人机成像光谱影像几何处理关键技术分析 .....	37
4.1.1 地面控制点的选取 .....	37
4.1.2 控制点数据库的建立 .....	41
4.1.3 外方位元素解算 .....	43
4.2 旋翼无人机成像光谱系统数据获取与预处理 .....	47
4.2.1 数据获取 .....	47
4.2.2 数据预处理 .....	49
4.3 几何处理方法选取与精度评价 .....	51
4.3.1 基于控制点的近似几何校正 .....	51
4.3.2 基于 POS 数据的几何校正 .....	53

4.3.3 精度评价.....	58
4.4 实验与分析.....	59
4.4.1 研究区数据.....	60
4.4.2 基于控制点近似几何校正的结果与分析.....	61
4.4.3 基于 POS 数据几何校正的结果与分析.....	67
4.5 本章小结.....	69
第五章 结论与展望.....	70
5.1. 主要研究结论.....	70
5.2. 研究展望.....	71
参考文献.....	72
个人情况简介.....	75
一、 发表文章目录与研究成果.....	75
二、 硕士期间参与主要项目.....	75
致 谢.....	76

## 第一章 引言

### 1.1 研究背景及意义

国民经济的高速发展以及现代化社会生活的快节奏方式,促使与地学信息相关的各领域亟需高质量、海量的遥感数据。这有力推动了遥感技术不断提高自身数据获取能力,即影像的空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率<sup>[1]</sup>。无人机遥感以其具有很强的时间机动性,可以获取不同空间分辨率尤其是高分辨率影像,方便灵活调整航线、航高、航速和航摄角度,代价较低等优势<sup>[2]</sup>,很好地满足了对获取的影像高空间分辨率、高时间分辨率的需求,因此在精准农业、灾情快速评估、环境监测等方面得到广泛关注及应用。旋翼无人机的成功研制,更是增进了无人机遥感迈向新的领域。因其可以实现垂直起降、定点悬停和中慢速巡航飞行等固定翼无人机所不具备的飞行性能<sup>[3]</sup>,使得旋翼无人机在应对突发环境污染事件、自然灾害应急等方面具有明显的技术优势。

另一方面,成像光谱技术的发展,使得在获取目标地物空间信息的同时,还能够得到每个像元在数十个至数百个连续光谱波段上的辐亮度频谱。与传统的多光谱遥感相比,成像光谱遥感获取的频谱是连续的,有重叠的,因此不会因为存在间隔而遗漏探测不到精细信息<sup>[4]</sup>。成像光谱技术很好地将图像维信息与光谱维信息融为一体,实现高光谱分辨率上的图谱合一<sup>[5]</sup>。

目前,将成像光谱技术应用于旋翼无人机平台进行航空摄影与对地观测,达到真正意义上的高空间分辨率、高光谱分辨率和高时间分辨率的研究仍处于初级阶段,对旋翼无人机成像光谱数据几何校正的研究更是少之又少。本文基于旋翼无人机成像光谱系统,通过分析其几何畸变产生的原因及对获取影像产生的变形效果,针对不同的辅助数据集类型,提出了一套完整的几何处理流程,并通过航空成像光谱系统(Aerial Imaging Spectrometer System, AISS)获取的高光谱数据,对几何处理技术流程进行了实施与验证。本文研究为基于旋翼无人机成像光谱数据几何处理技术的研究提供了一定的参考标准。

## 1.2 研究现状

### 1.2.1 无人机遥感发展与应用

无人机最早出现在第一次世界大战期间，早期的无人机主要作为军事上的靶机使用，之后逐渐扩展到侦察、作战及民用遥感领域。伴随计算机技术、通信技术的迅猛发展以及各种质量轻、体积小、数字化、探测精度高的新型传感器的相继问世，无人机的性能也不断提升，应用范围和领域迅速扩展<sup>[6]</sup>。图 1.1 显示了 2005-2013 年间无人机系统（Unmanned Aerial System, UAS）的发展变化，可以看出，从 2005 年至今，引用 UAS 的数量翻了两倍，这一增长速度同样也体现在民用/商用类型无人机平台，尤其是在 2012 年至 2013 年间。因此，UAS 在摄影测量与遥感领域的发展呈不断上升趋势<sup>[7]</sup>。

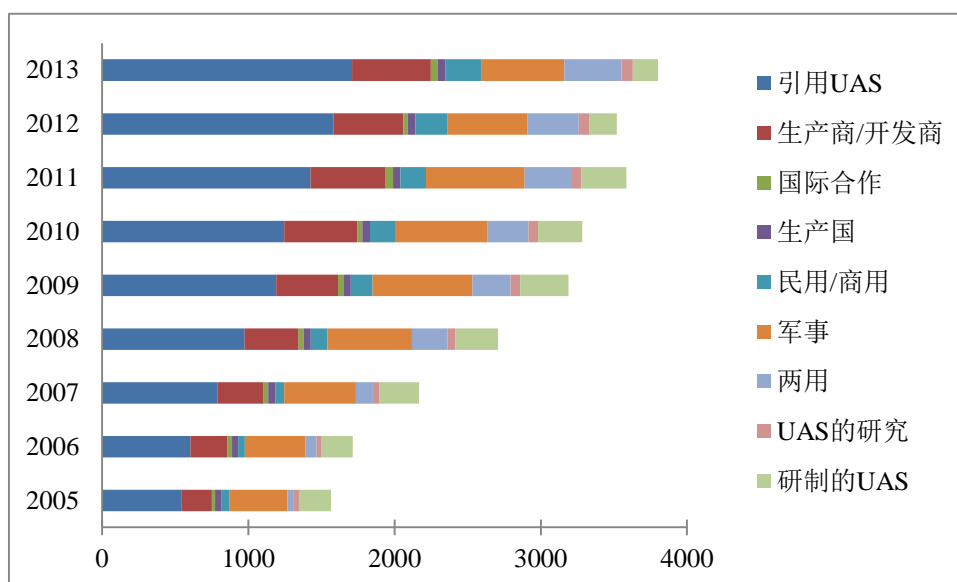


图 1.1 2005-2013 年间 UAS 发展变化

由上图可知，近年来无人机遥感技术在民用领域得到了广泛的潜在应用，如消防和紧急事务（事件响应协调、紧急救援）、能源行业和通讯网络（石油和天然气行业基础设施分布、电网、铁路网络监控）、农林渔业（作物喷粉、资源优化）、对地观测与遥感（气候监测、航空摄影、测量与制图、地震监测、污染监测）、通讯与广播（高空长航时平台作为代理卫星、中等高度长航时 UAS 用于通讯覆盖、相机平台）等<sup>[7]</sup>。限于篇幅，本文将主要针对无人机遥感技术在农林业、灾害、环境监测 3 大领域的国内外研究现状加以概述。

### (1) 农林业领域

无人机遥感在农林业领域的应用主要包括精细农业管理、植被生化参量研究、农情监测、森林火灾监测、森林资源调查等。

在国外, Johnson<sup>[8]</sup>利用无人机成像光谱系统实现对葡萄庄园的管理,通过在小型 UAV 上搭载 RGB 相机和推扫式微型成像光谱仪,获取了空间分辨率为 0.2m 的 RGB 影像以及包含 580 个波段的高光谱数据,将 RGB 影像用于创建地理数据库以呈现不同块田间的长势差异,高光谱数据则用来精细检测不同长势作物冠层反射率的差异; Zarco-Tejada<sup>[9]</sup>利用无人机上搭载的微型高光谱成像仪与热红外成像仪对荧光、温度、窄波段指数用于水分胁迫探测进行了研究, Zarco-Tejada<sup>[10]</sup>还仅使用无人机上搭载的微型高光谱成像仪数据分析了在自然光条件下,叶片尺度与影像尺度上净光合作用与稳态叶绿素荧光的关系; Rufino<sup>[11]</sup>将热红外成像仪,可见近红外高光谱传感器搭载于无线电控制的无人机模型,将所获取的数据用于森林火灾的监测。

在国内,王利民等<sup>[12]</sup>将 RICOH GXR A12 型相机装载于无人机平台用于农情遥感监测,研究结果表明无人机遥感在获取小范围、样方式分布的作物影像方面有着巨大的应用前景;张园等<sup>[13]</sup>利用无人机影像进行森林资源二类调查试验,证明了无人机遥感在森林病虫害监测、森林精确区划调查方面实施的可行性。



图 1.2 无人机遥感应用于农林业领域

### (2) 灾害领域

无人机遥感在灾害领域的应用主要包括滑坡调查、紧急事故搜救、灾情评估及灾后重建等。

在国外, Rau<sup>[14]</sup>利用无人机平台搭载的 Canon EOS 450D 数码相机,对莫拉克台风引起的山体滑坡进行探测、制图、建模、监测及灾害评估; van Persie<sup>[15]</sup>

通过装载于固定翼无人机上的视频摄像机获取实时的地理空间信息,为消防队危机管理系统提供第一手现场火灾事故资料;Molina<sup>[16]</sup>利用搭载视频摄像机和热红外相机的旋翼无人机平台,抵达人难以进入的高危地区进行搜救工作。

近些年来,无人机灾害监测应用于科学研究也越来越受到国内各相关部门的重视。周洁萍等<sup>[17]</sup>利用构建的无人机影像三维可视化系统,为汶川地震的救援、灾情评估、地震次生灾害防治及灾后重建工作等提供了快速有效的数据来源和分析手段;雷添杰等<sup>[18]</sup>分析了无人机遥感系统在低温雨雪冰冻灾害监测中的应用,指出利用“千里眼”微型无人机获取的高分辨率影像可进行灾情勘察和实时监测、现场救灾指挥和灾民搜索救援、灾情制图和受灾面积估算等。



图 1.3 无人机遥感应用于灾害领域

### (3) 环境调查与监测领域

无人机遥感在环境调查与监测领域的应用主要包括土壤侵蚀监测、牧场健康监测、大气监测、废弃物污染监测、外来物种入侵监测等。

国外无人机遥感应用于环境调查与监测领域已经比较成熟。d'Oleire-Oltmanns<sup>[19]</sup>采用固定翼无人机上搭载的数字相机,对研究区域进行多尺度航测,利用建立的 2D 和 3D 模型来定量评估土壤侵蚀;Rango<sup>[20]</sup>利用小型无人机对牧场健康进行评估和监测,克服了卫星遥感和有人机遥感空间分辨率低、时效性差的缺点;Corrigan<sup>[21]</sup>利用轻型无人机获取印度洋上空气溶胶垂直分布特性,通过与气溶胶监测网络所测得的气溶胶光学吸收深度进行比较,揭示了由于化石燃料及其他高温燃料源产生的黑炭的影响,海表面或远程测量往往不能反映气溶胶的垂直分布特性。

无人机遥感技术在我国环境监管中的应用虽然起步较晚,但发展迅速。台湾学者利用无人机拍摄的大比例尺影像,并结合 FORMOSAT2 遥感数据进行异常

信息的提取，识别出非法废弃堆积物，为环境污染监测提供可靠信息<sup>[22]</sup>；我国环境保护部卫星环境应用中心利用获取的无人机影像对广西北海沿岸外来物种“大米草”生物入侵状况进行监测，追踪调查外来物种对我国沿海红树林等生物多样性的影响。



图 1.4 无人机遥感用于环境调查与监测领域

### 1.2.2 几何处理技术研究进展

遥感图像几何处理技术从产生、发展到成熟运用的历程与摄影测量密不可分，摄影测量经历了模拟法、解析法和数字化三个发展阶段，解析摄影测量，尤其是数字摄影测量的出现对遥感图像几何处理技术的研究起到巨大的助力作用<sup>[23]</sup>。在此基础上发展起来的比较常用的几何校正方法有多项式法、共线方程法及建立在共线方程上的基于 POS 系统的航空遥感几何校正方法。林辉等<sup>[24]</sup>在 ER MAPPER 6.2 的支持下，采用不同次数的多项式模型，不同数目的控制点对航空像片进行几何纠正，并对纠正精度进行比较，认为在地形较平坦的地区，多项式模型具有较好的拟合精度；熊桢等<sup>[25]</sup>利用机载 GPS 数据对 OMIS 图像进行航线校正的研究，达到了较好的几何粗校正精度要求；刘军等<sup>[26]</sup>利用 INS/DGPS 系统解算的外方位元素对机载线阵推扫影像 PHI 进行几何校正，分析并解决了间接法几何纠正方案中地面点最佳曝光时刻的确定以及直接法纠正方案中如何进行目标定位、灰度重采样等问题；Ip<sup>[27]</sup>指出 IMU/DGPS 组合系统直接定位（Direct Georeferencing, DG）外方位元素参数的方法虽然优于传统的空中三角测量，但其精度还是受到 DGPS、IMU 等仪器定标误差的限制，将 DG 与空中三角测量结合形成集成传感器定位（Integrated Sensor Orientation, ISO）的方法可有效提高校正精度。

目前国内外学者对无人机遥感平台上搭载航空摄影相机或航空多光谱数码相机获取的 RGB 影像或多光谱影像进行几何校正的技术已日臻成熟。Lelong<sup>[28]</sup>先通过 50 个分布于影像框架里的差分 GPS 对参考影像进行几何校正,再在基准-待校正影像上选取 30 个地面控制点,采用二阶多项式拟合及双线性内插重采样的方法进行几何校正,校正结果的均方误差在 1-3 个像元内;Xiang<sup>[29]</sup>讨论了一种不需要地面控制点,无人机影像空中自动定位的方法,通过机上的导航数据和镜头畸变模型,对多光谱影像进行自动定位;张艳等<sup>[30]</sup>利用搭载于无人机的 GPS/INS 组合导航系统提供的导航解,针对线阵摆扫成像的成像特点,提出了线阵摆扫 CCD 影像的严格几何校正模型并设计了几何校正流程,通过多组实验验证了其正确性;刘异等<sup>[31]</sup>针对有畸变的无人机遥感影像,在无地面控制点的条件下提出了将分块提取的特征点作为基准伪控制点,进而对图像进行几何校正。徐豪等<sup>[3]</sup>对利用旋翼无人机遥感平台获取地面信息进行了初步探究,对其上搭载的 Canon EOS 30D 型数码相机获取的影像进行多项式几何纠正,结果显示所获得的田间信息精度满足精准农业的需求。由于国内外学者对于旋翼无人机遥感平台上搭载成像光谱系统几何处理技术的研究还相对较少,因此本文将基于旋翼无人机成像光谱数据提出一套完整的几何处理流程,为旋翼无人机成像光谱影像几何处理的研究提供了一定的参考标准。

### 1.3 研究内容及论文结构

本文将以 AISS 系统获取的高光谱数据为主要数据源,在剖析旋翼无人机成像光谱系统成像几何原理的基础上,深入研究几何变形影响因素,并建立数学模型分析其对旋翼无人机遥感影像上所成像点与对应地面点之间关系的影响;针对获取的不同辅助数据集类型,建立相应的几何校正模型,提出一套基于旋翼无人机成像光谱影像的几何处理流程;并利用所建立的几何校正模型对高光谱数据进行几何校正及精度评价。论文整体结构如图 1.5 所示:



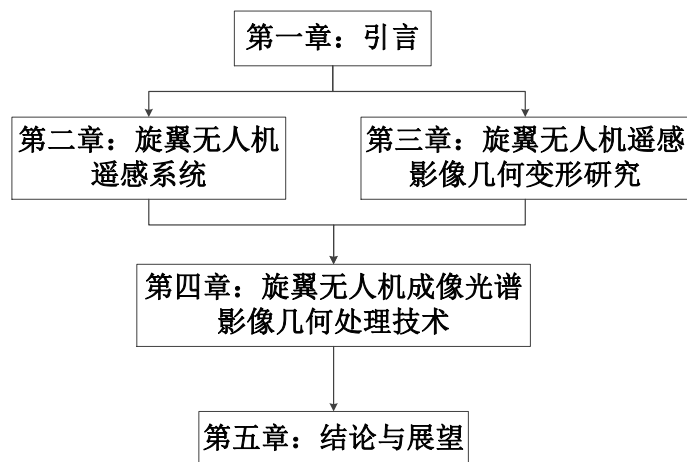


图 1.5 论文整体结构图

本论文的章节与内容安排如下：

- (1) 第一章，主要介绍了本文相关领域的研究背景与研究现状，包括无人机遥感发展与应用和几何处理技术的研究进展，并据此引出本论文的研究内容。
- (2) 第二章，剖析了旋翼无人机遥感系统的主要操作系统，包括 4 部分：旋翼无人机遥感平台及其在应用中相对于固定翼无人机遥感平台的优势；POS 系统组成及主要技术指标，POS 系统的工作原理与工作流程；高分相机系统的组成及主要技术指标；重点分析了旋翼无人机成像光谱系统构成中的分光系统、探测器、前置光学系统在满足设计要求下的主要技术指标及旋翼无人机成像光谱系统的成像几何原理，为旋翼无人机遥感影像几何变形分析奠定理论基础。
- (3) 第三章，探讨了旋翼无人机遥感影像几何变形的影响因素，包括 CCD 阵列误差的影响、传感器外方位元素变化的影响以及地形起伏、地球曲率、地球自转和大气折射所带来的影响；利用数学模型探讨这些影响因素对旋翼无人机遥感成像系统带来的误差，并在此基础上分别从纠正方案、几何纠正方法、重采样方法三个方面论述了传统遥感影像的几何纠正问题。
- (4) 第四章，针对旋翼无人机成像光谱数据，制定了一套详细完整的几何处理流程。综合考虑影像的几何畸变影响因素及获取的辅助数据集类型，建立相应的几何校正模型；对几何处理中的几个关键技术进行了分析；

以 AISS 飞行实验数据为例，对几何处理流程中的不同校正模型进行运用和实施，通过叠加检验、随机采样检验的方法评价了几何校正后的精度并对结果进行分析讨论。

- (5) 第五章，对本论文的研究成果进行总结，并提出了下一步研究工作应关注的重点。

## 第二章 旋翼无人机遥感系统

### 2.1 无人机遥感系统

无人机遥感系统由一系列子系统构成，包括无人驾驶飞行器、飞行导航与控制系统、任务载荷、数据传输系统、地面监控系统、发射与回收系统、其他系统接口以及户外保障装备等<sup>[32]</sup>（见图 2.1）。

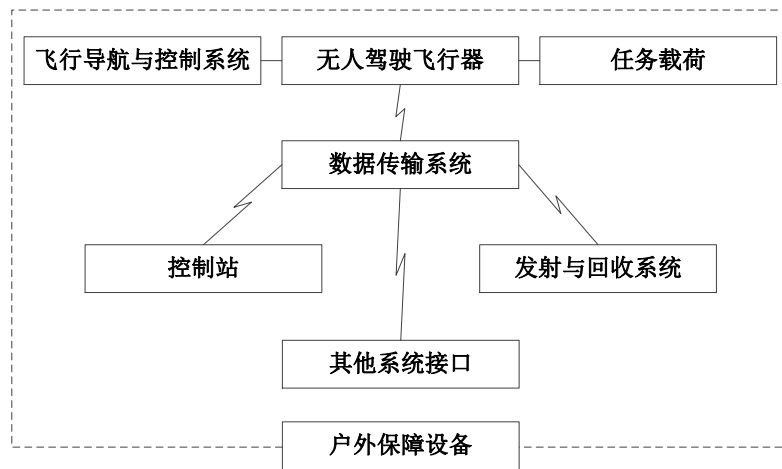


图 2.1 无人机遥感系统的组成

#### （1）无人驾驶飞行器

无人驾驶飞行器主要用于搭载任务载荷和飞行导航与控制系统，但也可携带用于完成任务的操作子系统如数据链路、稳定与控制设备、电池和燃料等。决定飞行器机型的主要因素包括操控范围、空速和任务所需的续航能力。操控范围和续航能力又决定了燃料负荷；速度的要求将决定使用轻于空气的飞行器，还是重于空气的固定翼、旋翼亦或是可转换的飞行配置。根据起降方式的不同可将机身配置分为水平起降（horizontal take-off and landing, HTOL）、垂直起降（vertical take-off and landing, VTOL）和混合类型（结合了 HTOL 和 VTOL 的特性），无人驾驶飞行器依据功能特性主要可以分为下列类型，如表 2.1 所示<sup>[32-34]</sup>。

表 2.1 无人驾驶飞行器类型

	类型	质量 (kg)	范围 (km)	飞行高度 (m)	续航 (hours)	实例	备注
长航时、远距离飞行器	高空长航时 (High-altitude, long-endurance, HALE)	>2000	>1000	20000	24-48	Global Hawk	
	中等高度长航时 (Medium-altitude, long-endurance, MALE)	1500	>500	14000	24-48	Predator	跑道起降
	固定翼 (Fixed-wing)	50-250	30-70	3000	3-6	Hunter RQ-5A UAV	—
中等距离飞行器	旋翼 (Rotary-wing)					Beijing Seagull	
近距离飞行器	非垂直起降 (Non-VTOL)	25-150	10-30	3000	2-4	Observer	—
	垂直起降 (VTOL)					Yamaha R Max	
小型无人机 (Mini-UAV, MUAV*)	—	<25/30/150	<10	150/250/300	<2	Bluebird Skylite	手持发射, 电脑控制
微型飞行器 (Micro air vehicle, MAV)	固定翼 (Fixed-wing)					WASP	飞行器尺
	旋翼 (Rotary-wing)	<5	<10	250	1	MICOR	寸≤
	扑翼 (Flapping-wing)					Microbat	150mm
纳米飞行器 (Nano air vehicles, NAV)	—	<0.005	—	—	—	Prox-Dynamics "Pico-flyer"	尺寸规格 <5cm
新型混合动力飞行器	—	—	—	—	—	Jet-lift Aircraft	垂直起降, 高速飞行

\* MUAV 类别中数目的多少因不同国家而不同

### （2） 飞行导航与控制系统

飞行导航与控制系统可实现对飞行姿态、航速、航向的精确控制，它包括惯性导航系统、GPS 接收机、飞控计算机、姿态陀螺、气压高度表、磁航向传感器、电源管理系统等<sup>[35]</sup>。飞行导航与控制系统性能的好坏将直接影响到获取数据的采集质量。目前大多数无人机都安装有自动驾驶仪，无人机升空后即可按预先设计的航线自主工作，无需人为控制；但在发生意外情况下（如发动机机械故障、无人机失速等），其他方式的导航（雷达跟踪、无线电跟踪和直接计算方位）可作为备用选项来监视无人机的工作状态。

### （3） 任务载荷

任务载荷是指获取遥感数据的设备及控制装置，一般被固定安装在无人机机身的任务仓内。这些设备及控制装置通常与飞行导航和控制系统一体化设计，具备任务载荷定点工作、等时间间隔工作和等距离间隔工作等功能。常见的任务载荷包括高清摄像仪、高分辨率 CCD 相机、成像光谱仪、热红外成像仪、复合气体检测仪等。

### （4） 数据传输系统

数据传输系统为控制站和飞行控制系统提供向上和向下的数据链路，通常以无线电频率作为传输媒介，也可通过激光光束或光学纤维传输。包括数据传输电台、天线、数据传输接口等。数据传输的有效距离一般要求大于 10km。

### （5） 控制站

通常基于地面或机上，控制站是人机界面操作的控制中心。操作员通过控制站向上链路对飞行器发出指令来控制飞行姿态及飞行器上搭载的各种任务载荷；同样，通过数据传输向下链路来接受飞行器返回的图像与信息。控制站也会与其他外部系统进行通讯，包括获取天气数据、传输网络中其他系统的信息、接收及汇报更高一级系统的信息等。

### （6） 发射与回收系统

发射与回收系统主要针对固定翼无人机设计，发射系统可为无人机在一定距离内加速到起飞速度提供保障，回收系统则确保无人机的安全着陆。根据场地的复杂程度，可以分为地面滑跑发射、滑跑回收和弹射发射、伞降回收两种。

### （7） 其他系统接口

当无人机系统无法单独完成任务时，则需要与其他外部系统（基于陆上、海上、空中的单元和星载卫星，或是其他无人机系统）合作形成信息系统网，外部接口便由此产生。通过接口可以获取不同系统的情报信息，整个系统便演化为系统集成。

#### （8） 户外保障设备

户外保障装备是指无人机遥感系统户外工作的运输装备和机械维护装备等，是无人机航摄作业的基本保障。

## 2.2 旋翼无人机遥感系统

旋翼无人机遥感系统的组成与上述大体类似，下面我们就自行集成的主要操作系统加以介绍，包括旋翼无人机平台、POS 系统和自带任务载荷，如图 2.2 所示。

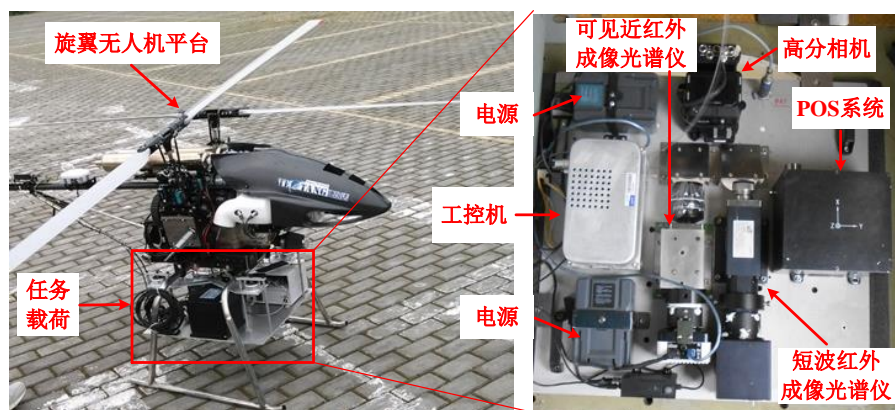


图 2.2 旋翼无人机遥感系统

### 2.2.1 旋翼无人机平台

目前，常用于摄影测量与遥感的无人机飞行器可分为固定翼无人机和旋翼无人机，如表 2.2 所示。从表中可以看出相对而言，旋翼无人机虽然质量大，但续航时间更长。另外，固定翼无人机只能通过动力系统和机翼滑行来实现起降和飞行<sup>[36]</sup>，其要求起降场地空旷、视野好，在场地受限时则无法发挥作用；而旋翼无人机对场地的要求不高，可以实现定点悬停、垂直起降、中慢速巡航飞行等功能，起降空间狭小、任务环境复杂的场合也能完成任务，在应对突发环境污染事件、自然灾害应急、执行高危任务等方面具有较明显的技术优势。因此，本文选择旋翼无人机平台作为研究对象。

表 2.2 目前常用于摄影测量与遥感的无人机飞行器示例

类别	生产商	重量(kg)	续航(h)
常见固定翼无人飞行器			
SwingletCAM	SenseFly	0.5	0.5
GeoScan101	GeoScan	2	1
UX5	Trimble	2.5	0.83
Pteryx	FotoMapy	5	2
Sirius I	MAVinci	3	0.91
Kahu	Skycam	4	2
常见旋翼无人机飞行器			
Geocopter	IGI	90	2
Scout B1-100	Aeroscout	75	1.5
R-MAX, type II	Yamaha	100	1

### 2.2.2 POS 系统

POS 系统采用惯性测量装置 (Inertial Measurement Unit, IMU) 和动态差分全球定位系统 (Difference Global Positioning System, DGPS) 紧组合的方式。如表 2.3 所示, DGPS 系统虽然可以测得传感器的位置和速率, 数据精度高且误差不会随时间而积累, 但其动态性能差、输出频率低, 无姿态测量功能, 且不易测得瞬间的快速变化; IMU 可以实现自主无信号传播, 具有定位和测速功能, 可快速获得传感器的瞬间移动信息, 但其测量误差会随着时间累积增加; IMU/DGPS 组合弥补了二者的不足, 综合获取两个系统的采集信息, 得到高精度的位置、姿态和速率数据<sup>[37]</sup>。

表 2.3 IMU 和 DGPS 主要差异比较

	优点	缺点
IMU	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 完全自主</li> <li>• 连续数据获取</li> <li>• 输出位置、姿态信息</li> <li>• 输出频率高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 传感器误差随时间迅速累积增加, 造成位置误差离散</li> </ul>
DGPS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高精度的位置和速率估计</li> <li>• 独立于时间的误差模型</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 动态性差 (易失锁), 产生空白轨迹</li> <li>• 输出频率低</li> <li>• 不能测量瞬间快速变化</li> <li>• 无姿态测量功能</li> </ul>
IMU/DGPS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 结合以上二者优点</li> <li>• 数据互补</li> <li>• GPS 修正 IMU 误差估计</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 需要精确的时间同步</li> </ul>

#### (1) POS 系统工作原理

POS 系统由 GPS 接收器, IMU 单元, 主控计算机系统 PCS 和后处理软件包四部分组成。其核心部件是集成的惯性导航算法软件, 它是由一系列独立的软件模块组成, 可以实时运行在 PCS 上, 也可以后处理时使用。它以 IMU 的误差方程为状态方程, 以 DGPS 的输出为观测向量, 通过 Kalman 滤波(Kalman Filtering, KF) 技术对状态误差作出最优估计<sup>[38]</sup>, 然后对系统进行校正使输出的数据兼备动态高精度和绝对高精度<sup>[26]</sup>。图 2.3 为 IMU/DGPS 组合导航与姿态测量系统的原理结构图, 表 2.4 是其主要技术指标。

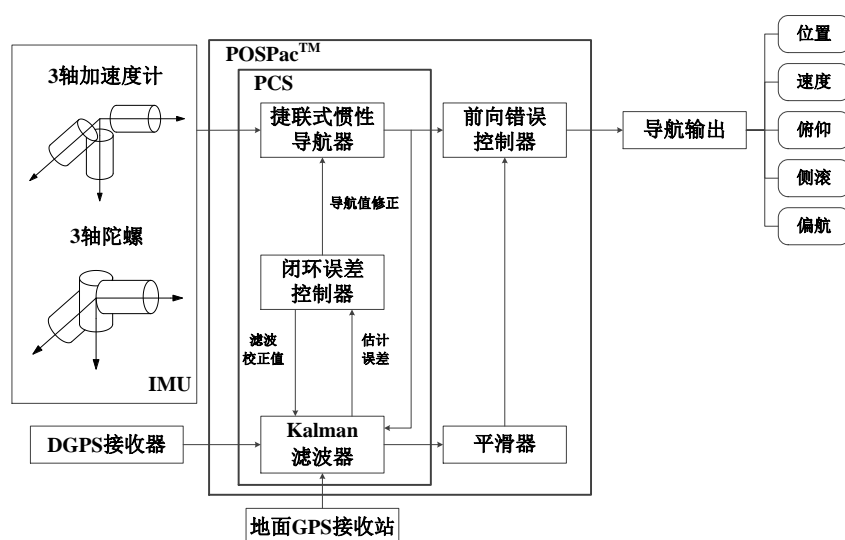


图 2.3 IMU/DGPS 组合导航与姿态测量系统原理图

表 2.4 IMU/DGPS 组合导航与姿态测量系统主要技术指标

测量范围	方位角	$0^{\circ} \sim 360^{\circ}$
	俯仰角	$\pm 75^{\circ}$
	滚动角	$\pm 180^{\circ}$
	角速率	$\pm 300\%$
	加速度	$\pm 10g$
	纬度	$\pm 85^{\circ}$
测量精度	航向 (GPS 有效)	$0.2^{\circ}$ (基线长度 2m、 $1\sigma$ )
	姿态 (GPS 有效)	$0.1^{\circ}$ ( $1\sigma$ )
	位置 (GPS 有效)	2m(CEP)、2cm+1ppm(CEP)(后差分)
	速度精度 (GPS 有效)	0.1m/s(rms)、( $1\sigma$ )

## (2) POS 系统工作流程

IMU/DGPS 组合导航与姿态测量系统的工作流程如图 2.4 所示。系统接通电源并自检成功后, 开始初始化, 等待 IMU 数据及两个 GPS 接收机的原始数据, 在 IMU 输出正常且两个 GPS 都定位后, 系统进行初始对准, 自动进入导航状态。在导航状态下, 系统将 GPS 位置、速度、航向作为参考, 利用自身敏感的三轴



角速度和三轴加速度，进行组合导航解算，实时解算载体的导航信息，并由导航信息输出接口输出。当 GPS 受到干扰时，系统将进入纯惯性导航状态。因此，为了保证 POS 系统和旋翼无人机航空遥感平台之间能够协调工作，工作频率不发生干扰，需要在进行飞行作业前对 POS 系统和旋翼无人机航空平台进行联调测试（见图 2.5）。

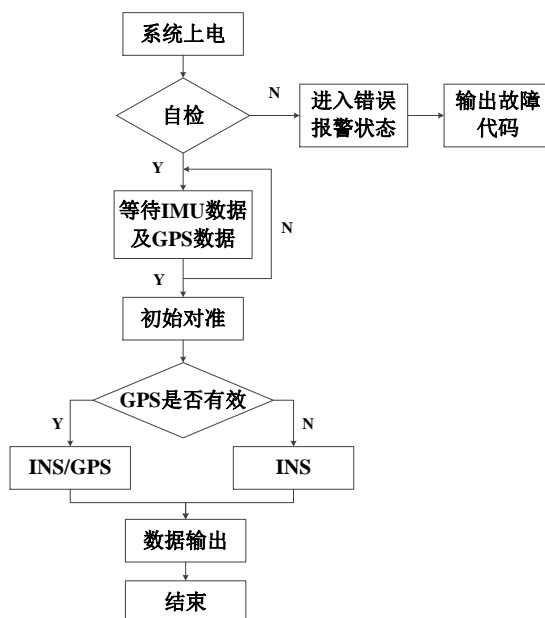


图 2.4 IMU/DGPS 组合导航与姿态测量系统工作流程

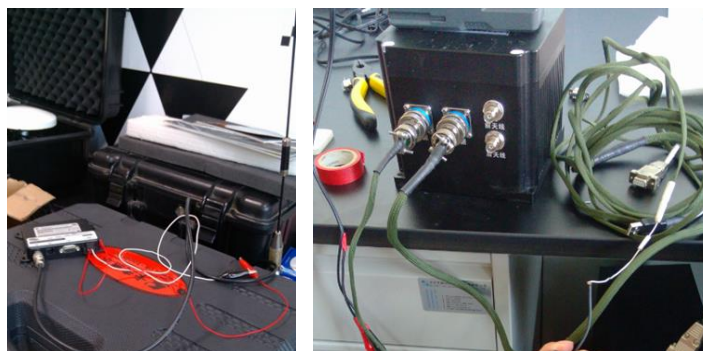


图 2.5 地面联调 POS 系统的主机和天线实物图

IMU/DGPS 数据文件的记录格式如表 2.5 所示。

表 2.5 IMU/DGPS 数据记录格式

序号	参数名称	类型	单位	分辨率
1	帧头	BYTE		
2	GPS 周	U16	周	1
3	GPS 秒	INT	秒	0.001
4	纬度	INT	°	$10^{-7}$

5	经度	INT	°	$10^{-7}$
6	高度	INT	m	0.001
7	航向角	U16	°	0.01
8	俯仰角	SHORT	°	0.01
9	滚动角	SHORT	°	0.01
10	东向速度	INT	m/s	0.001
11	北向速度	INT	m/s	0.001
12	天向速度	INT	m/s	0.001
13	X 轴角速度	FLOAT	rad/s	
14	Y 轴角速度	FLOAT	rad/s	
15	Z 轴角速度	FLOAT	rad/s	

### 2.2.3 成像光谱系统

旋翼无人机遥感系统的任务载荷主要包括高分相机系统和成像光谱系统，高分相机系统采用 Phase One IQ180，其性能参数如图 2.6 所示。



Phase One IQ180实物图

Phase One IQ180相机后背参数

仪器参数	指标参数
CCD有效尺寸	53.7×40.4mm
像素数	8000万
有效像素	10328×7760
像元尺寸	5.2um×5.2um
ISO	35-800
曝光时间	1/10.000s-2min
帧频	0.7帧/s
接口	支持USB3.0

图 2.6 Phase One IQ180 实物图及其相机指标参数

下面重点介绍旋翼无人机成像光谱系统，它是基于推扫式行扫描成像光谱辐射计原理，将平面反射镜采集的地面辐射能反射到反射镜组，再聚焦投射到焦平面的阵列探测元上，最终实现光电转换元件同时成像的过程（如图 2.7 所示）。

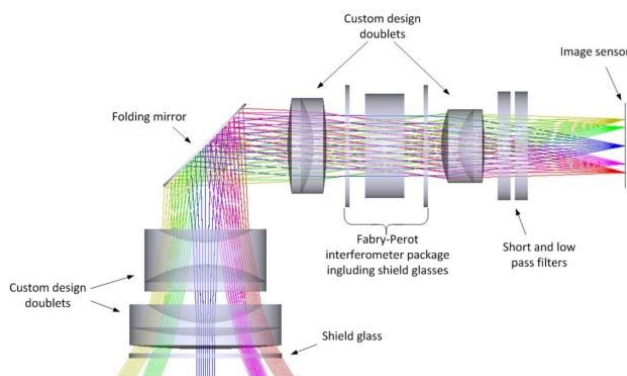


图 2.7 旋翼无人机成像光谱系统工作原理示意图<sup>[39]</sup>

旋翼无人机成像光谱系统的运动方向平行于旋翼无人机平台，通过平台的向前运动完成空间维的扫描，另外，通过棱镜和光栅的分光完成对光谱维的扫描。这样，二维地物和一维光谱维便形成了三维的图像立方体，如图 2.8 所示。

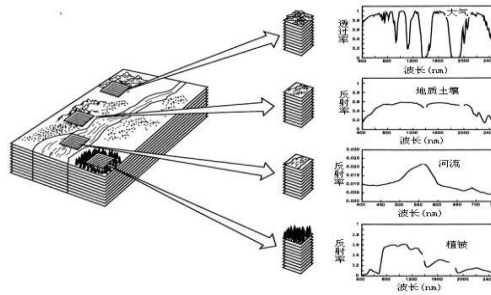


图 2.8 旋翼无人机成像光谱仪的图像结构

将旋翼无人机平台与成像光谱仪有机结合起来，采用基于旋翼无人机平台的低空高光谱新型遥感技术，可以准确地获取融合了地域空间特性和地物光谱特征的图谱合一数据，满足应用部门对高时间分辨率、高空间分辨率和高光谱分辨率遥感数据的需求。为实现对该技术的应用，成像光谱系统需满足表 2.6 所示的技术指标。

表 2.6 旋翼无人机成像光谱系统主要技术指标参数

仪器参数	指标参数
波段范围	可见近红外：400~1000nm 短波红外：850~2500nm
光谱分辨率	可见近红外：4~7nm 短波红外：8~12nm
光谱畸变 (smile)	<0.1 SSI
空间畸变 (keystone)	<0.1 GSD
帧频	>250 Hz
扫描视场	25°
信噪比	>300:1
实验室辐射定标精度	优于 5%

针对上述对旋翼无人机成像光谱系统的各项技术指标要求，以下分别从旋翼无人机成像光谱系统的分光系统、探测器、前置光学系统 3 个方面进行介绍。

#### (1) 分光系统

旋翼无人机成像光谱系统采用共轴的棱镜-全息透射光栅-棱镜 (prism-grating-prism, PGP) 的分光方式。选取 PGP 分光系统，主要在于其相对于传统的分光计具有以下优点：

- 1) 采用体位相透射全息光栅，能够达到很高的衍射效率（70%以上），并具较低的偏振方向相关特性；
- 2) 通过改变光栅周期、棱镜的顶角和两个棱镜的材料能够灵活地改变不同的波长范围；
- 3) 相较于色散棱镜分光计，PGP 分光计使用衍射光栅，能实现线性色散，具有较高的色散率；
- 4) 具备稳定和小型化的管状光机结构等。

PGP 分光计的关键组件是全息透射光栅，如图 2.9 所示。两片棱镜紧密粘合在衍射光栅两侧，其中光栅  $G$  与棱镜  $P_1$  之间安装了长波通截止滤光片  $LPF$ （孔径光阑的直径为  $D$ ）和光栅保护片  $G_1$ ，光栅  $G$  与棱镜  $P_2$  之间安装了光栅基片  $G_2$  和短波通截止滤光片  $SPF$ 。棱镜  $P_1$  的作用是利用其色散功能，使入射光谱中某一波长（不一定等于中心波长）以布拉格角入射到衍射光栅上，以提高系统衍射效率；棱镜  $P_2$  的作用是调整衍射光栅分光后的出射角度，使中心波长与光轴重合，长波和短波光束相对于光轴成中心对称，因此系统光轴基本为直线型，色散图像的空间和光谱维几乎没有象差，对入射光线的偏振特性不敏感<sup>[40]</sup>。

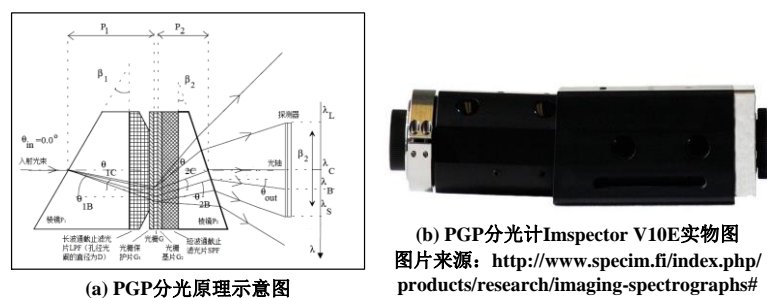


图 2.9 PGP 分光原理及实物图

## (2) 探测器

旋翼无人机可见/近红外 CCD 探测器用于获取被分光器件色散后的高光谱数据，设计时需要考虑以下几点：

- 1) 系统采用笔记本计算机作为数据采集终端，因此要求 CCD 相机采用数字接口，常见的高速数字接口有 USB2.0 及 IEEE1394，由于 IEEE1394 并没有完全普及，许多计算机中没有此端口，而 USB2.0 则是计算机的标

配接口，所以 CCD 相机应为 USB2.0 输出接口；

- 2) 为了降低 CCD 相机光敏元的暗电流，提高系统的信噪比，以及保证在不同温度环境下测量数据的稳定性和可比性，要求 CCD 相机具有制冷功能；
- 3) PGP 分光计的图像输出为 2/3"，因此相机的面阵 CCD 尺寸应匹配为 2/3"；
- 4) 分光计的机械接口为 C-Mount，为了便于安装，CCD 相机也应为 C-Mount 接口；
- 5) 为保证 CCD 相机图像采集与扫描机同步，相机需带有外触发功能。

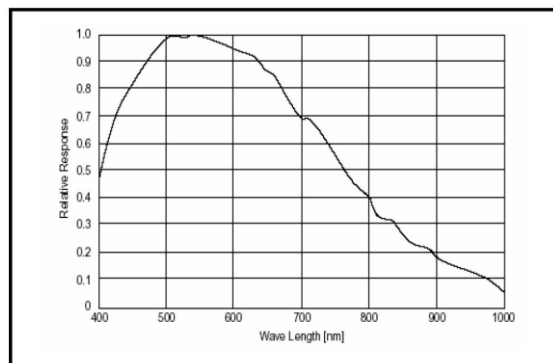
根据上述要求，可见近红外波段选用 Lumenera 公司的 INFINITY3-1 型相机如图 2.10 (a)，该相机 CCD 的响应范围为 400-1000nm，光谱响应函数如图 2.10 (b) 所示。CCD 相机采用 3×3 合并方式，在满足空间分辨率的同时，也提高了系统的灵敏度。合并后像元尺寸为  $19.35\mu\text{m} \times 19.35\mu\text{m}$ ，等效像元数为  $464 \times 346$ ，可实现每行空间分辨的像元数为 464，光谱通道数 346，具体指标参数如表 2.7 所示。

表 2.7 可见近红外 CCD 指标参数

仪器参数	指标参数
传感器	Sony ICX285 2/3"格式
响应范围	400-1000nm
有效像素	1392×1040, 140 万像素
像元数	464×346
帧频	15fps@1392×1040
相机输出	8 和 12 位
接口	USB2.0
像元尺寸	$19.35\mu\text{m} \times 19.35\mu\text{m}$
镜头接口	C-Mount
冷却方式	热电制冷



(a) 可见近红外相机实物图



(b) CCD光谱响应函数

图 2.10 可见近红外 CCD 相机及光谱响应率

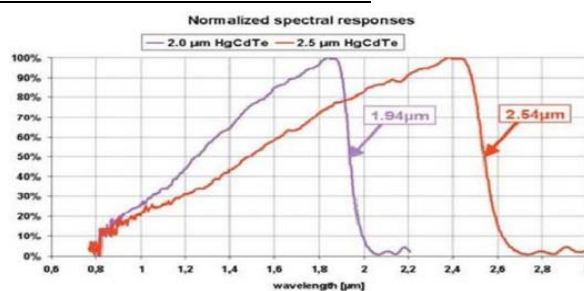
短波红外波段选用 XenIcs 公司 Xeva-2.5-320 型相机如图 2.11 (a)，该相机 CCD 的响应范围为 850-2500nm，光谱响应函数如图 2.11 (b) 所示，具体指标参数如表 2.8 所示。

表 2.8 短波红外 CCD 指标参数

仪器参数	指标参数
传感器	HgCdTe
响应范围	850-2500nm
像元数	320×256
帧频	100fps
相机输出	14 位
接口	USB2.0
像元尺寸	30um×30um
镜头接口	C-Mount
冷却方式	TE4 制冷



(a) 短波红外相机实物图



(b) CCD光谱响应函数

图 2.11 短波红外 CCD 相机及其光谱响应函数

### (3) 前置光学系统

前置光学系统用来将目标地物成像在分光系统入射狭缝上，其性能直接影响到旋翼无人机成像光谱系统的空间分辨率。前置光学系统性能参数的选择必须与 PGP 分光系统及 CCD 探测器的指标参数相匹配<sup>[41]</sup>。

为了获得最大的观测区域，应尽可能采用视场角较大的前置光学系统。但增大视场角与提高旋翼无人机成像光谱系统的空间分辨率相矛盾：视场角越大，焦距越短，从而空间分辨率越低。因此，合适的前置镜参数选取非常重要，其必须在满足空间分辨率要求的同时，获取最大的视场角。综合考虑以上因素选取的前置光学系统主要参数如表 2.9 所示。

表 2.9 前置光学系统主要参数

性能参数	可见近红外	短波红外
镜头焦距/mm	24	30

狭缝宽度/um	0.03	0.03
空间维像元尺寸/mm	14.2	14.2
总视场角/°	21	18.95
瞬时视场角/mrad	0.79	1.03
F 数	2.4	2

#### (4) 成像几何原理

由于旋翼无人机成像光谱影像中每一行上所有像元都是在同一时刻成像，因此在旁向（ $Y$  方向）上可认为是中心投影关系（见图 2.12）。在垂直成像条件下，旋翼无人机成像光谱影像可简化为线中心投影处理<sup>[42]</sup>，即同一扫描行上的像点具有相同的外方位元素，影像扫描行上像点与其对应地面真实点之间应满足以下共线方程：

$$\begin{cases} x=0=-f \frac{a_1(X-X_s)+b_1(Y-Y_s)+c_1(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \\ y=-f \frac{a_2(X-X_s)+b_2(Y-Y_s)+c_2(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos \varphi \cos \kappa - \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa \\ b_1 &= -\cos \varphi \sin \kappa - \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ c_1 &= -\sin \varphi \cos \omega \\ a_2 &= \cos \omega \sin \kappa \\ b_2 &= \cos \omega \cos \kappa \\ c_2 &= -\sin \omega \\ a_3 &= \sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa \\ b_3 &= -\sin \varphi \sin \kappa + \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ c_3 &= \cos \varphi \cos \omega \end{aligned} \right\}$$

其中， $(x, y)$  为像点的像平面坐标， $(X, Y, Z)$  为其对应地面点的大地坐标， $f$  为相机主距， $(X_s, Y_s, Z_s, \omega, \varphi, \kappa)$  表示传感器外方位元素。中心投影的共线方程为旋翼无人机遥感影像几何畸变的分析提供了理论基础。

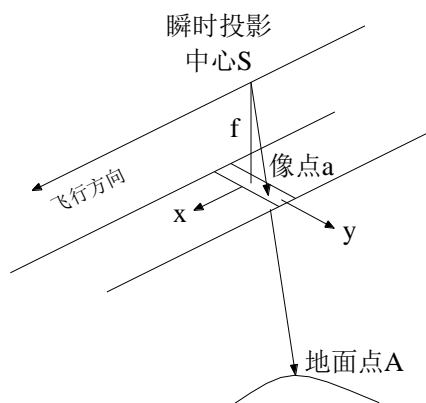


图 2.12 线中心投影

### 2.3 本章小结

本章介绍了旋翼无人机遥感系统的主要硬件组成，包括旋翼无人机遥感平台、POS 系统、高分相机系统及成像光谱系统。首先从无人机遥感系统的组成出发，概要介绍了各个分系统的构成及主要功能；然后针对旋翼无人机遥感系统，着重介绍了其主要操作系统，尤其是 POS 系统和成像光谱系统，分别就 POS 系统组成、工作原理及其工作流程，成像光谱系统的分光系统、探测器、前置光学系统及其成像几何原理加以详细阐述，通过分析成像光谱系统的成像原理，为后续旋翼无人机遥感影像几何畸变的研究奠定理论基础。







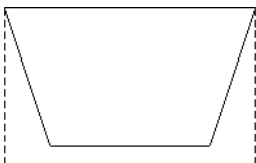
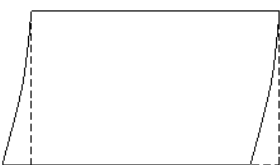
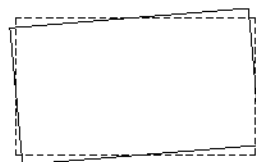
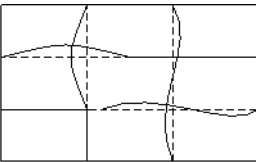
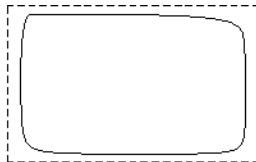
### 第三章 旋翼无人机遥感影像几何变形研究

#### 3.1 旋翼无人机遥感影像几何变形分析

旋翼无人机遥感影像上通常存在严重的几何变形，表现为目标地物的位置、方位、尺寸、形状等特征与地图坐标系中的表达不一致<sup>[43]</sup>。究其原因一般可分为系统性和非系统性两大类。系统性几何变形通常是有规律的、可以预测的，它对每幅影像产生的影响基本相同，可以通过模拟旋翼无人机遥感平台及传感器内部变形得到的数学公式或模型来测定。对于旋翼无人机成像光谱系统，由于采用 CCD 面阵相机作为传感器，因此不存在像主点偏移、胶片变形、压片不平等因成像几何形态所引起的影像变形，而主要考虑由 CCD 阵列误差所造成的变形。非系统性几何变形无规律可循，一般很难预测，包括平台不稳定引起的传感器位置误差、传感器姿态角误差以及地形起伏、地球曲率、大气密度差引起的光的折射等引起的误差。旋翼无人机几何变形的影响因素由表 3.1 给出。

表 3.1 旋翼无人机几何变形影响因素

几何变形类型			变形示意图
系 统 性	CCD 阵列误差		
非 系 统 性	传感器位置误差	$dX_s$	
		$dY_s$	
		$dZ_s$	

传感器姿态角误差	$d\varphi$	
	$d\omega$	
	$d\kappa$	
地形起伏		
地球的曲率		
地球的自转		没有变形
大气密度差引起的光的折射		非线性畸变

### 3.1.1 CCD 阵列误差的影响

旋翼无人机成像光谱仪的 CCD 探测器在生产过程中由于感光器件的排列偏差，会引入几何变形，如图 3.1 所示。

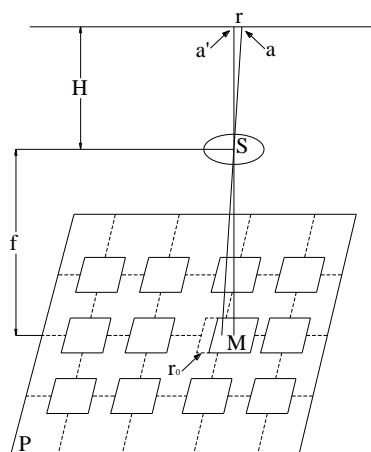


图 3.1 CCD 阵列误差引起的像点位移

上图中  $P$  表示 CCD 阵列平面，由于感光像元  $M$  存在  $r_0$  的位置偏移，导致所成影像中  $a'$  取代了正确像点  $a$ ，这在地面距离上将产生  $r$  的误差。根据相似原理，可以得到：

$$r = \frac{H}{f} r_0 \quad (3.1)$$

其中， $H$  为摄影物距。由公式 (3.1) 可以看出， $r$  的大小与 CCD 阵列偏差  $r_0$  成正比，与镜头焦距  $f$  成反比。

### 3.1.2 传感器外方位元素变化的影响

传感器外方位元素是指旋翼无人机遥感影像成像时的位置  $(X_s, Y_s, Z_s)$  及姿态角  $(\varphi, \omega, \kappa)$ 。传感器外方位元素相对于标准位置的变动会在影像上产生几何变形，这种变形可利用共线方程以像点坐标误差的方式表示。对于旋翼无人机成像光谱系统共线方程表达式 (2.1)，在垂直成像条件下， $\varphi = \omega = \kappa \approx 0$ ，因此共线方程中姿态角函数矩阵可写为

$$A \approx \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

以外方位元素为自变量求微分，那么，由传感器外方位元素变化引起的像点位移可表示为

$$\left. \begin{aligned} dx &= -(f/H)dX_s - fd\varphi + yd\kappa \\ dy &= -(f/H)dY_s - (y/H)dZ_s - f(1 + y^2/f^2)d\omega \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

由公式 (3.2) 可知， $dX_s$ ， $dY_s$ ， $dZ_s$ ， $d\varphi$  和  $d\kappa$  将使整幅影像产生平移、缩放和旋转等线性变形，而  $d\omega$  使影像产生非线性变形，如表 3.1 所示。

### 3.1.3 地形起伏的影响

地形起伏对像点坐标与其对应地面点坐标关系的影响，同样可通过公式 (2.1)

计算求得。利用目标地物点坐标  $Z_p$  的变化来表示地形的起伏有

$$dZ_p \approx Z_p' - Z_p = h \quad (3.3)$$

其中,  $h$  为目标地物点  $P$  相较于基准面的高差。

将传感器外方位元素看作无偏差的常量,  $(x, y)$  为自变量, 对公式 (2.1) 等号两边取微分有

$$\left. \begin{aligned} dx &= -f \frac{(Z) \cdot c_1 \cdot h - (X) \cdot c_3 \cdot h}{(Z)^2} \\ dy &= -f \frac{(Z) \cdot c_2 \cdot h - (Y) \cdot c_3 \cdot h}{(Z)^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

$$\text{其中, } \begin{bmatrix} (X) \\ (Y) \\ (Z) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X_p - X_s \\ Y_p - Y_s \\ Z_p - Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p - X_s \\ Y_p - Y_s \\ Z_p - Z_s \end{bmatrix}; \quad dx, dy \text{ 为由于地形起伏}$$

产生的像点位移。

在垂直成像条件下,  $\varphi = \omega = \kappa \approx 0$ , 上式中的  $A$  为单位矩阵, 式 (3.4) 可表示为

$$\left. \begin{aligned} dx &= f \frac{(X_p - X_s)h}{(Z_p - Z_s)^2} = \frac{x}{Z_p - Z_s} h = -\frac{x}{H} h \\ dy &= f \frac{(Y_p - Y_s)h}{(Z_p - Z_s)^2} = \frac{y}{Z_p - Z_s} h = -\frac{y}{H} h \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

公式 (3.5) 所含几何意义可以图 3.2 示出 (以  $dx$  为例)。由于旋翼无人机成像光谱影像每一行都可看为中心投影, 故将  $x=0$  带入上式有  $dx=0$ 。由公式 (3.5) 可知, 地形起伏引起的像点位移, 与像点距像主点的距离成正比, 与地物点相对于基准面的高差成正比, 与飞行高度成反比。因此, 由地形起伏所引起的几何畸变在航空影像中比在卫星影像中明显, 在山地丘陵地区比在平原地区明显, 在影像边缘比在影像中心明显。

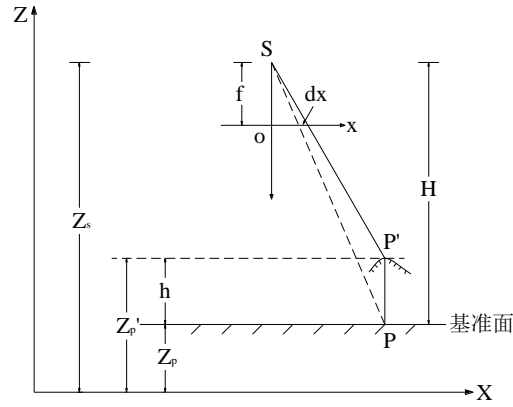


图 3.2 地形起伏引起的像点位移

#### 3.1.4 地球曲率的影响

地球曲率产生的几何变形与地形起伏产生的几何变形相仿，只需将地球表面的点（图 3.3 中的  $P$  点）到地球切平面的正射投影距离（图 3.3 中的  $\Delta h$  点）近似看为地形起伏，用  $\Delta h$  替代公式 (3.5) 中的高差  $h$  来计算曲率像点位移。

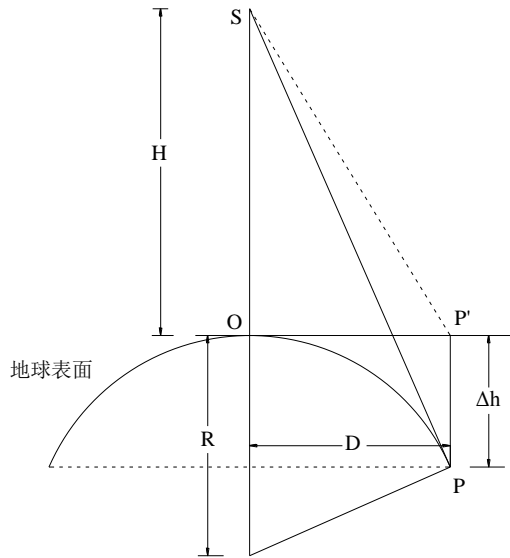


图 3.3 地球曲率引起的像点位移

如图 3.3 所示，设地球半径为  $R$ ，目标地物  $P$  到传感器与地心连线的距离为  $D$ ，则有

$$D^2 = (2R - \Delta h) \cdot \Delta h \quad (3.6)$$

由于  $\Delta h \ll 2R$ ，式 (3.6) 可简化为

$$\Delta h \approx D^2 / 2R \quad (3.7)$$

考虑到地球曲面低于切平面，因此  $h \rightarrow -\Delta h$ 。将式 (3.7) 带入公式 (3.5)，有

$$\begin{bmatrix} h_x \\ h_y \end{bmatrix} = -\frac{1}{2R} \begin{bmatrix} Dx^2 \\ Dy^2 \end{bmatrix} = -\frac{1}{2R} \frac{H^2}{f^2} \begin{bmatrix} x^2 \\ y^2 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

其中， $h_x$ ， $h_y$  分别表示在  $x$  方向和  $y$  方向上的像点位移高差； $Dx = X_p - X_s$ ， $Dy = Y_p - Y_s$ 。对于旋翼无人机成像光谱系统，由于  $x=0$ ，式 (3.8) 变为

$$h_y = -\frac{H^2 y^2}{2Rf^2} \quad (3.9)$$

### 3.1.5 地球自转的影响

对于旋翼无人机成像光谱系统，由于 CCD 线阵推扫系统所成影像中的所有像点都是瞬时一次曝光成像，因此地球自转不会引入几何变形。地球自转引起的几何变形主要针对动态传感器，尤其是卫星遥感。

### 3.1.6 大气折射的影响

由于大气层并非均匀介质，其密度随地面高度的不断增加而递减，折射率也随之变化，这使得摄影中心、像点和地面点三点不再共线而变成了曲线，从而产生几何变形。

如图 3.4 所示，若大气均一，则目标地物点  $P$  应沿直线  $PS$  成像于  $p_0$ ，但在实际中，由于受到大气折射的影响，目标地物点  $P$  将沿曲线  $PS$  成像于  $p_1$ ，其产生的像点位移为  $\Delta r$ 。通过一系列的公式推算，最终可求得

$$\Delta r = K(r + r^3 / f) \quad (3.10)$$

其中， $K$  是一个与飞行高度  $H$  和高程  $h$  相关的大气条件系数， $r$  为实际像点  $p_1$  距像幅中心  $o$  的距离。由公式 (3.10) 可以看出，大气折射对像点位移的影响是非线性变化的。

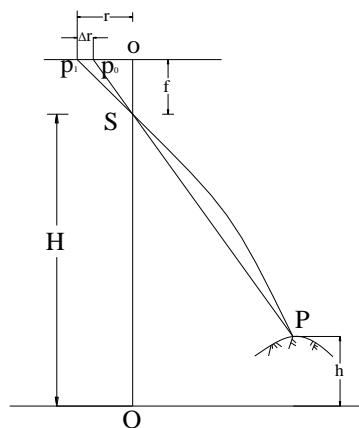


图 3.4 大气折射引起的像点位移

## 3.2 遥感图像的几何纠正

遥感图像的几何纠正是指从具有几何变形的图像中消除或最大限度地减弱变形，定量确定图像上像元坐标与目标地物的地理坐标之间的对应关系<sup>[44]</sup>。

### 3.2.1 纠正方案

#### (1) 直接法

直接法是从输入图像上的像点出发，按行列号依次进行坐标变换求取每个原始像点对应在输出图像坐标系（地面坐标系）中的位置，同时将原始图像上像点的灰度值按照一定重采样方法赋给校正后图像中的相应像点。

$$\left. \begin{aligned} X &= F_x(x, y) \\ Y &= F_y(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

其中， $F_x$ ， $F_y$  为直接纠正法的变换函数。

#### (2) 间接法

间接法是从输出图像上的像点空白阵列出发，按行列号依次通过逆运算反求其在输入图像坐标系中的位置，再将原图像上的像点灰度值直接赋给纠正图像中的对应像点。

$$\left. \begin{aligned} x &= G_x(X, Y) \\ y &= G_y(X, Y) \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

其中， $G_x$ ， $G_y$  为间接纠正法的变换函数。

直接法和间接法纠正方案如图 3.5 所示<sup>[43]</sup>。

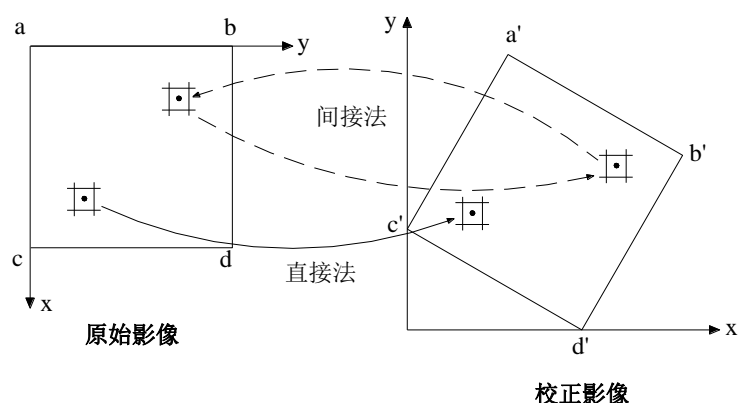


图 3.5 纠正方案示意图

### 3.2.2 几何纠正方法

#### ➤ 辅助数据集

无人机高光谱影像的几何校正依据辅助数据集类型的不同,采用相应的几何纠正方法。这里的辅助数据集大致可分为内方位元素、外方位元素、地图、参考正射影像、控制点以及数字高程模型 (digital elevation model, DEM), 如图 3.6 所示<sup>[45]</sup>。

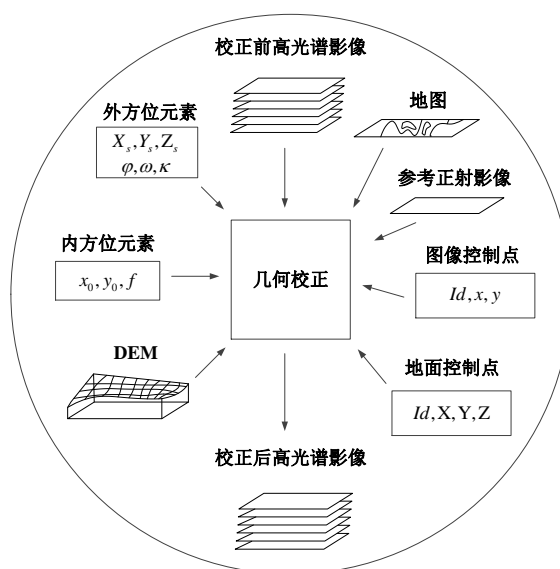


图 3.6 几何校正辅助数据集

#### (1) 内方位元素

内方位元素主要是指像主点在像平面坐标系中的位置坐标和投影中心到像平面的垂直距离。此外, 每条扫描行上的像元数、通道数、视场角 (field of view,



FOV)、瞬时视场角 (instantaneous field of view, IFOV)、扫描速率以及沿航线方向上旋转镜或棱镜的转动方向 (顺时针或逆时针) 也均可视为内方位元素范畴, 在飞行任务中, 这些内方位元素需保持不变。

## (2) 外方位元素

外方位元素用于描述传感器在每个时刻的位置和姿态, 用以下 6 个参数表示: 3 个坐标参数用于定义摄影中心在物方空间坐标系位置, 3 个角元素用于定义视距辐射的方向。获取外方位元素参数在解决几何校正问题中是至关重要的, 这是因为它们确定了原始影像数据与其要转换到的参考系统之间的几何关系。

## (3) 地图

地图中包含了重要的几何参考信息, 但须保证地图比例尺足够大以满足所需精度。通常在校正前需对研究区域地图进行扫描和数字化。地图可用来选取控制点坐标, 这些点应在影像及地图中具有明显可辨的定位识别标志, 地图所提供的形状信息 (如线性特征) 可用来作为几何校正算法中的约束条件。一些情况下还可以通过地图提取的轮廓线来获得数字地形模型。

## (4) 参考正射影像

正射影像的作用类似于地图, 不同之处在于正射影像包含图像信息而非矢量信息, 这可以用于自动提取控制点的匹配算法。

## (5) 控制点

在遥感影像中, 加在影像坐标上的、地面位置已知的点叫做地面控制点, 它是用来模拟计算像点坐标与对应目标地物之间的几何变换模型<sup>[44]</sup>。一个控制点包括一个标示符, 两组坐标以及残差 (如果有的话)。对于图像空间, 一个控制点用平面坐标系中的  $(x, y)$  表示; 对于空间参考系, 同一点用三维坐标  $(X, Y, Z)$  表示, 计算几何纠正在参考系统中的  $(X, Y, Z)$  是必要的。如上所述, 控制点可以从地图或正射影像中选取, 也可通过地面测量获得。当已有地形图/正射影像的比例尺达不到所需精度时, 必须使用 GPS 等进行地面测量从而得到控制点坐标。

## (6) 数字高程模型 (DEM)

DEM 描述了三维地形的形状, 其两个主要的数据结构为规则格网和不规则三角网 (TINs) <sup>[46]</sup>。不规则三角网在有效数据存储方面具有优势, 规则格网更适合于需要网格插值的情形。网格的空间分辨率不能高于 10 倍的图像空间分辨

率。DEM 所选取的参考系统需与几何校正的一致。

针对以上六种类型，可将几何纠正方法分为非系统性纠正和系统性纠正。

#### ➤ 非系统性纠正

非系统性纠正采用多项式函数（或局部三角网）对图像数据的分布进行校正，该纠正方法不考虑传感器的位置和姿态参数，利用足够的地面控制点建立图像坐标与地图坐标的对应关系，并建立图像坐标系与输出地图坐标系间的坐标变换关系。非系统性几何纠正算法主要有多项式纠正法、直接线性变换法和有理函数模型纠正法。

##### （1）多项式纠正法

多项式纠正法不需要对整个遥感系统（如平台、传感器、地球和地图投影等）有先验知识<sup>[47]</sup>，它将图像上的变形看作是一系列基本变形（平移、缩放、旋转、扭曲、仿射等）综合作用的结果，进而通过选取合适的多项式来对这些变形进行数学模拟。如果有足够的控制点对，则可以利用最小二乘法原理来计算多项式系数，再用解算出的多项式模型对整幅图像进行几何校正。

一般多项式函数可表示为

$$\left. \begin{aligned} x &= a_0 + (a_1X + a_2Y) + (a_3X^2 + a_4XY + a_5Y^2) \\ &\quad + (a_6X^3 + a_7X^2Y + a_8XY^2 + a_9Y^3) + \dots \\ y &= b_0 + (b_1X + b_2Y) + (b_3X^2 + b_4XY + b_5Y^2) \\ &\quad + (b_6X^3 + b_7X^2Y + b_8XY^2 + b_9Y^3) + \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

其中， $(x, y)$  为像点像平面坐标； $(X, Y)$  为其同名像素的大地坐标； $a_i, b_i (i = 0, 1, \dots)$  为多项式系数，多项式系数的个数  $N$  与其次数  $n$  有关，即  $N = (n+1)(n+2)/2$ 。

一般多项式纠正解算简便，运算量小，但它忽略了地形起伏变化的影响，不适用于地形较为复杂的山地丘陵地区。为克服这一缺陷，引入了地面高程的概念，得到改进的多项式函数

$$\left. \begin{aligned} x &= a_0 + (a_1X + a_2Y + a_3Z) + (a_4X^2 + a_5Y^2 + a_6Z^2 + a_7XY + a_8XZ + a_9YZ) + \dots \\ y &= b_0 + (b_1X + b_2Y + b_3Z) + (b_4X^2 + b_5Y^2 + b_6Z^2 + b_7XY + b_8XZ + b_9YZ) + \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

##### （2）直接线性变换法

直接线性变换模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} x + \frac{XL_1 + YL_2 + ZL_3 + L_4}{XL_9 + YL_{10} + ZL_{11} + 1} &= 0 \\ y + \frac{XL_5 + YL_6 + ZL_7 + L_8}{XL_9 + YL_{10} + ZL_{11} + 1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

其中,  $(L_1, L_2, \dots, L_{11})$  表示直线线性变换的参数。

由上式可以看出, 直线线性变换法形式简单, 直接建立了像点坐标与地物点坐标的对应关系, 但它忽略外方位元素随时间变化的特点, 将动态推扫式等同于静态处理, 使得校正精度产生偏差<sup>[48]</sup>。

### (3) 有理函数模型纠正法

有理函数模型通过构建有理方程来近似拟合二维像平面与三维物空间的对应关系, 其可以表示为

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{P_a(X, Y, Z)}{P_b(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_2} \sum_{k=0}^{n_3} b_{ijk} X^i Y^j Z^k} \\ y &= \frac{P_c(X, Y, Z)}{P_d(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} c_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_2} \sum_{k=0}^{n_3} d_{ijk} X^i Y^j Z^k} \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

其中,  $a_{ijk}$ ,  $b_{ijk}$ ,  $c_{ijk}$ ,  $d_{ijk}$  表示有理函数的系数。

解算过程中, 若数值较大, 可对  $(x, y)$  和  $(X, Y, Z)$  进行正态归一化后再计算。

式 (3.16) 中未知项可取不同的次数,  $P_b(X, Y, Z)$  和  $P_d(X, Y, Z)$  也可以有相同的表达形式, 但要求控制点的个数应不少于系数总个数的一半, 且次数越高, 对控制点的个数要求越多<sup>[48]</sup>。有理函数模型可以看做是多项式模型的扩展, 其引入了大量的定向参数, 可以取得较高的校正精度, 但往往需要较多的控制点且计算量比较大。

### ➤ 系统性纠正

系统性纠正是将与传感器构造有关的传感器位置、姿态参数以及几何畸变理论校正公式中所涉及到的校准数据都代入到理论校正式中进行几何校正。共线方

程纠正就是理论校正式的典型例子<sup>[44]</sup>。

共线方程纠正法假设传感器投影中心、像点及其对应地面点在成像瞬间位于同一直线上，方程中的参数可预测给出，也可利用已知控制点经最小二乘法解得。该算法理论严谨，考虑了地面高程的影响，纠正精度有所提高，但运算量大<sup>[43]</sup>。

表 3.2 从求解方程所需控制点数、精度及算法复杂性三个方面对直接线性变换、一般二次多项式、一次改进多项式、二次改进多项式、二次有理函数和共线方程六种几何校正算法进行了比较。

表 3.2 不同近似几何校正算法比较

几何校正方法	控制点数	精度	算法复杂性（图像像元总数为 N）
直接线性变换	6	较低	（12 次加法+14 次乘法） $\times N$
一般二次多项式	6	只适用于平坦地区	（10 次加法+16 次乘法） $\times N$
一次改进多项式	4	模型符合影像变形规律时较高	（6 次加法+6 次乘法） $\times N$
二次改进多项式	10	模型符合影像变形规律时较高	（18 次加法+30 次乘法） $\times N$
二次有理函数	15	接近共线方程法	（27 次加法+47 次乘法） $\times N$
共线方程	6	最高	（20 次加法+14 次乘法） $\times 7N$

非系统性校正与系统性校正是相辅相成的，实际研究中，也可以将二者组合起来应用。例如，先通过理论校正式消除内部畸变，再利用少数控制点所确定的低次校正式消除外部畸变；也可以在使用理论校正式进行几何纠正之前，利用控制点以较高的精度推算其所需的传感器内外方位元素。

### 3.2.3 重采样方法

由于校正后的地面坐标点不一定刚好位于输入图像的某个像素中心上，因此必须使用原始图像上周围点的像元值通过内插求出所求点的像元值。

理想的内插函数为 Sinc 函数，但由于它是定义在无穷域上的，且三角函数计算不便，因此常采用一些替代函数来近似模拟，常用的替代算法有最邻近点法、双线性内插法和三次卷积法（如图 3.7 所示）。

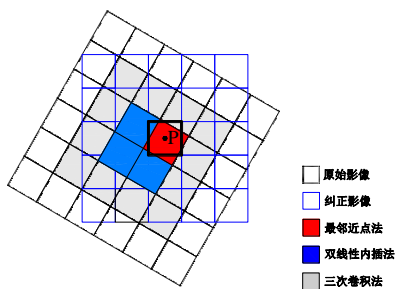


图 3.7 三种常用重采样方法

### (1) 最邻近点法

最邻近法是将距离内插点最近的像元灰度值作为待求内差点的像元值，即

$$Q(u, v) = P_{k, l} \quad (3.17)$$

其中,  $\begin{cases} k = [u + 0.5] \\ l = [v + 0.5] \end{cases}$ 。

最近邻点法的最大误差不超过 0.5，这使得原始图像上的像元值最大限度得以保留。该方法运算简便，运算量小，具有一定的校正精度。但校正后得到的图像灰度值往往具有不连续性，边界可能会出现锯齿现象。

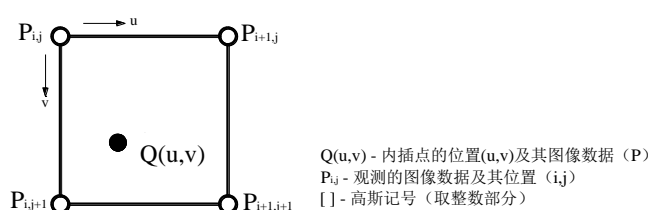


图 3.8 最邻近点法

### (2) 双线性内插法

双线性内插法是利用采样点  $Q(u, v)$  周围邻近的 4 个像元值，按照其距内插点的距离赋予不同的权重进行线性内插，即

$$Q(u, v) = (1-s)(1-t)P_{i,j} - (1-s)tP_{i,j+1} + s(1-t)P_{i+1,j} + stP_{i+1,j+1} \quad (3.18)$$

其中,  $\begin{cases} s = u - [u] \\ t = v - [v] \end{cases}$ 。

利用双线性内插法重采样得到的校正影像精度较高，运算量也不大，具有平均化的滤波效果，可以输出边缘比较连贯的图像。但是它破坏了原有的像元值，影像中的高频部分会受到压制而出现模糊的现象。

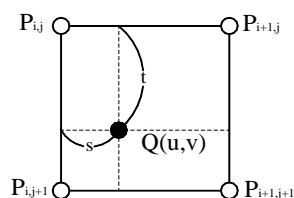


图 3.9 双线性内插法

### (3) 三次卷积法

三次卷积法利用以内插点为中心的  $4 \times 4$  窗口内所有像元的灰度值构建三次卷积函数，并对所求像元值进行内插处理，即

$$Q(u,v) = [f(1+t)f(t)f(1-t)f(2-t)] \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & P_{1,3} & P_{1,4} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & P_{2,3} & P_{2,4} \\ P_{3,1} & P_{3,2} & P_{3,3} & P_{3,4} \\ P_{4,1} & P_{4,2} & P_{4,3} & P_{4,4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(1+s) \\ f(s) \\ f(1-s) \\ f(2-s) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

三次卷积内插法的多项式其实是 Sinc 函数的一种简化近似函数，表示为一个三次样条函数

$$f(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \approx \begin{cases} 1 - 2|x|^2 + |x|^3 & (0 \leq |x| \leq 1) \\ 4 - 8|x| + 5|x|^2 - |x|^3 & (1 \leq |x| \leq 2) \\ 0 & (|x| \geq 2) \end{cases} \quad (3.20)$$

三次卷积法重采样得到的遥感图像精度较高，边缘有所增强，并具有均衡化和清晰化的效果。但是计算较前两种方法运算量较大，且破坏了原始像元值。

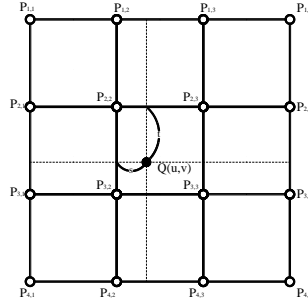


图 3.10 三次卷积内插法

### 3.3 本章小结

本章主要从旋翼无人机遥感影像的几何变形分析与传统遥感图像的几何校正两个方面展开。①在旋翼无人机成像几何原理的基础上，通过建立数学模型，逐一分析讨论了 CCD 阵列误差、飞行姿态变化引起的传感器外方位元素的变化、地形起伏、地球曲率、地球自转以及大气折射等因素对旋翼无人机遥感影像上所成像点与相应地面点之间的作用；②介绍了遥感影像的经典几何校正，分别从纠正方案、几何纠正方法及重采样方法 3 个方面进行阐述，为后续基于旋翼无人机成像光谱数据几何处理技术研究做铺垫。

## 第四章 旋翼无人机成像光谱影像几何处理技术

旋翼无人机成像光谱数据几何处理流程图如 4.1 所示，包括旋翼无人机成像光谱的数据获取、旋翼无人机成像光谱数据预处理、旋翼无人机成像光谱影像几何校正方法的选取、旋翼无人机成像光谱影像灰度重采样以及对几何处理后的旋翼无人机成像光谱影像进行精度评价。

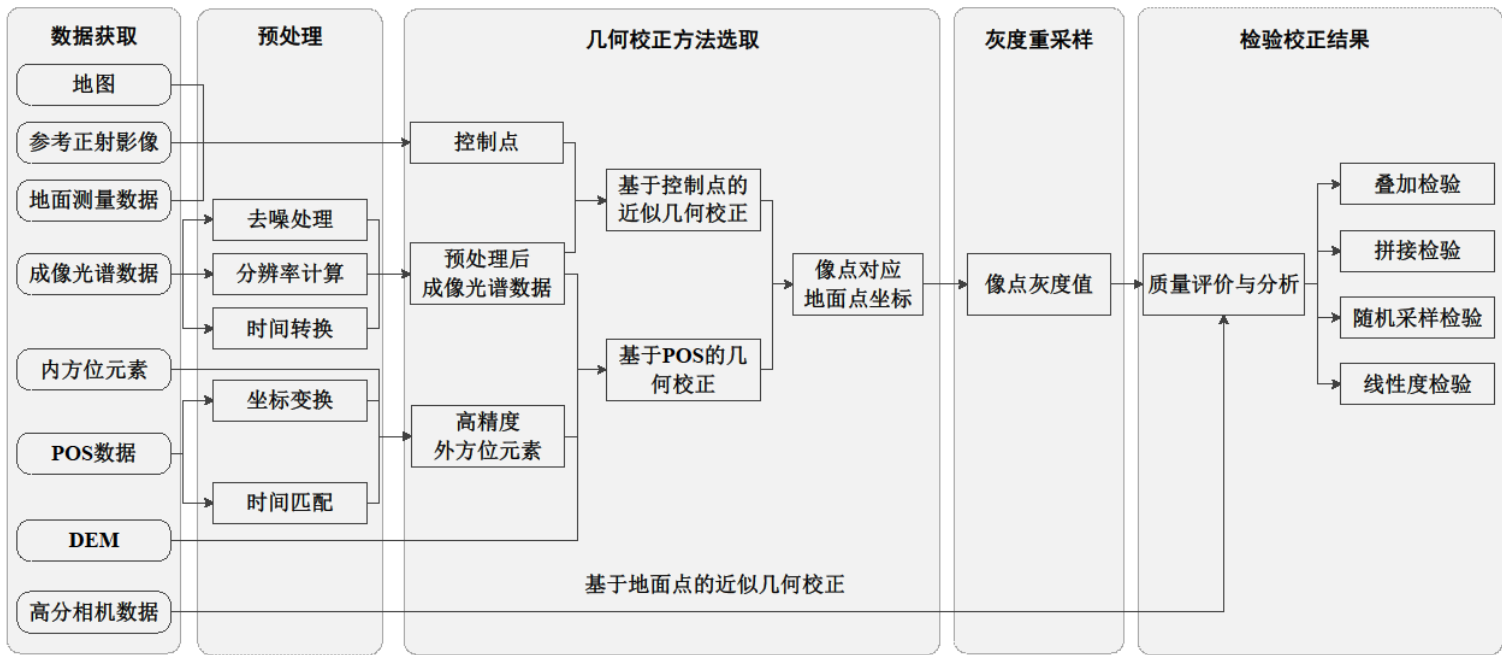


图 4.1 旋翼无人机成像光谱数据几何处理流程

### 4.1 旋翼无人机成像光谱影像几何处理关键技术分析

旋翼无人机成像光谱影像几何处理过程中涉及到以下 3 个关键技术：地面控制点的选取、控制点数据库的建立和外方位元素的解算。这 3 个关键技术直接影响到旋翼无人机成像光谱影像的校正质量的好坏。

#### 4.1.1 地面控制点的选取

##### (1) 选取方法

选取 GCP 是旋翼无人机成像光谱影像基于控制点近似几何校正中最重要的一步。如前所述，常用的获取 GCP 的方法有：

- 1) 数字栅格地图 (digital raster graphic, DRG)。对照旋翼无人机成像光谱影像, 从 DRG 上判读相应的同名点, 读出该点的大地坐标;
- 2) 数字正射影像图 (digital orthophoto map, DOM)。若所研究区域有对应的 DOM, 可以参照 DOM 在待纠正的旋翼无人机成像光谱影像上寻找同名点, 从而获得该点的大地坐标;
- 3) GPS 野外测量。在获取旋翼无人机成像光谱影像的同时, 同步在研究区利用 GPS 实测地面控制点, 记录并保存这些点的大地坐标。

## (2) 选取原则

旋翼无人机成像光谱影像上选取的控制点应当具备以下特征: ①控制点在影像上容易识别并且定位标志有精细的特征, 例如道路交叉点、建筑物边界、农田界限、湖泊边缘、河流弯曲或分叉处等; ②控制点上的地物不随时间而变化; ③影像边缘应选取一定数量的控制点, 以免发生外推; ④尽量使控制点满幅均匀分布于影像中。

另外, 地面控制点的数目也影响着旋翼无人机成像光谱数据几何校正的精度, 其选取的最低个数由纠正变换函数中未知系数的个数来确定。对于次数为  $n$  的多项式, 至少需要  $(n+1)(n+2)/2$  个地面控制点<sup>[49]</sup>。如果选取控制点数过少, 会导致纠正精度的下降, 尤其是在影像边缘。对于地形变化较大而没有控制点的区域, 凭借插值外推对应点会使影像产生严重变形。对于小比例尺的影像, 若没有高精度匹配的控制点, 而仅增加控制点的个数, 则会产生适得其反的效果。因此, 所选取的控制点应在满足准确定位、精确配准的前提下, 数目不低于上述公式计算的控制点个数。

## (3) 错误控制点检测技术

对于所选取的控制点, 需根据一定的准则衡量初始控制点对的配准精度, 剔除那些错误的匹配点对。这里的准则可分为基于统计意义的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 检测法和基于一定物理意义的局部最大团检测法<sup>[50]</sup>。

### ➤ 均方根误差检测法

假设所选控制点对  $(x_i, y_i)$  和  $(X_i, Y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) 满足映射变换  $T$ , 对应在  $X$ 、 $Y$  方向上的分量分别用映射函数  $f$ 、 $g$  表示, 即



$$\left. \begin{aligned} X &= f(x, y) \\ Y &= g(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

则有

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \left[ \left( f(x_i, y_i) - X_i \right)^2 + \left( g(x_i, y_i) - Y_i \right)^2 \right]}{k}} \quad (4.2)$$

$RMSE$  描述了在变换  $T$  下将  $(x_i, y_i)$  纠正到  $(X_i, Y_i)$  的整体均方误差大小。原则上选取的控制点对应一致符合变换  $T$ ，如果出现“离群点”，则会引起整体均方误差的变大。当  $RMSE > \delta$ （ $\delta$  为给定阈值）时，说明所选控制点对中存在不满足变换  $T$  的错误控制点对。 $RMSE$  检测错误控制点对的原理如下：首先，通过计算同名点周围特征区域间的相似度对所有匹配点对进行概率排序，相似度大的同名控制点排在相对靠前的位置，相似度小的同名控制点排在相对靠后的位置。

其次，从前往后搜索所有  $\frac{(n+1)(n+2)}{2} + 1$  对控制点组合（其中多余的一个控制点对用于平差，此时变换参数是通过求解最小均方误差获得），假设其满足变换模型  $T$ ，通过最小二乘法求解变换参数，再计算其  $RMSE$ ，若  $RMSE > \delta$ ，则所取控制点对中包含错误匹配，继续搜索；若  $RMSE < \delta$ ，则得到正确控制点对，停止搜索；若所取控制点对均不满足  $RMSE < \delta$ ，则需重新选取控制点对。最后，将上述正确的同名点集作为初始点集，逐一加入剩余控制点对，计算新的  $RMSE$ ，满足  $RMSE < \delta$  条件的即为正确同名点，否则删除。该检测方法适用于面积较小，地物较为简单的研究区域。

#### ➤ 局部最大团检测法

均方根误差检测法虽然被广为采用，但是它只针对同一模型进行一致性检测（也就是由初始点集确定的模型），而局部最大团检测法可实现多模型下的错误控制点检测。局部最大团检测法的思想是在较平坦的局部区域内，正确的控制点对间像点坐标距离与地面点坐标距离存在一致性，利用这种关系建立连通矩阵，形成局部最大团；搜索每个局部最大团中的初始正确点集，利用这些初始点集检测出错误控制点对，如图 4.2 所示。

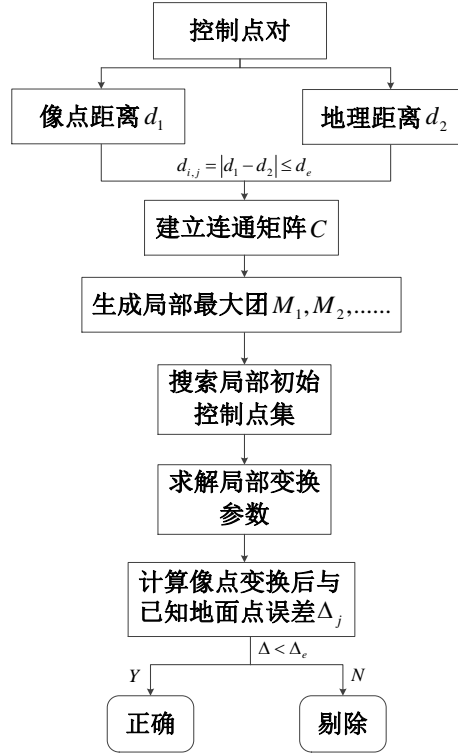


图 4.2 局部最大团检测错误控制点技术

1) 建立联通矩阵  $C$ 

对于  $\forall$  两个控制点  $i$  和  $j$ ，其对应的像点坐标与地面点坐标分别是  $(x_i, y_i)$ ， $(X_i, Y_i)$  和  $(x_j, y_j)$ ， $(X_j, Y_j)$ 。 $pixel\ size$  为旋翼无人机成像光谱影像的分辨率，则这两个控制点间的像点距离  $d_1$  与地面距离  $d_2$  可表示为：

$$\begin{aligned} d_1 &= pixel\ size * \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \\ d_2 &= \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \end{aligned} \quad (4.3)$$

像点距离与地面距离的误差可表示为：

$$d_{i,j} = |d_1 - d_2| \quad (4.4)$$

根据局部最大团检测原理，若  $d_{i,j} \leq d_e$  ( $d_e$  为给定阈值)，那么就说像点距离与地面点距离满足一致性准则，我们认为  $i$ ， $j$  两点是连通的；反之，若  $d_{i,j} > d_e$  则认为  $i$ ， $j$  两点不连通。将所有控制点的连通矩阵记为  $C$ 。对于控制点  $i$  来说，与其连通的点数越多， $i$  为正确控制点的概率也就越大。

## 2) 生成局部最大团。

记所有控制点组成的集合为  $N$ ，团是  $N$  的一个子集，团内的  $\forall$  两点  $i, j$  均满足连通矩阵  $C$  内的值全为 1。最大团是包含了最多控制点个数的团，其内的控制点为正确点对的可能性最大。获取最大团  $M_1$  后，标记  $M_1$  内的点，搜索下一个控制点集  $N - M_1$ ，获取最大团  $M_2$ ；以此类推，保留元素个数不少于  $\frac{(n+1)(n+2)}{2}$

的最大团，由于这些最大团并非是从全体控制点集合  $N$  中生成，因此称为“局部最大团”。局部最大团给出了在多个模型下最有可能成为正确控制点对的集合，这些局部最大团构成了初始正确控制点集。

## 3) 利用局部最大团检测错误控制点。

根据初始正确点集计算相应局部区域内的变换系数，确定各个局部变换模型。通过这些局部变换模型计算像点变换后坐标与已知地理坐标之间的误差  $\Delta$ ，若所有  $\Delta$  均大于  $\Delta_\delta$  ( $\Delta_\delta$  为给定阈值)，则为错误控制点，应剔除掉；否则为正确同名点。

### 4.1.2 控制点数据库的建立

#### (1) 控制点影像表数据结构

对研究区域建立控制点数据库，不仅可以避免人工选点费时费力的不足，而且实现了对旋翼无人机成像光谱影像高精度、大批量、快速几何校正的需求。控制点数据库的建立首先需要创建地面控制点相关属性列表，再通过提取地面控制点，将控制点的属性信息存入数据库中，地面控制点影像表结构如表 4.1 所示<sup>[51]</sup>。

表 4.1 地面控制点影像表结构

变量名	类型	含义
ListID	Cstring	控制点编号
L,B,H	double	控制点影像中心位置的经纬度和高程
X,Y,Z	double	控制点影像中心位置的大地坐标
East, North	double	投影平面坐标
CoordSysID	Cstring	投影平面坐标标识
mxy	double	控制点平面精度
h	double	基准平面高度
HeightSysID	Cstring	高程标识

mh	double	高程精度
lpBlock	LPBYTE	控制点影像指针
ImgWidth	long	控制点影像宽度
ImgHeight	long	控制点影像高度
Lmc, Bmc, Hmc	double	控制点影像底边中点的经纬度和高程
Timestring	Cstring	拍摄时间

将控制点存入数据库可分两步：先通过辅助数据集选取控制点，再在原始的旋翼无人机成像光谱影像上找到同名点及其周围的邻域，将该元数据和影像存入控制点数据库的列表中。

由于所选控制点上的地物可能存在自然或人为影响下的变化，因此控制点数据库逐渐完善后，还需实时更新。有些地物的变化比较明显，可被用来及时更新控制点库；但有些地物变化比较缓慢，不易察觉，可以事先设定阈值，通过日志文件中显示的控制点匹配相关系数来决定是否更新。

## (2) 控制点数据库的调用

控制点数据库建立后，对其调用的流程如图 4.3 所示。首先在控制点数据库中检索位于待纠正影像范围的控制点，读取这些控制点的经纬度和拍摄时间。随着控制点数据库的不断更新，同一个目标地物可能会存在多个与之匹配的点对，检查上述控制点中是否存在相同经纬度的控制点，如果有，选取与待纠正影像采集时间最接近的控制点数据；如果没有直接读取当前控制点数据用于控制点影像与旋翼无人机成像光谱影像匹配。

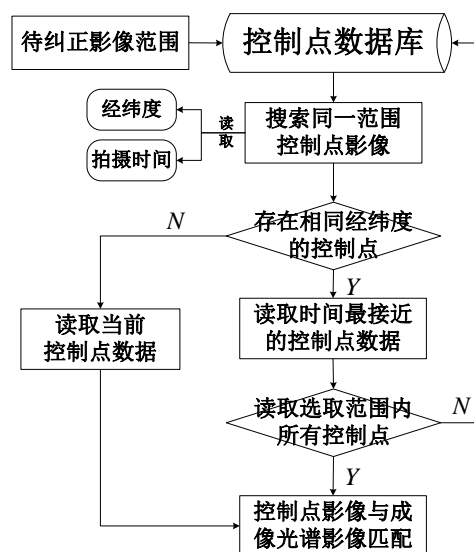


图 4.3 控制点数据库的调用

### 4.1.3 外方位元素解算

旋翼无人机成像光谱数据外方位元素的解算涉及到两个领域, 惯性导航系统和摄影测量系统。惯性导航系统中常用的坐标系有地心坐标系( $E$ )、导航坐标系( $g$ )和 IMU 坐标系( $b$ )。POS 输出的导航解属于惯性导航领域, 它包括 IMU 坐标系( $b$ )在 WGS-84 直角坐标系中的坐标( $X_{IMU}, Y_{IMU}, Z_{IMU}$ )以及其在导航坐标系( $g$ )中的侧滚(Roll)、俯仰(Pitch)和偏航角(Heading) ( $\Phi, \Theta, \Psi$ )。摄影测量系统中常用的坐标系有成图坐标系( $m$ )、传感器坐标系( $c$ )和像空间坐标系( $i$ )。旋翼无人机成像光谱数据外方位元素属于摄影测量领域, 它包括曝光瞬间传感器投影中心在成图坐标系( $m$ )中的位置( $X_s, Y_s, Z_s$ )以及像空间坐标系( $i$ )到成图坐标系( $m$ )的旋转角( $\omega, \varphi, \kappa$ )。由于我们所需的外方位元素与现有的 POS 导航解属于两个完全不同的系统, 因此需要通过坐标转换在这两个系统间建立关系从而得到旋翼无人机成像光谱系统的外方位元素。以下是对惯性导航坐标系统和摄影测量坐标系统的定义以及在求解外方位元素时所涉及的坐标转换<sup>[37, 52, 53]</sup>(见图 4.4)。

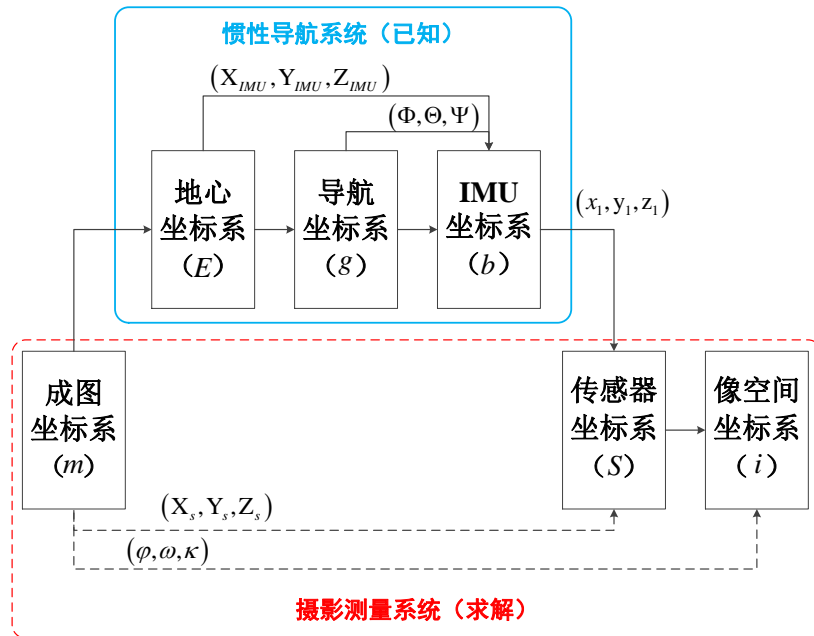


图 4.4 惯性导航系统与摄影测量系统间的坐标转换

#### (1) 坐标系统定义

- 1) 成图坐标系( $m$ ): 用户根据飞行区域特点自定义的局部右手坐标系。
- 2) 地心坐标系( $E$ ): 原点固定于地球中心,  $Z^E$  轴指向北极,  $X^E$  轴指向赤道面与本初子午面的交点,  $Y^E$  轴垂直于  $X^E O Z^E$  平面。常用的地心坐标系为 WGS-84 大地坐标系。
- 3) 导航坐标系( $g$ ): 也称局部地理坐标系, 原点位于飞行器质心,  $X^g$  为北方向(大地北),  $Y^g$  为东方向,  $Z^g$  指向地心。坐标系统随飞行方向不断发生变化。

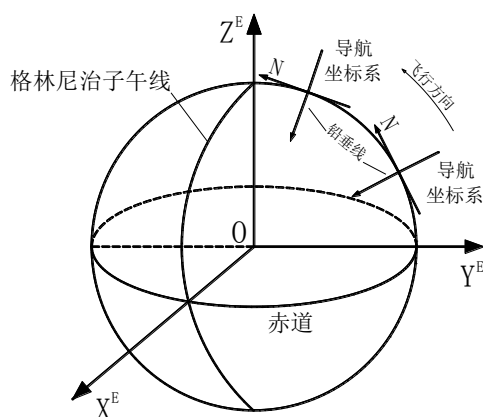


图 4.5 地心坐标系与导航坐标系关系示意图

- 4) 传感器坐标系( $c$ ): 原点位于透视中心,  $C_2$  轴指向传感器右侧为正,  $C_3$  轴指向地面方向为正,  $C_1$  轴沿飞行方向前向为正。
- 5) IMU 坐标系( $b$ ): 以 3 轴加速度计的交点为原点,  $x^b$  轴指向飞行方向,  $y^b$  轴指向飞机右侧,  $z^b$  轴竖直向下形成右手坐标系。理想情况下, IMU 与高光谱传感器应紧密固联, IMU 坐标系与传感器坐标系只存在航向上的平移, 但在实际中, IMU 坐标系与传感器坐标系间存在一定的交角, 称为偏心角, 这个偏心角需通过设立检校场来确定。

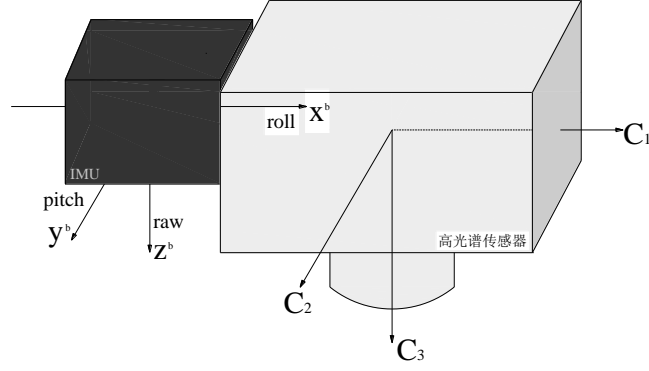


图 4.6 IMU 及高光谱传感器各轴指向及姿态角示意图

- 6) 像空间坐标系(*i*): 以摄影中心 *S* 为坐标原点, *x* 轴指向飞行方向, *y* 轴指向影像左侧, *z* 轴与主光轴重合, 形成像空间右手直角坐标系 *S-xyz*。

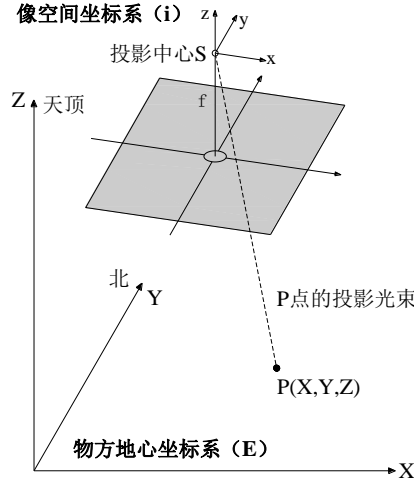


图 4.7 像空间坐标系示意图

## (2) 坐标系变换

根据前述外方位元素的定义, 像空间坐标系(*i*) 可以看成是成图坐标系(*m*) 依次经过绕 *Y*、*X*、*Z* 轴旋转角度  $\varphi$ 、 $\omega$ 、 $\kappa$  得到, 这一过程可以分多步坐标系统变换完成如图 4.4 所示, 因此, 成图坐标系(*m*) 到像空间坐标系(*i*) 的旋转矩阵  $C_i^m(\varphi, \omega, \kappa)$  可表示为<sup>[53, 54]</sup>:

$$C_i^m(\varphi, \omega, \kappa) = C_E^m C_g^E C_b^g(\Phi, \Theta, \Psi) C_c^b C_i^c \quad (4.5)$$

确定旋转矩阵  $C_E^m$ 、 $C_g^E$ 、 $C_b^g$ 、 $C_c^b$  和  $C_i^c$ , 即可由上式解出外方位角元素  $\varphi$ 、

$\omega$  和  $\kappa$ 。

- 1) 确定旋转矩阵  $C_E^m$ ：成图坐标系( $m$ )变换到地心坐标系( $E$ ) (WGS-84)

定义成图坐标系的原点位于飞行区域的中心，X 轴指向东，Y 轴指向北，Z 轴指向天顶方向，原点设为  $(B_0, L_0, 0)$ ，则由成图坐标系统变换到地心坐标系的旋转矩阵可表示为：

$$C_E^m = \begin{bmatrix} -\sin(L_0) & \cos(L_0) & 0 \\ -\cos(L_0)\sin(B_0) & -\sin(B_0)\sin(L_0) & \cos(B_0) \\ \cos(B_0)\cos(L_0) & \cos(B_0)\sin(L_0) & \sin(B_0) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

- 2) 确定旋转矩阵  $C_g^E$ ：地心坐标系 (WGS-84) 变换到导航坐标系( $g$ )

将地心坐标系变换到导航坐标系可分两步：首先将地心坐标系绕其  $Z^E$  轴逆时针旋转  $L$  度；再绕经  $Z^E$  轴旋转  $L$  角后的  $Y^E$  轴顺时针旋转  $(90+B)$  度，所形成的旋转矩阵可表示为：

$$\begin{aligned} C_g^E &= \begin{bmatrix} \cos L & -\sin L & 0 \\ \sin L & \cos L & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(90+B) & 0 & -\sin(90+B) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(90+B) & 0 & \cos(90+B) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L & -\cos B \cos L \\ -\sin B \sin L & \cos L & -\cos B \sin L \\ \cos B & 0 & -\sin B \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.7)$$

其中， $L$  和  $B$  分别为成像瞬间 IMU 中心的经纬度。

- 3) 确定旋转矩阵  $C_b^g$ ：导航坐标系( $g$ )变换到 IMU 坐标系( $b$ )

将导航坐标系变换到 IMU 坐标系可分三步：首先将导航坐标系绕其  $Z^g$  轴逆时针旋转偏航角  $\Psi$ ；其次，绕经  $Z^g$  轴旋转  $\Psi$  角后的  $Y^g$  轴逆时针旋转俯仰角  $\Theta$ ；最后绕经过  $\Psi$ ， $\Theta$  角旋转后的  $X^g$  轴逆时针旋转侧滚角  $\Phi$ ，所形成的旋转矩阵可表示为：

$$C_b^g = \begin{bmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Theta & 0 & -\sin \Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Theta & 0 & \cos \Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi & -\sin \Phi \\ 0 & \sin \Phi & \cos \Phi \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

- 4) 确定旋转矩阵  $C_c^b$ ：IMU 坐标系( $b$ )变换到传感器坐标系( $c$ )



将 IMU 坐标系变换到传感器坐标系即纠正两个坐标系间存在的偏心角。假设偏心角在 3 轴方向上的分量分别  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ , 则旋转矩阵可表示为:

$$C_c^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

5) 确定旋转矩阵  $C_i^c$ : 传感器坐标系( $c$ )变换到像空间坐标系( $i$ )

传感器坐标系( $c$ )到像空间坐标系( $i$ )只是  $Y$ 、 $Z$  坐标轴方向的不同, 因此  $C_i^c$  可表示为:

$$C_i^c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

6) 确定线元素( $X_s, Y_s, Z_s$ )

在成像瞬间, 传感器镜头透视中心在成图坐标系中的坐标可通过下式得到:

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = C_E^m \left( \begin{bmatrix} X_{IMU} \\ Y_{IMU} \\ Z_{IMU} \end{bmatrix} + C_g^E C_b^g(\Phi, \Theta, \Psi) \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \right) \quad (4.11)$$

其中,  $(x_1, y_1, z_1)$  为传感器透视中心在 IMU 坐标系中的偏心矢量;  $(X_0, Y_0, Z_0)$  为成图坐标系原点  $(L_0, B_0)$  对应的地心直角坐标。

## 4.2 旋翼无人机成像光谱系统数据获取与预处理

### 4.2.1 数据获取

理想情况下, 可获取的旋翼无人机成像光谱系统的数据类型包括地图、参考正射影像、地面测量数据、成像光谱数据、飞行姿态参数、传感器位置、内方位元素、POS 数据以及 DEM 高程数据。其中, 数字化的地图、参考正射影像和地面 GPS 测量数据可用来选取控制点用以进行基于控制点的近似几何校正; 成像光谱仪内方位元素(校准数据)、位置参数及飞行姿态参数构成低精度外方位元素, 将其带入理论校正式可进行几何粗校正; 成像光谱仪内方位元素和经过预处理后的 POS 数据构成高精度外方位元素, 可用其进行基于 POS 数据的几何精纠

正。表 4.2 列举了 6 种辅助数据集组合及预期几何校正精度<sup>[45]</sup>。

表 4.2 辅助数据集组合及校正精度（“×”：有；“—”：没有）

类型	高光谱影像 数据	内方位 元素	外方位 元素	DEM	地图	参考正射 影像	几何校正 方法	预期精度
1	×	—	—	—	—	—	不能校正	—
2	×	—	—	—	×	—	基于地面点	2-30 个像元
3	×	—	—	—	—	×	基于地面点/ 共线方程	1-30 个像元
4	×	×	低精度	×	×	—	基于 POS	1-20 个像元
5	×	×	低精度	×	—	×	基于 POS	<1-10 个像元
6	×	×	高精度	×	—	—	基于 POS	<1 个像元

- 1) 类型 1：在仅有旋翼无人机成像光谱数据而没有其他辅助信息的情况下不能做几何校正。
- 2) 类型 2：通过地图参考系统的平面坐标选取地面控制信息，在没有提供其他信息的情况下只能通过近似几何校正方法来获取校正影像，此时精度在很大程度上取决于地形起伏，这是因为投影差未被校正。由于近似几何校正方法仅限于局部，校正后影像的精度可能存在很大误差。
- 3) 类型 3：与类型 2 相似，参考正射影像也可提供平面控制点坐标，不同的是它还包含了影像信息可用来进行影像-影像的匹配。通过系统几何校正方法可以重建飞行轨迹，但内方位元素未知需要估计得到，这会直接影响到校正精度。
- 4) 类型 4：包括了成像光谱数据，内方位和低精度外方位元素，DEM 以及地图。飞行器的位置及姿态可通过 IMU/DGPS 系统测得，通常这些系统既没有几何连接到高光谱传感器，也不能提供高精度的测量，只能用来作为内务数据。
- 5) 类型 5：同类型 4。如前所述，参考正射影像可以提供图-图自动匹配。如果参考正射影像的空间分辨率等同于甚至高于高光谱数据的空间分辨率，并且在两个图像数据集中有足够的纹理信息，校正精度可以达到优于 1 个像元。
- 6) 类型 6：最优的类型。高精度的位置和姿态数据意味着 IMU/DGPS 组合定位系统计量单位的提升，这种技术可使位置精度在 10cm 范围内，速度测量达到 cm/s，姿态参数的精度在  $0.01^\circ$  范围内<sup>[55, 56]</sup>。在这种最优条件下，图像纠正精度可达到亚像素级。

### 4.2.2 数据预处理

#### (1) 成像光谱数据预处理

##### 1) 去噪处理

受飞行平台震动, 气流不均一等影响, 旋翼无人机获取的影像存在细节不清晰、伴有噪声的情形, 这将影响到影像后期的判读和解译, 因此需对影像进行去噪处理。

基于噪声在图像各波段分布不均匀, 采用方差最大化的主成分分析(Principle Components Analysis)不能保证图像质量随着主成分的增大而降低, 因此采用最大噪声分数(Maximum Noise Fraction)变换将输出波段按照信噪比的大小排序。这样, 通过 MNF 变换可以将噪声从图像中分离出来, 达到去噪目的<sup>[57]</sup>。

##### 2) 分辨率计算

成像光谱系统原始数据的空间分辨率是未知的, 需要结合视场角及相对航高进行计算, 如图 4.8 所示。

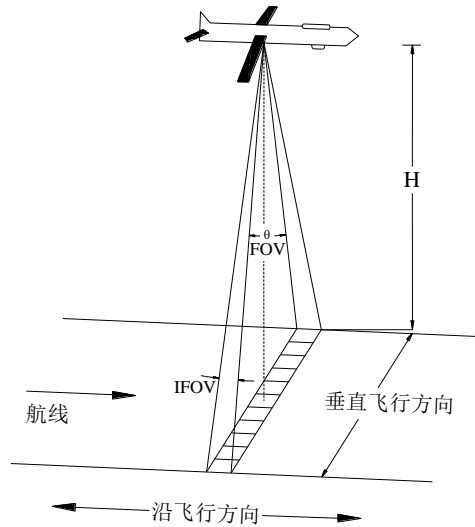


图 4.8 分辨率计算示意图

由三角函数关系可知

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{x/2}{H} \quad (4.12)$$

其中,  $\theta$  为传感器的视场角;  $H$  为飞行相对高度; 所求得  $x$  为整个探测阵列对应的地面面积, 单个像元所对应地面面积的大小为  $x/n$ ,  $n$  为探测元的个数, 对于可见近红外波段,  $n=344$ ; 对于短波红外波段,  $n=256$ 。

### 3) 时间转换

成像光谱仪读取的 GPS 时间是以北京时间为准，而 IMU/DGPS 输出的是格林尼治时间，所以在进行几何处理之前必须精确确定二者的转换关系。以航空成像光谱仪系统 AISS 为例，其换算公式为

$$POS\_time = (hour + 16) \times 3600 + minute \times 60 + second \quad (4.13)$$

式中，hour 的单位是小时；minute 的单位是分钟；second 的单位是秒。时间转换是在 Labview 环境下实现的，如图 4.9 所示。

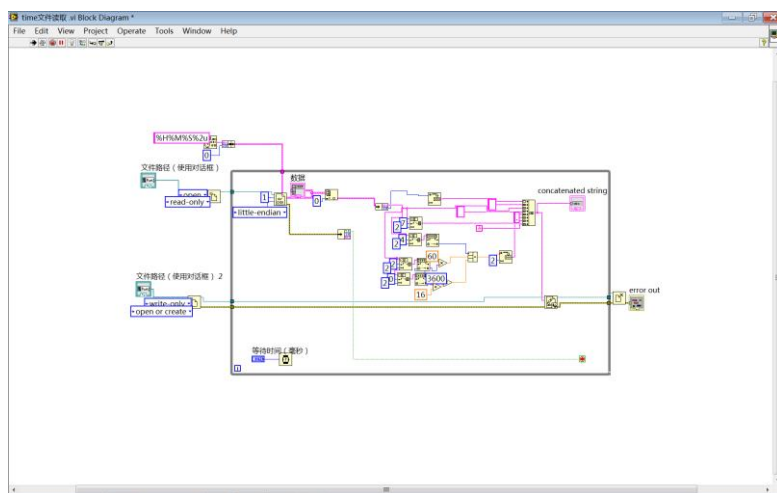


图 4.9 航空成像光谱仪系统 AISS 时间转换界面

## (2) POS 数据预处理

### 1) 坐标变换

由于 IMU/DGPS 记录的是大地经纬度坐标，为了处理方便，使用前需转换成平面直角坐标，平面直角坐标系的选取常用的高斯-克吕格投影。

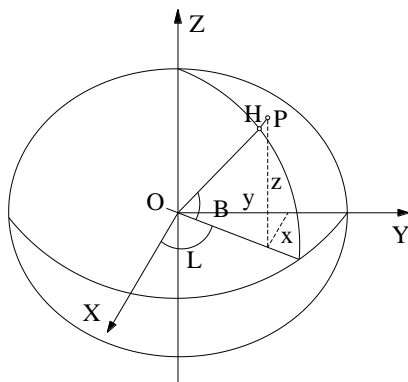


图 4.10 大地坐标系与直角坐标系关系

图 4.10 显示了大地坐标系与直角坐标系间的关系，由几何关系有

$$\left. \begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L \\ Z &= [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

式中,  $B$ 、 $L$ 、 $H$  分别为 IMU/DGPS 记录的经纬度和高程;  $N$  为卯酉圈曲率半径,  $N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$ ;  $a$ 、 $e$  分别为大地坐标系对应椭球的长半轴和第一偏心率,  $e^2 = (a^2 - b^2) / a^2$ 。表 4.3 列出了常用的三种椭球体参数值。

表 4.3 常用的三种椭球体参数值

地球椭球参数	克拉索夫斯基椭球体	1975 年国际椭球体	WGS-84 椭球体
长半轴 $a$ / (m)	6378245	6378140	6378137
短半轴 $b$ / (m)	6356863.019	6356755.288	6356752.314
偏心率平方 $e^2$	0.006693422	0.006694385	0.00669438

## 2) 时间匹配

IMU/DGPS 的采样频率与成像光谱仪数据的采样频率不一致, 航空成像光谱系统 AISS 可见近红外波段图像的采样频率为每秒 38 条扫描行, 短波红外波段图像的采样频率为每秒 50 条扫描行, 而 IMU/DGPS 每秒可以采集 200 次。因此, 必须先确定 IMU/DGPS 与成像光谱仪的时间对应关系, 对 IMU/DGPS 数据进行时间维上的重采样。有两种可选方案: ①首先对成像光谱仪每行数据进行插值, 使其频率与 IMU/DGPS 的数据记录频率相同, 再从 IMU/DGPS 数据中按时间的对应关系选取有效数据; ②直接对 IMU/DGPS 数据按成像光谱仪的数据记录频率进行最邻近重采样<sup>[58]</sup>。

## 4.3 几何处理方法选取与精度评价

### 4.3.1 基于控制点的近似几何校正

基于控制点的近似几何校正利用获取的 GCP 数据对原始旋翼无人机成像光谱影像的几何畸变过程进行数学模拟, 建立畸变空间与校正空间之间的对应关系, 通过这种对应关系将畸变空间中的各像点变换到校正空间中去, 从而实现对旋翼无人机成像光谱影像的校正<sup>[5]</sup>。基于控制点的近似几何校正流程如图 4.11 所示。

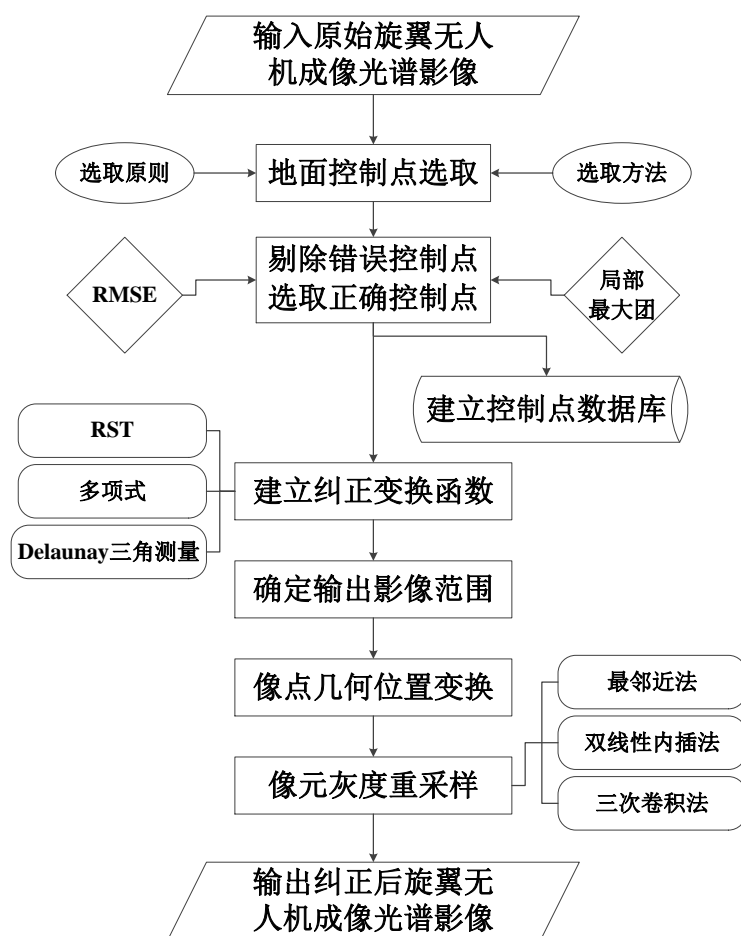


图 4.11 基于控制点的近似几何校正流程

- 1) 地面控制点的选取。依据关键技术中 GCP 选取的原则、选取方法及现有的辅助数据类型，对原始的旋翼无人机成像光谱影像进行影像-影像或影像-地图的控制点选取方式；
- 2) 剔除错误控制点。依据关键技术中错误点检测方法对所选的地面控制点对进行甄别，剔除  $RMSE > \delta$  或所有  $\Delta$  均大于  $\Delta_0$  的错误控制点。利用正确的控制点对建立控制点数据库；
- 3) 影像的几何校正。通过所选的正确控制点计算纠正变换函数中的系数，建立纠正变换模型（包括 RST、多项式和 Delaunay 三角测量），确定输出影像范围后，对像点做几何位置的变换及灰度值的重采样。
- 4) 输出并保存纠正后旋翼无人机成像光谱影像。

### 4.3.2 基于 POS 数据的几何校正

基于 POS 数据的几何校正是建立在共线方程的基础上，分为直接法纠正和间接法纠正两种方法。传统的纠正方法为减少运算量，通常只纠正同一扫描行的若干点，再以这些点为控制点进行多项式拟合，从而对整幅影像作纠正<sup>[59]</sup>。但对于高光谱影像，这种方法会造成光谱损失，下面针对旋翼无人机成像光谱系统提出一套基于 POS 数据的几何校正流程。

#### (1) 直接法

使用直接法对旋翼无人机成像光谱数据进行几何纠正，就是通过原始图像像点计算求出其对应的地面点坐标，变换函数为

$$\begin{cases} X = X_{si} + (Z - Z_{si}) \frac{a_1x + a_2y - a_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} \\ Y = Y_{si} + (Z - Z_{si}) \frac{b_1x + b_2y - b_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} \end{cases} \quad (4.15)$$

其中， $X_{si}$ 、 $Y_{si}$ 、 $Z_{si}$ 、 $\omega_i$ 、 $\phi_i$ 、 $\kappa_i$  为第  $i$  扫描行的外方位元素； $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  ( $i=1,2,3$ ) 为旋转矩阵  $C_i^m(\phi_i, \omega_i, \kappa_i)$  的元素； $(x, y)$  为像点的像平面坐标，由于影像采用线阵推扫式扫描成像，因此  $x \equiv 0$ ； $(X, Y, Z)$  为其对应地面点的大地坐标，如果摄区地势平坦， $Z$  可近似取为平均高程，在有 DEM 支持下，也可通过迭代算法得到。直接法校正流程如图 4.12 所示。

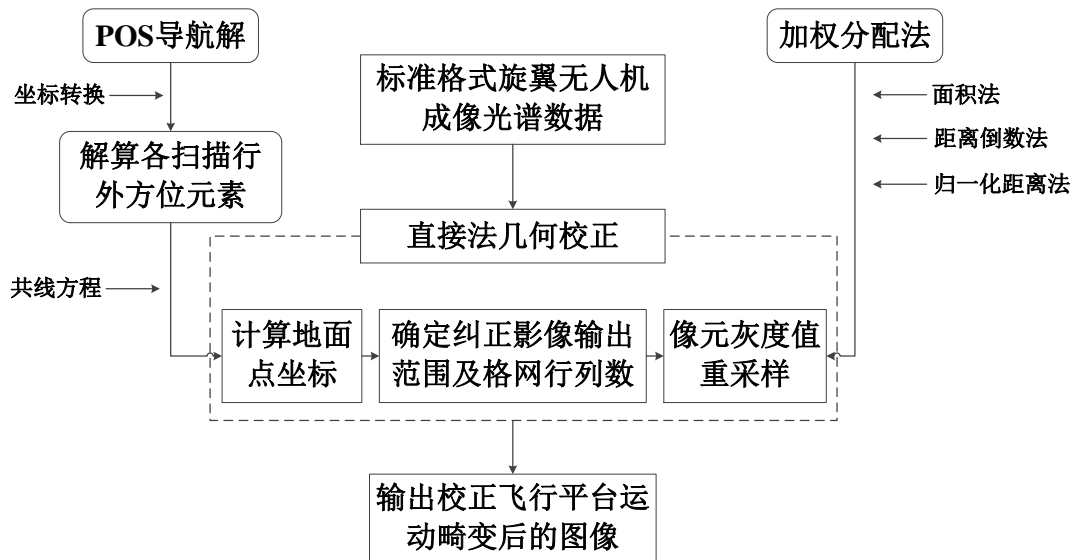


图 4.12 直接法几何纠正

- 1) 通过坐标转换公式 (4.5)、(4.11) 计算影像各扫描行对应的外方位元素；
- 2) 根据直接纠正法公式 (4.15) 计算原始影像各像点对应的地面坐标，并保存；
- 3) 搜索生成地面坐标中  $X_{\min}$ 、 $Y_{\min}$ 、 $X_{\max}$  和  $Y_{\max}$ ，根据它们的组合  $(X_{\min}, Y_{\min})$ 、 $(X_{\max}, Y_{\min})$ 、 $(X_{\min}, Y_{\max})$ 、 $(X_{\max}, Y_{\max})$  确定纠正影像的输出范围及格网行列

$$\text{数, 其中, } samples = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{pixel \ size}, \quad lines = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{pixel \ size};$$

- 4) 根据各像点对应的地面坐标在纠正影像上的位置，采用加权分配的方法进行灰度重采样，可供选择权函数有：面积法、距离倒数法、归一化距离法等<sup>[58]</sup>；
- 5) 输出并保存纠正后的影像。

由于直接法校正后影像上的像点不是规则排列，可能有空白或重复的像素，造成灰度值内插的不准确性，因此一般采用间接法对无人机成像光谱影像进行校正。

## (2) 间接法

使用间接法对旋翼无人机成像光谱数据进行几何纠正，就是利用图像像点对应的地面点坐标  $P$  反求其在原始影像上像点的位置  $p$ ，并将  $p$  的灰度值赋给  $P$ 。

间接法坐标变换函数为：

$$\begin{cases} x = 0 = -f \frac{a_1(X - X_{si}) + b_1(Y - Y_{si}) + c_1(Z - Z_{si})}{a_3(X - X_{si}) + b_3(Y - Y_{si}) + c_3(Z - Z_{si})} \\ y = -f \frac{a_2(X - X_{si}) + b_2(Y - Y_{si}) + c_2(Z - Z_{si})}{a_3(X - X_{si}) + b_3(Y - Y_{si}) + c_3(Z - Z_{si})} \end{cases} \quad (4.16)$$

由上式所解得的  $(x, y)$  是像平面坐标，对于间接法中涉及到的影像行列坐标  $(x', y')$ ，需做以下变换

$$\begin{cases} x' = \frac{x}{pixel \ size} + x_0 \\ y' = \frac{y}{pixel \ size} + y_0 \end{cases} \quad (4.17)$$

式中， $pixel \ size$  为像元尺寸大小， $(x_0, y_0)$  为像主点在像平面坐标系的坐标。间接法校正流程如图 4.13 所示。



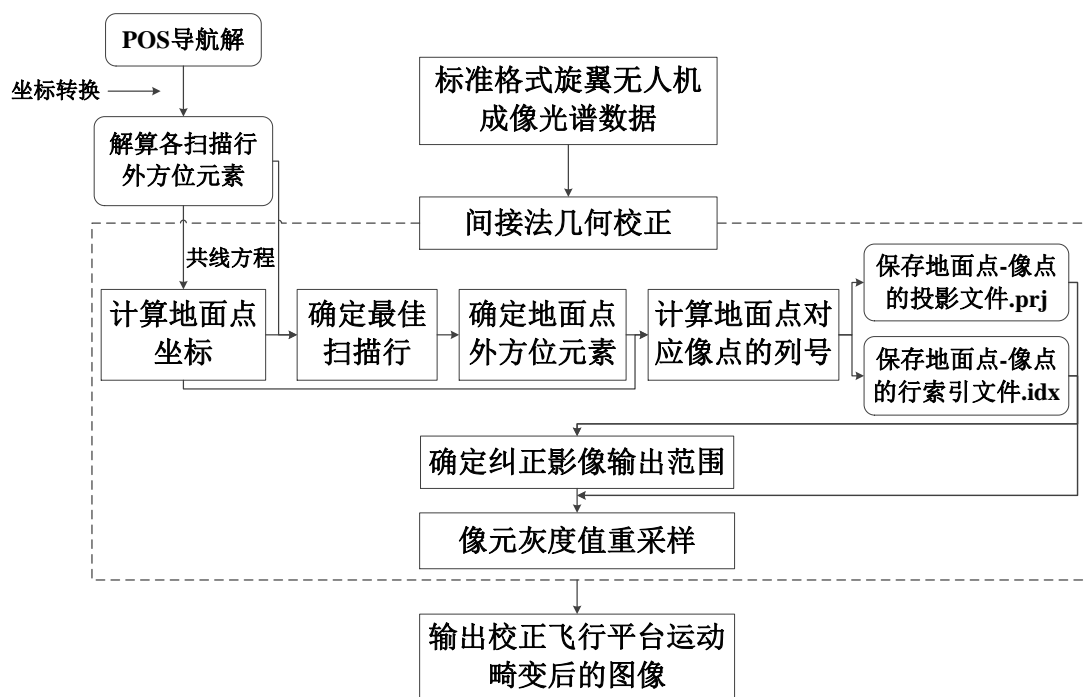


图 4.13 间接法几何纠正

- 1) 通过坐标转换公式 (4.5)、(4.11) 计算影像上各扫描行对应的外方位元素；
- 2) 根据间接纠正法公式 (4.15) 计算原始影像各像点对应的地面点坐标；
- 3) 获取地面点成像的导航解。利用像点坐标的外方位元素及地面点坐标，结合共线方程，通过收敛函数无限逼近  $x=0$ ，将此时所对应影像上的行作为最佳扫描行，该行所对应的外方位元素作为地面点的外方位元素；
- 4) 将地面点外方位元素，地面点坐标代入公式 (4.16) 的下式，计算得到地面点对应原始影像点的列号，这样，就得到纠正后影像点（地面点）对应的原始影像像点的位置信息，将其写入并保存到投影文件.prj 中，将纠正后每行影像对应原始影像的行列范围写入并保存到索引文件.idx 中；
- 5) 通过上述保存的两个辅助文件读入相应的原始影像范围，确定纠正影像的输出范围，并按照一定方法策略（最邻近、双线性、三次卷积）对原始影像进行重采样赋值给纠正影像；
- 6) 输出并保存纠正后的影像。

间接法纠正的关键在于确定地面点的最佳扫描行，进而得到该扫描行对应的外方位元素。地面点最佳扫描行的判断依据是找到一组导航解带入公式 (4.16) 使得所求  $x$  等于或者接近于 0。下面介绍两种快速搜索最佳扫描行的方法。设搜

索窗口的起始行为  $L_s$ ，结束行为  $L_e$ ，如图 4.14 所示。起始行  $L_e$  与结束行  $L_s$  之间相隔  $N$  行。

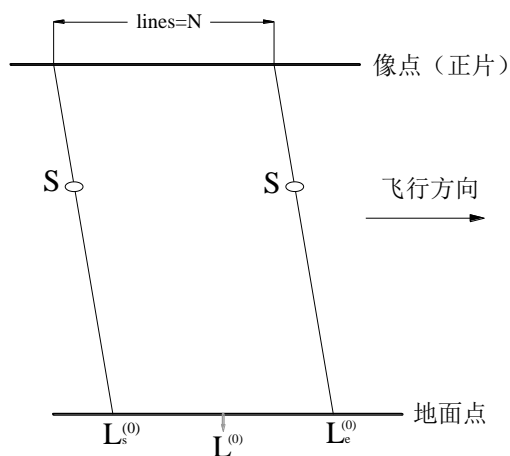


图 4.14 最佳扫描行确定示意图

#### ➤ 折半查找法

折半查找法通过一步步缩小搜索范围来确定最佳扫描行<sup>[26]</sup>，具体操作如图 4.15 所示。

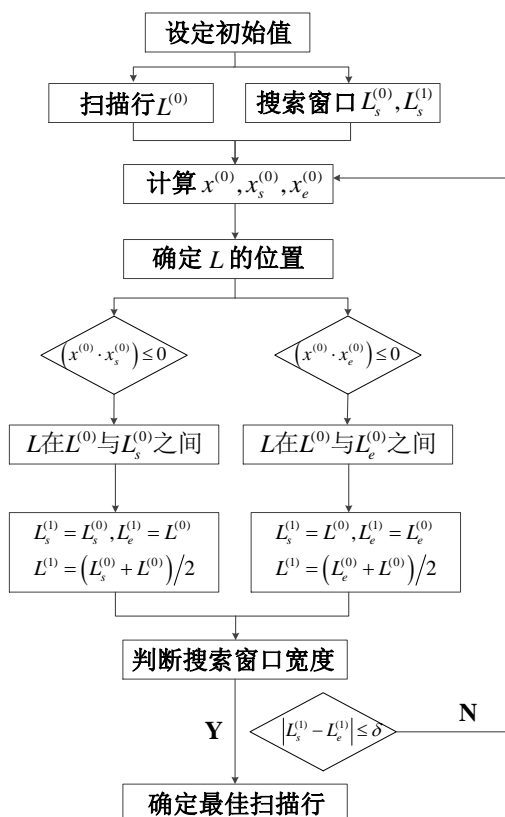


图 4.15 折半查找法确定最佳扫描行

- 1) 设定最佳扫描行的初始值及搜索窗口的初始变量。将最佳扫描行  $L$  的初始变化参量  $L^{(0)}$  设为  $N/2$ ，由以上定义可知，搜索窗口初始值可表示为  $L_s^{(0)}=1$ ， $L_e^{(0)}=N$ 。
- 2) 计算  $x$  值。分别将  $L^{(0)}$ ， $L_s^{(0)}$ ， $L_e^{(0)}$  所对应的外方位数据代入公式 (4.16) 计算它们  $x$  值，记为  $x^{(0)}$ ， $x_s^{(0)}$ ， $x_e^{(0)}$ 。
- 3) 确定  $L$  位置。判断  $(x^{(0)} \cdot x_s^{(0)})$  的符号，若  $(x^{(0)} \cdot x_s^{(0)}) \leq 0$ ，则  $L$  位于  $L^{(0)}$  和  $L_s^{(0)}$  之间，此时令  $L_s^{(1)} = L_s^{(0)}$ ， $L_e^{(1)} = L^{(0)}$ ， $L^{(1)} = (L_s^{(0)} + L^{(0)})/2$ ；若  $(x^{(0)} \cdot x_e^{(0)}) \leq 0$ ，则  $L$  位于  $L^{(0)}$  和  $L_e^{(0)}$  之间，此时令  $L_s^{(1)} = L^{(0)}$ ， $L_e^{(1)} = L_e^{(0)}$ ， $L^{(1)} = (L_e^{(0)} + L^{(0)})/2$ 。
- 4) 判断搜索窗口宽度。若搜索窗口的宽度  $|L_s^{(1)} - L_e^{(1)}| \leq \delta$  ( $\delta$  为给定阈值)，则继续下一步，否则返回第 2) 步。
- 5) 确定最佳扫描行。将搜索窗口  $[L_s, L_e]$  内每条扫描行的外方位元素代入公式 (4.16) 计算  $x$ ， $x_{\min}$  对应的扫描行即为最佳扫描行。

#### ➤ 迭代法

折半查找法虽然避免了对所有扫描行进行查找，但效率还是不高，不适合于包含大数据量的高光谱图像。迭代法作为折半查找法的一种改进方法，可以较快地获得地面点的导航解<sup>[60]</sup>。迭代法的具体操作如图 4.16 所示。

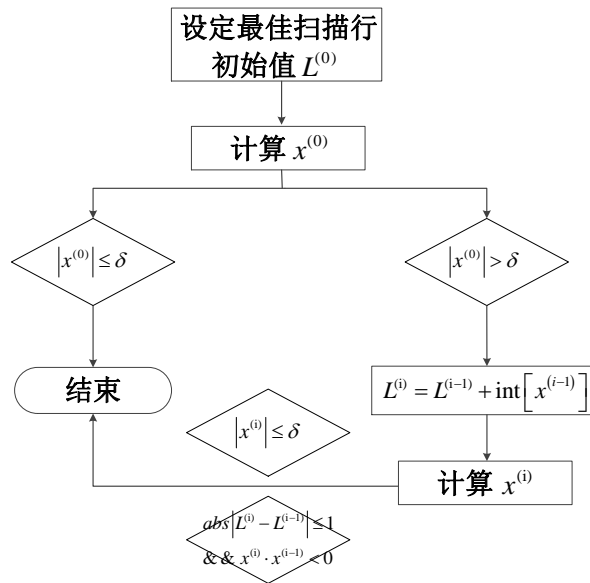


图 4.16 迭代法确定最佳扫描行

- 1) 设定最佳扫描行的初始值。不妨将起始行作为最佳扫描行的初始变化参量，即  $L^{(0)} = L_s$ 。
- 2) 计算  $x$  值。将  $L^{(0)}$  所对应的外方位数据代入公式(4.16)计算其  $x$  值，记为  $x^{(0)}$ 。  
若  $|x^{(0)}| \leq \delta$  ( $\delta$  为给定阈值)，则结束进程， $L_s$  为最佳扫描行。否则继续下一步。
- 3) 确定最佳扫描行。将  $x^{(i)}$  ( $i \geq 1$ ) 转换为图像行列号后，修改最佳扫描行为  $L^{(i)} = L^{(i-1)} + \text{int}[x^{(i-1)}]$ ，计算其  $x_i$  值，重复迭代直至  $|x^{(i)}| \leq \delta$  或  $\text{abs}[L^{(i)} - L^{(i-1)}] \leq 1$  &&  $x^{(i)} \cdot x^{(i-1)} < 0$ ，记录此时  $L^{(i)}$  为最佳扫描行。

### 4.3.3 精度评价

为了评价旋翼无人机成像光谱影像几何校正的效果，通常可采用以下三种方法<sup>[61]</sup>：

#### (1) 叠加检验

叠加检验是将校正后的旋翼无人机成像光谱影像与具有相同比例尺的正射影像或地形图进行叠加，通过比对清晰可辨识标识的重叠情况，直观的得出影像的校正精度。

#### (2) 拼接检验

对旋翼无人机成像光谱影像进行几何校正，目的之一是为了用于相邻影像的配准和融合。因此，在一定程度上，可以用配准过程中影像的拼接质量来衡量影像的校正质量。

#### (3) 随机采样检验

从含有地理坐标的辅助数据（如 GPS 数据、高精度地形图等）中随机抽取一定数量的清晰可识别的地物点，将这些地物点的经纬度与它们在校正后影像上的经纬度作比较，通过计算两者的误差值来定量地反映旋翼无人机成像光谱影像的校正精度。

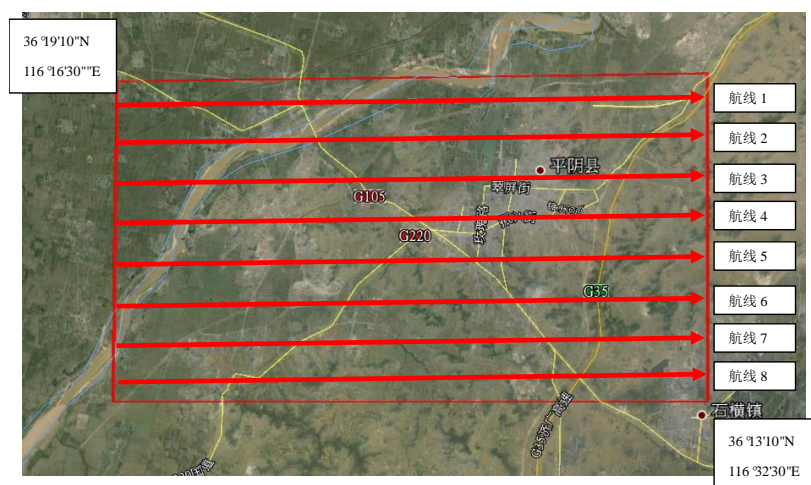
## 4.4 实验与分析

下面以 AISS 影像为例，来实践与验证上述几何处理流程。

本次航空作业共计飞行两架次，分别在 2013 年 12 月 9 日和 12 月 10 日，数据采集时间从当地时间 12:44 开始到 14:35 结束，飞行期间天气晴朗。飞行起降场地位于山东省平阴机场，机场南北长约 700m，东西宽 50m，自南向北起飞（见图 4.17）。飞行航线按东西方向直线规划，共设计 8 条航带，测区东西长 30km，南北宽 11.25km，主要涵盖了城乡居民点、水体和农田植被等。AISS 主要飞行配置参数如表 4.4 所示。



(a) 平阴机场航线设计



(b) 测区范围及航线

图 4.17 平阴机场航线设计及测区航线制定

表 4.4 AISS 的主要飞行配置参数

参数	飞行配置	
	VNIR	SWIR
相对航高(m)	~1500	
飞行速率(m/s)	~160	

影像幅宽(m)	760	640
空间分辨率(m)	1.5	2
帧频 (Hz)	38	50
F 数		5.6
总视场角(°)		73

#### 4.4.1 研究区数据

##### (1) 成像光谱数据

本次选取的成像光谱实验数据是航摄于 12 月 9 日 13 时 31 分的短波红外影像, 大小为  $320 \times 149985 \times 256$ , 覆盖了第 4、5、6、7 条航线。原始数据在基于 Labview 平台开发的软件中打开, 如图 4.18 所示。

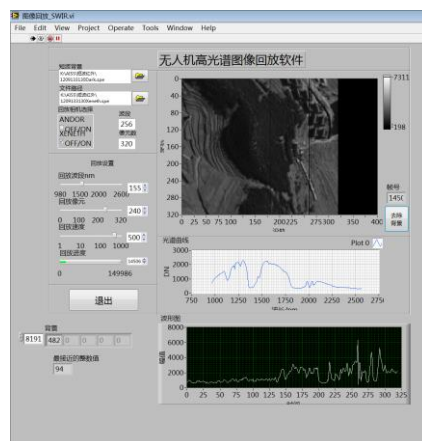


图 4.18 AISS 短波红外波段数据显示

从图中可以看出, 由于遥感平台的不规则剧烈运动, 地物存在严重的扭曲变形, 我们选取其中标识物明显的影像作为研究区影像进行几何校正。研究区选取了从 17825 行开始的短波红外成像光谱数据, 由于该区域地势比较平坦, 在没有 DEM 的支持下, 可取当地平均海拔作为高程, 即  $Z = 37m$ 。

对研究区成像光谱影像所做预处理工作如下: ①对短波红外成像光谱影像做去噪处理, 选取经 MNF 变换后的包含较高信息熵的前 4 个波段用作后续研究; ②利用公式(4.12)及已知参数计算短波红外成像光谱影像的空间分辨率为 1.96m; ③通过公式(4.13)将成像光谱仪读取的北京时间转换为与 POS 输出解一致的格林尼治平均时间。

##### (2) POS 数据

对研究区 POS 数据所做预处理工作如下: ①通过公式(4.14)将 POS 记录

的大地经纬度坐标转换为平面直角坐标；②通过开发的 POS\_Image\_TimeMatch 模块将 POS 数据与短波红外成像光谱扫描数据进行时间匹配,模块界面如图 4.19 所示。

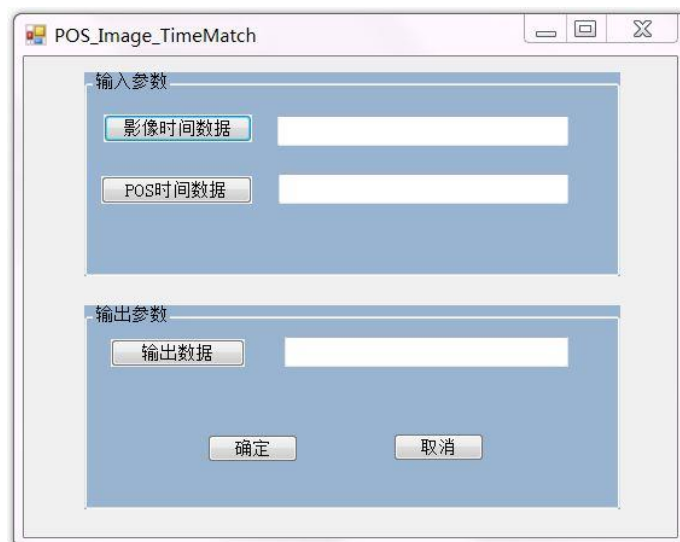


图 4.19 POS\_Image\_TimeMatch 模块界面

#### 4.4.2 基于控制点近似几何校正的结果与分析

按照 4.1.1 章节所述要求采集地面控制点,由于研究区域较小,我们采用均方根误差的方法来检测错误控制点。原始 GCP 分布如表 4.5 所示,从中可以看出 RMSE 精度除 GCP\_3, GCP\_4, GCP\_8, GCP\_12 误差较大外,其余点都能保持在  $RMSE < 2$ ,即误差在 2 个像元以内。手动剔除个别误差较大的控制点,并重新选点,得到表 4.6 所示控制点分布,其总体 RMSE 精度可达 0.98。剔除错误点后 GCP 在原始影像中的分布如图 4.20 所示。

表 4.5 原始 GCP 分布表

控制点 名称	像点 横坐标	像点 纵坐标	参考 横坐标	参考 纵坐标	误差 X	误差 Y	RMSE
GCP_1	43.5	17849.25	443223.17	4014770.29	0.77	-0.57	0.96
GCP_2	60	17900	443159.57	4014758.22	-0.73	-0.41	0.84
GCP_3	167.25	17941	443081.78	4014604.14	0.31	3.42	3.43
GCP_4	53	17952.25	443093.99	4014780.38	-0.69	4.17	4.23
GCP_5	230.75	17973.5	443030.74	4014513.13	0.98	1.56	1.85
GCP_6	287.25	17974.25	443018	4014429.67	-0.4	0.84	0.93
GCP_7	302.5	17984	443004	4014409.14	-1	0.05	1
GCP_8	131	17839.75	443216.67	4014637.74	0.17	-2.27	2.27

GCP_9	265.5	17833	443190.59	4014436.72	-0.97	0.86	1.29
GCP_10	288.25	17835	443184.17	4014401	0.13	-0.32	0.34
GCP_11	306.75	17846.75	443165.76	4014374.66	0.59	-0.21	0.62
GCP_12	170.83	18008	443012.77	4014608.47	1.38	-6.18	6.33
GCP_13	72.83	17994.67	443045.33	4014757.91	-0.53	-0.95	1.09

表 4.6 剔除错误点后 GCP 分布表

控制点 名称	像点 横坐标	像点 纵坐标	参考 横坐标	参考 纵坐标	误差 X	误差 Y	RMSE
GCP_1	44.05	17849.8	443223.17	4014770.29	0.55	0.55	0.78
GCP_2	59.28	17900.45	443159.57	4014758.22	-0.72	0.45	0.85
GCP_3	232.03	17974.66	443030.74	4014513.13	1.28	1.16	1.73
GCP_4	287.1	17974.36	443018	4014429.67	-0.15	0.11	0.19
GCP_5	301.76	17983.18	443004	4014409.14	-0.74	-0.82	1.11
GCP_6	131.04	17838.28	443216.67	4014637.74	0.04	-1.47	1.47
GCP_7	264.54	17834.06	443190.59	4014436.72	-0.96	1.06	1.43
GCP_8	288.41	17834.77	443184.17	4014401	0.16	-0.23	0.28
GCP_9	307.39	17846.46	443165.76	4014374.66	0.64	-0.29	0.71
GCP_10	72.72	17994.14	443045.33	4014757.91	-0.11	-0.53	0.55
GCP_11	145.69	17934.39	443099.04	4014635.38	0	0	0

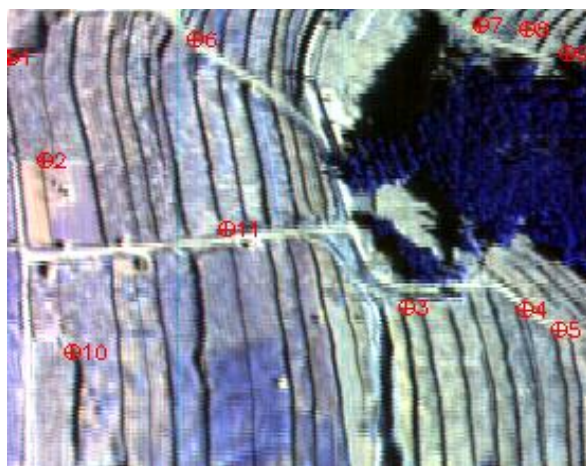


图 4.20 GCP 在原始短波红外成像光谱影像中的分布

(假彩色显示, R=177, G=80, B=50)

将这些正确 GCP 点录入控制点数据库, 并用其建立纠正变换函数。本文分别采用 RST、一阶多项式变换、二阶多项式变换, 结合 3 种不同的灰度重采样方法(最邻近点法, 双线性内插法、三次卷积法)对影像进行几何校正。校正结果如图 4.21 所示。



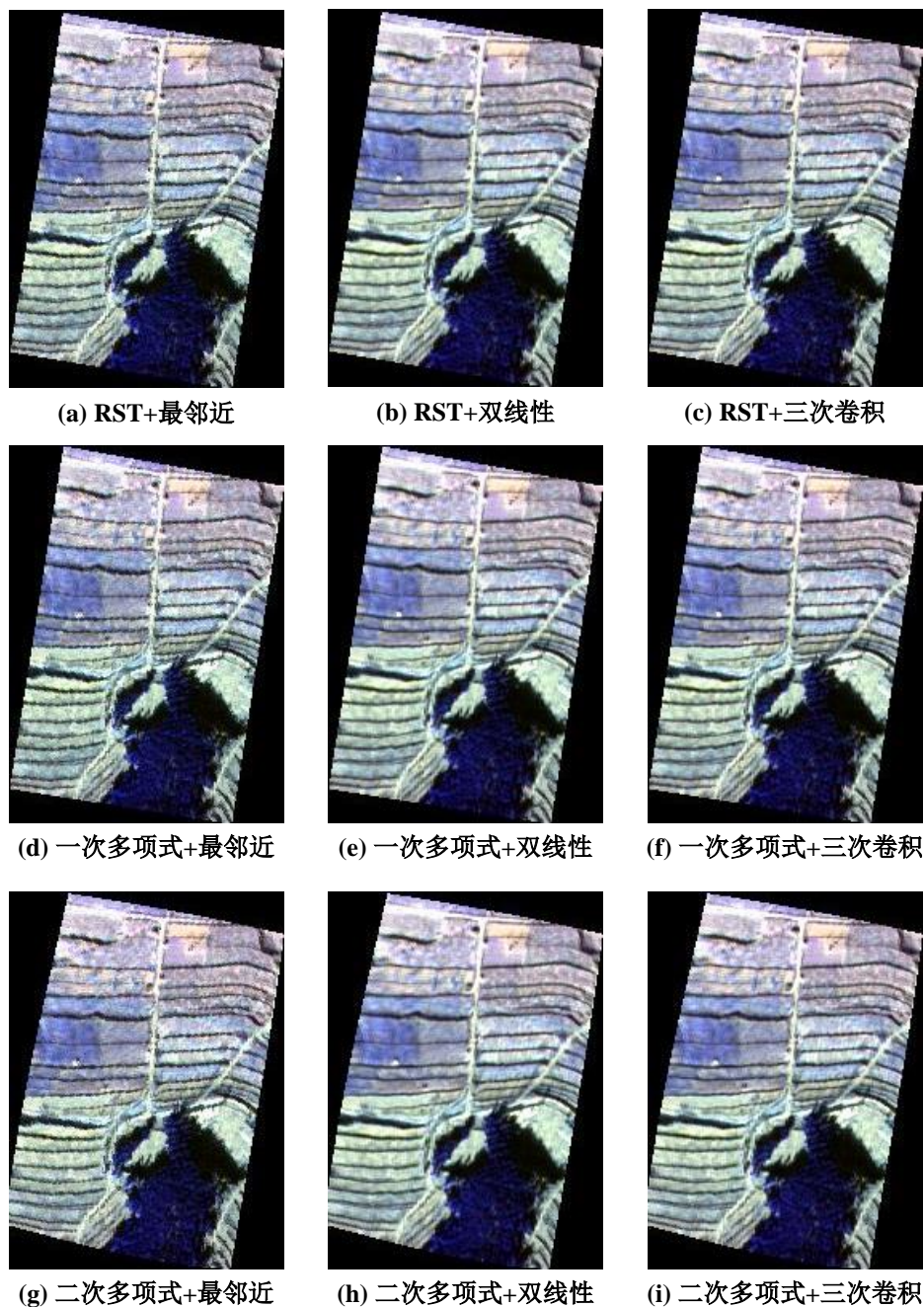


图 4.21 不同变换函数及采样方法组合结果图

目视判别可知，与最近点法相比，双线性内插法和三次卷积法使得影像细节变得模糊，不利于精度的评价。因此我们只考虑最近点法采样下，不同变换对精度的影响。使用的参考影像是实时飞行获取的高分相机数据（分辨率为 0.15m），先对其做基于地面控制点的几何精纠正（总体 RMSE 为 1.57，如图 4.22 所示），校正精度相对于地面的误差在 0.2m 范围内；之后在经过校正后的两幅影像上通过随机采样计算它们的 RMSE 来定量地评估精度，为了统一评价，三种

方法的参考点坐标一致。随机采样点的坐标及 RMSE 如表 4.6 所示。



图 4.22 高分相机几何校正结果图

表 4.7 随机采样点的坐标及 RMSE 误差表

控制点	参考影像		RST			一阶多项式			二阶多项式		
	纬度	经度	纬度	经度	RMSE	纬度	经度	RMSE	纬度	经度	RMSE
GCP#1	4014470.674	443035.0195	4014472.613	443034.253	2.085	4014470.261	443036.017	1.079	4014470.843	443034.8917	0.212
GCP#2	4014437.366	443193.029	4014437.333	443193.013	0.037	4014437.529	443194.777	1.756	4014439.293	443193.013	1.927
GCP#3	4014688.119	443225.9796	4014692.133	443226.333	4.030	4014688.54	443226.4964	0.666	4014688.213	443228.293	2.315
GCP#4	4014507.408	443104.8306	4014509.853	443104.813	2.445	4014508.383	443104.813	0.975	4014507.893	443106.773	2.002
GCP#5	4014721.214	443045.9407	4014719.573	443047.973	2.612	4014721.533	443047.581	1.671	4014719.573	443046.013	1.642

校正后成像光谱影像与参考影像叠加后 GCP 点偏离位置如图 4.23 所示。该图定性给出了精度估计。可以看出，总体而言，一阶多项式变换后得到的地理坐标更接近参考影像坐标，我们可以近似地认为是更接近真实地理坐标；二阶多项式次之，RST 的偏离位置最大。

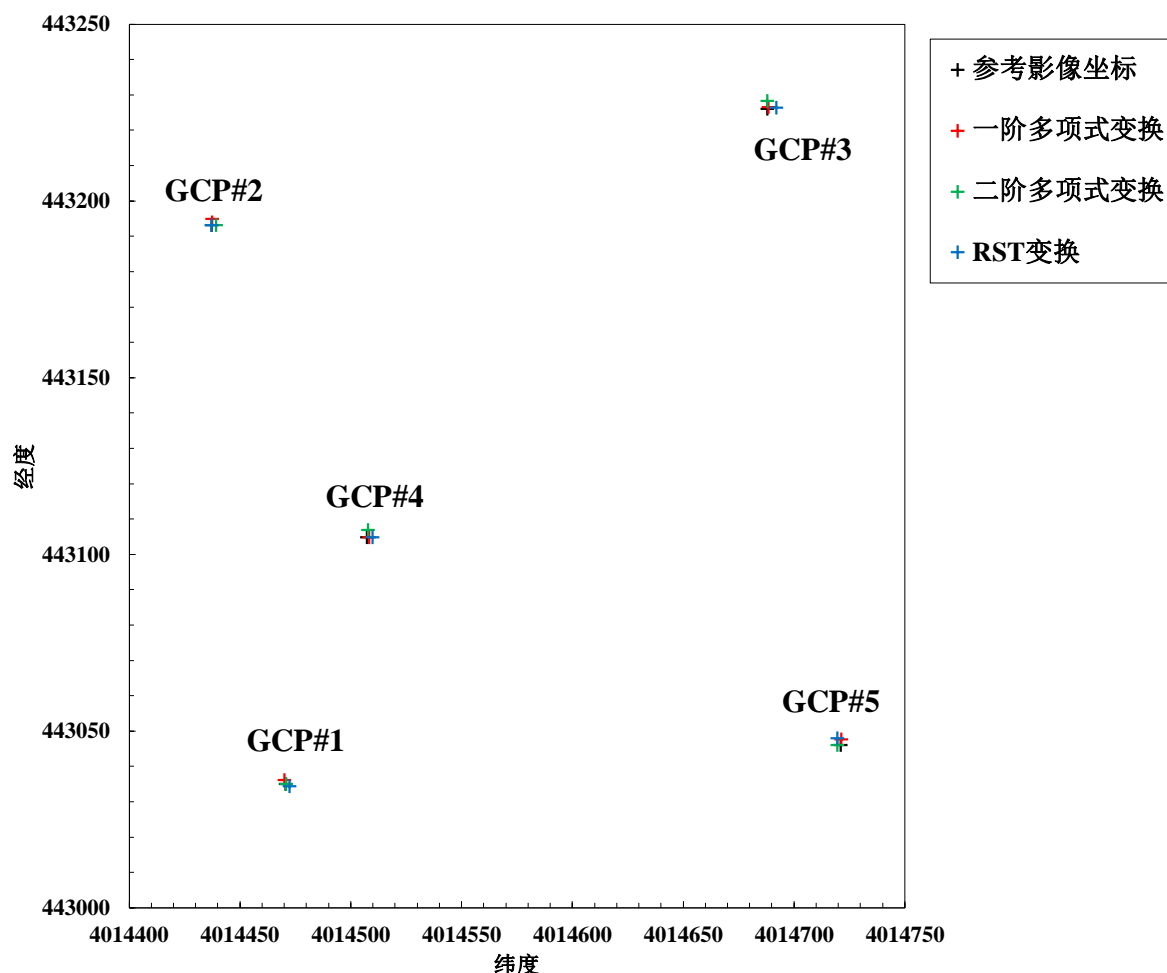


图 4.23 随机采样点偏离位置图

图 4.24 定量给出了三种变换下的精度评价结果。可以看出，尽管 RST 在 GCP#3 处有较低的 RMSE 值，但在其他控制点处的偏离都较大，也就是说旋转、缩放、平移变换不适用于处理内部存在畸变的影像；二阶多项式变换在 GCP#1 处的精度高于一阶多项式变换，而在其他控制点处均低于一阶多项式变换，推测认为在地形比较平坦的地区，使用一阶变换更符合真实模型，二阶多项式变换可能因增加模型复杂度而使得精度较低。

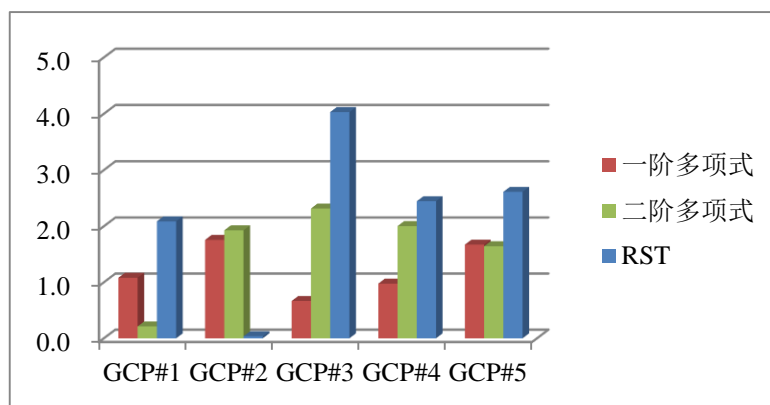


图 4.24 不同变换下精度比较

#### 4.4.3 基于 POS 数据几何校正的结果与分析

由于直接法重采样面临巨大的搜索量，尤其是针对于成像光谱影像，运算量大，校正效率不高，因此我们采用间接法，对于较小的研究区，我们选用折半查找法来确定最佳扫描行。图 4.25 给出了经过坐标转换后 AISS 传感器姿态变化趋势图。

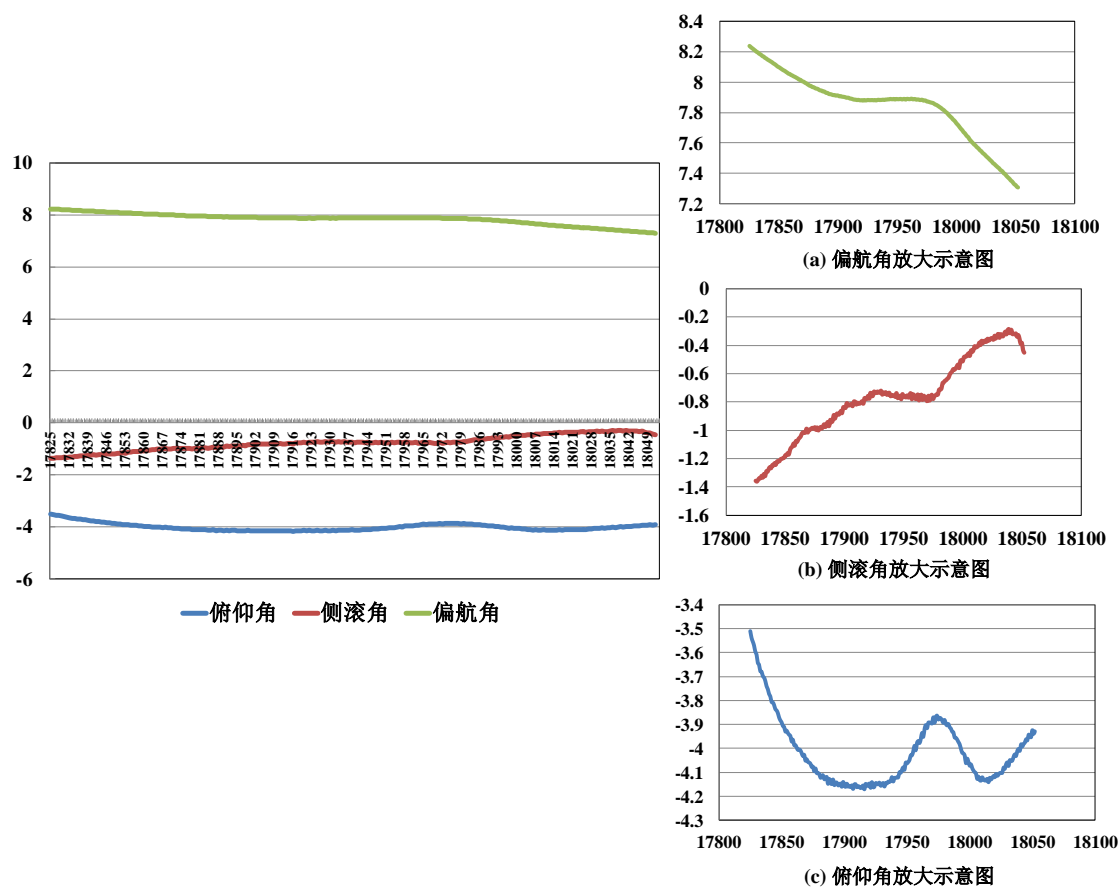


图 4.26 AISS 传感器姿态变化趋势图

由前所述，短波红外传感器每个扫描行的积分时间为 0.02s，获取图研究区短波红外影像用时 4.54s。由上图可知，在这 4.54s 时间内，总体而言，传感器姿态角变化不明显。但单个拿出来看还是有细节变化。可以看出，偏航角整体呈下降趋势，在 17985 行到 18050 行下降最为明显，约有  $0.5^\circ$ ；侧滚角与偏航角的变化趋势刚好相反，整体呈上升态势，在 18040 行处有所下降，由于图中记录的侧滚角是负值，因此它代表的物理意义为传感器侧滚角的变化幅度在减小；俯仰角表现为降-升-降-升，变化无规律，其对影像造成的影响是非线性的，这也是在采用基于 GCP 近似几何校正时虽然控制点处的变形得以纠正，但控制点与控制点间存在的一些内部变形，无法依靠公式模拟来将其纠正到原位。基于 POS 数据几何校正的结果如图 4.26 所示。



图 4.26 基于 POS 数据几何校正结果图

同样以校正后的高分相机数据作为参考影像，通过随机采样的方法评价其校正精度，结果如表 4.8 所示

表 4.8 基于 POS 数据几何校正精度评价

控制点	参考影像		基于 POS 的几何校正		RMSE
	纬度	经度	纬度	经度	
GCP#1	4014470.674	443035.020	4014468.030	443036.721	3.144
GCP#2	4014437.366	443193.029	4014436.343	443193.194	1.036
GCP#3	4014688.119	443225.980	4014689.510	443227.168	1.829
GCP#4	4014507.408	443104.831	4014504.943	443099.721	5.673
GCP#5	4014721.214	443045.941	4014720.543	443042.928	3.087



由表 4.8 可以看出, 基于 POS 数据几何校正精度不高, 究其原因, 可能包含了较大的系统误差, 可以概括为以下几方面: ①纠正过程没有 DEM 数字高程模型的支持, 虽然地形总体比较平坦, 但不能排除在个别区域仍存在地形起伏的影响, 如 GCP#4 上的地物为树木, 其冠层存在一定的高度, 而我们仍取研究区的平均海拔作为该处的高度, 因此产生较大的误差; ②偏心角的检校误差会直接影响到解算传感器外方位元素的精度<sup>[62]</sup>, 并且飞行平台的倾斜抖动无法保证在整个飞行作业中 IMU 与高光谱传感器间的偏心角始终保持不变; ③GPS 获取的是其天线相位中心的位置, 要获取传感器镜头透视中心的空间坐标, 必须精确测量偏心矢量, 这也将影响最终的校正精度。另外, 还有其他因素影响成像光谱仪扫描时间与 POS 记录时间的匹配, 如 AISS 系统航摄曝光时间与工控机生成文件标示的时间不一致, 为了能在极短时间内高速转移 AISS 系统 CCD 探测器获取的大量高光谱影像数据, 需将数据先寄存在内存中缓冲, 再转存到硬盘。因此, 工控机上文件标示记录的时间实际上是从内存中提取高光谱数据的时刻, 而并非真实的高光谱数据获取时刻; 再者, 我们往往无法精确查明航摄时的当地时间与格林尼治天文时间之间的偏差, 这也将带来一定的时间偏差<sup>[2]</sup>。

#### 4.5 本章小结

本章主要提出了一套完整的基于旋翼无人机成像光谱数据的几何处理流程, 从数据的获取到数据的预处理再到针对不同的辅助数据类型的几何处理方法的选取, 最后对校正结果进行检验。另外, 还将旋翼无人机成像光谱影像几何处理过程中存在的几个关键技术进行了分析。为了验证几何处理流程的可行性, 采用 2013 年 12 月 9 日在山东省平阴机场航飞获取的成像光谱数据, 分别对其进行基于控制点的近似几何校正及基于 POS 数据的几何校正, 并通过叠加检验、随机采样检验对校正精度进行评价与分析。

## 第五章 结论与展望

### 5.1. 主要研究结论

目前,国内外学者对无人机遥感平台上搭载航空摄影相机或航空多光谱数字相机获取的 RGB 影像或多光谱影像进行几何校正的技术已日臻成熟,但对于旋翼无人机遥感平台上搭载成像光谱系统几何处理技术的研究还相对较少。本文针对旋翼无人机成像光谱系统,提出了一套完整的几何处理流程,并通过现有的航空成像光谱系统 AISS 获取的高光谱数据对几何处理流程的可行性进行了实施和验证,初步形成了以数据获取、数据预处理、几何处理方法选取及检验校正结果的几何处理模式,为旋翼无人机成像光谱影像几何处理的研究提供一定的参考标准。

本文针对不同的辅助数据集类型,提出了两种基于旋翼无人机成像光谱数据的几何校正方法:基于控制点的近似几何校正和基于 POS 数据的几何校正,将航飞获取的实时高分相机数据经过近似几何校正后作为参考影像来评价上述两种方法的精度。

- (1) 在对成像光谱系统的成像几何原理进行深入分析后,针对旋翼无人机遥感平台,分别以系统性几何变形和非系统性几何变形为切入点,通过建立数学模型,定性地探讨了不同类型的畸变对旋翼无人机遥感影像上所成像点与对应地面点之间关系的影响;
- (2) 提出一套详细的旋翼无人机成像光谱影像基于控制点的近似几何校正流程。在基于选取准则、选取方法来获取地面控制点的基础之上,分析比较了剔除错误控制点的两种检测技术,并根据实验数据的特点,选取合适的错误控制点检测方法,研究表明,该方法能够有效剔除错误控制点,提高几何校正精度,并保障了所构建控制点数据库的精确性,为该区域几何校正控制点选取提供有力支持;
- (3) 提出一套详细的旋翼无人机成像光谱影像基于 POS 数据的几何校正流程。重点针对间接法中最佳扫描行的确定提出了两种快速搜索方法,并根据试验数据特点,选取最佳搜索策略,有效提高了搜索效率和准确性。



## 5.2. 研究展望

由于本人的知识和精力有限，本论文的研究中还存在一些不足和有待改进的地方，需在后续研究工作中作进一步完善：

- (1) 如果所获取的高分相机影像外方位元素已知，则可以尝试通过基于高分相机数据来对旋翼无人机成像光谱影像进行几何校正，具体流程如下：

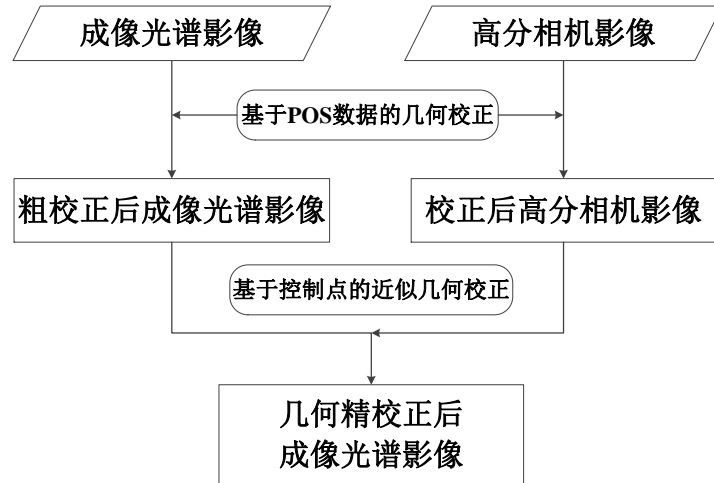


图 6.1 基于高分相机数据的几何校正流程

由于高分相机获取的影像内部畸变很小，并且与成像光谱影像实时获取，因此可以先对高分相机影像进行基于 POS 数据的几何校正（这里的 POS 数据指高分相机的外方位元素，其解算类似于传感器外方位元素的解算，具体见 4.1.3 章节），从校正后的影像中选取控制点，来对几何粗校正后的成像光谱影像做进一步精校正，从而在提高精度的同时，避免了野外采集地面点的繁冗工作量。

- (2) 本文选取的研究区影像地势相对比较平坦，从精度评价结果来看，基于控制点近似几何校正模型稍好，但影像并未涉及过多地形变化比较大的区域如建筑物等。在未来的工作中，将综合考虑这两个方面来研究几何处理流程及其中所包含的关键技术、数学模型的可行性。另外，几何处理最终结果还是要服务于多幅影像的匹配与拼接，本文所选研究区域相对较小，在后续研究中将面向大面积区域进行几何校正，尤其是在处理大数据量时，探讨如何在保证精度的同时，提高影像几何处理的效率。

## 参考文献

- [1] 陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 卫征. 多模态 CCD 相机系统 (MADC) 构像方式和数据处理研究 [D]; 北京: 中国科学院遥感所, 2006.
- [3] 徐豪, 丁晓东, 韩凝, et al. 旋翼无人机遥感图像几何纠正的初步研究 [J]. 浙江农业学报, 2009, 21(1): 63-5.
- [4] GOETZ A F. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(S5-S16).
- [5] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感: 原理, 技术与应用 [M]. 高等教育出版社, 2006.
- [6] 范承啸, 韩俊, 熊志军, et al. 无人机遥感技术现状与应用 [J]. 测绘科学, 2009, 34(5): 214-5.
- [7] COLOMINA I, MOLINA P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 92(79-97).
- [8] JOHNSON L, HERWITZ S, DUNAGAN S, et al. Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV; proceedings of the Proceedings of the 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment, F, 2003 [C].
- [9] ZARCO-TEJADA P J, GONZ LEZ-DUGO V, BERNI J A. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 117(322-37).
- [10] ZARCO-TEJADA P J, CATALINA A, GONZ LEZ M R, et al. Relationships between net photosynthesis and steady-state chlorophyll fluorescence retrieved from airborne hyperspectral imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 136(247-58).
- [11] RUFINO G, MOCCIA A. Integrated VIS-NIR hyperspectral/thermal-IR electro-optical payload system for a mini-UAV [J]. Infotech@ Aerospace, 2005, 1-9.
- [12] 王利民, 刘佳, 杨玲波, et al. 基于无人机影像的农情遥感监测应用 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 136-45.
- [13] 张园, 陶萍, 梁世祥, et al. 无人机遥感在森林资源调查中的应用 [J]. 西南林学院学报, 2011, 31(3): 49-53.
- [14] RAU J, JHAN J, LO C, et al. Landslide Mapping Using Imagery Acquired by a Fixed-Wing UAV; proceedings of the Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g), F, 2011 [C].
- [15] VAN PERSIE M, OOSTDIJK A, FIX A, et al. Real-time UAV based geospatial video integrated into the fire brigades crisis management GIS system [J]. International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2011, 38(1).
- [16] MOLINA P, PAR S, M. C, I. V, et al. Drones to the Rescue! unmanned aerial search missions based on thermal imaging and reliable navigation [J]. InsideGNSS, 2012, (7): 36-47.
- [17] 周洁萍, 龚建华, 王涛, et al. 汶川地震灾区无人机遥感影像获取与可视化管理系统研究 [J]. 遥感学报, 2008, (6): 877-84.
- [18] 雷添杰, 宫阿都, 李长春, et al. 无人机遥感系统在低温雨雪冰冻灾害监测中的应用 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(4): 2417-9.
- [19] D'OLEIRE-OLTMANN S, MARZOLFF I, PETER K D, et al. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

- for monitoring soil erosion in Morocco [J]. Remote Sensing, 2012, 4(11): 3390-416.
- [20] RANGO A, LALIBERTE A, HERRICK J E, et al. Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2009, 3(1): 033542--15.
- [21] CORRIGAN C, ROBERTS G, RAMANA M, et al. Capturing vertical profiles of aerosols and black carbon over the Indian Ocean using autonomous unmanned aerial vehicles [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2008, 8(3):
- [22] 金伟, 葛宏立, 杜华强, et al. 无人机遥感发展与应用概况 [J]. 遥感信息, 2009, 1): 88-92.
- [23] 李德仁, 周月琴, 金为铄. 摄影测量与遥感概论 [M]. 测绘出版社, 2001.
- [24] 林辉, 李际平, 叶光华. 多项式法航空相片几何纠正 [J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(2): 58-62.
- [25] 熊桢, 王向军. 基于 GPS 数据的 OMIS 图像航线校正研究 [J]. 遥感技术与应用, 2000, 15(1): 1-5.
- [26] 刘军, 张永生, 王冬红, et al. INS/DGPS 支持的机载线阵推扫影像几何校正 [J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 21-6.
- [27] IP A W L. Analysis of integrated sensor orientation for aerial mapping [J]. University of CalGARY Geomatics Engineering Reports, 2005,
- [28] LELONG C C, BURGER P, JUBELIN G, et al. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots [J]. Sensors, 2008, 8(5): 3557-85.
- [29] XIANG H, TIAN L. Method for automatic georeferencing aerial remote sensing (RS) images from an unmanned aerial vehicle (UAV) platform [J]. Biosystems engineering, 2011, 108(2): 104-13.
- [30] 张艳, 王涛, 徐青, et al. 无人机载线阵摆扫 CCD 影像几何校正 [J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(3): 168-70.
- [31] 刘异, 李玉霞, 童玲. 无地面控制点的无人机遥感影像几何校正算法 [J]. 测绘通报, 2012, 7): 57-9.
- [32] AUSTIN R. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment [M]. John Wiley & Sons, 2011.
- [33] BENDEA H, CHIABRANDO F, GIULIO TONOLO F, et al. Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV. The Augusta Bagiennorum test site; proceedings of the XXI International CIPA Symposium, F, 2007 [C].
- [34] EISENBEISS H. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition [J]. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 36(5/W1):
- [35] 孙杰, 林宗坚. 无人机低空遥感监测系统 [J]. 遥感信息, 2003, 1): 49-50.
- [36] 金云根. 无人飞行器低空遥感技术及其在大比例尺测绘中的应用 [J]. 华东地区第十次测绘学术交流大会论文集, 2007,
- [37] 李学友. IMU/DGPS 辅助航空摄影测量原理, 方法及实践 [D]; 郑州: 信息工程大学, 2005.
- [38] TITTERTON D, WESTON J. Strapdown Inertial Navigation Technology. 2-nd Edition [J]. The Institution of Electrical Engineers, Reston USA, 2004,
- [39] P L NEN I, SAARI H, KAIVOSOJA J, et al. Hyperspectral imaging based biomass and nitrogen content estimations from light-weight UAV; proceedings of the SPIE Remote Sensing, F, 2013 [C]. International Society for Optics and Photonics.
- [40] AIKIO M. Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph [M]. Technical Research Centre of Finland Heinola, Finland, 2001.

- [41] 吴振洲. 微型 Offner 成像光谱仪和光谱数据处理 [D]; 中国科学技术大学, 2012.
- [42] 徐卫明, 王建宇, 舒嵘, et al. 线阵推扫成像光谱仪几何校正误差的理论分析 [J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2): 109-12.
- [43] 张永生. 遥感图像信息系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [44] 刘勇卫译, 日本遥感研究会编. 遥感精解 [M]. 测绘出版社, 1993.
- [45] BREUER M, ALBERTZ J. Geometric correction of airborne whiskbroom scanner imagery using hybrid auxiliary data [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3/1; PART 3): 93-100.
- [46] HUTCHINSON M F, GALLANT J C. Representation of terrain [J]. Geographical information systems, 1999, 1(105-24).
- [47] TOUTIN T. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(10): 1893-924.
- [48] 朱述龙, 史文中, 张艳, et al. 线阵推扫式影像近似几何校正算法的精度比较 [J]. 遥感学报, 2004, 8(3): 220-6.
- [49] 章孝灿, 黄智才, 赵元洪. 遥感数字图像处理 [M]. 浙江大学出版社, 1997.
- [50] 刘春艳, 汤亚波, 徐守时. 基于控制点的目标地理位置快速自动精校正新方法 [J]. 测绘信息与工程, 2006, 31(1): 10-2.
- [51] 张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正 [D]; 武汉: 武汉大学, 2005.
- [52] 王伟, 童小华, 谢锋, et al. 基于 POS 数据的 OMIS 影像几何校正 [J]. 遥感信息, 2010, 1): 89-93.
- [53] 刘军, 张永生, 王冬红, et al. POS AV510-DG 系统外方位元素的计算方法 [J]. 测绘技术装备, 2005, 6(4): 6-9.
- [54] 董连凤. 高光谱影像预处理技术研究 [D]; 长安大学, 2007.
- [55] CRAMER M, TUTTGART S. Direct geocoding-is aerial triangulation obsolete? [J]. 1999,
- [56] HUTTON J, LITHOPOULOS E. Airborne photogrammetry using direct camera orientation measurements [J]. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 1998, 363-70.
- [57] 张兵, 高连如. 高光谱图像分类与目标探测 [M]. 科学出版社, 2011.
- [58] 吴传庆. 基于 POS/DG 的无稳定平台机载高光谱图像几何校正 [D]; 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2002.
- [59] HONGJIAN Y, YUN S, SHUKAI L. Fast rectifying airborne infrared scanning image based on GPS and INS [J]. Future Generation Computer Systems, 2004, 20(7): 1209-14.
- [60] 张浩, 张兵, 卫征. 基于 POS 的高光谱影像快速几何纠正 [J]. 测绘通报, 2009, 1): 14-7.
- [61] 李峥. 缺少控制点的无人机遥感影像几何校正技术研究 [D]; 成都, 电子科技大学, 2010.
- [62] 马艳华, 徐卫明, 金星, et al. 机载推帚式高光谱影像的空间定位原理与实现 [J]. 红外, 2005, 8): 6-9.

## 个人情况简介

### 一、发表文章目录与研究成果

#### 1. 发表或在投文章

- [1]. 李雪轲, 王晋年, 张立福, 吴太夏, 杨杭, 刘凯, 姜海玲. "基于面向对象规则和支持向量机的天宫一号高光谱影像分类." *遥感学报*. (已录用)
- [2]. Y. Hang, Z. Lifu, G. Yingqian, H. Shunshi, L. Xueke, Z. Genzhong, et al., "Temperature and Emissivity Separation from Thermal Airborne Hyperspectral Imager (TASI) Data," *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 79, pp. 1099-1107, 2013. (SCI)
- [3]. 姜海玲, 杨杭, 陈小平, 王树东, 李雪轲, 刘凯, 岑奕. "利用光谱指数反演植被叶绿素含量的精度及稳定性研究." *光谱学与光谱分析*. (SCI, 已录用)
- [4]. Xueke Li, Jinnian Wang, Lifu Zhang, Taixia Wu, Hang Yang, Kai Liu, Hailing Jiang, "A Combined Object-based Segmentation and Support Vector Machines Approach for Classification of Tiangong-01 Hyperspectral Urban Data," *IGARSS 2014*, Quebec, Canada. (EI, Accepted)
- [5]. 李雪轲, 王晋年, 张立福, 杨杭, 刘凯. "面向对象航空高光谱影像混合分类方法研究." *地球信息科学学报*. (二审)

#### 2. 研究成果

吴太夏; 张立福; 李雪轲; 刘佳; 岑奕; 王树东; 杨杭. 一种外场绝对辐射定标方法和系数. 专利号: 201310553276.8 (已受理)

### 二、硕士期间参与主要项目

1. 参与 TG-01 综合对地观测数据民用试应用矿产油气资源勘探与城市环境应用项目;
2. 参与高分辨率对地观测系统重大专项: 高分环境应用共性关键技术和系统研发子课题: 高分环境应用土地覆盖变化检测示范子系统研发。

## 致 谢

韶华易逝，时光荏苒，转眼已三年。回想三年前，我还是个对高光谱懵懂无知的女孩，三年的求学经历使我懂得很多，这与师长的教诲、家人的支持、同学和朋友们的鼓励密不可分。

衷心感谢我的导师王晋年研究员。王老师豁达干练、待人宽和、思维活跃、见解独到，对遥感应用的发展具有敏锐的洞察和感知能力。感谢您在我无助迷茫时给予的宝贵意见，让我如醍醐灌顶，甘露洒心。上善若水、润物无声，惟有以不懈的努力回报师恩。

衷心感谢我的导师张立福研究员。从论文的选题、实施、写作、编修到最后的定稿无不倾注着您的心血和精力。您严谨的治学态度、活跃的学术思维、饱满的工作热情、温良恭俭的待人风格给课题组营造了一个宽松愉悦的科研氛围，让我们得以高效快乐的学习和科研。

衷心感谢童庆禧院士、郑兰芬研究员和张霞研究员。作为中国高光谱遥感的开拓者、领军人物，童老师高屋建瓴始终站在本领域的最前沿；作为传道授业解惑的师者，童老师犹如明灯，为我们指明前进的方向，您渊博的知识、敏锐的洞察力和不断探索的科研精神永远是我们学习的榜样。特别感谢郑老师，三年如白驹过隙，但研究生入学面试时，您和蔼可亲、循循教导的画面仿佛还历历在目，是您的不断鼓励让我重拾自信，是您的谆谆教诲让我看清路在何方，感谢您对我日常学习、生活和工作中给予的无微不至的关怀。感谢张霞老师对论文的主体架构提出的宝贵意见，他山之石，可以攻玉。您孜孜不倦的科研精神深深感染我，激励我不断向前。

感谢吴太夏师兄、杨杭师兄、张红明师兄、王树东老师、刘佳老师、岑奕师姐、付东杰师兄、张晓红师姐、王潇师姐、赵冬师兄在科研实验项目上给予的指导和帮助。特别感谢吴太夏师兄在科研中鼓励我不断创新进取，使我懂得寻找科研与项目的平衡点，科研项目两不误；特别感谢杨杭师兄，杨师兄工作干练、顽强拼搏、遇到困难不言弃的精神为我树立了学习的榜样；特别感谢张红明师兄，张师兄涉退自述、乐善好施，在我撰写论文期间给予极大指导和帮助；在此，还要感谢小周姐、龚正姐和王畅在日常工作上对我的关心和帮助。

感谢高光谱研究室的兄弟姐妹们，一路走来，因为你们，研究生的生活才会如此丰富多彩，他们是：黄长平、王倩、姜海玲、陈小平、Hasan、胡顺石、帅通、尚坤、谢一淞、张明、李晶宜、杨德贺、段依妮、刘凯、孙雪剑、朱海涛、赵恒谦、张旭凯、丰明博、韩冰、张楠、余晓君、张艮中、庄智、李瑶、王桂珍、石婷婷、孙艳丽、张鹏、周惠慧、简讯、陈

浩。特别感谢刘凯师兄在学业中的耐心指导和热情相助；特别感谢孙雪剑师兄在一起做项目时传授的宝贵经验与方法；特别感谢姜海玲师姐在生活中给予体贴入微的照顾；特别感谢朱海涛师兄在我考研期间及初来乍到时给予的大力扶住和支持。

特别感谢我的小伙伴们：田海静、王晶、邵静，是你们的陪伴让我对生活、对科研充满热忱，累也不说累；特别感谢默默忍受我早出晚归的两位铁胆室友：耿晓庆和汪昊，是你们的包容让我得以顺利完成论文。是一场风暴，一盏灯，把我们联系在一起；是另一场风暴，另一盏灯，使我们再分东西，不论天涯海角，只愿你在我的航程里，我在你的视线里。

感谢研究生处吴晓清老师、刘华梅老师和杨硕老师在学习和生活中给予的支持和帮助，您们兢兢业业、对学生认真负责的态度使我受益良多。

最后，感谢养育我的父母和亲人们，您的关怀、鼓励和支持，一直以来都是我人生前进的源动力。

李雪轲

于中国科学院遥感与数字地球研究所

二零一四年四月 北京