

密级:



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

硕士学位论文

基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机系统研究

作者姓名: 曹丛峰

指导教师: 方俊永 副研究员

中国科学院遥感与数字地球研究所

学位类别: 工学硕士

学科专业: 信号与信息处理

培养单位: 中国科学院遥感与数字地球研究所

2017 年 6 月

**Research of UAV-borne Multispectral Camera System Based
on Narrow Bandwidth Filter Array**

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

**By
Congfeng Cao
Thesis Supervisor: Associate Professor Fang Junyong**

**Institute of Remote Sensing and Digital Earth
May, 2017**

中国科学院大学

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

中国科学院大学

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

摘要

高分辨率多光谱遥感影像从影像的空间结构和光谱特征两方面观测地物, 提供了更多有价值的信息, 在植被、农业、森林、环境保护和灾害应急等遥感应用中具有非常大的优势和潜力。随着遥感应用的深入和精细化, 更为机动灵活的遥感平台, 如低空无人机及飞艇, 逐渐与传统遥感方式如卫星和航空遥感技术形成互补, 并受到越来越多的关注。相比于维护与转场成本高昂的飞艇, 低廉的无人机遥感正在成为获得高分辨率遥感数据的重要途径之一。基于轻小型无人机的高分辨率多光谱遥感应用成为整个行业关注的热点。基于轻小型无人机的高分辨率多光谱遥感数据被广泛应用在作物生长、产量评估、地质灾害评估以及环境监测领域。因此, 基于无人机平台的高分辨率多光谱遥感从传感器设计和数据处理等方面对多光谱相机的研制提出了更迫切的需求及更高的要求。

基于此, 本文设计了一款适用于轻小型无人机的多光谱相机系统, 可应用在植被遥感、农业遥感及森林遥感等行业。作者在考虑了轻小型无人机平台的搭载能力及任务执行能力后, 采用了与传统多光谱相机不同的成像原理, 在探测器前精确安装滤光片阵列, 一次曝光得到地物目标分条带的分波段图像, 通过飞行平台的前向运动获得每个条带区域的多光谱图像, 经过处理后得到地物的高分辨率多光谱影像。这种设计利用平台的前向运动代替了相机旋转、扫描等机械运动, 与传统多光谱相机比较, 具有质量轻、体积小等特点, 适用于轻小型无人机平台。同时, 由于采用较大的探测器件, 对比目前市场上的无人机载多光谱相机, 本文相机能够获得更多的旁向像素数和更宽的旁向幅宽, 提高了系统执行任务的效率。为了与本文设计的多光谱相机成像特点相适应, 作者改进了目前常用的图像配准算法 SURF 算法, 在不影响配准精度的情况下, 提高数据处理效率, 更好地满足了任务执行需求。本文的主要内容和研究成果有几个方面:

- (1) 基于滤光片阵列分光的策略, 研制了轻小型无人机载多光谱相机系统。
- (2) 改进了目前常用的 SURF 图像配准算法, 保证图像配准精度情况下提高了影像的配准效率。
- (3) 在中科院怀来实验站进行了多次相机系统的无人机飞行试验, 获取了

第一手的研制相机原始图像；根据飞行试验和数据处理结果，就相机系统的改进更新、数据处理方法及流程等方面提出了意见及制定了发展路线图；为相机的实用化乃至今后的产业化提供技术基础。

关键字：轻小型无人机；多光谱相机；滤光片阵列；图像配准

ABSTRACT

Remote sensing images of high-resolution multi-spectral provide explanations and observations from both the spatial and spectral features of images and provide more valuable informations. It has the potential and advantages in remote sensing applications such as vegetation, agriculture, forests, environmental protection and disaster response. With the deepening and refinement of remote sensing applications, more flexible remote sensing platforms, such as low-altitude unmanned aerial vehicles and airships, are becoming more and more concerned and it complements traditional remote sensing methods with each other, such as satellite and aeronautical remote sensing technology. At the same time, UAV remote sensing systems are becoming one of the important platforms for high-resolution remote sensing data compared to the high maintenance and transition costs of airships. Therefore, high-resolution remote sensing applications based on light and small unmanned aerial vehicles have become the hotspots of whole industry. High resolution multi-spectral remote sensing data based on light and small unmanned aerial vehicles are widely used in crop growth, yield assessment, geological hazard assessment and environmental monitoring. The high-resolution multi-spectral remote sensing based on light and small unmanned aerial vehicles has put forward urgent requirements and higher requirements for the development of multi-spectral camera systems from sensor designing and data processing and so on.

A multi-spectral camera system for light and small unmanned aerial vehicles (UAVs) is designed in this paper, which can be used in vegetation remote sensing, agricultural remote sensing and forest remote sensing. Considering the carrying capacity and task execution capability of the light and small UAV platform, the author adopts the different imaging principle with the traditional multi-spectral camera, and then installs the filter array accurately in front of the detector. The multi-spectral images of each band region are obtained by the forward motion of the flight platform,

and the high-resolution multi-spectral images of the objects are processed. Compared with the traditional multi-spectral camera, the platform of the camera system is forward motion instead of the rotation, scanning and other mechanical movement and have the characteristic of light weight, small size, and is suitable for small UAV platform. At the same time, due to the larger detection device, it can obtain more adjacent pixels and wider side of the width, improve system task execution efficiency compared with the current market unmanned multi-spectral camera. The At the same time, in order to adapt with the multi-spectral camera imaging characteristics designed in this paper, the author improved the current image registration SURF algorithm commonly used. The algorithm improves the efficiency of data processing without affecting the approval accuracy, and meets the task execution requirements. The main content and research results of this paper in several aspects:

(1) Based on the strategy of filter array spectroscopy, a small-scale unmanned aerial multi-spectral camera system was developed.

(2) A improved common SURF image registration algorithm was proposed, which improves the registration efficiency of mass continuous images and maintains the image registration accuracy.

(3) First-hand development of the camera original image was obtained in the Chinese Academy of Sciences Huailai Experimental Station in a number of camera system UAV flight test; according to the flight test and data processing results, suggestions was proposed in updating the camera system, processing method and the development of the road map was proposed; This paper lay the technical foundation for availability and industrialization of this camera.

Key words: light small unmanned aerial vehicle (uav); Multi-spectral camera; Filter array; Image registration

目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
目 录.....	V
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 无人机遥感系统的研究现状	1
1.2.2 小型多光谱相机的研究现状	3
1.3 研究内容.....	5
1.3.1 基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机研制.....	5
1.3.2 改进 SURF 算法的配准算法	6
1.4 论文结构安排.....	6
第二章 基于阵列分光的无人机载多光谱相机研制	8
2.1 多光谱相机成像原理.....	8
2.2 窄带分光多光谱相机成像原理.....	11
2.2.1 相机成像原理	11
2.2.2 相机详细参数	13
2.3 滤光片阵列多光谱相机飞行试验.....	15
2.4 本章小结.....	17
第三章 窄带多光谱影像处理方法的研究.....	18
3.1 窄带多光谱数据处理流程.....	18
3.2 窄带多光谱影像配准算法研究.....	20
3.3 遥感图像配准拼接技术的研究现状.....	21
3.3.1 配准的几何变换模型	23
3.3.2 图像配准的四个要素	24
3.3.3 图像配准的特征	25
3.3.4 基于特征配准的算法	26
3.4 SURF 算法原理.....	28

3.4.1 特征点检测	29
3.4.2 特征描述	31
3.4.3 特征点匹配	34
3.5 SURF 算法改进	34
3.5.1 基于 SURF 算法的改进	35
3.5.2 算法实验及结果	37
3.6 窄带多光谱影像处理结果及分析	43
3.6.1 图像配准拼接效果	43
3.6.2 精度评价	44
3.7 本章小结	45
第四章 总结和展望	46
4.1 总结	46
4.2 展望	47
参考文献	49
发表文章	54
致谢	55

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

高分辨率多光谱遥感影像丰富了地物观测目标的空间特征和光谱特征,在植被、农业、森林和灾害遥感应用中具有非常大的优势和潜力^[1]。因此,多光谱遥感被广泛应用在作物生长、产量评估、地质灾害评估、环境监测以及地图测绘领域。同时,无人机遥感因其机动灵活、转场成本低等优点逐渐成为获取高分辨率遥感数据的重要手段^{[2][3]}。轻小型无人机作为无人机平台中应用最广的一个分支,因其体积小、造价成本低等优点,逐渐成为民用无人机平台的主流。因此,结合了无人机平台的机动灵活性和多光谱影像特征丰富性等优点的基于轻小型无人机平台的多光谱相机系统,在高分辨率遥感应用中如精细农业、点源与面源污染监测、电子矿山建设等成为被关注的重点。

但是根据抽样统计显示,国内轻小型无人机遥感系统传感器中,光学数码相机占主要部分比例高达占到 77%,其他传感器占 23%,其中多光谱相机仅占 4%^[4]。因此,进一步研发无人机载的多光谱相机系统具有较大的市场价值和应用前景。

在此背景下,本文比较了传统的机载多光谱相机成像原理的优缺点,决定采用阵列式滤光片分光方式,分时、分区域、分波段地获取地物目标的成像原理,设计与研制成了可搭载在轻小型无人机平台的多光谱相机系统,同时为了满足该相机数据处理精度和速度的要求,本文利用改进的 SURF 算法作为多光谱影像的配准算法,在保持图像配准精度的情况下,提高了配准效率。最后,通过无人机飞行试验进行相机性能和功能验证,为相机的进一步更新改进和数据处理方法流程的优化,提出技术要求和改进路线图。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 无人机遥感系统的研究现状

无人机是一种无人驾驶航空器。无人机主要模块包括动力模块、导航系统、

遥控系统和预编程飞行模块^[5]。通过遥控或预编程模块控制飞行。从 20 世纪初无人机研制开始,经过近一个世纪的发展无人机形成了庞大的规模种类繁多。无人机根据不同个标准可划分为不同类型。从动力方面无人机可以分成太阳能、燃油、燃料电池和混合动力类型无人机。从用途方面无人机可以分为军用、民用无人机。从控制方式出发,无人机可以分为无线电遥控、预编程自主控制以及复合控制无人机。还可以以航程为标准分成近程、中程和远程无人机。此外按飞行器重量无人机还可以分为微型、小型、中型和大型^[6]。无人机系统是对无人机一整套配套设备的扩展。它是由机体、机上载荷和地面设备组成的一套综合的技术支撑系统。无人机系统是由一套综合技术支撑能够实现无人机的飞行、操控、数据处理和信息传导等功能的整体^[7]。无人机遥感利用无人机技术,通过遥感传感器技术和通信技术等相关技术获得遥感信息,具有自动化、智能化、专业化的特点。

无人机遥感系统是以无人机为平台获取遥感影像和信息的系统。无人机遥感系统可以实时获得高分辨率遥感影像和视频等数据。成熟的无人机遥感系统需要由飞行平台系统,对地观测传感系统,飞行控制系统,数据处理系统和数据传输系多个系统组成。

无人机遥感系统具有航摄成本低、执行任务过程灵活和对环境条件要求低等众多优点。所以无人机遥感系统已经广泛应用在农林作业、工业测量和土地资源调查中。在智慧城市、数字考古、抢险救灾、三维实景、城市规划中无人机遥感系统应用也越来越广泛。

自 20 世纪 80 年代以来,无人机在遥感领域的优势,使得无人机遥感技术受到了非常高的重视。随着遥感技术的迅速发展,世界各国在无人机遥感系统技术上开展了大量研究,传感器向着数字化、轻重量、小体积和高探测精度方面逐步完善,小型多光谱、高光谱成像技术、合成孔径雷达技术等相关传感器高新技术得到了迅速发展^[8-10]。轻小型无人机体积小,机动灵活、运行成本低,在无人机遥感系统中具非常大的潜力。我国幅员辽阔人口众多,在土地调查、农业监测和灾害预警等领域非常需要轻小型无人机遥感技术。目前我国在无人机遥感应用方面处于世界领先水平。轻小型无人机遥感在汶川、玉树和尼泊尔地震中有突出表

现。在天津港特重大爆炸事故中也有非常好的表现。轻小型无人机遥感在我国突发灾害的减灾救灾应急方面有突出表现^[11-16]。所以轻小型无人机遥感发展迅速，已经广泛应用于遥感的众多领域。

但是轻小型无人机遥感还处于初级阶段，由于飞行平台的商载能力、供电和安全性等方面的限制，目前可实际应用的传感器尚显单一。其中光学相机和视频设备得益于民用光学设备的成熟应用广泛，但是在专业方面，除了高校和科研院所搭载热红外成像仪、多光谱相机、高光谱成像仪外，实际应用尚不普遍，主要原因在于这些设备的微型化、功能、性能或者价格方面离应用需求有一定距离。据统计，目前应用于轻小型无人机遥感的多光谱相机只占无人机传感器的 4%。由此可见，轻小型无人机传感器中多光谱相机严重不足，小型多光谱相机的研制和应用将影响无人机遥感的发展。

1.2.2 小型多光谱相机的研究现状

目前，多光谱相机种类繁多。AD-130GE 是由丹麦著名的 JAI 公司在 2015 年生产的一款多光谱工业相机，相机图如图 1.1。相机使用两个 CCD 传感器，分别为彩色 CCD 和黑白 CCD，采用棱镜分光的分光技术获得四个波段的信息得到多光谱图像。AD-130GE 相机分辨率是 1296×966 像素，相机传感器的帧率是 31fps，如果采用局部扫描方式可将帧率提高到 145fps。Bigeye G-629B Cool 是由德国制造的一款多光谱 CCD 相机，相机采用 600 万像素分辨率的高灵敏传感器，像素数为 3072×2048 ，重 1.39 Kg。相机对环境要求低可以在低光和恶劣的工业环境中稳定工作。SONY 红外工业相机 XC-EI50/CE 广泛应用于工业机器视觉、图像检测系统和医学影像检测系统中。UNIQ 是美国一家专门设计制造高分辨率数字相机的公司，包括光学相机、多光谱相机和高光谱成像仪。UNIQ 产品表现出色，在遥感传感器领域具有很高的知名度。UNIQ 生产的 UP1830 相机如图 1.2 所示，有效像素为 1024×1024 ，有近红，红色，绿色，蓝色四个波段，性能良好。随着多光谱相机广泛应用到无人机上，越来越多的公司开始生产专门搭载在无人机平台的多光谱相机。由 MicaSense Inc. 公司 2015 推出的 MicaSense RedEdge 是一款专门用于小型无人机的先进的多光谱设备，功能强大。其配套软件具有强

大的数据处理,分析能力。MicaSense RedEdge 同时收集五个不连续的光谱波段,可以提供蓝色、绿色、红色波段和两个近红外波段的精确多波段数据,常应用于农业遥感和环境监测,如图 1.3 所示。此外还有近红外 CCD 相机 CONTOUR-IR,分辨率为 752×528 ,重量为 0.23Kg。



图 1.1 AD-130GE 多光谱相机



图 1.2 UP1830 多光谱相机



14

图 1.3 RedEdge 多光谱相机

1.3 研究内容

主要的研究内容是基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机研制和试验。给出相机的详细设计和参数指标。将样机搭载在无人机进行飞行试验得到多光谱数据。然后对数据进行处理，找出与相机相对应的图像处理流程和方法。

1.3.1 基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机研制

本文通过对比现有的光路分光、滤光片分光和多镜头分光策略，指出了滤光片阵列的分光方式的优点：结构简单，稳定性高，造价低等。通过对比说明了基于滤光片阵列分光多光谱相机的不足。通过后面说明给出了相机成像原理和详细技术指标。

本文利用无人机搭载基于滤光片阵列的多光谱相机在中科院怀来试验站获取多光谱数据。将获得的多光谱数据通过裁剪拼接配准等处理得到了高质量的常

规宽幅多光谱数据，初步验证了新型相机的成像原理和多光谱数据的可用性。

目前常见的多光谱相机所获得多光谱图像大都是 1280×1024 像素，而本文研制的滤光片阵列多光谱相机所获取的多光谱单个波段图像可达到 1000（航向） \times 4300（旁向）像素，在保障航向图幅及图像质量情况下，可大大提高旁向幅宽和数据获取效率。

1.3.2 改进 SURF 算法的配准算法

由于数据在处理过程中会被裁剪成窄带图像，本文在数据处理部分还根据数据窄带的特点，研究了现有配准拼接算法，提出效率更高的改进 SURF 算法。

在图像配准中，改进的 SURF 配准效率明显优于 SURF 算法，而且不仅是针对本文相机得图像配准问题，改进 SURF 对图像配准具有普遍的适用性，在保持图像配准精度的情况下效率有明显提升。本文主要优化 SURF 算法特征提取步骤，在特征提取中加入非极大值抑制加强和模板匹配。这两方面的优化可以减少噪声点和不稳定点的影响，使得算法在提取特征时得到的特征更加鲁棒。

文中通过与 SURF 算法的对比实验表明：本文的算法在保持图像配准精度的条件下，配准速度明显提高。

1.4 论文结构安排

本文的研究重点是基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机研究，及与之相对应的高效的配准拼接算法的研究。

第一章主要阐述了基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机研发的背景、意义，阐述了无人机遥感系统、轻小型无人机遥感系统、小型多光谱相机的研究现状，并简要描述了本文所做工作和论文章节安排。

第二章主要对多光谱相机不同的成像策略进行介绍，然后进行了比较和总结。还介绍了基于窄带滤光片阵列多光谱相机的成像原理和关键技术以及在中科院怀来试验站进行的飞行试验。本章节详细阐述了相机的成像原理和相机成像的详细参数，对在中科院怀来试验站进行的飞行试验过程和试验结果作了简要说明介绍。

第三章介绍了数据处理的思路和流程，给出数据处理的细节设计。对数据处

理中的重点图像配准进行了详细的研究。通过结合多光谱遥感图像配准算法的研究现状,改进现有的 SURF 算法,使得算法能够满足相机数据快速处理的需要。最后给出数据处理的结果和精度评价,结果表明相机数据满足科学研究的要求。

第四章对相机研制和数据处理中存在的问题进行阐述和说明,对工作进行了总结和展望。对相机原理造成的波段成像差异问题进行了详细的阐述,对数据处理过程中存在的重影问题进行说明和探讨。总结相机研制和试验初步结果,对本相机接下来的工作进行了展望。

第二章 基于阵列分光的无人机载多光谱相机研制

2.1 多光谱相机成像原理

多光谱相机通过分光技术获得地物的多个谱段所辐射或反射的信息。多光谱相机的分光技术决定了相机的结构和体积以及影像数据处理方法^[17]。目前多光谱相机分光策略主要分为光路分光式分光、滤光片轮式分光、多镜头式分光三种。

(1) 光路分光多光谱相机

光路分光相机是让光通过一个镜头,通过分光器件将全色光分散到多个传感器平面上,在多个平面上获得同一个场景的多光谱图像。部分相机在将光分散到多个平面后通过棱镜将光反射到同一个传感器平面的不同区域分块成像。

光路分光是较早出现的,最为成熟的分光技术,通过用棱镜或光栅将目标的不同波长的光离散开,再通过会聚系统将目标不同波长的光聚焦在探测器的不同位置。光路分光主要有棱镜分光 and 光栅分光技术两种。棱镜分光的原理如图 2.1 左图 a 所示,它利用不同波长的光在介质中折射率不同的原理进行分光。光线进入棱镜通过在棱镜中不同的折射率最终投影到不同位置的探测器上。棱镜分光优点是光学效率高,不存在光谱级重叠的问题,但是棱镜对于光谱的色散是非线性的,受材料的限制棱镜分光在紫外范围内色散性能优于红外范围。

光栅是重要的色散元件,也是目前成像光谱仪最广泛采用的一种分光器件。光栅分光原理是利用光经过大量等间隔的狭缝产生衍射和干涉的现象进行分光。。光栅分光具有有高色散率和色散均匀性的优良特点,但是光栅光学效率较低,结构较复杂^[18]。

2002 年,美国邓肯技术公司(Duncan Technologies, Inc.)推出了单镜头多 CCD 数字相机 MS4100^[19],该相机就是采用棱镜分光的方法获取多光谱图像,被广泛应用于精准农业和林业、环境评价、海岸线管理、湿地研究。MS4100 相机图如图 2.1b 所示。光路分光式多光谱相机具有技术成熟,图像质量高的优点。

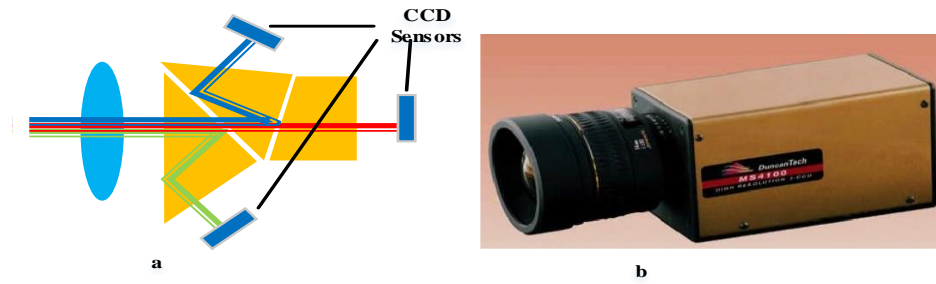


图 2.1 基于光路分光的原理和 MS4100 多光谱相机

(2) 滤光片轮式多光谱相机

滤光片轮式多光谱相机成像原理是将传感器采样频率与滤光片轮转频率适当同步,使滤光片每轮转到一个滤光片上都能在传感器上成像。滤光片轮式多光谱相机的滤光片可以更换,自由选择波段和通道数而且光路简单。SpectroCAM 多光谱相机采用的就是滤光片轮转式分光方式,通过滤光片转轮可以获取地物八个波段的反射信息。原理图和 SpectroCAM 实物如图 2.2 所示

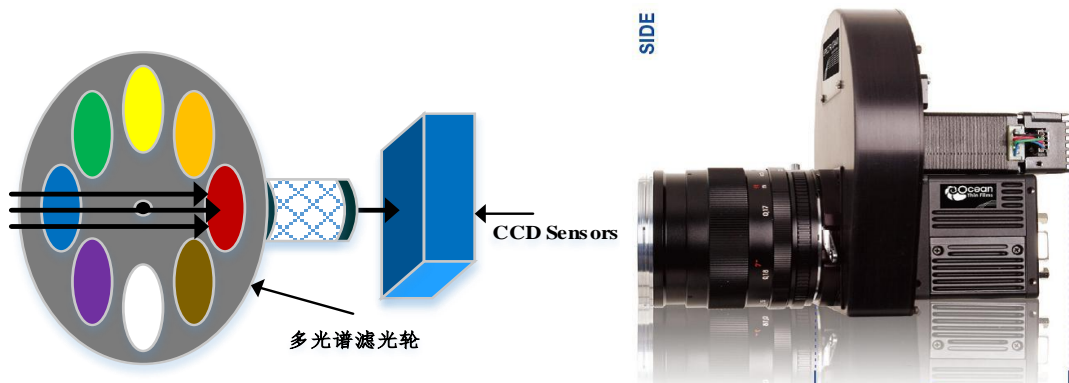


图 2.2 基于滤光片轮式分光的原理和 SpectroCAM 多光谱相机

(3) 多镜头分光多光谱相机

多镜头分光多光谱相机将每个谱段成像由分开的 CCD 成像平面阵列和光学装置来完成,这种方案的多光谱 CCD 相机,实质上是由多个 CCD 相机组装而成,每个相机镜头前配有不同的滤光片,每个镜头获取一个波段的图像,多个镜头对同一目标同时曝光获取多波段图像。光谱带的选择是由各通道物镜前的光学滤光片完成的。如图 2.3 所示。此类型多光谱相机的每个谱段都有独立的探测器和滤光片,且分别对应一个数据采集系统,会拥有较高的地面分辨率和图像质量。

这种方案系统设计简单，分光方法简便易行，可以更换不同焦距的镜头和不同波段的滤光片，具有较大的灵活性。采用多镜头分光的代表相机是 Mini_MCA，Mini MCA 拥有极好的地面分辨率而且用户可更换滤光片。

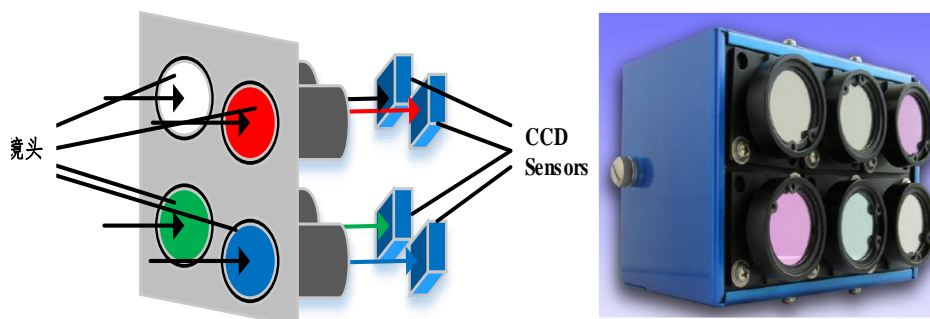


图 2.3 基于滤光片轮式分光的原理和 Mini_MCA 多光谱相机

但光路分光式多光谱相机复杂的光栅棱镜使得相机体积较大且相机系统复杂，波段数的增加会降低图像质量及成本的提高^[20]。轮转系统增加了滤光片轮式多光谱相机系统的复杂性，无法使相机达到理想的最小体积和重量。由于多个波段的姿态数据不一致，也增加了后续的影像处理难度。多镜头分光多光谱相机由于采用短焦距镜头和小探测器使得能够实现较小的相机体积和重量，但多光谱图像质量会受到一定的影响^[21]。

此外，还有基于线性渐变滤光片实现的相机，这项技术主要依靠线性渐变滤光片。线性渐变滤光片紧贴探测器，探测器的若干列像元对应线性渐变滤光片的某一光谱带，则整个像面对应全部工作波段。每次拍摄能够获得目标的二维空间信息以及各视场对应的谱带信息。通过扫描(扫描方向与线性渐变滤光片渐变方向一致)获得目标的完整数据。最后通过数据处理可重构出该目标的准单色图像及其反射光谱。随着渐变滤光片工艺水平的提高，渐变滤光片光谱分辨率可以达到 1%，光谱透过率能达到 70%^[22]。所以线性渐变滤光片光谱仪能够覆盖很宽的光谱范围，根据该原理研制的高光谱成像仪已逐步走向实用化。目前基于线性渐变滤光片实现上百个波段分光的相机一般是归于高光谱相机类型，采取推扫式成像扫描，数据质量对拍摄姿态和平台稳定性要求比较高。基于类似渐变滤光片的成像方式，有相关研究给出了基于滤光片阵列多光谱相机的设计方案，给出了

相机的一些理论参数^[23]。

2.2 窄带分光多光谱相机成像原理

光路分光式多光谱相机复杂的光栅棱镜使得相机体积较大且相机系统复杂，波段数的增加会降低图像质量及成本的提高。轮转系统增加了滤光片轮式多光谱相机系统的复杂性，无法使相机达到理想的最小体积和重量。由于多个波段的姿态数据不一致，也增加了后续的影像处理难度。多镜头分光多光谱相机中多个镜头、多个滤光片和多探测器的使用相机达不到理想体积和质量。如果采用短焦距镜头和小探测器实现较小的相机体积和重量，多光谱图像质量会受到一定的影响。本文借鉴目前广泛应用在高光谱成像仪的滤光片技术，设计研制基于滤光片阵列的多光谱相机。该相机仅通过一个镜头将进入镜头的光线通过滤光片阵列进行分光，在探测器上成像。相机结构原理简单，系统稳定性高，成本较低。而且本文设计研制的相机幅宽达到 4384 像素，相比于目前的光路分光，轮转滤光片分光和多镜头分光多光谱相机幅宽大多在 1000 像素之间，大大提高了作业效率。

2.2.1 相机成像原理

相机成像原理如图 2.4 所示：把多个独立的滤光片基片依次拼接成滤光片阵列，然后将该滤光片阵列放置于成像器件前。光线经过滤光片分光后的多波段光线分别分散到探测器的不同位置，在面阵探测器上的不同区域得到相应波段的图像。每次曝光可获得不同条带区域的不同波段的图像，通过飞行平台的前向运动即可获得同一条带区域的多光谱图像。

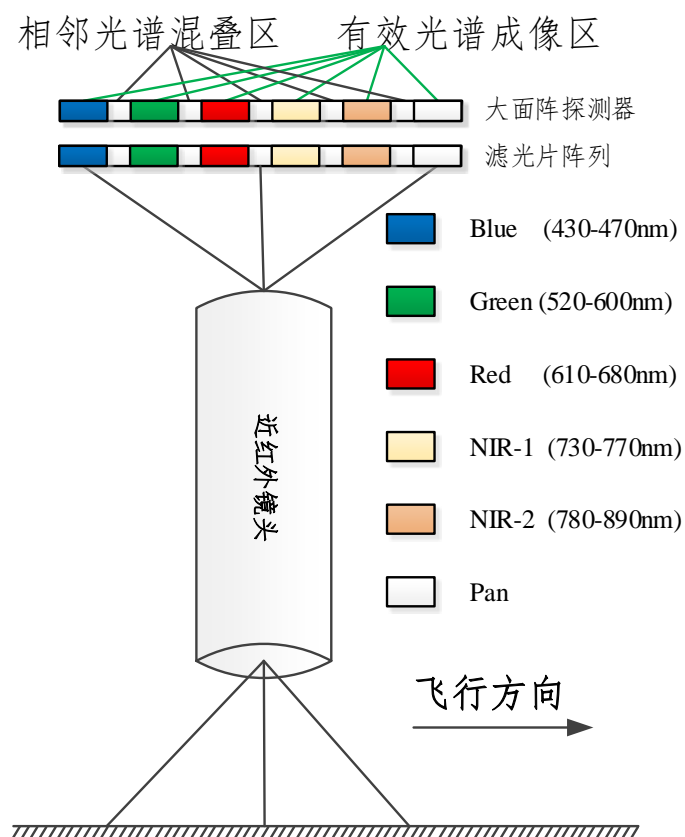


图 2.4 滤光片阵列多光谱相机成像原理

为了构成完整实用的多光谱相机系统，研制配备了小型三轴云台、微型 GPS/姿态模块、同步控制模块、采集存储模块以及预处理软件，相机系统总体框图如图 2.5 所示。

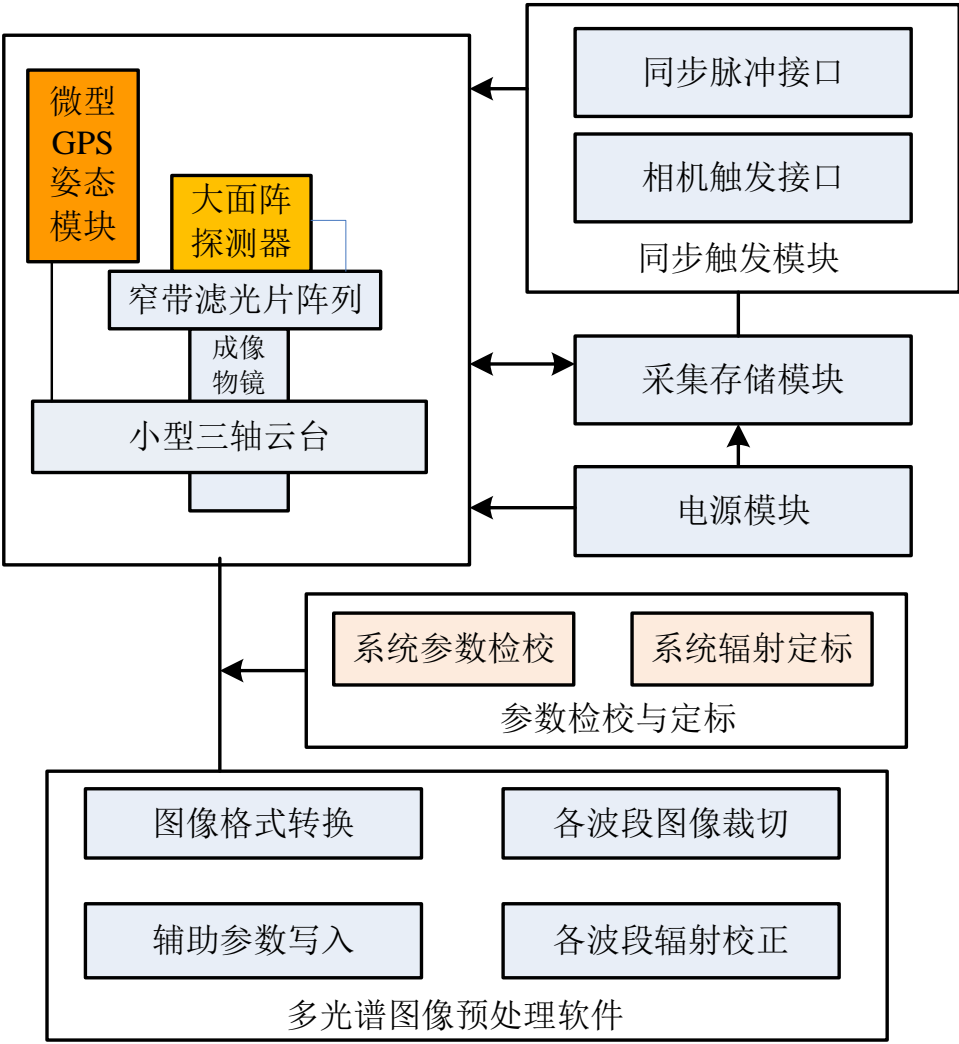


图 2.5 相机系统总体框图

2.2.2 相机详细参数

相机的详细参数主要包括多光谱图像的波段数。单幅图像幅宽以及经过滤光片阵列分光后每个波段在探测器中成像的单波段图像的幅宽。

根据多光谱相机应用需求，选取了 5 个广泛应用于农业、林业和环境等领域的多光谱波段^[24]，并增加一个全色波段构成 6 波段滤光片阵列。这 5 个定制的多光谱滤光片透过率曲线和谱带宽度如图 2.6 所示，图 2.7 所示为拼接好的滤光片阵列。相机获取的多光谱图像中各波段的位置分布从左到右分别是：蓝色滤光片、绿色滤光片、红色滤光片、近红外 1 波段滤光片、近红外 2 滤光片和未加涂层的全色滤光片。单个波段图像的长边对应探测器的短边，单个波段图像的短边

对应探测器的长边。

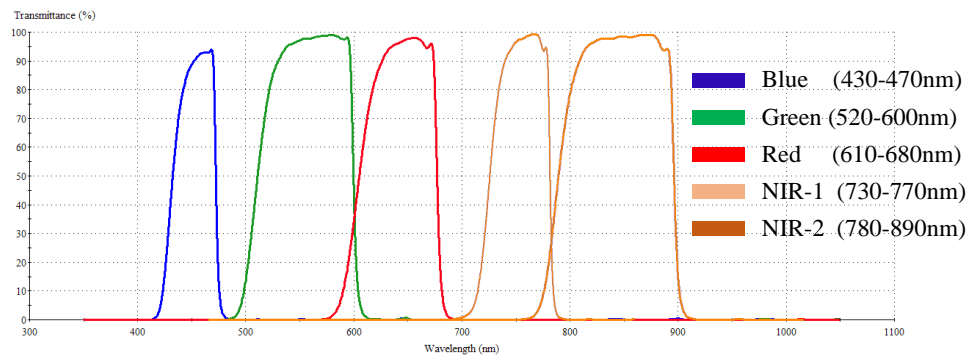


图 2.6 滤光片透过率

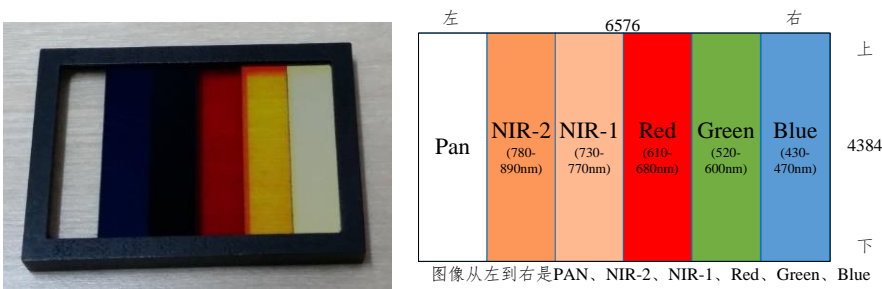


图 2.7 图像波段排列

采用阵列滤光片成像，每个波段在航向上都是分区域的窄条带图像。波段数过多或探测器像素数过小会导致航向方向的像素数过低而近似于线阵推扫成像，会加大对采集速率的要求及增加后期几何纠正的难度。本文采用具有较大像素规模的 KAI-29050 探测器，该探测器的像素数为 6576×4384 ，6576 对应飞行方向，依次排列 6 个波段，每个波段的像素数能够达到约 1000 像素，而 4384 对应旁向方向，能够实现较宽的旁向幅宽。探测器及其详细参数如表 2.1 所示。KAI-29050 探测器采用 Interline（行转移）方式，其采集速率帧频最高可以到达 4fps，能够满足低空无人机成像对采集速率的要求。

表 2.1 面阵探测器基本参数

参数	指标
探测器型号	KAI-29050
像素数	6576×4384
像素尺寸	5.5μm
成像面尺寸	36×24mm
采集帧频	最高 4fps

量化位数	14 位
------	------

本文研制的阵列滤光片多光谱相机如图 2.8 所示，长宽高尺寸为 21 mm×19mm×78mm，相机系统总重量约 1.5kg，共有 6 个波段，相对航高 200 米时分辨率为 5 厘米。一次拍摄获取的一景原始图像为 4384×6576 像素，包括 6 个波段的多光谱图像。经过实验室内光谱标定，可确定一景影像中各波段去除混叠后的具体位置，以便进行多光谱图像的裁切，6 个波段无混叠图像的长宽像素数如表 2.2 所示，全色波段最窄图像幅宽为 628×4384 像素，近红外一波段最宽幅宽为 947×4384 像素。

表 2.2 滤光片阵列多光谱相机各波段幅宽

波段	Pan	NIR-2	NIR-1	Red	Green	Blue
长×宽	628×4384	873×4384	947×4384	841×4384	931×4384	655×4384



图 2.8 滤光片阵列多光谱相机

综上所述，文中设计研制的基于滤光片阵列的多光谱相机，重 1.5Kg，共有全色、近红 2、近红 1、红、绿和蓝 6 个波段，单幅影像画幅为 6576×4384 像素，图像单波段影像最窄为 628×4384 像素最宽为 947×4384 像素。相机在百米高度获得的影像分辨率在亚米级。

2.3 滤光片阵列多光谱相机飞行试验

2015 年 11 月在中科院遥感地球所怀来实验站利用多旋翼无人机进行了滤光片阵列多光谱相机的飞行测试试验。该站是中科院正在运行的遥感实验站之一。

怀来试验站拥有华北平原和华北平原向蒙古高原过渡的生态地理特征。试验站范围内拥有丰富的地表类型，包括农田、水域、山地、草场和湿地滩涂。怀来遥感综合试验站拥有众多观测平台如高架车和高架塔吊。而且还有自动气象站、波纹比系统、涡动相关仪、和 6 谱段辐射观测系统等其它遥感观测仪器设备。

实验区的典型建筑包括怀来试验站主楼和其他附属建筑。由于季节原因植被主要是松树、落叶的杨树、绿化带冬青以及将枯杂草。道路分为水泥路面和土路两种。农田大部分是裸地，还包括少量的冬小麦和冬季作物。

拍摄时天气晴朗，无云，基本无风。相对飞行高度为 200m，理论空间分辨率达到 5cm；设计航线数为 2 条，飞行速度为 5m/s，采集帧频为 2fps。图 2.9 为搭载多光谱相机的多旋翼无人机。



图 2.9 搭载多光谱相机的多旋翼无人机

飞行试验共获得影像 118 幅，图像纹理清晰地物细节明显。图 2.10 为多光谱相机获取的单张原始影像。通过影像可以看到基于滤光片阵列的多光谱相机获得的图像质量很高，纹理清晰；汽车、花坛、房子瓦片和田垄等细节明显。同时，还可以看到明显的光谱重叠区域以及不同波段的明暗差距。



图 2.10 多光谱相机获取的单张原始影像

2.4 本章小结

本章主要介绍常见多光谱相机成像原理和基于滤光片阵列多光谱相机的详细参数。相机通过把多个独立的滤光片基片依次拼接成的滤光片阵列放置于成像器件前，经过滤光片分光后，多波段光线依次成像于探测器前，在面阵探测器上的不同区域得到不同波段的图像。每次曝光可获得不同条带区域的不同波段的图像，通过飞行平台的前向运动获得同一条带区域的多光谱图像。相机的主要参数包括相机的波段（目前有全色波段，近红 2，近红 1，红色波段，绿色波段和蓝色波段共六个），相机所获取的多光谱单个波段图像可达到约 1000（航向）4300（旁向）。以及单波段窄带图像每个窄带波段的尺寸（最窄尺寸为：628×4384 像素，最宽尺寸为，947×4384 像素）。

本章最后介绍多光谱相机在中科院遥感地球所怀柔实验站的实验，对环境概况进行了介绍，并展示了获取的图像。得到了高质量的低空遥感数据，初步验证了新型相机的成像原理和多光谱数据的可用性。

第三章 窄带多光谱影像处理方法的研究

根据上一章介绍的相机详细技术指标，可以看到，基于滤光片阵列多光谱相机试验后的到的数据不像常规多光谱数据是一个数据立方体而是在一个二维图像上具有多个波段（文中为六个波段）的信息。因此需要一套特殊的数据处理流程。下面将分章节分别介绍数据处理中的图像裁剪，图像配准拼接和图像谱段间配准。

3.1 窄带多光谱数据处理流程

基于滤光片阵列多光谱相机一张二维图像具有多个波段信息的成像方式所以数据处理主要涉及单波段裁剪、图像校正、单波段图像拼接、谱段间配准与合成等。

首先需要将二维图像中的多个波段图像裁剪成能够统一处理单波段的窄带图像，每个波段裁剪完成后进行几何校正，去除几何畸变对数据的影响。然后，将得到的每个波段的窄带图像进行配准拼接，使多张窄带图像最终拼接成为宽画幅的整幅单波段图像（文中相机则会得到六个波段的宽画幅图像）。因为相机内在结构决定，每个波段之间会有错位和视差，所以通过最后的波段间图像配准，变换得到最终的多光谱图像。

数据处理的技术路线如图 3.1 所示：单波段裁剪是将一幅图像裁剪为 6 个单波段窄带图像，图像校正对单幅图像进行几何纠正，拼接则是将裁剪后的图像拼接为常规的单波段整幅影像；谱段间配准是将各谱段之间进行高精度配准，再合成为整景多光谱影像。

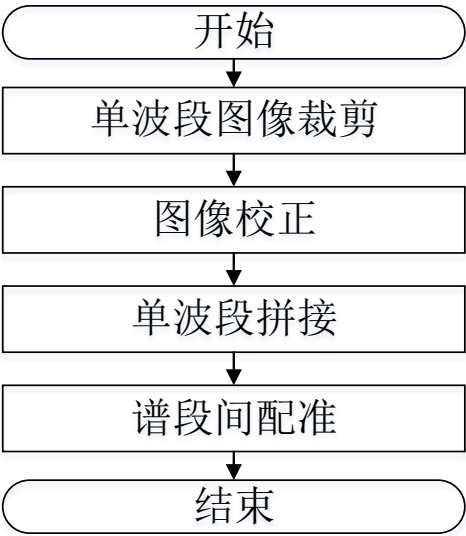


图 3.1 数据处理技术路线图

首先可以根据实验室内光学测试的结果确定各个波段无混叠清晰成像的确切位置分布直接进行多光谱图像的裁切。经过图像裁剪后可得到全色波段、近红 2、近红 1、红色波段、绿色波段和蓝色波段六个波段影像。

图 3.2 为裁剪后的单波段局部图像，分别为两个近红外波段、红波段和绿波段，图像清晰，质量较好。

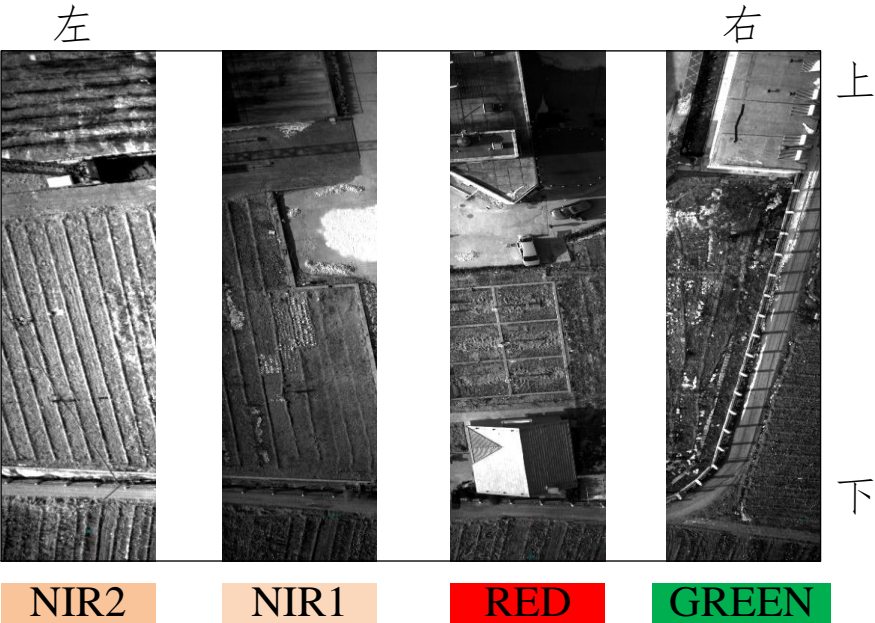


图 3.2 裁剪后单波段图像

3.2 窄带多光谱影像配准算法研究

由于多波段影像在同一镜头视场和探测器上分区域成像，每个波段图像具有不同的畸变量，通常情况下，机下点的红和近红外波段的畸变一定会比边缘图像的畸变小，不同波段图像的几何校正参数是不相同的，需要分别进行畸变/几何纠正。图像的拼接是指单波段的相邻图像通过重叠区进行区域拼接，图像的波段配准是指不同波段的图像进行配准形成多光谱图像。

因为数据的特殊性，所以图像配准拼接是整个数据处理的重点。配准主要有两个部分：一是单波段窄带图像拼接之前需要通过图像配准寻找图像同名点和变换参数，使图像能够高精度的拼接为宽幅单波段图像，二是拼接后的单波段图像需要通过配准寻找同名点和变换参数使图像能够形成清晰没有重影的高质量多光谱图像。

由于图像是窄带宽图像配，所以配准拼接过程中需要注意以下问题。图像是最窄波段图像长宽比为 628: 4384 的窄带图像，长宽比例失衡，而且为了保证拼接精度飞行速度控制会使得大部分情况下图像重叠率很高。在飞行不稳定情况下还会造成重叠区域不齐全和重叠率不够的现象。其次，重叠度的增加也会带来问题。航向重度的增加如果处理不当会使配准拼接后的图像模糊。另外重叠都变大，意味着配准时检测到的特征点等匹配指标的增加，会带来计算量的增加。所以需要寻找稳定、快速的配准算法应用到单波段的图像配准中。

多光谱图像的拼接配准技术路线图如图 3.3 所示。对于单波段窄带图像来说，首先对裁剪好的图像进行几何校正。对于每个窄带图像，分别检测图像的特征点，对检测到的特征点进行筛选后，计算变换参数，通过参数求解的图像的映射关系，最后拼接到统一坐标系下，然后通过拼接后处理消除拼接缝等拼接影响。对于拼接后的宽幅单波段影响，同样检测图像特征点，对特征点进行筛选剔除噪声点等，然后求得变换参数，通过变换参数变换图像，经过剪裁形成宽幅多光谱图像。

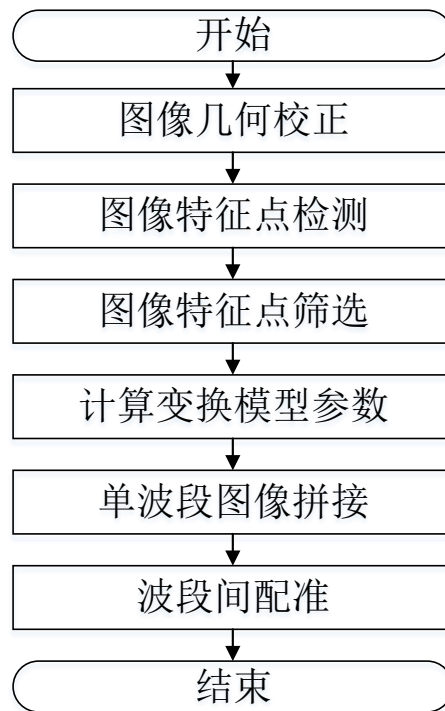


图 3.3 多光谱图像拼接配准技术路线图

3.3 遥感图像配准拼接技术的研究现状

图像配准广泛应用于医学遥感和图像相关的各个领域,因此也成为一个独立的热门研究方向。通常所说的配准,实际上是找到一种图像像素坐标转换方法,变换到相同坐标系下达到最佳匹配的过程,其中用作匹配基准的图像称为参考图像,通常认为是经过纠正的无变形的标准图像,而用作纠正图像形变以实现配准的图像称为待配准图像。

在图像拼接过程中,相邻图像之间都有重叠区域,通过寻找相邻图像的重叠区域寻找两幅图像的映射关系,通过映射关系将带配准图像映射到参考图像上。所以图像配准拼接的主要工作就是寻找图像间的映射关系。

配准方法可分为基于灰度信息的配准方法,基于特征信息的配准和基于变换频域的方法三类^[25]。

(1) 基于图像灰度的方法

基于图像灰度的配准方法又称为相关匹配或模板匹配^[26]。基于图像灰度的方

法以两张图像之间的重叠区域在颜色系统中所对应的图像灰度的相似程度作为配准的准则寻找图像配准的位置。基于图像灰度的方法通过图像灰度计算图像之间的相关程度，通过利用图像的灰度信息，寻找相似程度最大的匹配参数，完成配准。常用的配准包括：互相关计算^[27]、序贯相似检测（SSDA）^[28]。序贯相似检测使用连续搜索算法，并在搜索过程中设定阈值及早排除了不匹配的点，所以加速了图像配准的速度。W.K.Pratt 在计算图像相关性的时候加入了图像滤波器去除噪声平滑图像^[29]，P.van.Wie 使用边缘检测算法，在配准中先提取边缘然后计算边缘相关，通过这些处理使匹配结果不受图像灰度变化的影响^[30]。

基于灰度的方法的简单容易实现，但是基于灰度的方法没有考虑图像尺度的变化，对图像形变和明暗变化敏感，在遥感图像配准过程中容易受光照，外界噪声的影响，所以在外界变化较大的时候很难计算图像间的相似程度。而且基于灰度的方法计算复杂度高，算法效率很低。

（2）基于变换域的方法

基于变换域的方法利用傅立叶变换将图像从空间域变换到频率域，然后通过两幅图像的相互功率计算得出两幅图像间的平移矢量，进而实现图像的配准^[31]。基于变换域的方法的优点是简单直观，能在一定程度上能够抵抗噪声。同时傅里叶变换是成熟的快速算法而且易于硬件实现，因此具有独特优势。然而基于频率域的配准要求配准相邻图像间有较大的重叠比例，对现实中存在的镜头旋转和缩放等情况适用性差而且搜索整幅图像的计算代价较高。

（3）基于图像特征的方法

该方法利用图像中的点、线、面等图像上的特征进行图像配准，通过特征匹配构造映射关系，计算图像变换参数。基于图像特征配准方法的优势是可以大幅降低图像配准过程中的计算量，因为配准是通过对图像的点线面等特征进行分析。而且由于基于图像特征的配准方法是提取图像的特征向量进行相似度量所以对图像变形、遮挡和灰度变化等问题具有很好的适应性。特征提取、特征匹配、选取变换模型和求取参数、坐标变换及插值是图像特征的配准的四个部分组成。图像特征通常有点、直线、曲线等。图像处理过程中在光照变化，遮挡和形变剧烈

的情况下经常选用图像特征的方法进行配准。

基于灰度信息的影像配准方法优点是原理简单，容易实现，但具有运算量大而且不能解决影像旋转和尺度缩放的问题。而基于特征信息的影像配准方法利用影像重叠区域中对应的同名特征信息获得变换关系，所以计算量小、鲁棒性强，得到了广泛的应用。

3.3.1 配准的几何变换模型

配准的数学定义为待配准图像在参考图像上的映射。对于数字图像来说，不考虑波段即单波段情况下，配准就是求得两个二维数组间的坐标和数值上的映射。考虑波段配准就是求得两个三维数组间的坐标和数值上的映射。刚体变换、仿射变换、投影变换和多项式变换是图像配准常用的几何模型^[32,33]。这几种几何模型是平移、旋转、缩放、扭曲等变换关系的组合。图像配准就是根据待配准图像和参考图像变换关系（平移、旋转、缩放、扭曲等）选择正确的模型，确定模型的参数。

（1）刚体变换模型

刚体变换是在三维空间中，把一个几何物体作旋转，平移等变换。刚体变换不改变图像形状，保持图像的角度。刚体变换中图像上任意两点间的距离经过变换后距离保持不变。刚体变换可以分解为平移、旋转和镜像三种变换的组合。

（2）仿射变换模型

仿射变换模型是由一个非奇异的线性变换(运用一次函数进行的变换)接上一个平移变换组成。仿射变换模型包括：平移、缩放、翻转、旋转等变化组成。仿射变换一般是由相同视角不同位置拍摄造成的。

（3）投影变换模型

仿射变换是投影变换的特例。投影变换只保持变换后图像上的直线仍然是直线，四边形仍然是四边形，不再保持图像中的线的平行性。投影变换可以分解为平移、旋转、缩放和扭曲等变换关系。图像配准中最常用的几何模型就是投影变换^[34]。

两幅影像 $I(x, y)$ 、 $I'(x', y')$ 和投影矩阵 H ^[35] 的投影关系如公式 (3.1) 所

示：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

方程中单应矩阵 H 有八个未知数，所以求解最少需要建立八个方程，也就是说至少需要找到四对公共特征点。

（4）非线性变换模型

非线性变换既不保证“平直性”也不保证“平行性”。投影变换模型可以看做非线性变换模型的特殊情况。非线性变换模型用于配准时对各种情况的影响拟合精度很高，适用于各种情况，但是计算开销太大。对于一般的影像配准问题投影变换模型就可以满足变换需求。

3.3.2 图像配准的四个要素

图像特征配准由图像的特征空间，图像匹配的相似性度量，搜索空间和搜索度量四个要素组成。

（1）特征空间

特征空间是指：在两幅图像或者多幅图像上提取的用于匹配的特征的集合。特征选取的质量将对配准效果和配准的速度会产生直接影响。鲁棒稳定的特征是保证配准精度的前提，提取的特征要具有不变性、唯一性、独立性、稳定性。特征最好均匀分布在图像上，保证较高的正确提取率同时保证足够的数量，还要保证足够的定位精度。特征提取鲁棒稳定，会大大降低配准的计算量，提高配准的精度。

（2）相似性度量

提取出来的特征通过相似性度量来判断参考图像和待配准图像上提取的特征对的相似性程度。相似性越高则证明匹配精度越高。相似性度量影响算法的计算量、配准速度和算法稳定性，因此好的相似性会是配准更加快速精确。距离测量、角度测量和相关测量是配准中经常用到的相似性度量。根据特征向量特点选择相应的相似性度量准则。

（3）搜索空间

搜索空间是求图像映射关系的参数的集合。图像畸变的类型决定了搜索空间的组成，图像畸变的强度决定了搜索空间的取值范围。建立搜索空间才能找到最优变换矩阵，好的搜索空间能够求得高精度的变换参数。

(4) 搜索策略

搜索策略对配准速度和图像变换参数的选择以及配准的精度具有重要影响。好的搜索策略可以极大的减少计算量，提高影像的配准效率。常用的搜索策略主要有：序贯判定、层次性搜索、穷尽搜索、松弛算法、牛顿迭代法、动态规划、共轭梯度法等。

图像特征匹配的四个要素相互影响密不可分，每个要素对配准的精度和效率都有重要影响。需要针对不同的实际需求和配准图像的特点，选取不同的要素。

3.3.3 图像配准的特征

基于特征的匹配关键步骤是需在参考图像与待匹配图像中提取出一定数量的稳定特征集，然后根据特征相似性求解参考图像与带配准图像之间的映射关系。

用于特征匹配的特征主要包括点特征，线特征，面特征。角点、拐点、线交点、圆心、高阶偏导点、局部不连续断点等是配准中常用的点特征^[36-38]；轮廓线、分界线、直线段等是配准中常用的线特征^[39,40]；小面元的闭合域常用做配准中的面特征^[41]。相比于线、面特征，点特征因为易于表示、独立性强、鲁棒性强等特性而得到广泛的应用。提取的特征对图像的缩放、旋转、平移、亮度变化鲁棒性越高配准算法鲁棒性高。

点特征是指图像上的角点、交点、边缘点等，是最常用的图像特征。Moravec算子是于1977年提出的基于灰度方差提取点特征的方法^[42]。1988年C.Harris等人于对Moravec算子进行了改进，提出了基于局部自相关估计的Harris算子^[43]。该算子在每个方向上都进行了灰度变化计算，弥补了Moravec算子方向性差的缺点。但是，Harris算子的特征点检测只是像素级精度的，在对精度要求比较高的领域应用时需要后续处理进行高精度定位。此外，Harris算子对尺度变化敏感，不适合尺度变化较大的情况。SUSAN (Smallest Unnivalve Segment Assimilating Nucleus) 算子是牛津大学在1997年提出的^[44]。SUSAN算子的模板是一种近似

于圆形的模板。

线特征一般指边缘线，轮廓线和分界线等。线特征的检测主要用梯度算子和滤波器算子。梯度算子的原理是建立的梯度模板，然后将模板与图像作卷积运算，常用梯度算子有 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子和 Krisch 算子等。基于滤波器的梯度算子对噪声很敏感，通常需要先通过低通滤波对图像进行平滑处理去除噪声，再进行梯度差分运算。Canny 算子在 1986 年由 Canny 提出。Canny 算子的基本思想是：首先通过高斯滤波器平滑图像去除噪声，再通过一阶偏导计算梯度的幅值和方向，通过非极大值抑制细化梯度幅值，基于双阈值方法检测和连接边缘计算得出图像边缘。面特征一般指闭合区域，通常通过图像分割获取面特征。基于面特征配准结果直接受分割质量的影响。

3.3.4 基于特征配准的算法

特征选择与图像内容密切相关。应用于匹配的特征一般要求满足：不变性、稳定性、唯一性、独立性四个条件。但是实际应用中的特征一般是这四个条件的折中，不能全部满足。SIFT 算法是 Lowe 于 1999 年提出来并于 2004 年完善的配准算法^[45]，SIFT 算子对图像缩放、旋转和部分仿射变换具有不变性，还能抗拒一定光照变化和视点变换，有较高的辨别能力，提出来以后到了广泛的应用和发展。之后出现了很多基于 SIFT 的改进算法，如主成分分析不变特征变换算子（Principal Component Analysis-SIFT, PCA-SIFT）^[46]，将主成分分析与 SIFT 相结合。Miko-ajezyk 提出了另一种拓展形式梯度位置朝向直方图算法（Gradient Location-orientation Histogram, GLOH）^[47]，该算法将以特征点为中心的同心圆邻域分成 17 个小分区，然后计算每个分区中 16 个方向的梯度方向直方图，从而形成 272 维特征向量，然后使用 PCA 降维到 128 维，形成 128 维描述子。这几种算法的缺点是计算量大，算法运行较慢。Bay 等人在 2008 年提出加速鲁棒性（Speed-UP Robust Features, SURF）算法^[48]，在积分图像的基础上，利用箱式滤波器代替二阶高斯滤波，使得 SURF 在可重复性和鲁棒性方面近似于上述方法的同时还大幅提高了运算效率，因此具有更优的性能和更高的应用价值。所以 M.Teke 和 A.Temizel 将 SURF 应用到遥感多光谱卫星图像的配准中，并且得到了

较高的精度和较快的运算速度。Stefan.Leutenegger 等人在 2011 年提出二进制鲁棒性可拓展关键点 (Binary RoubustInvariant Scalable Keypoint, BRISK) 算法^[49]。旋转不变性、尺度不变性和鲁棒性是 Brisk 算法的有点。对有较大模糊的图像进行配准时, 表现最为出色的算法之一就是 BRISK 算法。同年在 ICCV 上 ORB(Oriented FASTand Rotated BRIEF, ORB)算法也被提出^[50]。ORB 算法的特征点检测利用 FAST 角点检测子, FAST 具有运算速度特别快的优点。同时 ORB 针对 FAST 特征方向敏感问题加入了方向信息。利用基于像素点二进制位比较的 BRIEF 特征描述子对特征点进行特征点描述。ORB 描述子对图像噪声不敏感对图像旋转具有不变性。Alexandre Alahi 等在 2012 年的 CVPR 中提出了 FREAK(Fast Retina Keypoint, FREAK)算法^[51]。

目前国内外主要用到的遥感图像配准算法大部分还是基于 SIFT 以及 SIFT 的变体, 另外还有基于 Harris 角点结合其他图像配准技术进化而来的算法。在匹配策略上除了传统的单向匹配还有可以减少错误匹配点数量的双向匹配策略^[52]这种方法能够剔除错误点, 但由于双向匹配过程中也会将一些正确的匹配点删掉而且使得匹配时间大大增加, 并不适用于航空遥感影像的快速拼接。

下面将依次概述 SIFT 算法、SURF 算法、BRISK 算法以及 ORB 算法。

(1) SIFT 算法

SIFT 算法是 DavidG.Lowe 在 2004 年提出的。他在总结了当时基于不变量技术的特征检测方法的基础上, 提出的特征匹配算法。SIFT 算法基于尺度空间理论生成所以对图像缩放、旋转甚至仿射变换都能保持不变性。SIFT 算法描述子产生过程中对描述子进行了归一化等操作所以对光照变化和视点变换也有一定的稳定性。SIFT 提取的特征点有较高的适应性, 所以 SIFT 算法被广泛地应用在各种图像匹配中, 在计算机视觉和模型识别方面的应用有很多成功范例。

(2) SURF 算法

SURF 算法作为 SIFT 算法的改进算法, 采用箱式滤波器和 Haar 小波在积分图像上计算生成, SURF 具有更高的特征匹配速度。虽然 SURF 和 SIFT 特征提取算法的流程相似都是建立尺度空间, 进行极值点检测, 生成主方向和特征向量。

但是 SURF 算法在特征提取的速度方面比 SIFT 算法要快一个数量级。SURF 算法不仅保持了对图像几何形变(包括旋转、平移、缩放)以及亮度变化外等外界因素的鲁棒性而且还大大加快了处理的效率所以在图像配准和拼接中得到应用非常广泛。

(3) BRISK 算法

BRISK 算法是 2011 年 ICCV 上提出来的一种二进制的特征描述算子。当图像出现有较大模糊的时候, BRISK 算法在配准算法里表现最为出色。与 SIFT、SURF 算法相似 BRISK 也是通过构建不同尺度图像, 确定主方向等步骤进行特征提取的, 不同的是 BRISK 在判断匹配点的匹配相关性时采用的是汉明距离而不是欧氏距离。BRISK 算法具有良好的旋转不变性、尺度不变性和鲁棒性。

(4) ORB 算法

ORB 算法是一种依靠视觉信息的特征点检测算法。它是 2011 年在 ICCV 上被 Ethan Rublee 提出来的。ORB 算法的特征点检测利用 FAST 角点检测子, FAST 具有运算速度特别快的优点, 所以 ORB 算法通常比 SURF 算法在速度上要高一个数量级。同时 ORB 针对 FAST 特征方向敏感问题加入了方向信息。利用基于像素点二进制位比较的 BRIEF 特征描述子对特征点进行特征点描述, 使描述子对图像噪声和旋转具有不变性。ORB 算法由具有方向的 FAST 兴趣点检测和具有旋转不变的兴趣点描述子两部分组成所以算法不仅能克服原来描述子对图像噪声和旋转敏感的缺点还大大提高了在图像配准中的速度。配准算法速度比较: $SIFT < SURF < BRISK < ORB$ 。有实验证实 ORB 算法的配准速率可以比 SIFT 算法快一个数量级, 比 SURF 算法快两个数量级。这使得 ORB 算法广泛应用在视频和图像处理中, 尤其是图像和视频的即时处理。

3.4 SURF 算法原理

SURF 算法事由 Bay 等人提出的加速鲁棒性特征(Speeded-Up Robust Features, SURF) 算法, 在积分图像的基础上, 利用箱式滤波器波近似高斯滤波简化卷积, 大大提高了运算效率, 使得 SURF 在可重复性和鲁棒性方面优于其他方法外, 还能够获得较快的计算速度, 因此在影像拼接、目标识别等方面有较大的应用价值。

近年来又有很多人^[1]对 SURF 算法提出改进，但是算法耗时仍然很长，在很多时间要求比较高的情况下仍然不适用。

SURF 算法特征提取可以分为特征点检测、特征描述和特征匹配三过程。

3.4.1 特征点检测

SURF 进行特征提取是建立在尺度空间理论上的。特征点检测过程中首先建立积分图像，其次利用箱式滤波器建立尺度图像，最后在尺度空间上对特征点进行精确定位。积分图像、箱式滤波器和生成 64 维特征向量，是 SURF 算法提升计算效果的三点关键改进。

(1) 建立积分图像

积分图像中任意一点的值^[2]为原图像左上角到该点组成的矩形区域的灰度值的总和，是对原始图像的积分。计算过程如图 3.4 所示：积分图像 I 中的点 $P(x,y)$ 的像素值 $I(P)$ 表示为从原点（左上角）到点 P 的矩形窗口的像素值的和。根据定义原图像任一矩形窗口的像素之和都可以通过简单的加减运算来完成，通过这个步骤建立积分图像可以优化计算，比如：求 S 矩形区域像素和仅需要 $B+D-A-C$ 。因为箱式滤波器和 Haar 滤波器是矩形模板，使用积分图像运算就可以将卷积变成简单的加减运算。所以建立积分图可以减计算量，大幅提高运算效率。

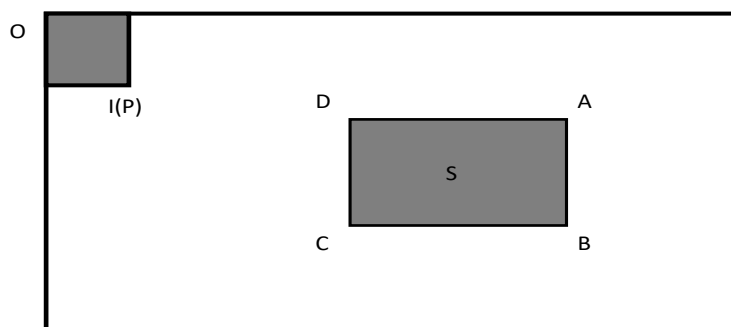


图 3.4 积分图

(2) 利用箱式滤波器建立尺度图像

SURF 算法使用的是尺度空间理论。为了加速卷积的速度，采用了箱式滤波器对高斯滤波器二阶偏导进行近似，然后对滤波器进行尺度变换代替通常方法中对图像的尺度变换，从而加快特征提取的过程。如图 3.5 所示将高斯二阶微分模

板简化成为几个矩形区域组成箱式滤波器。滤波器内相同的颜色代表相同的取值，简化滤波器中，白色区域值填充为 1，黑色区域填充为负数-1 或-2，灰色填充为 0。简化后的滤波器可以使用积分图加速运算，使得计算速度大大提高。

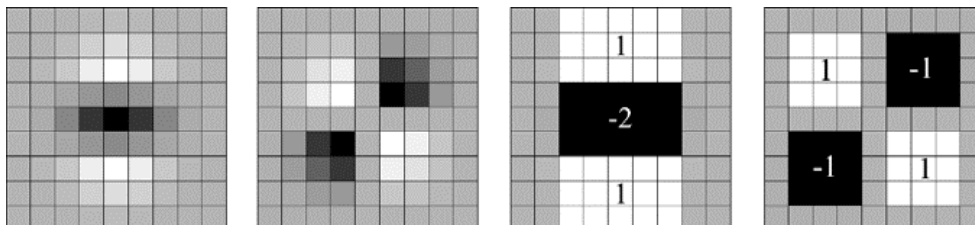


图 3.5 箱式滤波器

由于采用了积分图像和箱式滤波器改进计算，所以 SURF 算法采用不断增大箱式滤波器模板的尺寸的间接方法构建尺度空间，之后再在不同尺度图像上寻找特征点。通过箱式滤波建立尺度空间原理如图 3.6 所示：

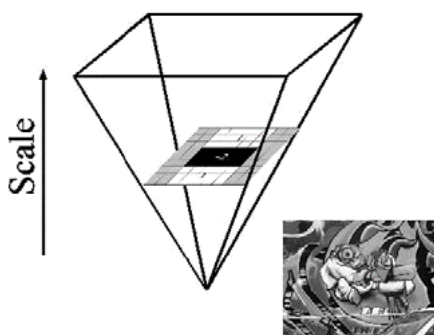


图 3.6 建立图像的尺度空间

最初始的尺度空间层我们用 9×9 的模板对图像进行卷积滤波（初始尺度空间尺度 $s=1.2$ 近似 $\sigma=1.2$ 的高斯微分），后续(layer)将通过逐步放大滤波模板尺寸不断与图像进行滤波得到。将尺度空间划分为几个阶 (Octaves)。每一阶通过逐步增大的滤波器模板代表逐渐增大的尺度空间，通过卷积产生一系列尺度图。阶数由图像大小来决定，但是尺度的增大过程中，算法检测到的斑点数量迅速衰减，所以一般进行 3-4 阶。每一阶采用 4 层的尺度图像。构建一个 4 阶的尺度空间采用的箱式滤波器大小的参数设置如图 3.7 所示：首先对图像使用初始 9×9 大小的模板进行卷积滤波，作为最初始的尺度空间层，然后通过一定的规律在后续(layer)的层逐步放大滤波模板尺寸（若模板尺寸为 $N \times N$ ，则对应尺度 σ 为 $1.2 \times 9/N$ ）。滤波器的阶数和步长都应该随着图像大小做相应调整。

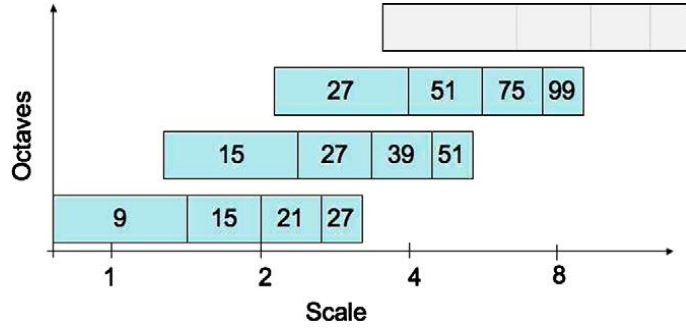


图 3.7 箱式滤波器参数设置

(3) 特征点精确定位

建立尺度图像后，就可以开始对特征点进行检测。用箱式滤波器与原始图像卷积来近似图像与高斯滤波二阶偏导卷积的结果，卷积结果记为 D_{xx} 、 D_{xy} 和 D_{yy} 。利用卷积近似代替图像上的点与高斯滤波二阶偏导卷积的结果，Hessian 矩阵行列式计算可以近似表示为公式 3.2:

$$\det(H) = D_{xx} * D_{yy} - (\omega D_{xy})^2 \quad (3.2)$$

其中 ω 为权重系数，实验表明取固定值为 0.9 最合适。

为了减少计算量，减少错误特征点的提取率，该过程可以设置一个阈值判定 Hessian 矩阵行列式计算的结果，当计算结果小于阈值时直接舍弃不进行特征点判定的后续步骤，当计算结果大于阈值时候才进行下一步判定。然后进行非极大值抑制，取该点本层、上层和下层三层对应的 $3 \times 3 \times 3$ 的邻域进行判定，只有比邻域内 $3 \times 3 \times 3 - 1 = 26$ 个值都大的点才会被选为特征点。然后通过尺度空间中进行三维二次函数拟合得到特征点的精确位置和尺度值。

3.4.2 特征描述

SURF 算法特征描述主要包括主方向描述和描述子生成两个部分。目的是通过求得特征点的特征向量和对特征向量的归一化处理得到对亮度和旋转具有不变性的特征算子。

(1) 主方向描述

主方向是为了使特征描述子具有旋转不变性而引入的。根据特征点领域像素

值，确定特征点的最大值偏向。如图 3.8 所示。主方向的计算方法是以特征点为中心，在以 6σ 为半径的圆形区域内，用 4σ 的 Haar 小波对图像进行卷积，计算在 x 、 y 方向的 Haar 小波（Haar 小波边长取 4σ ）响应。然后以特征点为中心对响应值进行两倍 σ 的高斯加权目的是使得越靠近中心的点贡献越大。然后计算统计直方图：以特征点为中心从 X 开始，用张角为 60 度的扇形窗口滑动，每次旋转 5 度。一共可以计算得到 72 ($360/5$) 个矢量。所有的矢量当中矢量模最大的(两个方向分量最大的)即为此特征点的方向。

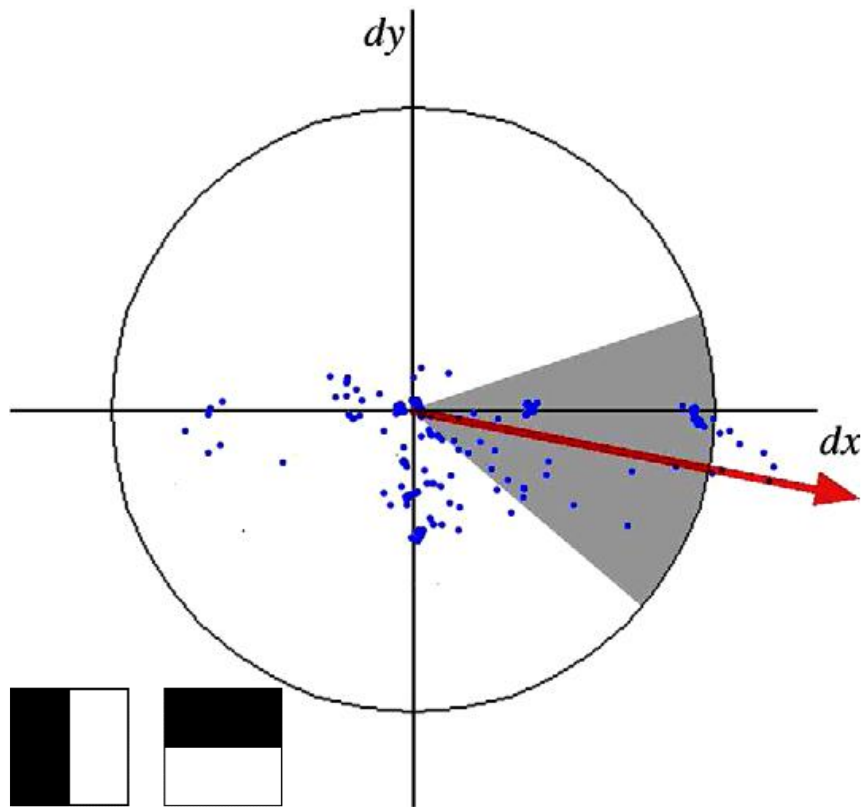


图 3.8 主方向描述

(2) 描述子生成

描述子生成是为了生成特征向量。好的特征向量可以提高图图像间的配准效率。为了构建特征向量，SURF 算法以确定的特征点为中心，划定边长为 $20 \times 20\sigma$ 大小的正方形区域，然后将区域的 y 轴旋转到特征点的主方向上。将正方形区域平均分成 16 个正方形子区域，每个子区域大小为 $5\sigma \times 5\sigma$ 。在每个子区域内分

别在 x , y 方向用 Haar 小波进行卷积运算得到 d_x , d_y 。以特征点为中心计算得到的 d_x , d_y 进行高斯函数加权（方差为 3.3σ ），可以减少亮度变化对特征点的影响增强定位的准确性。对每个子区域的所有响应值 d_x , d_y 求和，记为 $\sum d_x$, $\sum d_y$ 。为了描述 Haar 小波在两个方向的响应值的大小变化，对每个子区域的 d_x , d_y 的绝对值求和，是记为 $\sum |d_x|$, $\sum |d_y|$ 。这样对于每个子区域就有四个变量 $\sum d_x$, $\sum d_y$, $\sum |d_x|$, $\sum |d_y|$ 表示，因此 16 个子区域即形成 64 为的特征向量。如果对 $\sum d_x$, $\sum |d_x|$ 求解时分别考虑 $d_y > 0$ 和 $d_y < 0$ 的情况，同理对于 $\sum d_y$, $\sum |d_y|$ 求解时分别考虑 $d_x > 0$ 和 $d_x < 0$ 的情况，将会得到 128 维向量，128 维向量具有更多的信息，信息量大描述性更强，但是运算会变慢。最后对特征向量进行归一化处理使得特征对亮度具有不变性。描述子生成方式如图 3.9 所示：

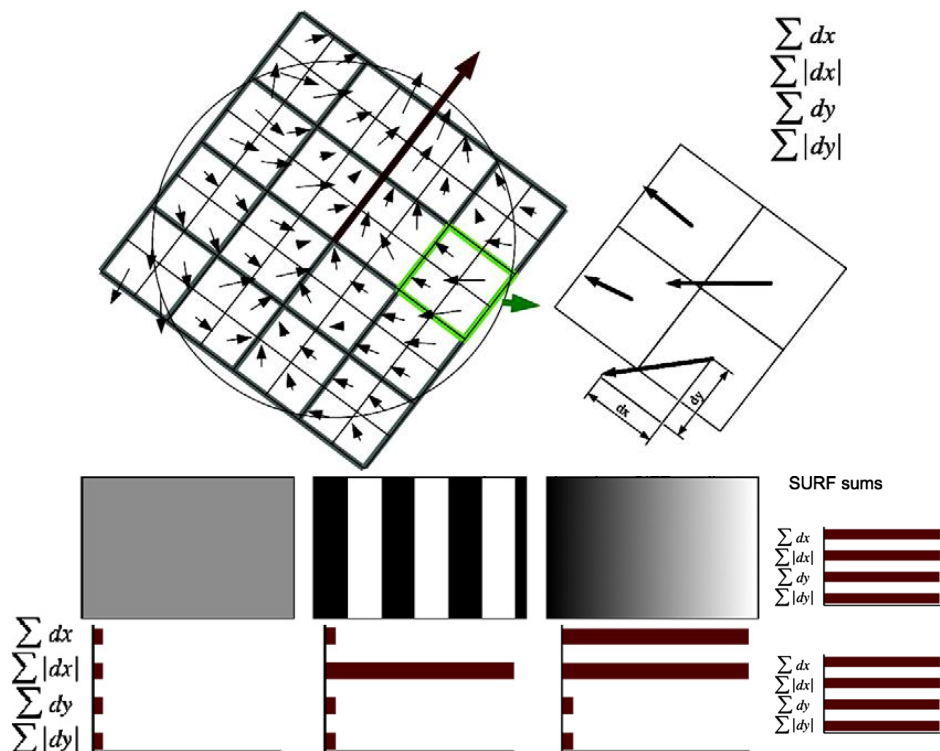


图 3.9 描述子生成

3.4.3 特征点匹配

两幅图像的特征点描述子生成后,就需要对特征点进行匹配,首先通过 **Hessian** 矩阵的迹矩阵的迹来进行正负检测,如果异号放弃后续的相似性比较以加快匹配。然后采用距离度量来比较两个特征向量的相似性。对于待配准图上检测的特征点,计算它到参考图像上所有特征点的距离测度,取最小距离和次小距离,进行比值运算。设定阈值(一般为 0.7, 阈值越小配准点对越少,配准速度更快),当该值小于这个阈值,认为特征点与参考图像中对应最小距离的特征点是匹配的,否则该特征点与参考图像上所有点都不匹配。

影像后处理

影像间由于拍摄环境,时间变化以及配准误差等因素的影响会存在色彩明暗差异。因此对映射变换后的图像要采用合适的后处理策略,使配准拼接后的影像在视觉上保持一致性而且尽量不降低原有的分辨率。

3.5 SURF 算法改进

窄带宽图像配准拼接面临两个问题。第一个问题是图像是长条状的窄带图像,最窄波段图像长宽比为 628: 4384,长宽比例严重失衡,而且大部分情况下图像重叠率很高,所以一旦平台的航高、航速、航向等飞行状态发生变化时产生的图像平移、缩放、旋转、偏扭、弯曲等几何变形将更为严重。如果碰到平坦没有特征地物的情况配准难度会进一步增加。其次,重叠度的增加也会带来问题。航向重度的增加会使配准拼接后的图像模糊。另外重叠都变大,意味着配准时检测到的特征点等匹配指标的增加,会带来计算量的增加。所以需要寻找稳定、快速的配准算法应用到单波段的图像配准中。

本文通过改进 **SURF** 算法,使得算法在保证配准精度的情况下能够快速完成配准任务,基于改进的 **SURF** 算法的航空影像拼接速度最高可以提高 3 倍,同时保持了影像的质量和拼接精度。2014 年王晶在基于 **SURF** 算子的航空影像拼接研究提出 **TSURF** 算法[53],通过引入筛选机制筛选特征点在,在航空影像拼接获得很好的效果。本文改进 **SURF** 在提取特征点后同样加入筛选机制,筛掉误差

较大的特征点来减少匹配点的数量提高匹配速度。改进 SURF 两个关键步骤是非极大值抑制加强和模板卷积。

改进的 SURF 算法包括特征提取、特征描述、特征匹配、影像拼接和影像后处理五个步骤。算法主要改进步骤是特征提取过程。在特征提取过程中筛选特征点，使特征点更加鲁棒。特征描述主要阐述特征描述方法，将提取的特征描述为 64 维向量。特征匹配对上一步产生的特征向量进行匹配，通过匹配方法高效寻找同名点。影像拼接是指通过匹配建立变换矩阵后将待配准图像映射到参考图像的过程。影像后处理指的是图像拼接过程中的融合方法，通过后处理消除拼接缝和视差影像。

3.5.1 基于 SURF 算法的改进

(1) 特征提取

SURF 算法在特征检测过程中会提取到大量冗余的特征点，但在后续的求解映射关系参数不需要过多的特征点，而且有一部分是错误的特征点，这不仅会影响影像配准精度而且将消耗比较长的时间匹配。本文改进 SURF 算法，在特征点描述生成之前对特征点进行筛选从而提高影像拼接的速度。包括以下两步：

A. 非极大值抑制加强

特征点检测过程中非极大值抑制只检测尺度空间三层 $3 \times 3 \times 3$ 邻域中的极值点。但是邻域内往往会存在一个或多个值与极值点非常接近的情况，即大量邻近冗余的极值点这样就使得特征点提取准确度降低。因此本文用 Hessian 矩阵的最大值除次大值，使得极值点必须比邻域内的点高出某个量。将这个比值作为判断标准，大于一定阈值，才选为特征点，否则就舍弃。通过这个方法筛选出稳定鲁棒的特征点。如公式 3.3 所示。

$$\frac{H_{\max}}{H_{\text{submax}}} \geq \theta \quad (3.3)$$

H_{\max} 和 H_{submax} 分别代表 Hessian 矩阵的最大值和次大值。其中 θ 为阈值，

本文设为 1.1（实验最佳数值为 1.1）。根据 H_{\max} 和 $H_{\substack{\text{sub} \\ \max}}$ 定义可以知道阈值 θ 总是大于 1。 θ 是一个超参数，本文取值 1.1 是根据大量实验得到的最优值，但是现实中配准能够遇到的情形复杂多变， θ 也应该根据实际情况进行取值。

B. 模板卷积

特征点具有如下分布特点：某个区域内特征点比较集中一般是正确的特征点，如果区域内只有些许零星特征点，该点一般是错误的特征点或者噪声点。因此加入筛选机制筛选特征点，将零星的特征点去掉除去噪声和不稳定点。本文通过模板算子对特征点矩阵进行卷积，对已检测到的特征点进行筛选。定义如下：模板算子中心值为尺度大小的平方，其余值均为-1，示例模板大小为 3，如公式 3.4 所示。模板算子大小为 $b \times l + 3/1.2 \times \sigma$ ， b 为初始偏移值，为偶数， l 是高斯尺度空间层数， σ 为尺度空间尺度。模板大小与上述三个参数相关， l 和 σ 是已知的， b 是根据实际情况改变的参数，如果更加注重拼接质量，就增加 b 的值，如果注重拼接速度就减小 b 的值。下面以 3×3 模板为例：

$$\text{model} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

将模板与初始检测到的特征点矩阵进行卷积运算：若卷积结果小于 0，则不为特征点；若卷积运算结果为 9，则模板内只有一个特征点，剔除该特征点；若卷积运算结果大于等于 1 小于 9，则说明模板内有两个或者两个以上的特征点，保留此特征点。

（2）特征描述

本文采用与 SURF 相同的算法生成特征描述。首先采用 Haar 小波滤波器模板，计算以特征点为中心的圆形区域内每个扇形窗口的 Harr 小波 x 和 y 两个方向的累积值。取累积最大就是特征点的主方向。然后以特征点为圆心将坐标轴旋转到检测到的主方向，将其周围的正方形区域平均划分成 16 个正方形子区域。对子窗口内 Haar 小波系数累加构造 4 维向量 $\sum d_x, \sum d_y, \sum |d_x|, \sum |d_y|$ ，构成该点的 64 维特征点描述符。通过特征描述过程使特征向量具有旋转、尺度

不变性，通过向量归一化，是特征对光照具有一定的鲁棒性。

(3) 特征匹配

特征匹配就是寻找相似特征向量的过程。对于 SURF 算法产生的大量高维向量空间的配准是一个复杂繁琐的计算过程。所以针对这个问题有人提出了一种改进 k-d 树^[54]的 BBF 算法^[55]，能减少计算量提高匹配效率，但是在特征点数量较少情况反而会增加计算量而且搜索精度也会受影响。穷举法在重叠面积较小、匹配点较少的情况下却能保持较好的搜索性能。因此本文使用穷举法^[56]进行匹配。

影像配准是为了将两幅影像变换到同一坐标系下。变换模型采用投影变换模型。通过图像共同的特征点，建立图像变换参数，求得单应矩阵 H 。两幅影像 $I(x, y)$ 、 $I'(x', y')$ 和单应性矩阵 H 的投影关系如公式 3.5 所示：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

方程中单应矩阵 H 有八个未知数，所以求解最少需要建立八个方程，也就是说至少需要找到四对公共特征点。经过特征匹配获得到的匹配点对通常会有很多对，而且通常都会存在误匹配点对，直接求解很难求得精确的单应性矩阵，所以使用随机抽样一致性(Random Sample Consensus, RANSAC)^[57]算法剔除匹配质量较差的点后再用最小二乘求解。通过上述过程得到精确的单应性矩阵后，将待配准影像进行变换，经过双线性内插得到配准后的影像。

(4) 影像后处理

影像间由于拍摄环境、大气因素和时间变化以及配准误差等因素的影响会存在色彩明暗差异。本文采用距离相关权重，在影像重叠区域进行加权运算，从而对两幅影像平滑拼接，也就是俗称的渐入渐出方法^[58]。该方法相比传统加权平均方法能做到使影像接缝处平滑过渡，而且在重叠区域不会出现模糊和重影，同时不会使分辨率降低。该方法能够保证图像拥有很好的视觉效果。

3.5.2 算法实验及结果

本文通过实验来比较 SURF 算法和改进 SURF 算法的影像质量和拼接效率，

并用 SURF 与改进 SURF 算子分别进行多幅连续航空影像快视图全自动拼接。算法基于 MATLAB 实验。算法运行环境为：WIN10 专业版 64 位系统、Intel(R) Core(TM) i7-4770 处理器主频 3.4GHz、内存为 8G。

为了更好展示结果，加快处理速度，本文实验将数据裁剪截取数据大小为 682×316 像素。实验中选择最宽波段近红 1 波段和最窄波段全色波段，进行相邻两张遥感影像拼接和多张影像连续拼接。本文选取有道路、房屋、裸地、植被等多种典型地物类型的区域。为了验证算法的有效性选取的遥感影像包含平移、旋转、缩放等变化关系。影像不仅选用本相机数据还选用了“黑河生态水文遥感试验 (HiWATER)”的机载高分辨率影像快视图。最后选取常规图像进行实验。

为了客观评价算法性能。实验记录算法运行 10 次的平均时间作为算法运行时间。选用坐标误差，角度误差作为配准拼接的精度评价指标，同时选用平均梯度和预测误差均方差作为图像质量评价指标。

实验一：两张影像图像拼接（全色，近红 1）

实验数据和实验结果如图 3.10 和图 3.11 所示：实验选择全色波段和近红 1 波段几乎相同的区域；地物包括裸地、道路、建筑、栅栏。从表格 3.1 的实验统计结果可以看出：拼接精度较高，影像坐标误差都在 0.5 个像素左右，角度误差都小于 0.1° ，说明改进算法与原算法在精度方面几乎没有差别，在影像质量方面，全色波段改进的算法与原算法在平均梯度和预测误差均方差上的变化分别为 0.17%，0.8%。近红 1 波段改进的算法与原算法在在平均梯度和预测误差均方差上的变化分别为 0.9%，0.33%。综上可以看出，改进算法的影像拼接质量与原算法相当。

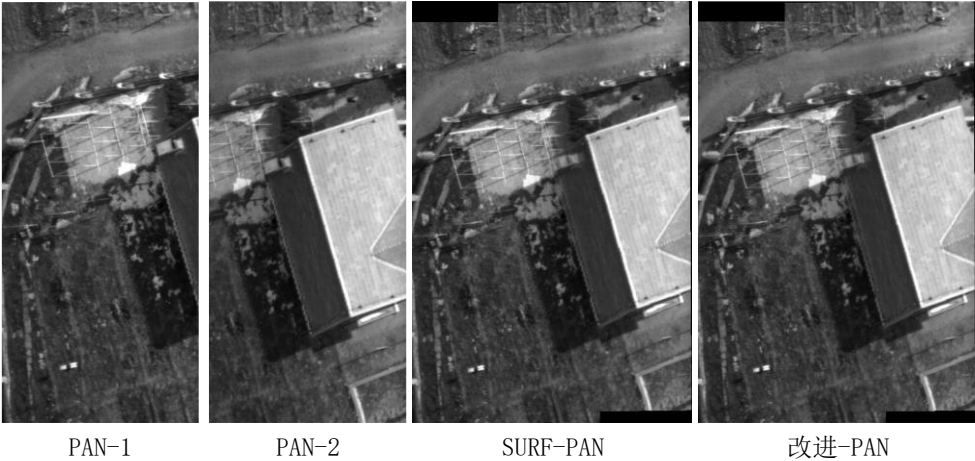


图 3.10 全色波段相邻图像拼接

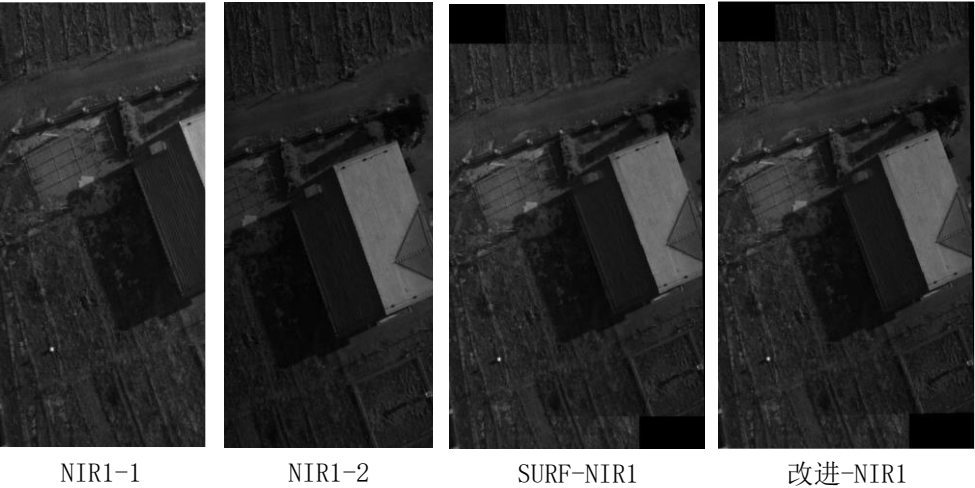


图 3.11 近红 1 波段相邻图像拼接

表 3.1 相邻图像拼接性能

算法	运行时间	坐标误差（像素）	角度误差（°）	平均梯度	预测误差均方差
SURF-PAN	819.67812 s	0.5010	-0.0669	16.2942	8.9504
改进-PAN	607.56148 s	0.5108	-0.0691	16.2667	8.2803
SURF-NIR1	921.14562 s	0.4901	-0.0701	11.356	8.0362
改进-NIR1	635.84567 s	0.5312	-0.0688	11.472	8.0031

实验二：单波段影像连续拼接（10 张影像，连续拼接）

本实验选用连续 10 张 NIR1 波段的图像，影像包括裸地、道路、建筑、栅栏等，细节中还包括绿化带，汽车等地物。两个算法拼接后的效果图如图 3.12 所示，相关数据统计如表 3.2 所示。

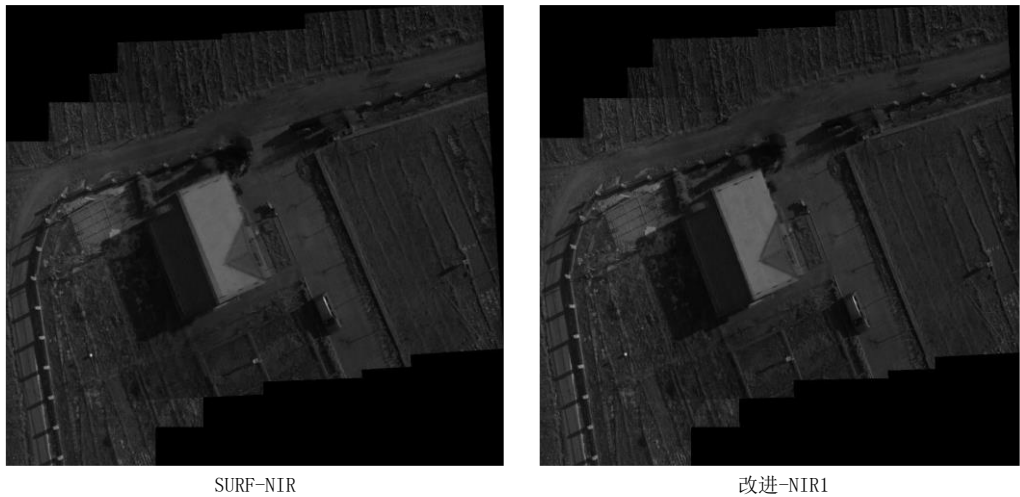


图 3.12 近红外连续相邻图像拼接

表 3.2 连续图像拼接性能

算法	运行时间	坐标误差（像素）	角度误差（°）	平均梯度	预测误差均方差
SURF	5140.089897 s	0.5546	-0.0643	12.1307	7.4503
改进	2018.709866 s	0.6118	-0.0601	12.2465	7.4434

图上可以看到改进后的算法保持了良好的视觉效果，目视几乎无法分辨两算法的差异，但是表格统计中可以看到改进后的算法比原 SURF 算法快了两倍。当然由于拼接图像数量较多误差累积，改进 SURF 算法拼接的图像坐标误差表现出变大的趋势，但是误差仍然在可接受精度范围内。标志图像质量变化的平均梯度和预测误差均方差上的变化均在 0.5%之内。表明拼接质量很高，可以达到应用要求。

实验三：黑河遥感影像实验

为了测试SURF算法和改进SURF算法在遥感图像拼接中拼接速度和拼接质量的差异。又选用黑河遥感影像作为实验数据。原图如 3.13 所示：影像包含建筑，植被，水体，道路等典型地物。SURF 算法和改进后算法拼接效果如图 3.14 所示。拼接后的性能，如表 3.3 所示。在拼接影像重叠区域较大的情况下，改进的 SURF 算法是原算法速度的两倍。但是改进算法在拼接质量上却与 SURF 算法相当，拼接后图像的坐标误差和角度误差都很小。平均梯度和预测误差均方差的变化均在精度要求之内。可见改进后的算法适用于遥感影像拼接，而且在图像重叠率较高的情况下具有很好的鲁棒性。



图 3.13 黑河遥感影像

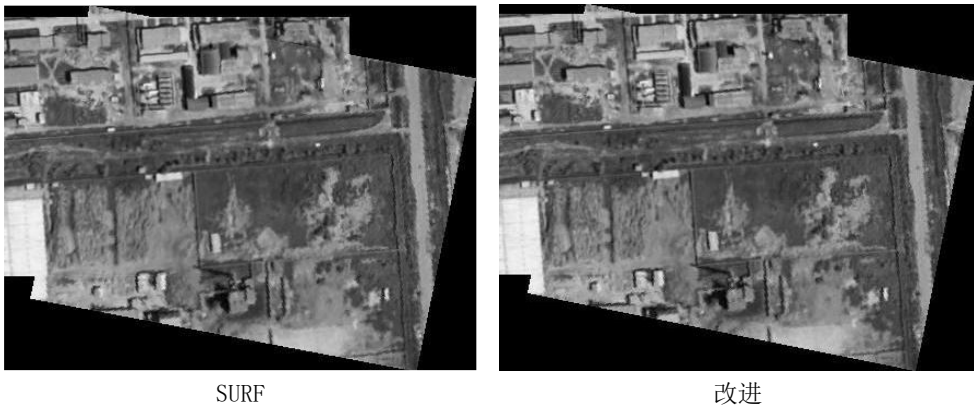


图 3.14 黑河遥感影像相邻图像拼接

表 3.3 黑河遥感影像相邻图像拼接性能

算法	运行时间	坐标误差（像素）	角度误差（°）	平均梯度	预测误差均方差
SURF	143.891176 s	0.53643	-0.0793	15.55640	7.3450
改进	79.311126 s	0.53484	-0.0744	15.45763	7.3454

实验四：普通常规图像拼接

本实验选用图像处理中常用的实验图像 Lena 作为实验图像。如图 3.15 所示：裁剪原图得到两张有重叠的局部图像，然后对右图（PIC-2）进行旋转缩小和变形处理。图像大小为 398×408 像素。两算法拼接效果如图 3.16 所示。通过实验图像可以直观看到：算法已经将旋转扭曲的图像基本校正。没有明显拼接痕迹，没有接缝。



图 3.15 常规图像



图 3.16 常规图像拼接

表 3.4 常规图像拼接性能

算法	运行时间	坐标误差 (像素)	角度误差 (°)	平均梯度	预测误差均方差
SURF	387.891176 s	0.4013	-0.0539	17.2490	7.3003
改进	229.311126 s	0.4118	-0.0503	17.2443	7.3434

通过表格 3.4 统计数据可以看出：改进算法的运行时间为原算法的 60%但是精度和影像质量几乎与原算法持平，因此我们有理由相信，改进的 SURF 算法在常规图像拼接中也会拥有很好的效果。

综合上述实验可以得到：两种方法拼接后的图像差别很小，目视情况下几乎无法区分，拼接中没有匹配错误的情况，两幅图像的拼接处，图像过渡自然而平滑，几乎没有拼接缝。统计拼接精度因子坐标误差和角度误差证明，两种算法拼

接效果相当，差异非常小。使用平均梯度和预测误差均方差统计拼接对两幅影像质量的影像，也证明两幅影像质量变化极小，两个算法的拼接质量相当。而且我们通过统计算法运算时间可以知道，相比于原 SURF 算法，改进后的算法效果得到明显提升，最低效率也比原算法节省三分之一的时间。实验证明改进后的算法在保持拼接精度和质量情况下比 SURF 具有更高的效率。

3.6 窄带多光谱影像处理结果及分析

通过对图像进行裁剪，校正，配准，拼接等处理最终得到常见的多光谱图像。处理过程中，拼接图像没有明显拼接痕迹，纹理清晰，而且保持了细节信息。假彩色合成图像地物明显，纹理清晰，符合试验场的地物特征。通过计算平均重投影误差结果表明拼接精度比较高。通过统计特征地物的像元亮度值并转换为反射率得到特征地物光谱曲线。常见地物波谱符合常见各自的光谱反射特征。

3.6.1 图像配准拼接效果

经过单波段拼接的图像结果如图 3.17 所示，图中所示为绿色波段、红色波段和近红 1 波段拼接后的图像，图像没有拼接痕迹，纹理清晰，且保持各自的细节信息。

多波段配准后的图像结果如图 3.18 所示。图中分别展示了道路植被和建筑的细节图，多光谱图像地物明显，符合试验场的地物特征。

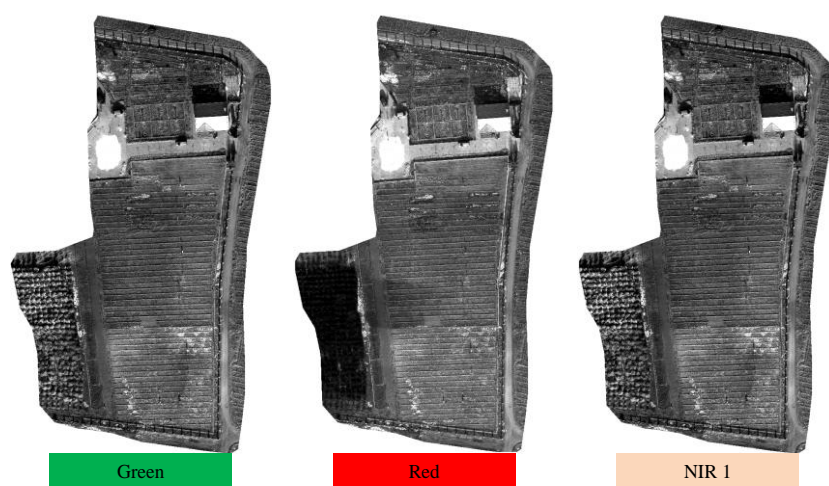


图 3.17 单波段拼接的图像结果

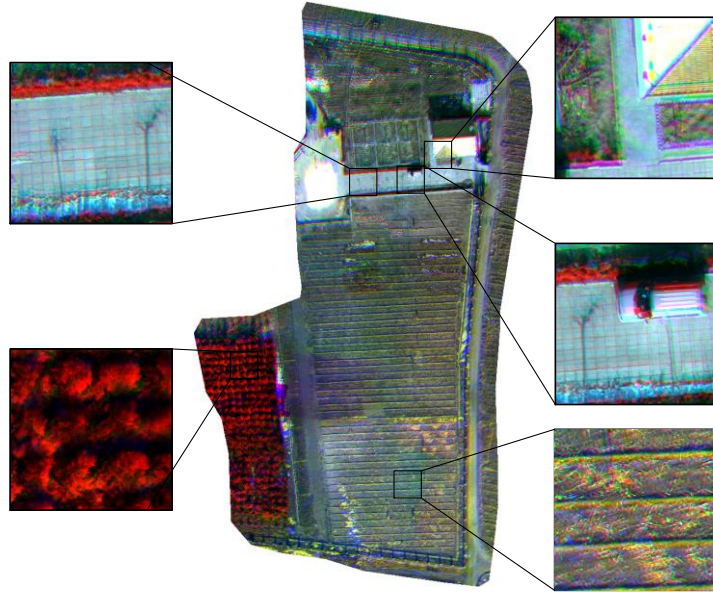


图 3.18 多波段配准后的图像

3.6.2 精度评价

精度评价主要从图像配准精度和波谱精度两方面评价。图像配准精度主要评价图像配准后的空间误差,即配准后图像对应坐标点位置是否发生位移以及位移的量。波谱方面主要是通过比对常见地物之间的光谱曲线差异。

精度评价方面,使用变换后的所有匹配点的平均重投影误差(MRE: mean reprojection error)^[59]作为精度评价指标,如公式 3.7 所示: x_i 和 x'_i 分别为匹配点对 \hat{x}_i 和 \hat{x}'_i 经过参数变换后得到的点。最终得到的拼接精度:最好的拼接波段为红色波段精度达到 0.10 像素,最差的拼接波段为蓝色波段精度达到 0.14 像素。结果表明拼接精度比较高,满足应用要求。

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n \left[d(x_i, \hat{x}_i)^2 + d(x'_i, \hat{x}'_i)^2 \right]}{n} \quad (3.7)$$

在波段配准后的波谱方面,如图 3.19 所示,通过统计特征地物的像元亮度值并转换为反射率得到特征地物光谱曲线。植物光谱曲线在绿色波段反射率和近红外波段反射率比红色波段反射率高形成吸收谷,在近红外波段反射率急剧增加,符合常见绿色植被的光谱反射特征。水泥道路和裸地同样也满足各自的光谱特征。

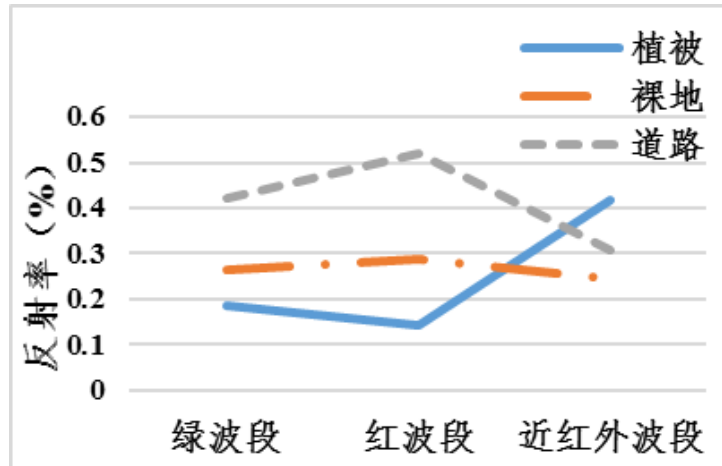


图 3.19 图像波谱

3.7 本章小结

本章通过分析得到数据处理的流程。首先需要将二维图像中的多个波段图像裁剪成能够统一处理单波段的窄带图像，每个波段裁剪完成后进行几何校正，去除几何畸变对数据的影响。然后，就得到的每个波段的窄带图像进行配准拼接，使多张窄带图像最终拼接成为宽画幅的整幅单波段图像。因为每个波段之间会有错位和视差，所以通过最后的波段间图像配准，变换得到最终的多光谱图像。

同时在配准方面考虑到：一图像是最窄波段图像长宽比为 628: 4384 的窄带图像，长宽比例失衡；二为了保证拼接精度飞行速度控制会使得大部分情况下图像重叠率很高；三飞行不稳定情况下还会造成重叠区域不齐和重叠率不够。考虑到这三个方面对数据的影响，所以本文最终选择用目前最为稳定高效的 SURF 算法作为图像配准算法，但是 SURF 算法效率仍然不能对数据处理的要求，所以通过改进 SURF 算法，在不损失配准准确率的情况下提高配准效率。最终通过验证得到：改进的 SURF 算法，相比 SURF 算法精度相同的情况下效率要快三倍。而且通过验证表明改进 SURF 算法具有普适性，对其他图像配准拼接问题同样有效。

最后通过精度评价对数据处理的精度和波谱精度进行验证，初步验证了新型相机的成像原理和多光谱数据的可用性。

第四章 总结和展望

4.1 总结

本文通过滤光片阵列的成像方式获得多光谱图像,并通过研制的多光谱相机获得了试验场的多光谱数据。通过裁剪拼接配准等处理得到了高质量的低空遥感多光谱数据,处理过程中,拼接图像没有明显拼接痕迹,纹理清晰,保持了细节信息。假彩色合成图像地物明显,纹理清晰,符合试验场的地物特征。通过计算平均重投影误差结果表明拼接精度比较高。通过统计特征地物的像元亮度值并转换为反射率得到特征地物光谱曲线。常见地物波谱符合常见各自的光谱反射特征。初步验证了新型相机的成像原理和多光谱数据的可用性。

目前常见的多光谱相机所获得多光谱图像大都是 1280×1024 ,而本文研制的滤光片阵列多光谱相机所获取的多光谱单个波段图像可达到约 1000 (航向) $\times 4300$ (旁向),在保障航向图幅及图像质量情况下,可大大提高旁向幅宽和飞行效率。

滤光片阵列多光谱相机在研制和试验过程中,还有几个方面的问题需要做更进一步的工作:

①由于多个光谱波段是同时成像与同一个焦面探测器位置,由于波长色散性,不可能实现 6 个波段同时清晰成像,势必造成不同波段的清晰度不一致,需要在光学装调及图像校正时兼顾不同波段的差异性。

②光学镜头、滤光片和探测器在不同波段的透过率及光谱响应是不同的,但多光谱相机的镜头光圈和曝光时间参数对各个波段是相同的,会造成不同光谱波段图像的辐射特性差异,需要在各波段滤光片的透过率设计上进行均衡。

③本次测试飞行试验中没有同步获取每幅图像的 GPS 和姿态数据,应在后续工作中增加同步模块,得到每幅图像曝光时刻的 GPS 位置信息和姿态数据,为后期的图像几何纠正和拼接提供辅助参数,有助于拼接和配准的快速处理。

本文通过深入研究 SURF 算法,在 SURF 算法基础上做改进,提出非极大值

抑制加强和模板卷积改进特征提取的方法，从而加快了配准拼接速度。通过实验验证，相比于 SURF 算法，改进的 SURF 算法使拼接速度提高了三倍，同时保持了较好的影像质量和拼接精度。本文通过验证证明改进的 SURF 算法不仅适用于基于滤光片多光谱相机的数据，而且具有普适性，对于航空影像和常见的光学影像都有很好的效果。

对于拼接算法方面，还有几个方面的问题需要做更进一步的工作：

①本文中代码实现上仍然可以通过算法和数据结构进行优化，可以通过代码优化提高效率。

②本文中采用的图像均保持了较好的飞行姿态和拍摄姿态，缺少算法稳定性和鲁棒性极限的实验。

③目前改进算法中的超参数是根据经验得来的，下一步可以通过大量实验选取最佳参数。

4.2 展望

随着无人机遥感系统发展，无人机遥感成为获得高分辨率遥感影像的重要手段。无人机遥感也越来越多的应用到军事，灾害，医疗和检测等各个领域，针对无人机遥感的发展。轻小型无人机因为其体积小，机动灵活、成本低等优点，在无人机遥感系统越来越得到重视。但是由于轻小型无人机载重的限制，需要更加轻便小型的遥感设备常规遥感设备。多光谱遥感不仅能获得二维空间信息，还能获得光谱信息，空间信息与光谱信息结合极大提高了目标探测的准确性。多光谱相机被广泛应用在地质灾害评估，农作物和环境监测以及地图测绘领域。但是目前相比于常规光学相机能够应用于轻小型无人机的多光谱相机非常少。所以多光谱相机也是轻小型无人机遥感亟待发展的一个领域。

本文通过滤光片阵列的成像方式获得多光谱图像，并通过研制的多光谱相机获得了试验场的多光谱数据，验证了新型相机的成像原理和多光谱数据的可用性，为小型多光谱相机的实用化乃至今后的产业化提供技术基础，可以作为无人机多光谱相机的有益补充。然而与相机研制相关的各项技术仍在飞速发展，比如相机

滤光片阵列可以通过优化和改进喷涂技术使得影像重叠区域更小、分波段透过率更高以提高图像成像质量；目前集成电路硬件的发展使得相机控制元件可以更加轻便小巧，将大大减少相机重量和体积。

本文通过深入研究 SURF 算法，在 SURF 算法基础上做改进，提出非极大值抑制加强和模板卷积改进特征提取的方法，从而加快了配准拼接速度。但是研究过程中也发现了很多问题，首先基于改进的 SURF 算法图像拼接虽然提高了但是仍然达不到理想的速度更不要说实时处理，其次在研究中考考虑配准算法需要较好的稳定性所以没有选用速度更快的 ORB 算法，但是有实验证实 ORB 算法比 SURF 算法在配准效率要高一个数量级。接下来工作可以研究大量配准速度更快的配准算法，改进算法的稳定性实现快速的配准算法。如果能够研究出用于航空遥感影像快速稳定的拼接算法，将大大提高航空遥感的效率减低图像后期处理的时间和成本。

参考文献

- [1] 赵英时 遥感应用分析原理与方法[M].北京: 科学出版社, 2003: 78.
- [2] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,(05):505-513+540.
- [3] Adam C, Vincent G, Everett A Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use[J]. Remote Sensing, 2012(4): 1671-1692.
- [4] 廖小罕, 周成虎等. 轻小型无人机遥感发展报告[M]. 科学出版社, 2015, 3
- [5] 徐永旺. 无人机自动驾驶仪设计及控制方法研究[D].哈尔滨工程大学,2010.
- [6] 吴汉平.无人机系统导论(第二版)[M].北京: 电子工业出版社,2003
- [7] Jeremiah G. Unmanned Aerial Systems[R]. US Congressional Research Service,USA,2012.
- [8] IBRAHIM A W N, PANG W C, GERALD S G L, et al. Moving objects detection and tracking framework for UAV-based surveillance [A]. 2010 Fourth Pacific-Rim Symposium on Image&Video Technology [C]. Singapore: IEEE Computer Society, Nov 14-17, 2010.456-461.
- [9] CHAO H Y, AUSTIN M J, HAN Y D, et al. AggieAir: Towards low-cost cooperative multispectral remote sensing using small unmanned aircraft systems [M]. Advances in geoscience and remote sensing, 2009: 463-490.
- [10] YI L, JUHA H, ANTONI J. Mini-UAV-Borne LIDAR for Fine-Scale Mapping[J]. Geoscience & Remote Sensing Letters (S1545-598X), 2011, 8(3): 426-430.
- [11] SHENG H, CHAO H Y, CAL C, et al. Low-Cost UAV-Based Thermal Infrared Remote Sensing: Platform, Calibration and Applications [A]. International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA) [C], Qingdao, China: IEEE/ ASME, 2010: 38-43.
- [12] 卢晓攀. 无人机低空摄影测量成图精度实证研究[D].中国矿业大学,2014.

- [13] Kim J H, Lee D W, Cho K, et al. Development of an electro-optical system for small UAV[J].Aerospace Science & Technology, 2010, 14(7): 505-511.
- [14] 曹振宇. 自然灾害应急测绘信息服务机制与方法[D].武汉大学,2014.
- [15] 李苓苓,陈世荣. 救灾技术装备应用系列之四 无人机遥感技术在减灾领域中的应用[J]. 中国减灾,2011,(21):50-51.
- [16] 王福涛,王世新,周艺,王丽涛,阎福礼. 多光谱遥感在重大自然灾害评估中的应用与展望[J]. 光谱学与光谱分析,2011,(03):577-582.
- [17] 操乐林,武春风,侯晴宇,张伟. 基于光谱成像的目标识别技术综述[J]. 光学技术,2010,(01):145-150.
- [18] 葛明锋. 基于轻小型无人机的高光谱成像系统研究[D].中国科学院研究生院(上海技术物理研究所),2015.
- [19] Y. Huang, Y. Lan, W.C. Hoffmann. Use of Airborne Multi-Spectral Imagery in Pest Management Systems. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. 2008.
- [20] Tanikawak, Okamura T, Kudo J, et al. Six-band Multispectral Sensor Using off-axis Three-mirror Reflective Optics[J].Optical Engineering, 2000, 39(10): 2781-2788.
- [21] Escobar D, Everitt J H, Noriega J R. A twelve-band airborne digital video imaging system [J]. Remote Sens. Environ, 1998, 66: 122-128.
- [22] 程欣. 大视场光纤成像光谱仪光学系统研究[D].中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2012.
- [23] 方煜,吕群波,刘扬阳,谭政,李伟艳,裴琳琳,王建威. 滤光片阵列型多光谱相机中阵列的设计与形变影响分析[J]. 光子学报,2015,(07):13-18.
- [24] 童庆禧,田国良,茅亚澜. 多光谱遥感波段选择方法的研究[J]. 宇航学报,1983,(02):1-13.
- [25] Brown L G. A survey of image registration techniques [J].ACM Computing Surveys, 1992, 24(4): 325- 376.
- [26] L.M.G Fonseca. B.S. Manjunath. Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing(1996)

1049—1056.

- [27] W.K. Pratt. Digital Image Processing. Wiley. New York. 1991.
- [28] D.I. Barnea. H.F. Silverman. A class of algorithms for fast digital image registration. IEEE Transactions on Computing(1972) 179-186.
- [29] W.K. Pratt. Correlation techniques of image registration. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems(1974) 353-358.
- [30] P. van Wie. M. Stein. A landsat digital image rectification system. IEEE Transactions on Geoscience Electronics(1977) 130-136.
- [31] P.E. Anuta. Spatial registration of multispectral and multitemporal digital imagery using Fast Fourier Transform. IEEE Transactions on Geoscience Electronics (1970) 353-368.
- [32] Y Keller, A Averbuch. A new approach to multi-sensor image registration. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision, 2003, 2(5):II-543-8 vol.2
- [33] J. B. Antoine Maintz, Max A. Viergever. A survey of medical image registration[J]. Medical Image Analysis,1998,2(1):1-36.
- [34] 袁艳,叶会,苏丽娟. 基于投影变换与 SIFT 结合的摆扫图像拼接技术[J]. 现代电子技术,2015,(09):59-64.
- [35] Hsu Chiou-ting, Tsan Yu-chun. Mosaics of video sequences with moving objects. Signal Processing: Image Communication, 2004,19(1):81~98.
- [36] Barbara Zitová, Jan Flusser. Image registration methods: a survey[J]. Image and Vision Computing. Volume 21, Issue 11, October 2003, 977–1000.
- [37] B.S. Manjunath, C. Shekhar, R. Chellapp. A new approach to image feature detection with applications [J]. Volume 29, Issue 4, April 1996, Pages 627-640.
- [38] M Ehlers,M Fuller. Region-based Matching For Image Integration In Remote Sensing Databases, International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 1991, 4:2231-2234.
- [39] D Bhattacharya, S Sinha. Invariance of stereo images via the theory of complex moments[J]. Pattern Recognition, 1997, 30(9):1373-1386.
- [40] D Shin,JK Pollard,JP Muller. Accurate geometric correction of ATSR images[J].

- IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1997, 35(4):997-1006.
- [41] A Goshtasby,GC Stockman,CV Page. A Region-Based Approach to Digital Image Registration with Subpixel Accuracy[J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on, 1986, GE-24(3):390-399.
- [42] H.Moravec. Towards automatic visual obstacle avoidance. proceedings of the 5th international joints conference on artificial intelligence, Cambrige, 1977:584-59.
- [43] Harria.C.J, Stephens.M. Acombined corner and edge detector . Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference, 1988: 147-151.
- [44] Smith S M, Brady J M . SUSAN a new approach to low level image processing journal of vision, 1997, 23 (1): 45-78.
- [45] Lowe. D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision. 60 (2) . 91-110.
- [46] Yan Ke. Rahul Sukthankar. PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors. CVPR (2004) 506-513.
- [47] K. Mikolajczyk , C. Schmid. A performance evaluation of local descriptors[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27 (10) :1615-1630.
- [48] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. SURF: Speeded Up Robust Features [J].Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110 (3) : 346—359.
- [49] Stefan Leutenegger, Margarita Chli and Roland Y. Siegwart , BRISK:Binary Robust Invariant Scalable Keypoints.
- [50] Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige , Gary Bradski, ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF, ICCV.2011.
- [51] Alexandre Alahi, Rspheal Ortiz, Pierre Vandergheynst.FREAK: Fast Retina Keypoint. CVPR.2012.
- [52] 刘焕敏,王华,段慧芬. 一种改进的 SIFT 双向匹配算法[J]. 兵工自动化,2009,(06):89-91.
- [53] 王晶.基于 SURF 算子的航空影像拼接研究[D].中国科学院大学,2014.
- [54] Beis J S. Lowe D G. Shape indexing using approximate nearest- neighbour

search in high- dimensional spaces[C].Proceedings of the IEEE 1997 Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Puerto Rico: [s. n.], 1997: 1000-1006.

[55] 徐杰,金湘亮,白瑞广. 一种改进的摄像头视频实时拼接方法[J]. 计算机工程与应用,2013,(24):179-181+237.

[56] 宋延爽,耿楠. 基于 SURF 算法的全景图拼接技术研究 with 实现[J]. 计算机工程与设计,2012,(12):4647-4651.

[57] Martin A. Fischler, Robert C. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981,24(6): 381-395.

[58] Szeliski R. Video mosaics for virtual environments [J].IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16 (2): 22-30.

[59] Richard Hartley and Andrew Zisserman (2003). Multiple View Geometry in computer vision. Cambridge University Press, 2003, 95.

发表文章

曹丛峰, 方俊永, 赵冬. 基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机研制及初步结果. 光学技术. (编号: 16—227)。

致谢

时光匆匆如流水，随着遥感与数字地球所门前海棠花的盛开，毕业的脚步也轻轻地向我走来。三年的硕士学习生活，收获的不仅仅是愈加丰厚的知识，更重要的是在阅读、实践中所培养的思维方式、表达能力和广阔视野。很庆幸这三年来在遥感所我遇到了如此多的良师益友，无论是在学习上、生活上还是工作上，都给予了我无私的帮助和热心的照顾，让我在一个充满温馨的环境中度过三年的硕士生活。感恩之情难以用言语度量，谨以最朴实的话语致以最崇高的敬意。

衷心感谢我的导师方俊永老师。感谢方老师一直以来的关心和指导以及在工作学习过程中给予的鼓励。方老师严谨的治学态度、渊博的知识和科学的工作方法对我的硕士学习工作产生了深刻的影响。从仪器操作，到科研的思路，我的每一点进步无不凝结着方老师的心血。每当我在科研学习中遇到问题时，方老师总是耐心地听我阐述，帮我捋清思路，为我指明正确的思考方向。方老师帮我修改文章时密密麻麻的批注和一字一句的修改至今历历在目。非常感谢方老师这三年来在科研方面对我的指导、帮助和支持，在生活方面给予的关心和照顾。

衷心感谢赵冬老师在工作 and 生活上给予我指导和关心。赵老师一直指导我的学习，为我指明学习方向，帮助我完成研究任务和计划。每当有新想法，赵老师都会鼓励我去实现，去探索。赵老师关心我的工作、学习，指出我的不足，给我正确建议。非常感谢赵老师在三年来对我的精心培养。赵老师自信豁达干脆利落的人格魅力将对我产生深远影响。

衷心感谢刘学老师一直以来的关心和指导。刘老师风趣幽默，为人随和，常常用他的渊博知识为我进行解惑，给我的学习工作提供很大的帮助。衷心感谢张晓红老师对我的关心和指导，张晓红老师宽容慈爱和忘我的工作精神让我受益颇多。衷心感谢王潇老师在工作学习中给予的鼓励，王潇老师睿智谦和的人格魅力让我受益良多。

感谢王晶师姐在科研学习中给予的无私帮助，感谢郑晓梅师姐给予的无私帮助，两位师姐毕业以后工作繁忙，但是每当请教她们问题时，两位师姐都会耐心解答，帮忙查阅资料，谢谢两位师姐。感谢马经宇师兄，马师兄在生活和学习上

常常给予帮助和关心，给我解答各类问题，在研究中给我提了好多有益的建议和意见。感谢王建阳，三年来互相帮助互相学习都让我们有了很大的进步，生活学习中接触让我们产生了深厚的友谊。感谢曾福、杨惠文师妹，朱添翼师弟，郭科师弟在学习生活中对我点点滴滴的关心和帮助。感谢在所里接触的每一个人，在这样一个欢快向上的环境中工作学习是我的荣幸。

感谢研究生吴晓清、刘华梅和杨硕老师在学习生活方面给我的关心和帮助，三位老师严谨细致、认真负责的工作态度帮助我很快融入到遥感所的工作学习中。

感谢我的室友陈永新，三年来我们一直在一起生活，一起分享欢笑，一起排忧解难，一起感悟三年研究生生涯。感谢我的朋友和同学，感谢董文全，李志坤等，我非常庆幸能够遇到你们，和你们相处这么融洽。

感谢我的爸爸妈妈和姐姐，你们是最坚实的后盾，一直默默关心我，支持我。研究生三年几经变故，不能为父母分担，深表歉意。你们是我奋斗的动力，你们健康快乐是我最大的心愿。

感谢所有关心我支持我的各位，愿美好的祝福伴随每一个我认识的和认识我的人。