

航空遥感图像配准技术

刘朝霞 安居白 邵峰 王雅轩 著



科学出版社

航空遥感图像配准技术

刘朝霞 安居白 邵 峰 王雅轩 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以作者近年来在遥感图像配准技术方面的研究成果为主线,结合国内外相应的发展动态,全面系统介绍遥感图像配准技术的基本理论和近年来的新方法、新成果。本书围绕遥感图像配准过程中遇到的几个重要问题,详细阐述基于点特征、区域特征和结构特征的图像配准方法,重点分析每种方法采用的特征描述符和特征匹配方法,同时介绍遥感图像配准技术的应用情况。

本书内容新颖、实用性强,可供遥感技术与应用、模式识别、图像处理等相关专业的研究人员、工程技术人员、高校教师、研究生等参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

航空遥感图像配准技术 / 刘朝霞等著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-042005-3

I. ①航… II. ①刘… III. ①航空遥感-图像处理 IV. ①TP72

中国版本图书馆(CIP)数据核字(2014)第223784号

责任编辑:孙 芳 / 责任校对:张小霞
责任印制:肖 兴 / 封面设计:蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014年9月第一次印刷 印张:9 1/2 彩插:6

字数:126 000

定价:60.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

图像配准是图像处理中的一个重要问题,并且是极富挑战性的研究领域。目前,此项技术已经在遥感、医学图像分析、制图学、机器视觉和模式识别等领域得到广泛研究。与卫星遥感相比,航空遥感更为机动、灵活,其具备获取图像周期短、分辨率高且不受地面条件限制、资料回收方便及能够实时动态检测等特点,因而被广泛应用于农业、林业、地质、矿产、水文和水资源、海洋、环境监测等方面。在航空遥感应用中,往往需要将连续拍摄的两幅或多幅序列图像拼接成一幅完整的目标区域的全景图像,为后期的监测工作提供基础数据。但是,使用其他领域的图像配准算法配准遥感图像时,尤其是在配准动态变化、亮度变化、几何变化比较大、相似特征比较多、重叠区域比较小的图像时,容易出现配准误差较大的问题。同时,海量的遥感数据也对算法的效率提出了较高要求。因此,配准算法的准确性、效率和稳定性仍是亟须解决的问题。这些问题不仅是遥感图像配准领域,而且也是其他图像配准领域的研究热点,仍具有一定的挑战性,所以,航空遥感图像的配准是富有现实意义和科研价值的重要课题。目前,国内航空遥感领域中尚未发现能够比较系统介绍遥感图像配准算法的学术著作,希望本书的出版能够为促进遥感图像配准算法的研究发挥积极的作用。

近年来,遥感领域中不断涌现新的图像配准思路与方法,作者感到很有必要向读者及时介绍这些新成果。由于配准方法的多样性,本书主要以作者博士阶段的研究成果为主线,结合在研的国家自然科学基金项目,同时穿插介绍一些国内外的相关发展情况,总结而成。围绕遥感图

像配准算法中遇到的几个重要问题展开研究,不仅对现有遥感图像配准算法进行了全面的总结,而且其中提出的方法,尤其是基于结构特征的图像配准提高了配准算法的效率、精度和稳定性,为图像配准算法整体研究提供了新思路,为解决其他领域图像配准及模式识别中所遇到的问题提供了依据,其成果在国内遥感监测实践中得到了应用,取得了良好的社会价值和经济效益,同时也在国际遥感领域获得了专家的认可。

本书首先对涉及的概念及配准技术原理和相关技术进行综述;然后重点介绍基于特征点的图像配准技术、基于特征区域的图像配准技术、基于特征结构的图像配准技术,以及作者的研究成果,包括所涉及的特征、对特征的描述方法及特征匹配,为特征匹配及模式识别提供了新的思路;最后介绍遥感图像配准技术的应用情况。

本书由刘朝霞执笔、统稿、定稿,安居白、邵峰、王雅轩参与编写部分内容。在本书的撰写过程中,得到大连海事大学研究生的帮助,再次表示衷心的感谢。

本书出版得到国家自然科学基金项目(No. 61201454)和辽宁省高等学校优秀人才支持计划(No. LJQ2014127)资助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏与不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 航空遥感技术发展概况	1
1.1.1 遥感技术相关概念	1
1.1.2 航空遥感成像方式	4
1.2 航空遥感的特点	7
1.3 航空遥感图像配准的意义	8
1.4 本书的内容安排	16
第 2 章 航空遥感图像配准基本理论及技术	17
2.1 图像配准原理	17
2.2 图像配准技术	20
2.2.1 基于图像灰度统计的配准方法	21
2.2.2 基于图像变换域的配准方法	23
2.2.3 基于图像特征的配准方法	24
第 3 章 基于点特征的航空遥感图像配准技术	28
3.1 图像的点特征	28
3.1.1 Harris 特征点	28
3.1.2 SIFT 特征点	29
3.1.3 SURF 特征点	31
3.2 特征描述	32
3.2.1 基于直方图分布的描述符	33

3.2.2	基于空间频率技术的描述符	34
3.2.3	基于统计的描述符	34
3.2.4	基于形状的描述符	36
3.3	特征匹配	36
3.3.1	基于局部特征相似性的特征匹配	37
3.3.2	基于空间关系的特征匹配	37
3.3.3	局部特征和空间关系结合的特征匹配	39
3.4	基于矩不变量和改进的 ICP 图像配准算法	40
3.4.1	粗配准	41
3.4.2	精配准	46
3.4.3	实验分析	49
第 4 章	基于区域特征的航空遥感图像配准技术	55
4.1	图像的区域特征	55
4.1.1	矩不变量区域特征	55
4.1.2	自动卷积区域特征	56
4.2	基于三角形区域的图像配准算法	56
4.2.1	区域描述	56
4.2.2	自适应特征匹配	61
4.2.3	实验结果	64
4.3	基于亮度仿射不变量 IIMS A 的图像配准算法	71
4.3.1	IIMS A 描述符	71
4.3.2	特征匹配	74
4.3.3	实验分析	78
第 5 章	基于结构特征的航空遥感图像配准技术	88
5.1	概述	88
5.2	常见的结构特征描述符	88
5.2.1	几何均值距离	89

5.2.2	基于形状的描述符	89
5.2.3	基于空间关系的描述符	92
5.3	基于结构特征的图像配准模型	93
5.3.1	RANSAC	93
5.3.2	ICP	93
5.3.3	基于概率的方法	94
5.3.4	基于邻接点结构的方法	95
5.3.5	图配准模型	96
5.4	基于受限空间顺序约束的特征配准算法	96
5.4.1	基于图结构的不变量描述	97
5.4.2	匹配模型构造	100
5.4.3	特征匹配	103
5.4.4	实验分析	108
第 6 章	遥感图像配准技术应用	123
参考文献		134
彩插		

第 1 章 绪 论

1.1 航空遥感技术发展概况

1.1.1 遥感技术相关概念

任何物体都有不同的电磁波反射或辐射特征。遥感技术就是从人造卫星、飞机或其他飞行器上应用各种传感仪器对远距离目标所辐射和反射的电磁波信息进行收集、处理,感知目标的某些特性并加以探测、分析和识别的技术,其是 20 世纪 60 年代在航空摄影和判读的基础上随航天技术和电子计算机技术的发展而逐渐形成的综合性感测技术。遥感技术的最大优点是能于短时间内取得大范围的数据信息,可以以图像与非图像方式表现出来,代替人类去难以抵达或危险的地方观测^[1]。

根据平台分类,遥感大体上可分为航天遥感、航空遥感和地面遥感三类。

航天遥感又称太空遥感,泛指利用各种太空飞行器为平台的遥感技术系统。它以地球人造卫星为主体,包括载人飞船、航天飞机和太空站,有时也把各种行星探测器包括在内。卫星遥感是航天遥感的组成部分,以人造地球卫星作为遥感平台,主要利用卫星对地球和低层大气进行光学和电子观测。航天遥感使用的极地轨道卫星的高度一般约 1000km,静止气象卫星轨道的高度约 3600km。

航空遥感又称机载遥感,是指利用各种飞机、飞艇、气球等作为传感器运载工具在空中进行的遥感技术,是由航空摄影侦察发展而来的一种

多功能综合性探测技术。按飞行高度,分为低空(600 ~ 3000m)、中空(3000 ~ 10000m)、高空(10000m 以上)三级,此外还有超高空(U-2 侦察机)和超低空的航空遥感。航空遥感具有机动、灵活的特点。

由此可见,航天遥感和航空遥感的区别主要包括两点:①使用的遥感平台不同。航天遥感使用的是空间飞行器,而航空遥感是以飞机、气球等飞行于大气层中的飞行器作为遥感平台的遥感,在飞行的机动性及空间分辨率方面通常优于航天遥感,这是最主要的区别。②遥感的高度不同。航天遥感使用的极地轨道卫星的高度一般约 1000km,静止气象卫星轨道的高度约 3600km,航空遥感使用的飞行器的飞行高度只有几百米、几公里或几十公里。

地面遥感主要指以高塔、车、船为平台的遥感技术系统,地物波谱仪或传感器安装在这些地面平台上,可进行各种地物波谱测量。

根据传感器感知电磁波波长的不同,遥感又可分为可见光-近红外遥感、红外遥感及微波遥感等^[2]。

可见光-近红外遥感主要指利用可见光(波长为 0.4~0.7 μm)和近红外(波长为 0.7~2.5 μm)波段的遥感技术统称。前者是人眼可见的波段,后者为反射红外波段,人眼虽不能直接看见,但其信息能被特殊传感器所接受。它们的共同的特点是:辐射源是太阳,在这两个波段上只反映地物对太阳辐射的反射,根据地物反射率的差异,可以获得有关目标物的信息,它们都可以用摄影方式和扫描方式成像。

红外遥感是指通过红外敏感元件,探测物体的热辐射能量,显示目标的辐射温度或热场图像的遥感技术的统称。遥感中指 8~14 μm 波段范围。地物在常温(约 300K)下热辐射的绝大部分能量位于此波段,在此波段地物的热辐射能量大于太阳的反射能量。热红外遥感具有昼夜工作的能力。

微波遥感是指利用波长 1~1000mm 电磁波遥感的统称。其通过接收地面物体发射的微波辐射能量,或接收遥感仪器本身发出的电磁波束

的回波信号,对物体进行探测、识别和分析。微波遥感的特点是对云层、地表植被、松散沙层和干燥冰雪具有一定的穿透能力,又能夜以继日地全天候工作。

按照不同的研究对象,遥感又可分为资源遥感与环境遥感两大类。资源遥感是以地球资源作为调查研究的对象的遥感方法和实践,调查自然资源状况和监测再生资源的动态变化是遥感技术应用的主要领域之一。利用遥感信息勘测地球资源,成本低、速度快,有利于克服自然界恶劣环境的限制,减少勘测投资的盲目性。环境遥感指利用各种遥感技术对自然与社会环境的动态变化进行监测或作出评价与预报的统称。由于人口的增长与资源的开发、利用,自然与社会环境随时都在发生变化,利用遥感多时相、周期短的特点,可以迅速为环境监测、评价和预报提供可靠依据。

在遥感图像处理级应用中,需要考虑几个基本要素,即空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率、温度分辨率^[2]。

空间分辨率指遥感影像上一个像元所对应的地面实际面积的大小,是用来表征图像分辨地面目标细节能力的指标,是评价传感器性能和遥感信息的重要指标之一,也是识别地物形状大小的重要依据,通常用像元大小、像解率或视场角来表示。像元指单个像元所对应的地面面积的大小,以 m 或 km 为单位。航空遥感的分辨率一般能达到 0.5m 到 0.25m 或者更高的精度。像元是扫描影像的基本单位,由行、列号及对应的亮度值描述。像元越小,空间分辨率越高。像解率是用单位距离内能分辨的线宽或间隔相等的平行细线的条数来表示,如线/mm 或线对/mm。瞬时视场指遥感器内单个探测元件的受光角度或观测视野,单位为 mrad。瞬时视场越小,空间分辨率越高。瞬时视场取决于遥感器光学系统和探测器的大小,一个瞬时视场内往往包含不止一种地物覆盖类型,这就是“混合像元”,其中包含的每一种类型称为“纯”的“终端单元”。

时间分辨率是指在同一区域进行的相邻两次遥感观测的最小时间

间隔。对轨道卫星来说,时间分辨率亦称覆盖周期。时间间隔大,则时间分辨率低,反之时间分辨率高。航空遥感调查周期短,其时间分辨率往往比较高。时间分辨率是评价遥感系统动态监测能力的重要指标。根据地球资源与环境动态信息变化的快慢,可选择适当的时间分辨率范围。

光谱分辨率指成像的波段范围,分得愈细,波段愈多,光谱分辨率就愈高,现在的技术可以达到 $5\sim 6\text{nm}$ 量级,400多个波段。细分光谱可以提高自动区分和识别目标性质及组成成分的能力。

温度分辨率是指热红外传感器分辨地表热辐射(温度)最小差异的能力。

1.1.2 航空遥感成像方式

利用安装在飞机(或气球)上的航空摄影机,按照预定的计划从空中向地面摄影取得航空像片的全部作业过程(包括飞行摄影、暗室冲洗、质量评定等环节)称为航空摄影。航空摄影一般选在上午或下午,因为上午或下午地面上的景物比较清晰,有足够的光照度,容易收到较好的影调效果。如果地面上有雾,则拍摄时要使用适当的滤光器,以增强画面的反差。

遥感方式除传统的航空摄影外,还有多波段摄影、彩色红外和红外摄影、多波段扫描和红外扫描、侧视雷达等成像遥感;也可进行激光测高、微波探测、地物波谱测试等非成像遥感。航空遥感所用的传感器多为航空摄影机、航空多谱段扫描仪和航空侧视雷达等^[3]。由航空摄影机获取的图像资料为多种形式的航空像片(如黑白片、黑白红外片、彩色片、彩红外片等)。由航空多谱段扫描仪可获得多光谱航空像片,其信息量大大多于单波段航空像片。航空侧视雷达从飞机侧方发射微波,在遇到目标后,其后向散射的返回脉冲在显示器上扫描成像,并记录在胶片上,产生雷达图像。下面分别对常见航空遥感方式进行简要介绍。

1. 航空摄影

航空数字摄影是通过放置在焦平面的光敏元件,经过光电转换,以数字信号来记录物体的影像。依据探测波长的不同,可分为近紫外摄影、可见光摄影、红外摄影、多光谱摄影等。摄影机可分为分幅式、全景式和多光谱摄影机。分幅式摄影机一次曝光得到目标物一幅像片,镜头分为常角、宽角和特宽角。全景式分为缝隙式和镜头转动式。多光谱摄影机又分为多相机组合、多镜头组合和光速分离型。多光谱摄影机可同时直接获取可见光和近红外范围内若干个分波段影像。

2. 扫描成像

扫描成像是依靠探测元件和扫描镜对目标物体以瞬时视场为单位进行的逐点、逐行取样,以得到目标地物电磁辐射特征信息,形成一定谱段的图像,其探测波段可包括紫外、红外、可见光和微波波段。成像有以下三种方式:

(1)光/机扫描成像。光/机扫描成像是一种对地表的辐射分光后进行观测的机械扫描型辐射计,它是把搭载扫描仪的飞行平台的移动与利用旋转镜或摆动镜对平台移动的直角方向进行扫描结合起来,从而得到二维信息的遥感器。光/机扫描的几何特征取决于瞬时视场角和总视场角。进行扫描成像时,总视场角不宜过大,否则图像边缘的畸变太大。通常在航空遥感中,总视场角取 $70^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 。光/机扫描仪可分为单波段和多波段两种。多波段扫描仪的工作波段范围很宽,从近紫外、可见光至远红外都有。

(2)固体自扫描成像。固体扫描是用固定的探测元件,通过遥感平台的运动对目标进行扫描的一种成像方式。目前,常用的探测元件是 CCD。CCD 通过光学系统一次获得一条线的图像,然后由多个固体光电转换元件进行电扫描。将探测器搭载于飞行平台上,通过和探测器成正

交方向的移动而得到目标物的二维信息。CCD 通过自扫描,感受波谱范围宽,畸变小,体积小,重量轻,系统噪声低,动耗小,寿命长,可靠性高。

(3) 高光谱成像扫描。通过多波段扫描仪将可见光和红外波段分割成几个到几十个波段。对遥感而言,在一定波长范围内,被分割的波段数愈多,即波谱取样点愈多,愈接近于连续波谱曲线,因此,可以使得扫描仪在取得目标地物图像的同时也能获取该地物的光谱组成。这种既能成像又能获取目标光谱曲线的“谱像合一”的技术称为成像光谱技术。按该原理制成的扫描仪称为成像光谱仪。成像光谱仪是新一代传感器,20 世纪 80 年代正式开始研制。成像光谱仪旨在获取大量目标窄波段连续光谱图像的同时,获得每一个像元几乎连续的光谱数据,主要应用于高光谱航空遥感。高光谱成像光谱仪的图像由多达数百个波段的非常窄的连续光谱波段组成,光谱波段覆盖了可见光、近红外、中红外和热红外区域全部光谱带。光谱成像多采用扫描式或推帚式,可以收集 200 或 200 以上波段的数据。图像中的每一像元均得到连续的反射率曲线。

3. 雷达成像

雷达意为无线电测距和定位,是由发射机通过天线在很短时间内向目标地物发射一簇很窄的大功率电磁波脉冲,然后用同一天线接收目标地物反射的回波信号而进行显示的一种传感器。不同物体,回波信号的振幅、相位不同,接收处理后,可测出目标地物的方向、距离等数据。按发射波源分为红外雷达和激光雷达。按工作方式可分为成像雷达(真实孔径侧视雷达和合成孔径侧视雷达)和非成像雷达。雷达成像属于微波遥感的一种,其特点如下:

(1) 可全天候、全天时工作。

(2) 对某些地物具有特殊的波谱特征,如水和冰(微波波段发射率的差异)。

(3)对冰、雪、森林、土壤(尤其对干燥、松散物质)等具有一定的穿透能力。

(4)适宜对海面动态情况(海面风、海浪)进行监测,对海洋遥感具有特殊意义。

(5)分辨率低,但特征明显。

1.2 航空遥感的特点

与卫星遥感相比,航空遥感有着许多不可比拟的优点。飞机可在监测区域做较长时间的盘旋飞行,适用于观测目标的动态变化。另外,航空遥感机动灵活,在突发事件发生时能及时升空监测,并且飞行器可根据需要调整飞行高度,可在云层下飞行而少受云的干扰且可获得高分辨率数据。航空遥感的优点总结如下:

(1)航空遥感空间分辨率高,信息容量大。通常情况下,空间分辨率越高,识别地物的能力越强。但实际上每一目标在图像上的可分辨程度不完全由空间分辨率决定,还与目标的形状、大小及它周围的亮度、结构的差异有关。利用航空图像可以取得较精确的位置、方位、距离、面积、高度、体积和坡度等数据。利用空间分辨率来选择遥感数据时,主要考虑需要识别的地物的最小尺寸,大数据量对计算机存储、计算的压力及成本。航空遥感主要服务于较大比例尺的区域资源与环境详查、制图,以及解决工程技术上的具体问题,其经济与社会效益明显。

(2)航空遥感灵活,适用于一些专题遥感研究。航空遥感可以根据用户的需求,灵活选择具有特定空间分辨率、波谱分辨率、时间分辨率的传感器,设计航空遥感飞行的方案和路线等。

(3)航空遥感作为实验性技术系统,是各种星载遥感仪器的先行检验者。一般来说,检测传感器的功能首先需要用遥感飞机作为平台在地面实验场上空采集数据。可以认为,一切星载遥感仪器都是以机载试验

为前提的。

(4)信息获取方便。航天遥感需要发射卫星,因此受到时间和空间的限制,不能随时对感兴趣的目标进行观测。而航空摄影的平台主要是飞机,受到的限制少,可以随时随地对需要侦察或普查的地区进行遥感。

与其他遥感技术系统一样,航空遥感也有其固有的弱点,主要表现在:航空遥感受天气等条件限制大;航空遥感的观察范围受到限制;航空遥感数据的周期性和连续性不如航天遥感。

1.3 航空遥感图像配准的意义

航空遥感具有机动、灵活,获取图像周期短、分辨率高、不受地面条件限制、资料回收方便及实时动态检测等特点,因此被广泛应用于军事、农业、林业、地质、矿产、水文和水资源、海洋、环境等领域侦查监测,以及台风、洪水、地震、海啸、海洋污染等大型灾难与事故处理^[4,5]。

另一方面,由于飞行高度及摄像设备等各种因素的限制,在研究区域较大时,一幅图像往往不能完全覆盖整个目标,因此,可能需要将连续拍摄的两幅或者多幅序列图像拼接成一幅完整的目标区域的全景图像,为后期的目标监测、事故跟踪、溢油识别、计算溢油面积和估算溢油量等工作提供基础数据,这就需要图像配准技术。除此之外,由于航空遥感的数据量往往会比较大,巡航周期短,为了更好地发挥航空遥感实时性的特点,也要求相应的配准算法不仅要准而且要快。

图像配准是图像处理中的一个重要问题,并且是极富挑战性的研究领域。图像配准就是将不同时间、不同传感器或不同条件下获取的两幅或多幅图像进行匹配、叠加使得图像上的同名点精确对准的过程。各种图像配准的文献都会出现“配准、匹配、几何校正”三个词,它们的含义比较相似,一般两幅图像之间用“配准”;寻找对应特征(点)的过程叫“匹配”;根据参考图像和待配准图像之间的几何变换关系,对待配准图

像进行逐像素处理变为配准图像的过程叫做“几何校正”。

通过对两幅图像进行配准,使得多模信息融合成为可能,可以从现有数据中进一步获得场景的深度信息、检测场景的变化及识别和跟踪运动目标。图像配准已经被广泛应用于遥感、医学图像分析、制图学、机器视觉和模式识别等领域^[6]。尽管如此,在不同的时间、不同的光照、不同的视角及不同的传感器下获取的图像,它们之间会发生很大的变化,对于这些图像的配准仍没有一个通用的方法。目前,大部分研究是针对某一方面的问题,如一些关于处理宽视角的算法^[7~9]。而含低重复区域、大尺度仿射变换及亮度变化的图像配准仍是研究的难点。另一方面,配准的精度和有效性仍是研究者十分关注的热点问题,配准算法的精确性和有效性会影响到很多实际的应用,如图像融合、图像镶嵌、时序图像分析、目标变化检测、目标识别等。

航空遥感领域是配准技术的重要应用领域之一^[10~12]。但是,由于航空遥感应用的特殊性,航空遥感图像配准也存在许多因应用环境不同而特有的特点。在航空遥感图像的实际拍摄过程中,由于对同一场景或目标区域使用相同或不同的传感器(成像设备),在不同条件下(天气、照度、摄像位置和角度等)获取的两个或多个图像会有所差异,其差别可以表现在分辨率、灰度属性、位置(平移和旋转)、比例尺、非线性变形等方面。

在航空遥感成像过程中,影响配准精度的干扰因素主要有以下几个方面:

(1) 由于飞行高度、飞行方向和相机视角不同,使得仅用 GPS 信息获取的图像间的变换关系不准确,因此在相机参数未知的情况下,基于图像内容的配准就变得十分必要。

(2) 由于目标自身(形状、温度)的变化,使得同一目标的红外图像在细节和亮度上发生变化。

(3) 若目标单一,背景简单,则获取的航空遥感图像重复特征较多,