| 分类号_ | |
|------|--|
| UDC | |

| 密级_ | | |
|-----|--|--|
| | | |
| 编号 | | |

中国科学院研究生院

硕士学位论文

基于傅立叶变换的多源高分辨率遥感 数据的配准技术

余战武

| 指导教师 | 普林特 | 副研究员 | 博士 |
|----------|-----|-------|-------------|
| | 中国利 | 学院自动化 | 研究所 |
| 申请学位级别_工 | 学硕士 | 学科专业名 | 称_模式识别与智能系统 |
| 论文提交日期 | | 论文答辩日 | 期 |
| 培养单位 | 中国 | 科学院自动 | 化研究所 |
| 学位授予单位 | 中 | 国科学院研 | 究生院 |

答辩委员会主席_____

Multi-source Remote Sensing Very High Resolution Data Matching using Fourier Transform

Dissertation Submitted to

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences

in partial fulfillment of the requirements

for the degree of

Master of Engineering

by

Yu Zhanwu

Pattern Recognition and Intelligent Systems

Dissertation Supervisor: Associate Professor Veronique Prinet

独创性声明

本人声明所成交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与 我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确地说明并表示了谢意。

签名:_____ 日 期:_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院自动化研究所有关保留、使用学位论文的规定,即:中国科学院自动化研究所有权保留送交论文的复印件,允许论文被查阅和借阅;可以公布论文的全部或部分内容,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

| 签名: | 导师签名: | 日 | 期: | |
|-----|-------------------|---|----|--|
| | • / / / · | | | |

摘 要

多源数据配准是对同一场景下不同传感器或不同手段所获数据之间的 配准,它属于图像配准技术的一重要分支,在遥感数据分析、医学图像处 理、计算机视觉等方面有着重要的应用。本文在对以前多源数据配准技术 的分析与总结基础上,结合项目的应用背景,以 QuickBird 卫星图像与 地理信息数据为实验数据,围绕多源图像自动配准这一主题,进行了高分 辨率光学卫星图像与 GIS(地理信息系统)数据自动配准技术的研究。 本文的相关工作及主要贡献如下:

- 图像滤波:针对高分分辨率卫星图像中特征信息丰富的特点,本文将 均值漂移的方法成功应用到高分辨率卫星图像上。它能对灰度分布较 为均匀区域进行有效平滑同时保存了边缘特征。滤波保证了同一物理 特征具有均匀一致的灰度分布,这将有利于于下一步的特征提取工 作。
- 道路特征提取:本文在对高分辨率卫星图像的特征分析基础上,提出 了一种新的将灰度信息与几何形状信息结合起来提取城区主干道区 域的方法。该方法跟其它特征提取方法相比自动化程度很高:能够应 用于大幅高分辨率光学卫星图像道路特征提取上。它是实现图像与 GIS 数据自动配准的关键一步。
- 3. 道路特征图像与 GIS 数据的自动配准:在假定卫星图像数据与 GIS 数据中包含丰富城区主干道信息且其变换模型可用相似变换近似描述的前提下,本文提出了一套新的基于傅立叶变换的自动配准方案。该方法首先运用线状区域在频域中的方向特性求取数据之间的旋转角度,然后采用多尺度策略求取数据之间的缩放与平移参数。其他傅立叶变换配准方法相比较,它最大特点在于对图像旋转、缩放、区域变化的很强自适应性。
- 4. 小块区域 GIS 数据在大块图像中的自动定位问题研究:本文以上述 配准方法为基础,采用分块匹配的方法解决小块 GIS 数据与大块图 像数据的配准也即定位问题。它在对图像按照一定方式进行分块后采 用本文所提方法寻找该分块图像数据位置并求得其与 GIS 数据的变 换模型参数,根据这些信息确定小块 GIS 数据在大块图像中的位置。

关键词: 多源数据配准 方向频谱函数 傅立叶变换 滤波 道路特征提取

Abstract

Multi-source Data registration is to perform the match on images of the same scene acquired by different sensors or different means. It is one special branch of image registration and can be applied to remote sensing data analysis, medical image processing and computer vision etc. On the basis of surveying and analyzing the previous registration methods, This thesis focuses on the study of automatic registration of multi-source data especially for high-resolution image data and GIS (Geographical Information System) data. The related work and main contribution are summarized as follows:

- 1. **Image Filtering**. To make better use of the abound information in high-resolution satellite images, Mean Shift Filter method is successfully applied to denoise the images. The method can achieve an effective smoothing of regions with uniform gray-value distribution while preserving the structural information such as edges or lines. Therefore, It will guarantee that physical features appear as uniform regions with given structures and this will help to features extraction.
- 2. Road Feature Extraction. Based on the analysis of features in high-resolution satellite images of urban areas, a new method is proposed to extract the main road features in this case. The method combines spectral information and geometric constraints and it can achieve an automatic extraction work even in images which cover large areas. The automatic feature extraction is the key step for a full automatic image-GIS data registration.
- 3. Automatic Registration of Feature Image and GIS Data. With the assumption that both satellite images and GIS data holds adequate road features and their transformation can be expressed by similar transformation model, we propose a new FFT-based(Finite Fourier Transform) method to match the feature images and GIS Data. The algorithm makes use of the directional property of linear regions in frequency spectrum to recover the rotation of both data and then adopt a multi-scale strategy to get scale and translation as well. The significant advantage of the algorithm is its capability to match the rotated and scaled

images robustly even when they have a large scale change or obvious geometric differences.

4. **Study on GIS Data Locating.** Based on the matching method proposed above, a patch-dividing strategy is adopted to solve the problem of matching small-patch GIS data and large-area satellite images and also the locating problem. The strategy firstly divide images into small patches in a given mode and then use our matching method to find the position of the patch which has the largest overlapping areas with GIS data and also the corresponding transform model; According to this information, the GIS data can then be easily located in satellite images.

Keywords: multi-source data registration, directional spectral function, Fourier transform, image filtering, road feature extraction

| 第一 | -章 绪论 | .1 |
|------------------------|---|----------|
| 1.1 | 研究意义与背景 | . 1 |
| 1.2 | 本文组织结构 | .4 |
| 第二 | ⊥章 数据特性分析 | .5 |
| 2.1 | 快鸟卫星图像特性 | .5 |
| | 2.1.1 简介 | .5 |
| | 2.1.2 图像等级划分 | .7 |
| | 2.1.3 相关的坐标系统 | .8 |
| 2.2 | 地理信息系统 | 10 |
| | 2.2.1 地理信息系统的组织结构 | 11 |
| | 2.2.2 地理信息系统的空间数据结构 | 12 |
| 2.3 | 数据选择 | 14 |
| 第三 | 至章 多源数据配准技术综述 | 18 |
| 3.1 | 图像配准 | 18 |
| | 3.1.1 定义与分类 | 18 |
| | 3.1.2 基本流程 | 19 |
| | 3.1.2.1 特征提取 | 20 |
| | 3.1.2.2 特征匹配 | 22 |
| | 3.1.2.3 变换模型评估 | 23 |
| | 3.1.2.4 插值与变换 | 27 |
| | 3.1.2.5 误差估计 | 27 |
| 3.1.3 | 3 图像配准算法总述 | 29 |
| 3.1.4 | 4 小结 | 32 |
| 3.2 | 多源数据配准 | 33 |
| | 3.2.1 定义 | 33 |
| | 3.2.2 多源数据配准与图像配准之间的关系 | 33 |
| 3.3 | 遥感图像与GIS数据配准 | 34 |
| 3.4 | 本文的研究方案 | 38 |
| 第四 | 日章 高分辨率光学卫星图像的道路特征提取 | 39 |
| <u>/</u> 1 4 | 引言 30 | |
| т .1 Д 2 | 消費 39 道路转征描述 | 41 |
| т .2 Л З | 道路转征提取 | +1 13 |
| т.5 | 2017) Ш. Є. Ч. П. С. Ч. С. Ч. С. Ч. С. Ч. Ч. С. Ч. | тЭ 13 |
| | 4.3.7 皆征退取 4.3.2 特征提取 | тл 15 |
| | 433 试验结果与分析 | ני 17 |
| 4.4 | 小结 52 | r/ |
| 第五 | 章 基于二维FFT的多源数据配准算法研究 | 53 |
| 5.1 | 引言 53 | |

目 录

iv

| 5.2 基本理论基础 | 54 |
|---------------------------------------|----|
| 5.2.1 二维FFT定义 | |
| 5.2.2 二维FFT性质 | |
| 5.3 现有基于傅立叶变换配准技术综述 | |
| 5.4 一种基于傅立叶变换的新配准算法 | 61 |
| 5.5 实验结果与分析 | 64 |
| 5.5.1 验证对旋转角度的自适应性 | 64 |
| 5.5.2 验证对不同尺度的自适应性。 | 67 |
| 5.5.3 对场景与数据类型的自适应性 | |
| 5.5.4 特征道路完整性对配准结果影响的研究 | |
| 5.5.5 多模态或多时相下的城区卫星图像配准 | 75 |
| 5.6 小块GIS数据在大块图像的定位问题 | 76 |
| 5.7 总结与讨论 | 81 |
| 第六章 结束语 | 83 |
| 6.1 本文主要工作 | |
| 6.2 未来工作展望 | |
| 参考文献 | 86 |
| 攻读硕士学位期间撰写及发表的论文 | 91 |
| 致谢 | |
| · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | |

插图目录

| 图 2-1 地球坐标系示意图 | 8 |
|--------------------------------|----|
| 图 2-2 飞行器坐标系示意图 | 9 |
| 图 2-3 摄像机坐标系示意图 | 9 |
| 图 2-4 传感器坐标系示意图 | 10 |
| 图 2-5 图像坐标系示意图 | |
| 图 2-6 地理信息系统组织结构 | |
| 图 2-7 城区快鸟多光谱图像块视图(春季拍摄) | 15 |
| 图 2-8 城区快鸟全分辨率图像块视图(春季拍摄) | 15 |
| 图 2-9 城区快鸟全分辨率图像块视图(冬季拍摄) | |
| 图 2-10 城区GIS分层数据示意图 | 17 |
| 图 3-1 遥感数据与GIS数据配准的框架 | |
| 图 4-2 快鸟全色彩图像中的城区主干道区域(春季拍摄) | |
| 图 4-3 基于均值漂移的滤波方法与均值滤波方法结果比较图 | 45 |
| 图 4-4 道路特征判断准则示意图: | |
| 图 4-5 小块城区道路特征提取结果图 | |
| 图 4-7 大块 全色彩图像的城区道路提取结果图 | 49 |
| 图 4-8 检测线段的长度对特征提取效果影响示意图 | 51 |
| 图 5-1 线状区域频域上的方向特性 | 58 |
| 图 5-2 高斯平滑效果示意图 | 62 |
| 图 5-4 算法对数据旋转角度自适应性验证结果图 | 66 |
| 图 5-5 算法对数据尺度缩放自适应性验证结果图 | 68 |
| 图 5-6 算法对场景、数据类型自适应性验证的结果图 | 70 |
| 图 5-7 第一组实验中局部区域的全分辨率显示效果图 | 71 |
| 图 5-8 图像道路三种状态下的道路特征提取示意图 | 74 |
| 图 5-9 图像配准后的棋盘示意图 | 76 |
| 图 5-10 分块策略示意图 | 77 |
| 图 5-11 GIS数据位置说明图 | 78 |
| 图 5-12 图像数据分块后的锐度分布图 | 80 |
| 图 5-13 小块GIS数据在大块图像数据中的定位实验结果图 | |

表格目录

| 表 | 2-1 | 快鸟 | (QU | ICKBI | RD) | 卫星 | 影像 | 参数 | | • • • • • • • • • | | • • • • • • • • | | 6 |
|---|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-------------|-------------------|-----|-----------------|-----|----|
| 表 | 4-1 | 道路检 | 金测实 | 、验数 | 据列 | 表… | | | | | | • • • • • • • • | | |
| 表 | 4-2 | 道路特 | 寺征携 | 取方 | 法结 | 果讶 | 的列 | 表 … | | • • • • • • • • • | | • • • • • • • • | | 51 |
| 表 | 5-1 | 算法 | 对场量 | 景与图 | 像类 | 型目 | 自适应 | ī性实 | ミ 验中 | 「所用 |]数捷 | 的访 | 包明… | 69 |
| 表 | 5-2 | 算法 | 对场量 | 景与图 | 像类 | 型自 | 自适应 | Z性张 | 金证乡 | 民验的 | 的结果 | 比较 | ξ | 72 |
| 表 | 5-3 | 手工師 | 配准フ | 方法求 | 取相 | 1似3 | 变换模 | 袁型参 | 診数及 | 反 配准 | 宦精度 | - | | 72 |
| 表 | 5-4 | 手工師 | 配准フ | 方法求 | 取仿 | ī射? | 变换模 | 袁型参 | 診数及 | 反 配准 | 宦精度 | - | | 73 |
| 表 | 5-5 | 三种 | 持征打 | 是取状 | 态下 | 「的酉 | 记准约 | 吉果及 | を精度 | 王 | | • • • • • • • • | | 75 |
| 表 | 5-6 | 图像 | 间配∤ | 隹实验 | 所遗 | 数排 | 居列表 | ₹ | | • • • • • • • • • | | • • • • • • • • | | 75 |
| 表 | 5-7 | 图像 | 间配ϟ | 隹实验 | 结果 | 设设 | 吴差伯 | 计… | | | | • • • • • • • • | | 76 |

第一章 绪论

1.1 研究意义与背景

多源数据是通过不同手段获得具有多时空性、多尺度性、多语义性 和存储格式多样性的数据。3S 领域包括遥感(Remote Sensing)、地理信 息系统(Geographical Information System)与全球定位系统(Global Position System) 三部分,在 3S 领域里通常存在两种获取方式截然不同 的数据: 遥感图像数据和地理信息系统数据。遥感是一种远距离、非接触 的目标探测技术和方法。它利用搭载在遥感平台上的传感器接收从目标反 射或辐射的电磁波信息,实现对目标定性或定量的描述,而这种描述通常 以图像数据形式完成。其中,遥感平台分航天遥感平台(人造卫星、航天 飞机等)与航空遥感平台(航摄飞机、热气球等)两种;常用的传感器有 合成孔径雷达,多光谱扫描仪,CCD 线阵列扫描仪。地理信息系统是在计 算机硬件和软件支持下,运用地理信息科学和工程系统理论,科学管理和 综合分析各种地理数据,提供管理、模拟、决策,规划,预测和预报等任 务所需要的各种地理信息的技术系统。它是信息系统发展到高级阶段的产 物,它不仅随着计算机软件技术发展"应运而生",而且很大程度上也得 益于计算机硬件水平的发展。它所使用的数据统称为地理信息系统数据, 在我国,目前几乎所有的地理信息数据都是经过计算机辅助或手工绘制完 成。

空间技术的迅速发展及新型传感器的不断涌现,使得遥感图像数据的获取在及时性,准确性,以及类型多样化方面得到了充分的发展:对于同一地区,我们可以及时获得大量的来自不同传感器,具有不同空间分辨率,覆盖不同电磁波谱段的多源遥感数据。另一方面,信息技术日新月异的革命以及硬件水平突飞猛进的提高,导致了具有海量数据存储能力的新一代地理信息系统的诞生;海量存储能力造成了数据更新工作量的爆炸式膨胀,使如何实现 GIS 数据自动更新研究工作变得尤为紧迫。同时遥感数据获取的及时性与多样性为 GIS 数据自动更新的研究提供了可行性支持。从理论上讲,这部分研究工作属于数据集成范畴。数据集成是实现多

源遥感图像以及图像与数字高程模型数据,地理信息系统数据等其它语义 信息综合的技术手段。数据集成主要包括空间集成与信息集成两个步骤。 空间集成是将来自同一目标区域,不同时间与视角的两幅或多幅图像或其 他源数据在相同参考坐标系下建立一一对应的关系,其目的在于消除或抑 制由于成像条件差异所引起的图像间几何变形。空间集成的形式主要有多 视意义下的配准及多模态意义下的空间集成。信息集成是在空间集成的基 础上,将多源数据的信息加以综合,消除冗余和矛盾,实现信息互补,降 低不确定性,以达到对探测目标相对完整一致的信息描述。信息融合包括 多传感器数据的信息集(数据融合)成及多时相数据的信息集成(变化检 测)。

可以看出,信息集成的前提和基础是空间集成。能否找到不同源数 据之间在空间上的一一对应关系并实现其精确配准攸关整个集成工作的 成败。传统的空间配准方法是手工配准,在几何特征明显的数据场合里, 该方法比较有效,但是在配准过程中,同名点的确定不仅需要大量的人工 干预,而且需要操作者具备足够的场景认识和操作经验;而且当数据的几 何特征不明显或者比较复杂,同名点确定的难度会大幅提高,可能导致手 工配准方法失效。另外,海量遥感图像数据及 GIS 数据的出现使得同名点 确定的工作量与重复性会随之急剧增加,更无法保证配准结果的及时应 用。以上分析表明,手工配准方法不足以保证数据集成的可靠性及应用的 时效性。因而人们转而寻求精确、高效的自动配准方法。由于空间数据的 多样性以及不同数据之间几何变换模型不一致性,很难找到适合于所有任 务的万能方法。待配准数据中自身特性、覆盖的目标地区、噪声类型、以 及数据之间存在的畸变类型,共同决定了配准方法的选取。但是无论配准 方法如何变化,其大都包括以下几个步骤:特征提取、特征匹配、变换模 型确定与参数估计、坐标变换和灰度插值。

空间数据的自动配准在数据集成工作中基础性地位决定了它在遥 感、医学图像、计算机视觉上等领域有着广泛的应用价值。近 30 年来, 数以千计的文献都涉及到此方向问题的研究,其中若干篇对该问题研究方 法的进行了详尽的综述:文献[1]对 1992 年以前配准技术进行了较为全面 的总结;文献[2]则详细比较和分析了医学图像配准技术;文献[3]综述 了遥感图像配准技术的发展;文献[4]在文献[1]的基础上加入了对 1992 年以后 10 年的图像配准技术综述。总体上大多文献是解决同源数据或者 同语义数据,而对于多源或不同语义数据配准问题却涉之甚少。这一方面

由于后者所使用数据语义或特性的差异,对特征的提取与变换模型的确立 造成很大困难;另一方面因为当时传感器类型单一化与地理信息系统尚未 成熟,使得多源数据配准无论在条件还是应用上都十分有限。而如前所述, 近年来遥感领域传感器的多样化及地理信息系统的日趋成熟,为多源数据 配准提供了可行性与可利用性支持。总之,多源、多语义数据的自动配准 是实现多源数据集成的前提和瓶颈。探求解决或克服多源数据配准的技术 难点,研究如何在尽量减少人工干预下,实现其自动配准,是当前遥感领 域中尤为必要与迫切的任务。

遥感数据中高分辨率卫星遥感影像的出现使得在较小的空间尺度上 观察地表的细节变化、进行大比例尺遥感制图以及监测人为活动对环境的 影响成为可能,因而具有广阔的应用前景。它已经在城市生态环境评价、 城市规划、地形图更新、地籍调查、精准农业等方面被证明有巨大的应用 潜力。人们第一次可以从卫星图像制作整个国家的大比例尺地图;农民可 以更精确地监测农作物的长势和估算收成;科学家能够注视环境敏感地区 并预报趋势;城市规划人员可以更进一步开发新的住宅区。随着社会进步 和需求的进一步增加还会开发或将要开拓许多新的应用市场,如自然灾害 后测量和绘制财产损失,编制突发事件反应计划,绘制运输网络图,开发 交通导航系统,计划编制和开发房地产等。伴随着相关软硬件技术的全面 发展,高分辨率遥感影像的应用将日益深入到地球科学的方方面面。

在地理信息系统数据中,覆盖不同目标区域的数据有很大的特性差异,一般说来,城区 GIS 数据与其他区域 GIS 数据相比,有着以下特点:

- 存储结构比较复杂,一般采用分层特征存储方式,一个完整的城区 GIS 可能包含了道路、建筑物、桥梁、绿地、水域等多层特征,而每层特 征又可能由若干子特征组成:如道路层可能由路边线与路中线构成。
- 精度要求比较高。由于城区 GIS 主要用于城市规划、房地产等场景且 城区特征比较复杂,其精度一般要求在1:10000 以上。
- 3. 更新速度快。这主要由于我国城市化的发展趋势,使得城区建设速度 加快,因而要求其 GIS 数据更新跟上建设的步伐。

北京,作为中国的首都,属于国内城市建设速度最快的城市之一, 同时由于 2008 年奥运会即将在北京召开,为这座城市的发展注入了新的 活力。房屋拆建、道路改造、植草绿地工程因应而生。而这些却给北京市 城区规划与 GIS 数据更新带来了极大的机遇与挑战。以中科院自动化所为 主要负责单位,哈尔滨工业大学、中科院遥感所、北京测绘科学院四家科 研单位共同承担的国家 863 高科技项目"城市发展规划中的多源数据融合和决策支持"就是在这样的应用场合下展开的。本文将在该项目背景下,以 QuickBird 高分辨率卫星图像与北京城区 GIS 数据为例,进行多源数据配准技术研究工作,以期实现自动配准并尽可能提高配准精度。

1.2 本文组织结构

本文共分为六章。

第一章绪论部分简要介绍了本学位论文的研究意义、国内外相关研 究状况、及论文的框架结构及主要内容。

第二章着重于高分辨率遥感卫星图像的成像原理及自身特点,以及 城区 **GIS** 数据分层存储方式,为以后多源数据特征提取及格式转换提供 必要的理论依据及可行性支持。

第三章是对当前多源数据自动配准技术的综述。首先介绍了图像配 准问题,给出图像配准过程中所涉及的基本步骤,并对图像配准主要技术 进行综合比较与评估;然后引入多源数据配准问题,分析其与图像配准问 题之间的关系 并介绍目前提出的多源数据配准方法以及它们适用的场 合;最后,结合本文所述新的应用场景以及对上述方法的比较,初步提出 一套实现城区高分辨率卫星图像与 **GIS** 数据自动配准的解决方案。

第四章是高分辨率卫星图像的特征提取。首先介绍城区高分辨率卫 星图像的特征提取类型及相应的方法;结合特征提取的最终目的及本文所 处理图像覆盖区域的特点,提出一用于城区道路区域提取的算法。

第五章提出了一种基于有限傅立叶速变换的多源数据自动配准方法;首先介绍了傅立叶变换的一些重要定理;然后对现有基于傅立叶变化的配准方法进行综合比较;结合前一张所提取的特征结果,提出一种较新的基于傅立叶变化的配准算法;最后对该方法的鲁棒性与有效性,并将其用于多模态、多时项图像间的匹配,以及小块区域 GIS 数据在大幅图像中的定位。

第六章是小结。对本文主要的工作及贡献进行一下总结,并对未来在 此领域的工作进行了有效的展望。

第二章 数据特性分析

在多源数据配准得研究中,我们主要选择了两类生成、存储方式均 不相同的数据:由美国数字全球(DigitalGlobal)公司提供的快鸟 (QuickBird)卫星图像与北京遥感测绘院提供的GIS分层矢量数据。为 了便于实现两类数据的特征提取,本章将对这两类数据的特性分进行分 析;并在最后对所选择数据覆盖的地区加以说明。

2.1 快鸟卫星图像特性

2.1.1 简介

快鸟卫星由 Ball 航天技术公司(Ball Aerospace & Technologies Corp)、 柯达公司和 Fokker 空间公司(Fokker Space)联合研制,于 2001 年 10 月 18 日美国数字全球公司成功发射。它是目前世界上空间分辨率最高的商用卫 星,其突出的优越性表现在:全色分辨率为 61 cm,多光谱分辨率为 2.44 m,是同类卫星 Ikonos 的 1.63 倍;多 光谱有红、绿、蓝、近红外四个波 段,与 Ikonos 相同;图像幅宽 16.5 km,是 Ikonos 的 1.5 倍;在没有地面 控制点的情况下,地面定位圆误差精度可达 23 m;采用 11 bits/s 数据格 式,增加了灰度级数,减少了阴影部分信息的损失。据数字全球公司估计 在 2004~2005 年之前空 间轨道上不会出现性能与快鸟卫星相当或超过快 鸟卫星的商用遥感卫星。有关快鸟卫星参数如表所示。与同期光学卫星图 像及航拍图像相比,快鸟卫星图像具有以下应用优势:

 空间分辨率高。最明显的优势即在于此,以往只有航空遥感才可获取 的高分辨率影像,现在通过卫星也可取得与航片相媲美的空间数据。 以往卫星遥感数据成图最大比例尺大约为 1:25000(如 SPOT 数据), 而 Ikonos 卫星数据最大成图比例尺可达1:2500,快鸟卫星数据将 更 高,能达1:1500~1:2000。这种大比例尺的图像不仅能满足传统遥 感用户的需求,也 将满足如 城市规划建设、地籍管理、地震和洪水 应急救灾等要求大比例尺地图行业的需求。在传统遥感应用中,也将 增加应用的深度,比如用 Landsat 或 SPOT 数据只能监测大面积作物 生 长趋势,很难细分小块作物的种类和长势,而快鸟卫星等数据则 很容易做到这一点,高 分辨率数据将使解译工作变得简单。

- 不受地形条件的限制。对航空飞机难以到达的偏远山区(如我国西南 部地区)、条件恶劣地区以及南极等遥远地区同样可获取数据。
- 因空域管制严,航飞申请手续繁琐等原因,对小面积区域,如一个小 镇、一个工业园区等,相对航拍数据获取而言,它更容易同 hu 数据 更新更快。

上述特点使得 QuickBird 卫星图像广泛应用于农作物监测与产量估 计、测绘制图、环境监测、军事与国防等多个领域。针对不同的应用领用, 快鸟图像所经过的处理等级也不一样。因此有必要对快鸟图像的各处理等 级加以介绍。

| 快鸟(QuickBird)卫星影像参数 | | | | | | | |
|---------------------|---------------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| 卫星发射时间 | 2001年10月18日 | | | | | | |
| 卫星轨道高度 | 450 公里 | | | | | | |
| 卫星回访时间 | 1—3.5 天(与纬度有关) | | | | | | |
| 卫星轨道高度及倾角 | 450 km 98° 太阳同步 | | | | | | |
| 卫星轨道周期 | 93.4 分钟 | | | | | | |
| 每轨拍摄 | 约 57 景 | | | | | | |
| | 全色: 61 厘米到 72 厘米 黑白: 445~990 nm | | | | | | |
| 图像分辨率 | 多光谱:244 厘米到 288 厘米 蓝 450~520 nm | | | | | | |
| &光谱特性 | 绿 520~600 nm 红 630~690 nm 近红外 760~900 | | | | | | |
| | nm | | | | | | |
| 成像幅宽 | 16.5 公里 X 16.5 公里 | | | | | | |
| 图像数据编码方式 | 11bits/s | | | | | | |
| 定位精度 | 圆误差 23 m; 线性误差 17 m(无地面控制点) | | | | | | |

表 2-1 快鸟(QUICKBIRD)卫星影像参数

2.1.2 图像等级划分

根据后续处理程度的不同,快鸟图像大致可以划分为基本级、标准级、 正射级三类图像[6]。

- 基本级图像:基本级图像在快鸟图像中所经处理最少,它主要适于自身拥有高级图像处理设备或能力的用户。基本级图像与经纬度信息、星历表、照相机模型结合起来可用于高级影像处理(如正射纠正)。基本级图像经过了辐射校正与传感器校正,但未进行几何校正。其中辐射校正包括:不同传感器间相对辐射响应校正、对传感器未收集数据的区域充零以及相对辐射值到绝对辐射值的转换;传感器校正包括:内在传感器几何结构校正、光学校正、扫描校正、多光谱带之间的配准等。基本级黑白图像在星下点的分辨率为61cm,而在25度俯视角处大约为72cm;基本级多光谱图像在星下点的分辨率为2.44m,而在25度俯视角处大约为2.88m。由于它是处于参考坐标系下而非地面坐标系,因而它在几何上属于无确定精度的裸数据。单幅全色基本图像大小为27552×27424;单幅多光谱图像大小为6856×6888。所覆盖的面积大致为272 km²。
- 标准级图像:标准级图像用于需要较高定位精度或较大覆盖面积的场合。这种场合下的用户一般能够使用比较充足的图像处理工具将该级别卫星图像应用到各种场合去。标准级图像经过了辐射校正、传感器校正、几何校正三个层次的处理,且已投影到特定制图坐标系中去。标准级图像的辐射校正与传感器校正跟基本级图像的一样,它的几何校正工作包括移除飞行器轨道位置与高度的不确定成分、地球自转、地表不均衡及全景失真等。其黑白图像在星下点的分辨率为60cm,而在25度俯视角处大约为70cm;多光谱图像在星下点的分辨率为2.4m,而在25度俯视角处大约为2.8m。标准级图像的几何定位精度大约为14m。其单幅图像大小及所覆盖地区的面积与基本级图像大致相仿。
- 正射级图像:正射级图像图像已经被投影到地理信息系统坐标系中,可以作为一基准图像进行广泛的应用。正射校正后的图像是进行地图或 GIS 数据的更新工作、现有特征层匹配的理想参考数据源。它也可用于变化检测及其他要求较高精度的分析应用场合。正射级图像除了

进行标准级图像所要求的辐射、传感器、几何校正以外,还需要使用数字高程模型(DEM)与地面控制点(GCP)将图像上的每个像素都准确投影到地方地理坐标系中去。它与标准级图像的根本区别在于标准级 图像使用一个粗略的 DEM 实现地图投影,而它使用的 DEM 精度很高。正射级图像的分辨率与标准级大致相同,但是其地理定位精度大大高于标准级图像定位精度且依赖于图像的最后尺寸。

2.1.3 相关的坐标系统

不同等级的快鸟卫星所提供的图像数据中均包含了图像在自身参考 坐标系与地球坐标系中的信息;另外基本级卫星图像还提供了飞行器位置 与方向、照相机、线性传感器在焦面上的位置等信息。为了便于地理定位, 本节将对与之相关的坐标系统作以介绍[7]:

地球坐标系:地球坐标系以地球中心为坐标原点,常见的地球坐标系 是 WGS84 参考坐标系,包括欧氏坐标轴(*x_E*,*y_E*,*z_E*)与地理坐标(经 度、纬度)其中*Z_E*指向传统的地极方向;*X_E*位于子午线所在平面与 赤道平面的交接线上;使用右手正交准则所指方向即为*Y_E*。



图 2-1 地球坐标系示意图

 飞行器坐标系:飞行器坐标系的中心位于飞行器的质心,它的坐标轴 大体上与摄像系统对齐。Z_s轴大致指向拍摄目标方向;X_s轴平行于 扫描的方向;根据右手原则可以确定Y_s的方向,垂直于飞行轨迹所在 方向。对于一个驾驶这飞行器的观测者来说,X_s方向为飞行器前进 的方向;而Y,在自己右首方向,Z,垂直向下。



图 2-2 飞行器坐标系示意图

摄像机坐标系:在这里摄像机包括了望远镜与图像传感器。摄像机坐标系相对于飞行器框架来说是静止的。其原点位于望远镜的透视中心; Z_c平行于望远镜的光轴; X_c平行于扫描的方向; Y_c可由右手定则得到且平行于传感器阵列。



图表 2-3 摄像机坐标系示意图

传感器坐标系:对于每一个位于 N 元线性排列传感器阵列里的光学传感器来说,它都拥有一个整型列坐标,其取值都在 0~N-1 之间,传感器的这个坐标值沿着 Y。减小的方向增加。传感器的 Z。轴平行于摄

像机坐标系的*Z_c*轴;*Y_p*方向平行于触感器阵列的方向;依据右手定则可以获得*X_p*方向,*X_p*垂直于线性阵列方向且大致与图像扫描方向保持平行。



图 2-4 传感器坐标系示意图

 图像坐标系:与上述坐标系不同的是,图像坐标系属于二维坐标系 (列,行),当图像被显示时,列值朝右增加而行值朝下增加。(0,0) 对应着图像的左上角点。



图 2-5 图像坐标系示意图

2.2 地理信息系统

地理信息系统(GIS-Geographical Information System)是计算机支持下 管理、处理、分析空间数据的信息系统。空间数据是指描述"空间实体" 的空间位置特性与专属特性的数据[8]。通常包括不同来源和形式的遥感 数据、地形图数据、专题图数据、野外采样数据、统计调查数据。从技术 的角度看,地理信息系统是结合了地球科学、计算机、信息科学、系统科 学等多科学知识的跨学科技术系统。从应用的角度看,地理信息系统最重 要的应用对象是与地理空间分布密切相关的地球资源和环境信息,是为资 源和环境的信息管理、定量分析、综合评价与辅助决策服务的十分重要的 技术手段。

2.2.1 地理信息系统的组织结构

总体上看,地理信息系统由数据库、空间数据管理与分析系统、用户 接口、网络系统等四个基本部分组成[9]。如下图所示



图 2-6 地理信息系统组织结构

空间数据管理与分析系统。空间数据管理包括 GIS 运行平台、数据输入与转换、数据查询与检索、空间数据分析操作、应用模型分析、空间数据显示与制图等模块。其中 GIS 运行平台又称为空间数据管理引擎,是地理信息系统的核心,通过这一软件平台,空间数据按照某种数据结构进行数据库存储与管理,支持多幅与专题分层管理、支持图

像层的引入、实现空间实体与属性数据库的关联,根据引用模型确定 空间关系分析、信息查询与应用分析的算法与运算,完成空间信息与 分析结果的显示及制图,并实现系统与外部信息系统及输入输出设备 之间的数据传输与交换。GIS 空间数据管理和应用系统是在 GIS 软件 开发平台的基础上,根据相应目标进行二次开发而成。

- 数据库。地理信息系统中的数据库包括空间数据库与属性数据库两部分。空间数据库以文件组织方式存储点状、线状、面状空间实体的位置与分布信息。属性数据库则常利用商用广西型数据库系统存储空间数据库中的相应实体的专题属性信息。空间数据库管理系统通过实体码与关系数据库系统进行联结。通常,空间数据库在进行数据输入(如地图数字化)或数据转换过程中自动建立,而属性数据库则需要根据应用目标进行数据库定义,确定有关的数据项与数据类型。"数据库"除存储数据外,其重要功能还在于根据查询与应用分析模型所提出的数据检索指令提供所需的数据。尽管目前大多 GIS 系统的空间数据库与属性数据库为分开管理的,但已经开始表现初一种趋向,即由通用关系数据库系统不仅管理属性数据库也同时管理空间数据库,如美国的 ERSI 的 SDE 模式。
- 用户接口。用户接口主要负责地理信息系统的用户终端与空间数据管理之间的信息转换。用户终端交互式发出信息查询与应用分析的指令接口传递给空间数据管理系统,经过系统执行后再将查询和分析结果返回用户终端。系统应在这里提供一个友好的用户界面。
- 网络系统。地理信息系统发展的重要标志是信息共享。信息共享的主要表现为多用户、分布式数据库、互操作与网络管理四个方面。前三方面体现了当前 GIS 发展中越来越迫切的现实要求。而后者网络管理则是实现前三方面的必要条件。地理信息系统中网络管理功能表现为支持局域网、广域网及 Internet 互联网的能力。

2.2.2 地理信息系统的空间数据结构

空间数据结构是对点、线、面空间实体的各要素之间关系的一种抽象。空间数据结构在地理信息系统的设计、建立和应用中起着十分关键的 作用,它决定了空间数据采集、存储、管理、操作运算的基本方式。空间 数据结构按照对空间实体各要素相互关系描述的方式,主要分为矢量结构 和栅格结构两类。不同的空间数据结构与数据采集方式有关。矢量结构主要来自跟踪数字化采集方式;栅格数据主要来自于扫描专题图像、遥感图像或数字地形模型(DTM)。

2.2.2.1 矢量结构

矢量结构中描述的基本数据源为:点、结点、矢量、线段、多边形。 目前最常用的地理信息系统为二维地理信息系统环境,以下对矢量结构说 明均仅考虑二维情况:

点(Point):最基本的地图数据元素。由一对*x*,*y*坐标来表示其空间位置。

结点 (Node):包括两种:特征点用于表示具有主体属性意义的点状实体如水井、城镇点、泉、高程点等;线段端点用于表示线段起始点与终止结点。因而不具专题意义。

矢量 (Vector): 连接两点构成矢量, 具有方向性。

线段(Line):由一个或若干连接的矢量组成,它也可分为两类:具有 专题属性的线实体与多边形的组成线段。

多变形(Polygon): 面状空间实体,由一条或若干条线段组成的闭合 范围。

空间数据结构的矢量结构是通过上述图形元素的数据编码来实现的。 空间数据编码包括拓扑编码与坐标编码:坐标编码仅表示空间数据元素的 具体位置,不能反映相互关系与属性,而拓扑编码只描述多边形、线段、 结点之间的空间相互关系及属性关系。它并不需要考虑点、线的具体位置 与相互距离。两者互为补充、相辅相成,缺一不可,只有结合起来才能完 整的描述存储空间数据库中的空间实体。

2.2.2.2 栅格结构

把工作区域按照规则的形态均匀分割为格网矩阵而成的结构为栅格 结构。常用的规则形态为正方形格网,也可以是三角形、六边形、矩形等 格状网络。卫星图像中的像元可以直接构成格网结构的空间数据。

在栅格结构的地理信息系统中,每个格网单元是最基本的信息存储单 元和处理单元。在这里,一个真实地理空间中的空间实体被分割为一个到 若干各格网单元,一个空间实体是多个格网单元的几何。格网的大小直接 影响到描述空间实体几何形态的精度和应用分析的精度。因此格网单元大 小应根据应用目标、空间实体的地域分布与分异特点来确定,原则上要使 得格网单元能有效的模拟出实体单元的空间分布。另一方面在保持空间分 析的精度的前提下,尽可能压缩存储的数据量,以减轻系统在存储与处理 能力方面的压力。

2.2.2.3 矢量结构与栅格结构比较与转换

地理信息系统的数据结构的确定往往与主要数据源的特征有关。若主 要数据源为遥感图像、数字地形模型,则可以选择栅格数据作为系统的基 本数据结构;若主要数据由划线地图、专题地图跟踪数字化过程生成,则 可选择矢量结构作为系统的基本数据。矢量结构与栅格结构两者各有特 点,通常一个较好的地理信息统应该具备这两种数据的转换功能,而且经 过空间配准栅格图像数据与矢量地图数据可以折叠到一起。

2.3 数据选择

前两节我们对课题所涉及的两类数据做了详细的介绍,结合本课题的 研究背景,我们将从以下方面考虑选择具体数据:

- 从数据类型上说,高分辨率卫星图像与GIS各有特点,这些特点可以 很好的结合起来互为补充。一方面高分辨率卫星图像更新较GIS数据 快,可用辅助GIS数据的更新工作;另一方面GIS数据清晰的主题特 征分层存储方式可以帮助人们对所获卫星图像数据进行特征分析。
- 从图像等级上说,为了验证我们所提出的图像配准算法的有效性与鲁 棒性,采用了标准级与正射级两种级别的图像。
- 从课题的研究背景方面考虑,由于本课题主要研究"城市发展规划中的多源数据融合和决策支持",我们研究数据选择北京市区的快鸟数据与GIS数据(北京测绘科学院提供)。
- 对于高分辨率卫星图像来说,全色彩卫星图像与多光谱卫星图像都被 用于测试配准的有效性。
- 由于 GIS 数据主题分层存储方式,我们选择了道路、道路中线、房屋、 绿地、水域五层在城市地区特征比较明显的数据作为我们的实验数 据。

图 2-7 与图 2-8 分别为我们所选择的多光谱卫星图像块视图与全色彩图像块视图。其中左图为定比例缩小后的整个场景图,右边两图为红边

所框定区域原始分辨率下的块视图。对两组数据的分析比较可以发现以下 特点:

 由于空间分辨率的不同,使得同类特征在两类图像的效果有很大差异,如:道路上的汽车在多光谱卫星图像上可能表现为一个斑点,而 在全色彩图像上可能是一个灰度均匀的条状区域。



图 2-7 城区快鸟多光谱图像块视图(春季拍摄)



图 2-8 城区快鸟全分辨率图像块视图(春季拍摄)



图 2-9 城区快鸟全分辨率图像块视图(冬季拍摄)

光谱分辨率的不同,使得特征在多光谱卫星图像上比全色彩图像上显得更加丰富,因而一些特征在多光谱卫星图像上比在全色彩上更易区别。

为了验证配准算法的有效性,我们还选择了同一场景冬季拍摄的图像 作为研究数据,与前两幅图像不同的是,该图像中大部分特征物都被雪覆 盖,因而可利用的特征大为减少;另一方面由于冬季太阳辐射角很小,使 得特征物阴影变长。

关于 GIS 数据,我们使用由北京测绘科学院提供的北京市区分层矢量 GIS 数据。由于原始数据为矢量数据,而图像数据为栅格形式存储,因此 有必要将 GIS 数据由矢量数据转换为栅格数据。我们采用如下方式实现 数据的转换:通过读取矢量数据文件(*.dxf),根据所要求栅格数据的分辨 率求出位图大小,然后在位图中对特征进行重新定位。以下部分为与卫星 图像覆盖同一区域的多层特征 GIS 数据可视化图。改图种蓝色区域代表 建筑物;深绿色区域为绿地;暗红色线条为道路的边缘轮廓。





第三章 多源数据配准技术综述

本章对当前多源数据自动配准技术进行综述。首先介绍了图像配准 问题与图像配准过程中所涉及的基本步骤,并对图像配准主要技术进行综 合比较与评估;然后引入多源数据配准问题,分析其与图像配准问题之间 的关系并介绍目前多源数据配准方法以及它们适用的场合;最后,结合 本文所述新的应用场景以及对上述方法的比较,初步提出一套实现城区高 分辨率卫星图像与 GIS 数据自动配准的解决方案。

3.1 图像配准

3.1.1 定义与分类

图像配准[1]是将从不同视角运用不同种传感器或在不同时刻获得同一场景的两幅或者多幅图像不断迭和的过程,其目的是使同一坐标下的象素对应同一场景点。在配准过程中,通常以其中的一幅图像作为参考图像(reference image),其它图像相对于参考图像进行匹配,称之为测量图像(sensed image)。

图像配准是所有用于从不同源数据集成工作(图像融合、变化检测、 多通道数据融合)获取最终信息的图像分析中的重要一步。其应用场合涉 及到遥感图像处理、医学图像处理、计算机视觉等多个领域。一般情况下, 根据图像获取的方式不同图像配准有以下四个应用领域:

- 多视分析:从不同视点获取同一场景的图像。其目的在于获取场景的 更大二维视图或三维表示。应用场景包括:遥感一测量地区的多幅图 像拼接;计算机视觉一形状复原。
- 多时分析:同一场景不同时间通常在固定基线下而可能的不同条件下获取的图像。其旨在发现或评估连续图像获取下的场景变化。应用举例:遥感一土地利用、土地规划的监测。计算机视觉一视觉监控、运动检测中的自动变换检测。医学图像处理一疗理与肿瘤变化监控。
- 多模态分析:同一场景下不同传感器获取的图像。目的是通过融合不同源信息以获取更复杂更具体的场景表示。在遥感领域里,比较典型的多模态配准类型有:特性不同传感器所获图像的融合、更高空间分

辦率的获取、更高具有光谱分辨率的多光谱图像的获取以及不受云层 或太阳光照的雷达图像的生成。医学图像中,记录解剖身体组织结构 的不同传感器图像的融合(如:核磁共振图像、超声波图像、CT 图 像、PET 图像),其结果可用于放射性医疗或核磁医疗。 多模态图像配准可以是不同类型图像的配准,也可以是图像与其他场 景模型数据的配准。场景模型可以是场景的计算机表示,如地图、数 字高程模型。典型的应用是定位获取图像在场景模型中位置并比较 之。应用场景例子包括:遥感图像一航拍图像或卫星图像与地图或其 他 GIS 数据之间的配准。计算机视觉中的目标模板与实时连续图像的

匹配、自动质量检测。医学图像-病人图像与数字解剖图配准,标本 分类等。

3.1.2 基本流程

由于图像数据的多样型以及应用条件的不同,很难设计出一个完整能 够满足所有配准任务要求的统一方案。每一种配准方法的研究不仅要考虑 图像间的几何形变、而且还要涉及到图像数据噪声的影响、图像的内容、 配准的精度及与具体应用条件和成像地物相关的数据特点等等。但大多数 的配准方法一般具如下四个关键步骤:

- 特征提取:配准图像中明显目标的手动或者理想情况下的半自动提取。这些明显目标包括:带有闭合边界的区域、边缘、轮廓、先端交叉点、角点等。为了进一步的处理,这些特征可以用几个能够代表描述他们的点来表示如:重心、线段端点、曲线的突点等。
- 特征匹配:该步主要用于建立匹配图像中特征之间的特征对应关系, 不同的特征描述及相似性度量与特征空间位置关系被综合利用以确 立对应关系。
- **变换模型评估:**用于匹配测试图像到参考图像的变换函数的类型、参数在这一步将被确定。其中变换函数的参数是通过已建立的特征对应关系而被计算。
- 插值与变换:测量图像根据已经确立的变换函数变换,图像在非整坐标区域的像素值通过合适的插值方法来计算。

对于每一步,其实现都存在一些典型的难点。首先,我们必须先确定 对于给定的任务哪一类特征比较合适。这些特征必须是明显的目标,分布 均匀而且容易检测。通常情况下,提取的目标具有物理可解释性。参考图像与测试图像中被检测的特征集合即使是在图像没有能够覆盖足够多相同区域或者其他不可预见的变化情况下也拥有足够多的不变特性。特征检测的方法必须拥有足够的定位精度而且不受假定图像退化模型的影响。理想情况下,无论图像变形是何种方式,检测算法能够检测出各种投影情况下的相同特征。

在特征匹配阶段,不正确的特征提取或者图像退化都可能导致问题出现;物理上对应的特征对相似度可能因为不同的成像条件而大幅降低,因而特征描述算子与相似性度量方式的选择应该考虑到这一点。同时,这些度量方式能够足以区分不同特征且不受轻微不可遇见的特征变化与噪声的影响。匹配算法在不变性方面应该鲁棒而且有效。在另一幅图像上没有匹配对的单一特征不应该影像到匹配效果。

映射函数的类型应该根据传感器的先验知识或预期的图像退化方式来选择。如果没有这些先验知识,该模型应该足够的灵活以便处理任何可能出现的退化模型。特征检测方法的精度、特征对应估计的可靠性、可接受的近似误差范围也都应被考虑到。如果匹配目标是进行变化检测,则我们所寻找的变化最好保留下来,这一工作很重要但是极其困难。

最后,应该从要求的插值精度及计算复杂度两方面考虑图像重采样的 方式。大多场合下最近临域法或双线性插值法足以处理大多场合。然而, 一些应用场合要求更精确的插值方法,如三次卷积插值或双三次卷积插 值。

一个完整的匹配系统,还应具备关于图像配准效果的客观、定量的评价方式及指标。

3.1.2.1 特征提取

特征元素的提取分为手工选择特征和自动识别特征两种方法。手工选 择特征元素方法是通过人的辅助作用来识别图像中的特征,在这个过程 中,特征元素的识别和匹配是同时进行的。特征元素的选择明显受人的主 观因素的影响,同时随着图像处理的数据量的加大,完全手动选择控制点 方法逐渐淘汰,而更趋向于人工干预尽可能少的自动提取特征元素。自动 检测的特征元素主要来自:

● **角点**:如卫星图像中建筑物的角点、阴影的拐角处等,常用角点检测

方法有:

1. ithchen 和 Rosenfeld 提出一种基于图像一阶和二阶差分的角点 检测算子[10]:

$$K(x,y) = \frac{f_x^2 f_{yy} - 2f_x f_y f_{xy} + f_y^2 f_{xx}}{f_x^2 + f_y^2}$$
(3-1)

K(*x*, *y*)局部最大点确定为角点 Brunnstrom 等人在 Kithchen[11]和 Rosenfeld 的基础上,提出了寻找*K*(*x*, *y*)分子的局部极值,这将 倾向于选择拥有较高梯度值的点。另一对 Kithchen 和 Rosenfeld 的改进方法由 Zungia 和 Harlic[12]提出,其首先进行边缘检测, 然后在此基础上在边缘像素上寻找由梯度幅度均化后的*K*(*x*, *y*) 的局部极值。

2. Baudet [13]通过寻找 Hessian 行列式的局部极值作为角点。 $|H(x,y)| = f_{xx}f_{yy} - f_{xy}^2$ (3-2)

- 3. Dreschler 和 Nage[14]的方法寻找图象函数的 Gaussian 曲率的 极值点,在这些点之间使用插值方法来定位角点。
- 4. Forsterner[15]提出了角点算子仅使用一阶差分,其取

$$F(x,y) = \frac{\overline{f_x^2 f_y^2 - (f_x f_y)^2}}{\overline{f_x^2 + \overline{f_y^2}}}$$
(3-3)

的局部最大值作为角点。其中横线代表了(*x*, *y*)邻域的梯度平均 值。Harris 的方法和 Forsterner 的方法属于同一类。在比较试验中, Harris 算子被评定为效果最好的角度算子,但其缺点是比较耗时。 Trajkovic 和 Hedley 基于角点强度变化应该在各个方向都很大的 思想提出的改进算法,因而强度变化较小点中的极大值点即为角 点,其算法与 Harris 算法相比较运算量小但效果较差。

- 线段交叉点:,线段交叉点具体到城市场景中有,桥梁,道路,堤坝, 河流等交叉点,这些地貌都有很强的直线特征,所以提取它们很关键 的一步是进行边缘检测和线段提取。
 - 缘检测:作为图像的特征、图像的边缘有着极其重要的意义,因此对于图像的边缘检测对于图像的分析和识别也是至关重要的。进行边缘检测的最基本方法是图像的微分、梯度和拉普拉斯算子,模板匹配方法等。
 - 2. 线段提取:严格的讲,线段提取属于边缘检测的高级阶段。线

段提取是对提取出来粗边缘进行再提取以获取所需的信息。线 段提取的方法有霍夫变换和邮程长度编码[11]等方法。

- 区域质心点:获取区域质心点首先需要进行区域分割。对于特征不连续的边缘检测,把图像分割成特征相同的互相不重叠的连接区域的处理叫做区域分割。图像分割的最简单方法是阈值分割,阈值分割是把图像中的灰度分成不同的等级,然后用设置灰度门限的方法确定有意义的区域或欲分割的物体的边界,该方法对于复杂的图像难以得到满意的结果,其他方法有区域扩张法、在特征空间利用群聚进行区域分割、对图像的纹理信息进行分析提取纹理边缘以及不变性特征区域提取方法等。
- 区域:区域的提取方法主要分基于图像分割技术和基于相关度计算两种,基于图像分割技术通常用于检测内部纹理比较单一且和外部灰度差别较大的区域。基于相关度计算的方法,通常是在相关函数已知的情况下,通过在寻找测量图像使得与参考图像给定区域的相关度函数值最大的区域获得,基于相关度计算的区域提取过程与匹配过程同时进行。

3.1.2.2 特征匹配

特征匹配的目的是在两图像之间同类特征空间中,寻找一一对应的匹 配特征,最终产生一系列同名点,特征匹配的方法可以是基于空间关系的 结构匹配[16][17]、聚类方法[18]、基于距离变换的匹配[19]、或者是基于 几何不变性的特征匹配[20][21][22]等。对于图像特征的不变性描述应该满 足如下条件:不变性,即来自参考图像和测量图像的对应特征应该具有几 何不变性;惟一性,同一类特征的描述应该具有惟一性;稳定性:特征的 描述受噪声的影响应该近可能的小;独立性:关于图像特征的描述是一种 矢量,那么矢量中的各分量应该具有统计意义下的独立性。然而,上述四 个条件在通常情况下并不同时满足,因此有必要选择折中。

区域特征匹配中常用的一些不变性描述有:仿射不变矩,傅立叶描述 子、形状矩阵、主轴的惯性矩、差分链码等。此外,还有人将关于区域形 状的一些几何描述如面积、周长、最小外接矩形、组合成矢量的描述,或 与上述不变性的描述按最小距离法等准则进行特征匹配。关于边缘特征, 通常直接采取图像中组成边缘特征的离散点序列来表示;而对于边缘特征 的描述,通常是基于离散点的近似曲率估计等,此外,可以利用参数化的 曲线进行边缘特征的描述。

图像匹配方法大致可以分为两大类:基于区域的匹配方法与基于特征 的图像匹配方法。基于区域的匹配方法中特征提取与特征提取通常是同步 进行的,两个步骤的分界线不是十分地明显;而基于特征的匹配方法中特 征提取与特征匹配可以明显地区分开来。

3.1.2.3 变换模型评估

在特征匹配完成之后,映射函数将被建立,它用于将测试图像跌合 到参考图像上去。对于来自同一目标区域的两幅图像,假定确定了n对控 制点[$(X_i,Y_i),(x_i,y_i)$],i = 1,2,...,n,其中 (x_i,y_i) 为参考图像中的特征点, (X_i,Y_i) 对应于测量图像中的特征点。待配准的两幅图像的相对几何变换 函数,形如:

$$\begin{cases} X_i = f(x_i, y_i) \\ Y_i = g(x_i, y_i) \end{cases}$$
(3-4)

式(3-4)建立了由参考图像的点到测量图像的点的坐标的一一映 射关系。

映射函数的建立主要包括函数类型的确定以及参数的确定。映射函数的类型应该与测量图像假定的几何变形、图像的获取方式、所要求的配准精度保持一致。在某些特定场合、几何变形部分已知。如获取设备或者场景几何所引起的变形已可建模,则可根据逆形变进行预校正。

映射函数通常有两种分类方式,根据用于计算函数参数的控制点跌 合的精度不同,可分为插值函数与近似函数:前者将测量图像的控制点准 确地映射到参考图像上去;而后者则为近似映射。另一方面,根据模型在 图像的适用范围不同,映射函数可以分为:全局映射函数(global transformation functions)、局部映射函数(local transformation functions) [23]。全局映射用所有的控制点估计一个映射函数的参数集合;而局部映 射将图像看作一个由多个小片的组合,控制函数的参数取决于它们在对整 幅图像所产生支持中的位置。下面将根据这一角度对映射函数进行进一步 的说明。

全局变换。最典型的全局映射模型为仿射变换(affine transformation)。
该变换用于修正两图像间的关于旋转、缩放、以及平移的相对差异。
与式(4)对应,仿射变换可表示为:

$$\begin{cases} X = a_0 \cdot x + a_1 \cdot y + a_2 \\ Y = b_0 \cdot x + b_1 \cdot y + b_2 \end{cases}$$
(3-5)

获取图像的传感器具有相似的视点、或是传感器与景物之间距离远 大于景物处的地形变化时,可选择仿射变换。上述两点均不满足时,可选 择**二阶多项式变换**,如式(3-6)所示:

$$\begin{cases} X = a_0 \cdot x^2 + a_1 \cdot y^2 + a_2 \cdot x \cdot y + a_3 \cdot x + a_4 \cdot y + a_5 \\ Y = b_0 \cdot x^2 + b_1 \cdot y^2 + b_2 \cdot x \cdot y + b_3 \cdot x + b_4 \cdot y + b_5 \end{cases}$$
(3-6)

在图像的几何变换中,并不提倡二阶以上的多项式变换[7],因为高阶 多项式映射在使测量图像与参考图像对准过程中很容易使远离控制点的 区域产生极大偏差。

对于地形比较平坦,但传感器的位置非常不同的情况,可选择**射影变** 换(projective transformation),可表示为:

$$\begin{cases} X = (a_0 \cdot x + a_1 \cdot y + a_2)/(d \cdot x + e \cdot y + 1) \\ Y = (b_0 \cdot x + b_1 \cdot y + b_2)/(d \cdot x + e \cdot y + 1) \end{cases}$$
(3-7)

一般情况下控制点的个数高于确定映射函数参数所需要的最少个数,这是一般采用最小二乘法求解全局变换模型的参数,这种参数求解方法把图像的局部几何形变平均分配到整个图像中,因此,全局变换模型无法解决由于传感器的非线性、或是由不同视点观测局部三维景物特征而产生的局部几何形变。

局部变换。为克服图像间的局部几何形变问题,引入局部变换函数。
在待变换图像的不同部分,局部变换产生不同程度的图像变换。局部
变换可以是:表面拟合(surface fitting)函数、分段多项式(piecewise polynomials)函数、自适应映射(adaptive mapping)等。
①表面拟合函数。
考虑来自同一目标区域的两幅图像,假定确定了n对控制点

 $[(X_i,Y_i),(x_i,y_i)], i = 1,2,...,n,其中(x_i,y_i)为参考图像中的特征点,$ $<math>(X_i,Y_i)$ 对应于测量图像中的特征点,进一步可得到两个集
合: { (x_i, y_i, X_i) : i = 1, 2, ..., n}, { (x_i, y, Y_i) : i = 1, 2, ..., n}。分别采用表面拟合 函数 f(x, y), g(x, y) 拟合上述点集,在 (x_i, y_i) 处,有: $f(x, y) = X_i, g(x, y) = Y_i$;而对应于参考图像中的其它点(x, y),相应的 (X, Y)则由f(x, y), g(x, y)分别插值得到。**薄板样条插值**(thin plate splines) [24][25][26]是一种典型的表面拟合函数,函数的定义如下:

$$\begin{cases} X = f(x, y) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + \sum_{i=1}^n F_i \cdot r_i^2 \cdot \ln r_i^2 \\ Y = g(x, y) = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + \sum_{i=1}^n G_i \cdot r_i^2 \cdot \ln r_i^2 \end{cases}$$
(3-8)

其中, $r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$, 参数 $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, F_i, G_i$ 由下列条 件确定:

$$\begin{cases} f(x_i, y_i) = X_i, i = 1, 2, ..., n \\ \sum_{i=1}^{n} F_i = 0 \\ \sum_{i=1}^{n} F_i \cdot x_i = 0 \\ \sum_{i=1}^{n} F_i \cdot y = 0 \end{cases} \begin{cases} g(x_i, y_i) = Y_i, i = 1, 2, ..., n \\ \sum_{i=1}^{n} G_i = 0 \\ \sum_{i=1}^{n} G_i \cdot x_i = 0 \\ \sum_{i=1}^{n} G_i \cdot x_i = 0 \\ \sum_{i=1}^{n} G_i \cdot y = 0 \end{cases}$$
(3-9)

在保证控制点可靠获取的前提下,将样条拟合函数应用于局部几何存 在的图像配准,可以得到非常好的配准结果;但表面拟合是对图像所 有控制点的拟合,错误的控制点存在时,无法保证变换模型的可靠性。 由前面的求解条件可以看出,联立方程的个数与得到的控制点个数有 关,对于 n 对控制点,需要 2·(n+3)个方程才能解得拟合函数 f(x,y),g(x,y)的参数,与采用最小二乘方法的全局多项式变换函数的 求解比较,计算负荷大大增加,对于大范围遥感图像的配准,这种方 法并不实用。

另一形式的拟合函数为**多二次曲面**(multi-quadratics)[27]函数,由 下式给出:

$$\begin{cases} f(x,y) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i} \cdot \sqrt{(x-x_{i})^{2} + (y-y_{i})^{2} + R^{2}} \\ g(x,y) = \sum_{i=1}^{n} \beta_{i} \cdot \sqrt{(x-x_{i})^{2} + (y-y_{i})^{2} + R^{2}} \end{cases}$$
(3-10)

其中,参数R为张量系数,其大小可由用户根据各控制点的相对距离

确定。

②分段多项式。

比较有代表性的为 Goshtasby 提出的**分段线性映射**函数(piecewise linear mapping functions)[28] 和**分段三次曲线映射**函数(piecewise cubic mapping functions)[29]。对于来自同一目标区域的两幅图像,确定了一系列控制点[$(X_i,Y_i),(x_i,y_i)$],i = 1,2,...,n之后,首先,以控制 点为顶点,将参考图像进行区域的三角化划分,在测量图像中识别对 应的三角化区域,在每一对对应的三角区域中,定义局部映射函数。 由于每一个映射函数仅用于一个图像中的子区域到另一图像对应子 区域的变换,所有这些局部的映射函数就构成了整对图像的映射,即 分段映射函数。

在[13]中采用线性映射函数进行局部映射,这种线性映射可以保证图像中相邻区域的边界处映射函数的连续性,但却不能实现映射函数的 光滑过渡,图像间存在相对几何形变时,这一方法所产生的配准结果 比传统的全局多项式方法更精确;[29]中采用的非线性映射函数保证 了映射函数的连续性和光滑性,但计算的复杂程度明显增加。

对于分段多项式映射,图像局部区域的划分与控制点的个数、控制点 的位置有关;图像间对应每一对子区域对应一个映射函数的求解,计 算负荷大仍是一个明显的问题。

③自适应映射。

在满足图像配准精度要求的前提下降低计算的复杂性,是自适应映射的初衷。自适应映射过程的基本算法如下:事先给定误差调节参数 α , 首先,由图像间的控制点对 $[(X_i,Y_i),(x_i,y_i)]$,i=1,2,...,n,确定薄板样 条插值函数为局部映射函数,如式(8),从而有:

$$\begin{cases} X = f(x, y) \\ Y = g(x, y) \end{cases}$$
(3-11)

若按照一定的区域划分原则,将图像划分成m个子区域,对于每一子区域j(j=1,2,...,m),采用更为简单的函数来近似f(x,y),g(x,y),即:

$$\begin{cases} X = p_j(x, y) \\ Y = q_j(x, y) \end{cases}$$
(3-12)

采用该子区域中的任易对应点系列 (x_{ii}, y_{ii}) , ii = 1, 2, ..., k, 估计近似误 $\le \sigma_j$:

$$\sigma_{j} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{ii=1}^{m} \sqrt{\left(f(x_{ii}, y_{ii}) - p_{j}(x_{ii}, y_{ii})\right)^{2} + \left(g(x_{ii}, y_{ii}) - q_{j}(x_{ii}, y_{ii})\right)^{2}}$$

(3-12)

如果 $\sigma_j \leq \alpha$,则采用式(3-11)作为这一区域的局部映射,否则对 这一区域继续划分。由此看来,映射函数的确定和区域的划分是一个 依据一定规则的自适应分段过程。这种自适应映射与控制点的数量、 位置无关,用户可通过调节参数 α 的大小达到提高配准精度的目的, 但这种优化过程是以增大计算负担为代价的。在控制点可靠获取的前 提下,这种自适应技术较前两种局部映射更适于复杂局部几何形变的 图像配准。

3.1.2.4 插值与变换

映射函数建立以后,将用于将测量图像变换到参考图像所在的空间上,即配准图像。配准有前向、后向两种方式:前向方式根据映射函数将测量 图像的像素直接变换到参考图像所在空间,该方式容易使输出图像产生空 洞或累叠。比较常用的是后向方式,它对于参考坐标上的每一个点,根据 映射函数的逆函数寻找对应的测量图像的象素值,该方式可以避免空洞与 累叠。

插值可以看作是图像与特定插值核的卷积。常用的方法有:最近临域、 双线性、双三次卷积、四次样条、三次 B 样条、高阶 B 样条等。其中双 线性插值最常用,它是在精度与计算复杂度上的最佳折中;双三次卷积累 比较适于变化中存在较大测量图像放大场合,最近临域插值大多情情况下 应尽量避免使用,因为它容易产生人为噪声,只有在要转换的图像灰度阶 数较低而且不想引入"合成"的灰度值时才使用它。

3.1.2.5 误差估计

除了图像匹配的主要流程,对配准误差进行估计与评价也是一很重要 的工作。这一方面是因为,配准是由多个步骤组合而成,每一步都可能产 生误差,对配准各阶段进行比较客观的误差估计有助于后续改进工作;另 一方面,配准的不精确与图像物理差距在某些情况下难于区分,根据配准 阶段不同,误差一般主要有以下三种:

27

- 定位误差:由于不准确的检测所造成控制点位置的移动成为定位误差。作为检测方法的内在误差,定位误差不能在给定图像上被直接度量。但是从计算机模拟学习与基本事实的比较中可以得到大多数控制点的平均精度,这可用于估计特定场合下的期望定位误差。定位误差可以通过选择特定数据的优化检测算法来减小,但是大多时候在被检测的特征点数量与平均定位误差之间存在取舍。有时我们需要误差较大但数目较多的控制点,而非定位精度高但数量少的控制点。
- 匹配误差:匹配误差通过对已建立的特征对应关系中错误特征对个数 来度量。它有可能导致严重的匹配错误,所以应该尽量避免。通常情况下,这种误差可以通过鲁棒的匹配算法来避免。错误的特征对可以由连续性检测确认:两种不同的匹配方法用于同一候选控制点集合,两种方法所产生候选控制点对的交集被认为真正控制点对,其他候选点因而被排除。在没有可靠的匹配方法场合下,伪控制点对可以通过互相证实的方法被排除:每一步,排除一对候选点并计算映射函数的参数;然后检查被排除的候选点对根据该映射函数模型能否匹配。如果它们之间位移低于给定阈值,则被认为是有效控制点。
- **对齐误差:** 对齐误差可以定义为映射模型与实际图像间的几何形变的 差距。对齐误差总是存在的,因为所选择的映射模型可能不与实际几 何形变相一致或者模型参数计算总是不够精确。前者主要由缺乏充分 的先验知识造成而后者源自控制点对的稀少以及控制点定位误差。最 简单的对齐误差度量方式是计算控制点的均方差,但它不是有效的度 量方式,因为它只确定了控制点对的对齐方式;而且大的均方差有可 能由控制点定位误差造成,因而不能正确反映图像配准精度。一种与 之相似的方法是计算测试点对的误差:即将控制点分成两部分,一部 分用于计算映射函数模型,另一部分用于估计误差。估计误差的那部 分控制点成为测试点。这一方法弥补了前一方法的零误差缺陷,但也 有其不可取之处:测试点本身定位误差可能导致最后估计结果不准 确,同时取出部分控制点做测试点容易造成映射模型的精度降低;因 而这一方法一般仅适于有足够控制点对的场合。另外一种误差度量方 法是使用多线索一致性检查。即同一幅测量图像通过不同方法匹配到 参考图像上去,对这些方法的配准结果进行比较,在某些领域如医学 图像配准中,通常将一种被公认为效果最好的方法作为金一匹配方 法,其余的方法通过与它进行结果比较;而大多场合下并不存在金方

法,这时需将多种方法结果进行综合比较,如果它们之间差别甚微则 表明拥有好的匹配精度。最后还有一种常用的评估方法是目测法,即 让领域专家通过视觉效果评估配准好坏,它通常作为上述方法的有效 补充而被使用。

3.1.3 图像配准算法总述

按照配准过程应用的特征元素的类型,图像的自动配准算法可以分为 两大类: 基于区域的配准方法和基于特征的配准方法。基于区域的配准 方法提供了一个在地图上每一点都产生一个评估的稠密差异图。基于特 征的配准方法只对特征所在位置的点提供深度信息。[30]

- 基于区域的配准方法。其匹配过程是:在参考图像中以要匹配点 D 为中心确定一个m×n大小的窗口,该窗口区域即为模板。然后在测 量图像中选择足够大的搜索区域(以保证对应点在该区域),将模板 在搜索区域中移动时所覆盖的区域与模板进行相似性比较,寻找相似 性最大的区域中心点即为对应的点。常用的相似性度量主要有:归一 化的函数(normalized cross-correlation function)、相关系数(correlation coefficient)、差平方和(sequential similarity)和最小二乘匹配(least squares matching)基于区域的匹配方法对于纹理丰富的图像鲁棒性比 较高,但是该方法只限于光谱相似的图像配准。国内外基于区域的配 准的具体算法有:
 - Maxime Lhuilier[31] 提出了一种基于区域增长技术的稠密配准算法,该算法主要有两步:首先提取和匹配重要点,图像颜色分布均匀的区域即种子区域的匹配。然后从种子区域开始进行基于相关的匹配扩散,以生成仅仅覆盖图像中纹理足够丰富区域的密度匹配。该算法适用于非刚体场景和摄像机运动等情况的图像匹配。
 - Bruce D.Lucas、Takeo Kanade[32]提出了用 NewTon-Raphson 迭代 的图像匹配算法。该算法在假定图像已经有了近似配准的情况下, 运用空间灰度梯度信息来确定最优匹配的方位,通过更多的信息 该技术能够在较短时间内搜寻到两幅图像的最优匹配。适用于存 在现行扭曲和旋转错位情况的图像匹配。
 - 3. Paul A.Viola 等人[33]提出了一种基于信息论的图像配准方法。采 用**互信息**(mutual information)作为两图像之间的相似性度量,通

过搜最大互信息达到两图像配准的目的。相对于"归一化的互相 关"来说,这种互信息估计器更为鲁棒;由于这种基于信息论的 方法其特征空间为图像的灰度空间,即便是在基于边缘的匹配方 法不适用的前提下,这种基于信息论的方法仍能工作。但这种方 法对于图像中存在大范围相似区时,显得力不从心;此外,当图 像与模板的灰度值之间不是固定的函数关系,而是存在畸变时, 这种基于灰度的互信息不足以评判匹配质量。

- 4. 杨清友,王超[34] 提出了区域互相关的算法。该算法假定参考图像R和测量图像间旋转可以近似忽略,首先分别在R,S中选取合适的小窗口,通过区域的互相关运算,确定两图像的粗匹配;在粗匹配前提下,分别在两图像中确定多个对应的子区域作为模板和搜索区,实现局部区域的匹配优化,最终以优化得到的匹配区域形心为控制点,确定全局仿射变换模型,实现图像的配准。该配准过程是一个由粗到细,逐渐优化的过程;其核心是互相关运算子区域的提取。
- 5. R.N.Bracewell[35] 使用相位相关方法进行只存在平移变换的图像 间配准。该方法基于傅立叶位移定理,它通过计算参考图像与测 量图像之间的协功率频谱并寻找最高峰点的位置来寻找图像间的 平移量。该方法对于具有频域噪声或不均匀随时间变化的光照干 扰有很强的鲁棒性;且当要配准图像尺寸较大时表现出很强的省 时特性。在此基础上,E.D Castro等人[36]又将该方法用于解决存 在旋转、平移、缩放变换的图像间匹配上去;Foroosh [37]等人通 过相位相关方法的分析描述将其用于实现图像配准的图像亚像素 级配准上去。在本文第五章,将详细讨论这一类方法。
- 基于特征的配准方法。这类方法中待提取和匹配的特征元素应来自两 图像中的同类元素。特征元素的提取应该有关于尺度、旋转的不变性 特征,它们可以是:边缘、轮廓、几何拓扑关系等结构特征。特征元 素匹配时,通常用其属性作为衡量相似度的标准。基于特征匹配的方 法能够根据定位深度比连续性提取较准确的信息,而且适合灰度特征 明显不同的多传感器图像配准中。但是在纹理复杂的图像匹配中鲁棒 性较差。关于基于特征的图像配转算法文献很多,这里仅列举了几种

有代表性的算法:

- STockman[38]等人提出了运用聚类提取控制点的算法。该算法首 先利用直线、曲线、圆和交叉点等提取点的特征并表示为向量的 形式。称之为匹配元素。分别对参考图像和测量图像的每一个元 素进行匹配,确定配准对应的旋转、缩放、平移等变换值。利用 匹配元素的所有组合生成一个 RTS (rotation-translation scale)空间,寻找 RST 空间中的聚集点来确定图像配准的变换参 数。
- Ton 和 Jain [39] 提出了以图像中出现频率较高的目标区域的形 心为特征点,采用松弛(relaxation)算法寻求匹配的特征点对 作为控制点的配准算法。但是该算法假定图像中的特征点至少有 一半在另一半图像中存在对应点。
- Ventura[40]等人提出的算法中,首先采用分割的方法从图像中提 取关于"平移、旋转、缩放"不变性的结构对象;然后利用基于 模糊逻辑的多值逻辑树比较不同图像的结构对象的属性的相似 性,确定匹配的对象结构后,以对应结构对象的形心为控制点进 行配准。
- 张正友[41]提出了一种通过寻找未知的射影几何来匹配为标定图 像的鲁棒方法,该方法中,首先利用相关度计算寻找曲率较高的 点作为初始控制点,建立初始对应关系;然后通过估算对应的单 极几何约束关系,搜寻更多的控制点。
- 5. J. Matas [42] 等提出了基于 MSER (Maximally stable Extremal Regions)提取的方法。该方法中,首先利用类似水线分割的方法 提取出 MSER,建立尺度、旋转不变性描述空间,在该空间内建立对 应评估函数寻找对应控制点进行匹配。
- 6. Flusser 和 Suk [43]给出了具有仿射几何形变的自动配准方法。 他们采用基于边缘检测的分割技术提取图像子块(patches),确 定各子块的轮廓,阈值化筛选,得到满足条件的子块,将每一满 足满足条件的子块以仿射不变矩表示,然后采用下述方式来实现 匹配:采用四维欧拉特征空间,确定两图像中最相似的三对子块, 以三对子块的形心为控制点,计算仿射变换的参数,以实现测量 图像与参考图像预匹配;利用采用 the nearest-neighbor rule 确 定最终的匹配子块。以匹配子块的形心为控制点,估计仿射变换

模型以实现图像的配准。

- 7. Li[44] 提出了两种基于轮廓特征的图像配准方法:基本轮廓匹配 (basic contour matching scheme)与弹性轮廓匹配(elastic contour matching)。前者首先在两幅图像中提取满足给定长度条 件的两种轮廓作为待匹配特征:封闭轮廓与开放轮廓。使用差分 链码和不变矩描述封闭轮廓,通过对这些描述属性的比较,达到 封闭轮廓匹配目的;采用曲率最大原则求取开放轮廓的凸点,以 包含凸点的轮廓作为基元,进行开放轮廓的匹配。最后以封闭轮 廓的形心与开放轮廓的凸点为同名点,采用最小二乘法估计变换 模型。所谓弹性轮廓匹配法是在实现粗匹配的基础上,对参考图 像进行边缘检测,以参考图像的轮廓为初始信息,采用主动轮廓 模型实现测量图像与参考图像的匹配;该方法的限定条件是参考 图像所检测的轮廓必须连续。
- Le Moigne[45]采用小波变换的方法进行图像配准。首先将参考图 像和测量图像采用小波方法进行多分辨率分解,分别从每一级的 LH 和 HL 小波系数中提取显著特征,由最高级开始进行,迭代计 算,最终确定图像配准所用变换模型,从而实现图像配准。
- 9. [19]提出了一种参数化的边缘匹配方法,即:HCMA(Hierarchical Chamfer Matching Algortihm)。在图像配准的应用中,它引入了多分辨率思想的金字塔结构,利用距离变换方法将其中一层图像的二值特征以距离图像形式表示,基于边缘距离(Edge Distance)最小准则,不断调整变换模型的参数,在参与配准的两幅图像间寻求边缘特征的最佳匹配,从而实现两图像之间的配准。该方法适用于在初始匹配的基础上进一步改善配准效果。基于 chanmfer matching 思想的边缘距离与二值特征的直接相关运算比较,更适合刻画图像中边缘特征的相似性。

3.1.4 小结

本节首先从图像配准定义与分类着手,详细分析了图像配准的四大关键步骤,然后介绍了国内外有关的具体算法。通过以上文献总述,我们可以归纳出自动图像配准的难点和核心问题是:

● 如何实现不同图像数据同名特征自动提取。这一过程要解决两个问

题:首先要确定同名特征的类型,目前大多数特征配准算法的同名特 征类型选择总与特定物理实体特征结合在一起,这使得特征类型难以 实现自动选择;其次如何实现这些同名特征的自动提取,这涉及到图 像处理、人工智能、计算机视觉等诸多领域的知识,由于这些领域的 工作还仅处于研究阶段,距离实际应用还很遥远,因而同名特征自动 提取是实现自动配准技术的一个技术瓶颈。

- 特征匹配方法的自动选择。特征匹配方法本质上的区别是其相似性度 量函数的差异。相似性度量函数的建立又依赖于所给定同名特征的类型。尽管给定一类特征,其相似性度量函数从内容上类似,但特征集合的相似状况迥异使对应的相似性度量函数参数设置上无法统一。
- 变换模型自动选择同样也存在与上述类似的问题:即对于不同的配准 图像对,难于实现其变换模型自动选择;一般采用的方法是后验法, 先是根据一些给定先验知识及经验选择模型,求出模型参数后,对模 型下的配准精度进行评估来判定该模型是否适合。

如前所述,现有评估方法都不很完整有效,一套有效的配准结果评估 方法的建立势在必行。通过总结图像配准的难点,可以看出,在图像配准 的各个阶段,可以有许多不同的处理方法。而由于应用的条件不同,很难 确定哪一种方法是最好的。对于未来用于图像配准的人工智能系统来说, 有必要针对这类系统开发一种能够根据具体应用情况进行配准算法自动 选择的系统,该系统将通过整合不同配准方法,寻找一致特定结果。

3.2 多源数据配准

3.2.1 定义

多源数据配准也即**多模态数据配准**,即同一场景下不同传感器获得的 不同数据之间的配准。在遥感领域里,比较典型的多源数据配准类型有: 特性不同传感器所获图像的融合、更高空间分辨率的获取、更高具有光谱 分辨率的多光谱图像的获取以及不受云层或太阳光照的雷达图像的生成。

3.2.2 多源数据配准与图像配准之间的关系

多源数据配准属于图像配准的一个特殊分支,因为它大致上具备图像

配准的四个关键步骤:特征提取、特征匹配、变换模型确立、插值与重采样。而其与一般图像配准的不同之处在于,它不仅可以是不同传感器所获 图像数据之间的配准,也可以是图像与其他场景模型数据的配准:本课题 研究中的**高分辨率卫星图像与 GIS 数据的配准**就属于这一范畴;由于两 种数据结构的不同,它可能比一般的图像配准多一个数据转换问题,即将 其他场景数据转换为图像数据。

多源数据配准的应用领域较为广泛,包括了遥感、医学、计算机视觉 等多个领域。限于篇幅,下一节将围绕遥感图像与 GIS 数据配准这一主 题,介绍近年来国内外在这方面所做的工作。

3.3 遥感图像与 GIS 数据配准

遥感图像与GIS数据配准就是将遥感图像数据配准到GIS空间或者将 GIS数据配准到遥感图像所在坐标系的过程。它是利用遥感卫星图像实现



图 3-1 遥感数据与 GIS 数据配准的框架

GIS 数据自动更新,以及用 GIS 数据作为先验知识对遥感图像进行特征提取的关键一步。近年来国内外多篇文献都对这一问题进行了研究,并提出了多种方法。由于所使用的数据不同,这些算法所解决的具体问题也相差很大,因而目前关于遥感图像与 GIS 数据配准并不存在一万能的方法。 尽管这些算法千差万别,解决的问题也不尽相同,但这些算法框架却差别不大,如下图所示,它们大致可以分为三个步骤:数据格式转换、特征提取、配准和重采样。下面对这三个步骤作一介绍:

- 数据格式转换。数据格式转换目标有二:一方面使待配配的数据拥有相同的存储格式;另一方面转换后的数据便于计算机的后续处理,如特征提取及提取特征的计算机描述。对于遥感图像数据来说,由于其数据量较大,大多采用了压缩存储方式,而比较便于计算机处理的图像数据格式为以二维或三维矩阵形式表示的裸格式,因此遥感图像数据格式转换的目的是将压缩格式存储的数据转换为裸格式存储方式。而GIS数据格式转换则主要把矢量数据转换为栅格数据。无论哪一种类型数据转换,都尽量要求转换后的数据与转换前数据存在一一映射关系。
- 特征提取。遥感图像与 GIS 数据特征提取对应图像配准问题中的特征 提取。由于 GIS 数据是分层特征存储,也即每一主题特征由一层 GIS 数据表示(如道路层、房屋层、绿地层),因而 GIS 特征提取只需把 每层特征数据单独列出即可。而遥感图像的特征提取则复杂的多,不 同场景、不同类型的图像所提取的特征也不一样;而且一般遥感数据 特比较复杂,噪声较大,特征不很明显。由于特征提取最终目标是实 现与 GIS 数据的匹配,遥感图像的特征提取多为具有实际物理意义的 特征提取,即实体特征提取。这些实体特征多要求在地面上特征且在 图像上分布比较均匀,对于城市场景下的遥感图像来说,比较理想的 实体特征有:道路、高度较低的房屋,水体,绿地,及人工地面控制 点等。
- 配准和重采样。这一过程主要包括对图像特征与 GIS 特征提取进行匹配,求取变换模型,根据变换模型实现图像到 GIS 空间的转换或者 GIS 数据到图像坐标系的转换。一般说来 GIS 特征较为全面,更与实际特征相符,而遥感图像特征则比较杂乱不全面,且不准确;另一方面,遥感图像与 GIS 数据由于产生时间不同,可能局部区域发生了变化。这都使得配准过程比较复杂。因而如何利用粗提取特征实现粗配

准,利用粗配准模型进行进一步特征提取,并实现较精确的配准,是 大多图像-GIS 数据配准算法所要解决的问题,因而特征配准与特征 匹配在这些算法中大多为一循环过程。图像与 GIS 数据之间变换模型 的选择将因所匹配的数据类型而不同,对与城市场景下高分辨率卫星 图像与 GIS 数据之间的变换模型一般多为相似变换模型或仿射变换 模型;而其类型的数据将根据处理等级的不同可能选择仿射变换模 型、投影变换、分段线性变换等。在模型确定后,最后一步工作是根 据变换模型将图像数据转换到 GIS 空间或者将 GIS 数据投影到图像坐 标系上,前者多为了利用图像数据实现 GIS 数据的更新,而后者则是 为了能够利用 GIS 先验知识实现图像的特征提取。

根据所使用遥感数据类型不同,前有的图像与 GIS 数据配准工作可 以分为两部分:航拍图像与 GIS 数据的配准及卫星图像与 GIS 数据的配 准工作。下面将对这些工作做一简要介绍:

Heiner Hild、Stuttgart 在[46]提出一 SPOT 卫星图像与 GIS 矢量数据 全自动配准系统。该系统所使用数据以森林为场景,它首先从 SPOT 卫星 图像与 GIS 数据提取多边形区域为特征数据。这些多边形区物理意义上 对应着森林覆盖区域。其中 SPOT 卫星图像中使用区域增长的方法提取多 边形特征;而 GIS 特征数据则是对相邻的区域进行合并而获得。对于这 些仿射不变性特征,使用后向深度优先树搜索算法确定其对应关系。该树 优先搜索算法使用一维或二维约束用于寻找一多边形区域的连续子集。接 下来根据确定的对应关系可以得到一个粗变换模型,根据该变换模型所有 与它一致的特征对将在一认证过程得到确定。对于每一个匹配的特征对将 计算其仿射变换模型,这些单个的变换模型将通过每一个被确认的传感器 模型的多边形对得到改进。最后从误差低于预先确定标准方差的多边形特 征对中提取同名点,根据这些同名点获得精配准的变换模型。

R.Bonnefon 等在[47]提出了一个利用线性特征进行 SPOT 卫星图像与 GIS 数据进行配准的方法。该方法假设 GIS 数据与卫星图像已经粗配准, 在此基础上做进一步的精匹配工作。它首先使用了三种算子进行特征提取 线性特征提取: 沈一卡斯特算子,杜达道路检测算子及拉普拉斯算子;然 后对三幅检测结果图像进行三种方式的结合:特性一致的特征融合;特性 不一致的融合;将一致及不一致特征同时保存下来的折中融合,使用一个 具体的道路特征模型获得最后检测结果图。然后使用 Dempster-Shafter 正 交准则及粗变换模型实现检测图像与 GIS 数据融合并获得四种结果评价

36

图像:高信度图像、可信图像、冲突图像、混淆图像。接着使用高信度图像与检测图像的折中融合图像作为匹配图像与 GIS 数据进行匹配,匹配包括两步:首先使用动态规划的方法寻找沿着初始 GIS 矢量数据上最优路径;接着运用动态轮廓的方法对该路径进行全局优化。最后利用Dempster-chafter 正交原则所生成的四幅图像对匹配结果进行评估。

在 Yasuharu Yanamura 与 Histoshi Saji 的文献[48]中,提出一实现航 拍图像与 GIS 数据的配准的方法,并将其利用到地震损害区域的检测中 去。其大体的配准思路是首先对两种数据进行预处理:对于航拍图像,将 彩色图像转换为灰度图像,然后利用中值滤波的消除噪声,最后使用 Sobel 滤波器获取带有矢量强度与方向的边缘图;对于 GIS 数据来说,为了减 少计算量,运用腐蚀与膨胀算子消除窄道路,保留主干道。然后通过寻找 给定的边缘图像数据与 GIS 数据相似性度量最大值获得该最大值情况下 的最优值。该相似性度量定义如下:

$$P = \frac{\sum |S|}{\sum |S| + \sum |A|}$$
(3-13)

其中 $\sum |S|$ 为图像中拥有高的边缘强度点且与 GIS 数据有相同边缘方向的 点的个数, $\sum |A|$ 表示为图像中拥有高的边缘强度点且与 GIS 数据有不同 边缘方向的点的个数。由于航拍图像比较几何变换比较大,该文采用的变 换模型是投影变换模型。

Taravudh Tipdecho 在[49]中提出一实现航拍图像与空间数据自动配准的方法。该方法主要提取的是边缘与角点。其大体上主要包括以下步骤: 首先利用被检测出的边缘为线索进行连接点手工定位,运用这些连接点获 取变换模型,这里由于所处理图像为航拍图像,使用投影变换作为两数据 之间的变换模型;接着根据这个粗配准模型根据边缘特征自动增加连接 点,并通过角点检测提高配准精度。最后利用改进准模型对图像进行重采 样,投影到 GIS 空间中去。

Ts.Purevdorj 与 R.Yokoyam 在[50]中提出一种将高分辨率雷达图像与 地理信息数据进行配准的方法。该方法首先使用地面控制点参数及地形高 度信息实现两者之间的粗配准,并根据粗配准模型将两数据跌合到一起; 然后通过比较跌合的数据与地理信息数据边缘之间的差值对配准进行校 正,获得更精确的配准模型。

除了上述方法以外,近年来还有其他关于图像与 GIS 数据配准的方法 提出,限于篇幅,这里将不作一一介绍。通过对以前该领域的工作分析和 比较,我们可以得到以下结论:

- 前述算法都只用于解决具体问题,如果场景、数据类型发生变化,则 其可能无法工作。
- 这些工作的自动化程度并不高,主要表现在特征提取上。大多算法的 粗配准都要依赖于地面控制点、地形高程模型等先验知识。

3.4 本文的研究方案

本节我们将结合本文的研究背景及使用数据,提出我们自己的解决方案。正如前所述,我们的解决方案也包括了三个关键步骤:数据格式转换, 特征提取,配准与重采样。

在数据格式转换阶段,我们主要做两方面工作,一个是将 16 字节深度、4 通道的 tiff 格式图像数据转换为一个二维矩阵表示的裸数据,为了便于现实,我们是用直方图拉身技术将每一个象素的深度由 16 位转换为 8 位;另一方面,采用重画技术将 GIS 数据由矢量格式转换为栅格格式。为了便于处理与比较,转换后的数据存储方式与转换后的图像数据方式完全相同,都以裸格式存储。

在特征提取阶段:我们着重于以下几类特征提取:房屋区域检测、房 屋角点检测,道路角点检测,道路区域提取,道路中线提取。我们将在这 几方面做尝试,以图寻找一全自动、高效的特征体去方法,且提取后的特 征能够比较容易的与 GIS 特征数据建立对应关系。

在最后一阶段,主要解决两个问题,如何建立提取的图像特征与 GIS 特征的对应关系,以及变换模型的选择问题。对于场景的高分辨率卫星图 像来说,由于特征建筑物比较规则,因而提取的特征也比较规则且重复性 有可能很高,这会加大特征匹配的难度,解决这一问题的一个很好思路是 利用特征物之间的几何结构关系,但是如何建立、识别、利用这样的几何 关系又是一个难题。

在接下来的两章里,我们将详细围绕这个解决方案,介绍我们所完成 的工作,同时对未解决的问题进行分析。

第四章 高分辨率光学卫星图像的道路特征提取

4.1 引言

特征提取是高分辨率光学卫星图像与GIS数据进行配准的最关键也是 最困难的环节。对于大多数配准算法来说,它所能实现自动化程度往往取 决于其特征提取阶段需要的人工干预量。由于GIS数据自身即为由多层特 征组成的有序集,因而配准中的特征提取工作重点主要在高分辨率卫星图 像上。

由第二章可知,我们所处理的高分辨率光学卫星图像以北京市部分市 区为场景,其所包含信息十分丰富:它有效的提供给定时刻该市区的建筑 物分布、道路网络等城市规划所需的信息的同时也会清晰的记录建筑物阴 影、植被等细微信息。对于人来说,信息越丰富意味着我们所能了解的东 西越多;但是对于计算机来说,丰富的信息特征是把双刃剑,一方面它意 味着可能被提取的特征很多;另一方面当确定要提取某一实体特征时,其 他特征相对于该特征来说就成为了噪声,这将意味着特征提取难度的增 加。

因而图像特征提取的第一步是确定待提取的特征,包括待提取的特 征表现形式(点、边、区域)及它所代表的物理实体。由于本文所使用 GIS数据由五个特征层构成:公路、铁路、水域、建筑物、植被,图像中 所提取的实体特征将从这五种里选出。下面我们将对这些特征实体的提取 作一综合分析:

- 水域:由于水体表面光滑似镜,它在高分辨率卫星图像中表现为一平滑的暗区,因而它成为最易提取的特征,且特征提取的精度很高。但是对于城市场景来说,水域并非一个普遍存在的特征,它可能是零星分散的不规则小块区域(公园里的小湖),也可能表现为光滑连续的带状区域(河流)。因而它不适合作为独立特征用于配准,但可以跟其他特征结合起来作为配准的特征对或用于配准精度的评估。
- 铁路:铁路本身结构比较复杂,由枕木、铁轨、石子等多种材质组成, 其在图像种表现很不明显,同时由于铁路一般处于城市的郊区地带, 因而它不适于作为待提取的特征。

- 植被:对于高纬度区域的城市来说,其植被特征受季节影响很大;同时林区的植被特征与道路旁的植被特别很大。因此城区中的植被没有稳定的特征,不易于提取。
- 道路:完整发达的道路网络是城市特别大城市地区的一大主题标志, 且一般来说道路网络覆盖了整个城区;而且一般的道路都在地面上, 即没有高度差,因而道路是进行高分辨率卫星图像与 GIS 数据配准工 作的最佳特征选择。但是在高分辨率卫星图像中,道路的特征提取并 不像水域特征那么容易,因为该类型图像中的道路特征比较复杂:大 的主干道一般视觉上表现具有固定宽度且具有较小的局部曲率的带 状区域,而由于城区道路上存在阴影、车辆、立交桥,路边植被遮挡 等,这种区域的纹理特性要比水域的纹理特性复杂多;小的主干道则 视觉效果千差万别,部分小道因其表面比较光滑且与周围建筑物材质 不同,特征比较明显,而另一些小道可能因为诸如植被遮挡、阴影, 其特征可能比较模糊,甚至人眼都不容易辨出。尽管由于道路特征比 较复杂,我们无法较为准确、完整的提取出城区的道路系统,但是我 们有可能大致提取出城区中的大部分主干道网络。对于覆盖较大城市 区域的图像与 GIS 数据配准来说,道路特征是首选目标之一。
- 建筑物:当城市中建筑物普遍较低,且所要配准数据为覆盖区域中没有明显道路特征时,建筑物特征是一个可以替代的选择。但是近年来由于北京市的快速发展,大量高楼拔地而起,使得建筑物特征在高分辨率卫星图像中变得越来越复杂,以前简单的基于模型匹配的建筑物提取的方法已不再适应。尽管目前有大量的文献[67,68,69,70,71,72]研究建筑物的自动提取,这些文献所提出的方法距离理想目标还是很远:首先这些方法大多使用背景比较简单的图像,在这些图像里,建筑物多表现为灰度均匀分布且形状规则的区域,噪声的主要来源是阴影及少量的斑点噪声,当图像背景复杂或使用其它区域的同类图像数据时,算法就很有可能失效;其次大多算法自动化程度不高,需要人工干预,如人工选择种子点,或使用智能剪刀手工选区房屋的初始轮廓。因而高分辨率卫星图像中的城区建筑物提取要比道路特征提取困难的多,同时由于城市的主要建筑物都有相当的高度差,直接影响其用于图像与 GIS 数据配准时的精度。

通过以上的分析可以得知,本文所研究的高分辨率卫星图像与 GIS 数据的配准问题中,道路特征是我们选择的最佳提取特征。由于高分辨率卫

星图像道路特征复杂性,我们无法准确提取完整道路网络,只能大致提取 出其主要区域,其边缘,道路的拐角处特征点,道路中线等都可能准确得 到。为了保证配准的精度以及特征提取的有效性,我们只能选择区域作为 提取的道路特征表现形式。 自上世纪 70 年代来, 多种关于道路网络提取 的方法被提出来,根据所提取的道路网络物理性质不同,这些方法可以分 为四类: 高分辨率图像中郊区道路网络提取、高分辨率图像中城区道路提 取、中低分辨率图像中的郊区道路网络提取以及中低分辨率图像中的城区 道路提取。这些方法中的大多数用于处理低分辨率卫星图像中道路提取, 文献[51]对这些方法进行了全面的综述。而近年来随着高分辨率光学卫星 图像的出现,对高分辨率光学卫星图像的分析已成为日益迫切的任务,由 于上述四种场合中道路所表现物理特征差别巨大,以前大多方法已无法满 足新的高分辨率卫星图道路特征提取任务。近几年来若干关于该场合道路 提取方法被提出来,根据所采用控制策略的不同,它们可以分为自上而下 的提取方法与自下而上的方法。第一类方法通过使用一些基本的图像处理 方法如:图像数字形态学,线或边缘提取,图像分割来完成其提取过程, 例如: 在[52]中,图像被二值化后,通过使用零度线段检测方法与形态学 中的细化方法提取道路:[53]利用专业图像处理软件生成一道路模板,通 过跟踪提取出来的边缘生成道路种子点,然后道路可以根据道路模板与道 路种子点的匹配而被提取。[54]中,使用基于图像分割与组合技术的形状 与结构分析产生道路初始种子点,然后运用基于差分几何的线边缘提取方 法提取剩余道路种子点,最后根据图论将这些种子点与初始种子点融合到 一起。第二种方法的关键步骤是不同源数据的融合。[55]中所提方法就属 于该类,该方法主要是通过融合从多光谱卫星图像中获取的信息与数字表 面模型的匹配来完成道路特征提取。但是无论哪一类方法,都未能实现一 个比较自动完整的配准方法,因而满足不了图像与 GIS 数据完全自动配 准的要求。

下面,我们将提出一种道路特征自动提取方法,在提取改种算法之前, 我们将对道路特征进行一下分析描述

4.2 道路特征描述

[56]已经对航派卫星图像道路特征进行比较详尽客观的描述。图 4-1 与图 4-2 分别是城区中主干道区域的高分辨率多光谱卫星图像与全色彩



图像。结合[56]与这两图图像我们可以得到如下结论:

图 4-1 快鸟多光谱图像中的城区主干道区域(春季拍摄)分辨率为 2.4m/pixel



图 4-2 快鸟全色彩图像中的城区主干道区域(春季拍摄)分辨率为 0.6 m/pixel

- 不同类型的道路具备不同的宽度,但是对于特定的一条道路来说,起 宽度在一定范围内变化很小。
- 2. 从整体上看,城区的主道路轮廓可能具有一定的弯曲度,但是其局部 的弯曲度却很小。
- 主干道表面纹理并不光滑,其上可能存在斑马线、过街天桥、阴影、 车辆等。而对于街头小巷情况则更加复杂,部分段路特征比较明显而 其他部分段路的特征因数目屋檐遮挡而极其不明显。
- 被连接起来的邻接道路构成了道路网络,且构成道路与连接点的密度 在大的城区比较高。

根据提取的精度不同,城区道路特征提取可分为两个等级:精确提取 与粗略提取;所谓精确提取就是准确提取道路的所有特征如:边线、中线、 斑马线等;而粗略提取则为提大致提取道路的轮廓,也就是只要所提取的 区域与道路实际区域大致相当即可。通过以上分析不难得出,由于城区道路特征的复杂性,如果没有别的先验信息,要精确而又自动的提取道路特征几乎不可能;但是利用现有的信息完成道路特征的粗略提取却有很高可行性。在下一节我们将介绍如何将上述特性结合起来用于高分辨光学卫星图像中道路特征的粗提取。

4.3 道路特征提取

我们提出的道路特征提取分为两个部分:图像滤波与滤波后图像中的 道路特征提取。下面将详细介绍这两部分内容。

4.3.1 图像滤波

由于我们所使用的原始数据存储格式为tiff,它拥有4个通道且每个通 道为16位,而目前windows系统大多只支持3通道8位格式数据,为了 便于数据处理及效果显示,我们首先使用直方图均衡方法将16位数据转 换为8位,然后对8位图像数据进行滤波。限于篇幅,我们将对该方法作 具体介绍,详情可参考[57]。

对于高分辨率卫星图像来说,其噪声类型主要有三种:第一类是在成 像过程中形成的白噪声;第二类是对图像进行重采样、压缩等过程中行程 的预处理噪声;最后一类是在决定性噪声即:非特征提取物相对待提取特 征而言形成的噪声。因此我们有必要对图像进行平滑滤波处理,它在抑制 前两类噪声同时可使不同物理特征大致对应不同灰度分布均匀区域,这将 有利于特征区别与提取。

我们采用了均值飘移的滤波方法,因为它在对均质区域进行平滑的同时能够较好保存边缘轮廓。均值飘移滤波器是在 spatial-range 联合域对 图 像 进行 "动态"滤波。 首 先 将 r 个 波 段 的 $M \times N$ 图 像 映 射 成 spatial-range 域 d 维空间的点序列 $\{z_j\}, j = 1, 2, ..., n$ ($n = M \times N$),其中 r = 1为灰度图像; $r \ge 3$ 为彩色图像或多光谱图像;d = r + 2为扩展域的 维数。基于均值漂移向量(mean shift vector)的特性[58],以d 维空间 的每一点 z_j ($j = 1, 2, ..., n = M \times N$)为初始位置,按照式 4—15 不停的计算 对应 spatial-range 域、窗半径分别为 h_s, h_r 的联合核 $G_{s,r}$ 的中心位置序 列 $\{y_{ik}\}, k = 2, 3, ...,$ 直到漂移向量 $y_{ik} - y_{ik-1}$ 的模为零,迭代结束,得

到 y_{jc} , 其中 $y_{j1} = z_{j}$ 。 $y_{jk} = \frac{\sum_{j=1}^{n} z_{j} \bullet g_{1} \left(\left\| \frac{y_{j,k-1} - z_{j}}{h_{s}} \right\|^{2} \right) g_{2} \left(\left\| \frac{y_{j,k-1} - z_{j}}{h_{r}} \right\|^{2} \right)}{\sum_{j=1}^{n} g_{1} \left(\left\| \frac{y_{j,k-1} - z_{j}}{h_{s}} \right\|^{2} \right) g_{2} \left(\left\| \frac{y_{j,k-1} - z_{j}}{h_{r}} \right\|^{2} \right)$ (4-2)

其中, $G_{s,r}(x) = cg_1(||x_s||^2)g_2(||x_r||^2)$, c为归一化系数。由 y_{jc} 中对应灰度/颜色信息可以得到原始图像中第*j*点的滤波值, *j*=1,2,...*n*=*M*×*N*。对于均值飘移滤波方法,通过调整窗口半径 h_r , h_s 的大小,可以获得不同的空间分辨率与辐射分辨率的滤波效果。 为了更好的评价均值飘移滤波器特性,我们将其结果与邻域均值滤波 结果进行了比较,邻域平均法的基本思想是用邻域内的几个象素灰度 平均值来代替邻域中心象素的灰度。假定有一幅*M*×*N*个象素的图像 f(x,y),平滑处理后得到一幅图像g(x,y)。g(x,y)由下式决定:

$$g(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{(m,n)\in S} f(m,n); S 是 以(x,y) 为 中心的临域$$
(4-3)



(A)(B)Image: A transformed by transfor



图 4-3 基于均值漂移的滤波方法与均值滤波方法结果比较图: (A),(B)为原始图像; (C),(D)为其对应均值漂移滤波结果($h_r = 10, h_s = 10$); (E)(F)为均值滤波结果

从图 4-2 所展示的结果图上看,均值飘移滤波器能较好抑制图像噪声的同时,最大程度上保留了边缘或者其它结构特征;但是在均值漂移滤 波运算过程中,因为包括了图像到高维空间的映射以及核中心位置的迭代 运算,内存要求较大,而且运算时间要比邻域均值滤波方法要长的多;另 外到目前为止*h_r*,*h_s*参数的确定要靠反复实验完成,如何实现该尺度银子 的自动选择依然是一非常有兴趣的研究课题。

4.3.2 特征提取

在完成卫星图像的预处理基础上,我们将使用一种将光谱信息与几何 约束信息融合的方法进行道路特征提取。如前所述我们提取的目标是能够 粗略描述道路轮廓的区域,因而提取的重点放在"全局"轮廓的提取而非 "局部"轮廓的精细提取上,同时力求所提算法对区域场景及图像类型的 鲁棒性。

对于城区道路来说,其建筑材料主要由沥青或水泥两种构成,其中沥 青占了绝大部分。这就决定了对于未被遮挡的城区道路来说,其光谱特性 呈现一定的稳定性,即局限于一定范围,而这个范围与道路建筑材料所对 应的光谱范围相一致。但是简单使用一自动阈值分割方法并未能完成特征 提取任务,这是因为:一方面城区场景中的其他特征物也可能有与道路类 似的光谱特性;另一方面道路上的一些覆盖物因其光谱特性与道路光谱特 性差别较大而被排除在外,事实上这些覆盖物所在区域应属于道路区域。 因此,我们有必要将道路的几何约束特性结合起来完成区域特征提取。

根据以上分析,道路特征提取的进一步任务是消除有类似道路光谱特性的非道路区域及填补道路上覆盖物区域。由前一节可知,我们知道城区中的主干道在局部范围内呈现很强的线性特征,而整体上可能存在一定的弯曲度。这种局部线性特征的表现就是,对于一个道路上的点来说,总存在一条一定长度的线段,该线段的绝大部分点都具有道路的光



(A)







图 4-4 道路特征判断准则示意图: (A)为原始图像; (B)为(A)中亮圆区域某一检测线段灰度分布直方图; (C)为(A)中暗圆区域某一检测线段灰度分布直方图。

谱特性(如图 4-4 所示)。因而我们使用以下准则来提取道路特征:对于 图像中的任一点,如果存在一条定长度的线段,该线段的绝大部分点都 具有道路的光谱特性,那么该线段所有的点都属于道路区域点,该线段 即为道路上的线段。在给定道路光谱上下阈值*S*₁,*S*₂及检测线段长度*L*的 情况下,其相应的伪代码如下所示:

```
procedure RPDETECT (I, S_1, S_2, L, R, RI)
RI \leftarrow -1, W \leftarrow image \ width, H \leftarrow image \ height;
for i \leftarrow 1 to H do
    for i \leftarrow 1 to W do
         if RI(i,j) = -1 then
             if S_1 \leq I(i,j) \leq S_2 then
                  for \theta \leftarrow 0 to 180 by 1 do
                       LS \leftarrow pixels on the line segments starting
                     from (i,j) in \theta n \theta dition with length L;
                       N1 \leftarrow number of pixels in LS;
                       N \leftarrow number of pixels in LS whose spectral
                       value are in [S_1, S_2];
                      if N1/N \le R then
                           RI(LS) \leftarrow 0;
                      endif
                 repeat
                 if RI(i, j) = -1 then
                    RI(i, j) \leftarrow 1;
                  endif
             endif
         endif
    repeat
repeat
end RPDETECT
```

其中 R 为给定线段中道路特性光谱元素个数所占比重的阈值,通常情况下被设定为 0.9。S₁,S₂一般根据图像特性以及道路材料特性人为确定,由于光学图像中大多主干道都具有稳定的光谱特性,S₁,S₂值的将在一小范围内进行选择,因而其有规可循;而检测线段的长度 L 则具有很大的选择范围,且不同的 L 对特征提取影响结果很大。总体上讲,我们主要设定的阈值为 L,因此我们所提出的算法自动化程度较高。

4.3.3 试验结果与分析

为了验证本算法提取道路区域特征的有效性,我们分别进行了以下实验:对本方法提取特征结果图与阈值自动分割结果图进行比较以检验它在 剔除具有类道路光谱特性非道路象素方面的能力;对同一小块地区不同时 段拍摄的两幅多光谱图像进行特征提取以证明该方法对拍摄时节的自适 应性;选择了两类大区域图像数据以显示该方法在大区域道路网络提取方 面的优越性:这两副图像分别覆盖了北京市区约 2/3 到 3/4 的地方。具体 实验数据如下表所示:

| 标号 | 图像类型 | 原始分辨率 | 拍摄时间 | 图像尺寸 |
|-----------|------|--------------|------------|--------------------|
| 图 4-5 (A) | 多光谱 | 2.8m/pixel | 3/14/2002 | 860×864 |
| 图 4-5(D) | 多光谱 | 2.8 m/pixel | 3/14/2002 | 857×858 |
| 图 4-5(E) | 多光谱 | 2.44 m/pixel | 12/27/2002 | 1000×974 |
| 图 4-5 (F) | 多光谱 | 2.44 m/pixel | 12/27/2002 | 1018×1020 |
| 图 4-6 | 多光谱 | 2.8 m/pixel | 3/14/2002 | 6876×2975 |
| 图 4-7 | 全色彩 | 0.6 m/pixel | 3/14/2002 | 6888×3302 ¤ |

表 4-1 道路检测实验数据列表。(**2 注:**为了减少计算量,我们将图 4-7 所示全色 彩图像缩小了4倍,该尺寸为图像重新采样后的尺寸)



(A)

(B)





(D)



图 4-5 小块城区道路特征提取结果图: (B) (C)分为(A)的阈值分割结果图与本算法 结果图; (G), (H), (I)分为 (D), (E), (F)进行道路提取的结果图, 其中(C) (G) 所 设参数值为 S₁ = 30, S₂ = 100, L = 200; (H), (I)为 S₁ = 25, S₂ = 85, L = 200



图 4-6 大块多光谱图像的城区道路提取结果图 S₁ = 30, S₂ = 100, L = 200



图 4-7 大块 全色彩图像的城区道路提取结果图 S₁ = 30, S₂ = 100, L = 200

图 4-5 中(A)为覆盖奥运村附近地区的图像,(B)、(C)分为对(A) 二值化与使用本文所提算法后的结果,比较(B)、(C)可以证明该算法能有 效的去除非道路特征点并补充道路上的被覆盖区域;(d)、(e)为同一地区 秋、冬季拍摄的图像,(G)、(H)分为其对应结果,观察结果可以看出本 算法比较完整的提取了两图中的主干道路部分,但是(H)结果要比(G)的差 些,这是因为对于冬季拍摄的图像中,由于太阳斜射,其中建筑物的阴影 要比秋季成,因而图像噪声大一些;(F)是与(A)同区域不同时节拍摄 的图像,其提取结果情况与(H)类似;图4-6与4-7是覆盖大范围城区的 多光谱图像与全色彩图像道路特征提取状况,从这两幅图中可以清楚看到 北京城区四环、三环、二环以及学院路、长安街等大的主干道都被比较完 整的提取出来;而且某些具有弯曲轮廓的主干道也被提取出来,这进一步 验证了我们的主干道模型假设:高分辨率卫星图像中的主干道整体上可能 呈现一定的弯曲度,但是在局部上却具有线状特性。

我们可以首先将同一地区填充的GIS数据道路层手工配准到卫星图像 空间上,然后使用配准后的GIS数据道路层为参考更客观的评价本方法所 提取道路区域特征的效果。设*E*₁为本方法所提取道路特征象素组成的集 合; *E*₂为配准后GIS数据道路层中道路特征组成象素的集合。则可使用 如下三个指标进行提取效果评价:

道路提取的完整度:
$$\lambda_1 = \frac{|E_1 \cap E_2|}{E_2}$$

道路提取的准确度: $\lambda_2 = \frac{|E_1| |E_2|}{|E_1|}$ 道路提取的综合质量: $\lambda_3 = \frac{|E_1 \cap E_2|}{|E_1 \cup E_2|}$

则前述实验所得评价结果如表 所示。从该表可以看出本算法在道路 特征提取的完整性指标普遍不高大约在 0.65~0.85 之间,这主要是因为 该算法提取目标为城区主干道而忽略了城区的细小的道路;但是本算法具 有较高的准确度,其值大多在 0.85 以上。值得一提的是,比较二值分割 结果与本算法特征提取结果的评价指标可以发现本算法无论是在完整度、 准确度以及综合指标都要高于或远高于二值方法,这再次证明了本算法去 除非道路特征点并补充道路上的被覆盖区域的有效性。

50

| 标 号 | $ E_1 $ | $ E_2 $ | λ_1 | λ_2 | λ_3 |
|-----------|---------|---------|-------------|-------------|-------------|
| 图 4-5 (B) | 235720 | 113066 | 0.679 | 0.320 | 0.282 |
| 图 4-5(C) | 84113 | 113066 | 0.707 | 0.951 | 0.682 |
| 图 4-5 (G) | 79213 | 91567 | 0.803 | 0.929 | 0. 757 |
| 图 4-5 (H) | 165028 | 92364 | 0.896 | 0.502 | 0.474 |
| 图 4-5(I) | 85485 | 115471 | 0.689 | 0.930 | 0.655 |
| 图 4-6 | 1723131 | 2139072 | 0.714 | 0.886 | 0.653 |
| 图 4-7 | 1865217 | 2317635 | 0.702 | 0.872 | 0.636 |

表 4-2 道路特征提取方法结果评价列表

本算法中光谱特性的阈值 *S*₁,*S*₂大多根据卫星图像类型以及道路建筑 材料来确定,因而我们在固定 *S*₁,*S*₂的情况下,分别去 *L* 为 50,100,150, 200,250,300,350,400,450,500 以图 4-5 (A) 所示为实验数据来研 究不同检测线段的长度 *L* 对特征提取结果的影响,所对应的结果评价指标 曲线如下图所示:



图 4-8 检测线段的长度对特征提取效果影响示意图:其中横轴代表L,点线为λ,所 对应曲线;虚线为λ₂对应曲线;实线为λ₃对应曲线

观察上图可得知:随着L增加, λ_1 呈整体下降性趋势;L大于200时, λ_2 在0.9~1之间变化,具有一定的稳定特性,这是由于城区主干道具备局部线状特征而在全局呈现一定弯曲度,因而随着L的增加,可以检测出的道路特征越来越少,而对于每一条检测出来的特征线段,其上具备道路光谱特性的象素个数占总个数的比例总大于0.9,因而使得 λ_2 大于0.9。而综合评价指标 λ_3 在L=200值最大,其后受 λ_1 的影响逐渐衰减,因此我们

设定L为200。

4.4 小结

本章主要讨论了高分辨率卫星图像的道路特征提取问题。由于特征提 取目的是实现其与 GIS 数据的配准且我们使用区域作为匹配特征,我们 主要注重提取全局的特征信息,而忽略这些特征的局部信息;换言之,所 提出的算法具备全局鲁棒性,但是可以忽略局部精确度。

为了抑制高分辨率卫星图像的图像噪声以便于特征提取,我们首先使 用均值漂移方法对图像进行滤波,该方法有效平滑灰度分布均匀区域的同 时能够完整保存图像中的边缘信息。在滤波的基础上,我们使用一种将光 谱信息与几何信息结合起来的方法进行道路区域特征提取。通过实验我们 可以得出:

- 在光谱特性根据先验知识人工设定的情况下,通过调整检测线段长度 为 200 即可获得比较完整的主干道网络,充分证明了本算法自动化程 度很高。
- 本算法能够较完整的提取城区主干路网络,图像所覆盖的区域越广, 这种特性越明显,且对于不同地区不同时段拍摄不同类型的高分辨率 光学图像道路特增提取都有效。而一般算法的实验仅仅局限于小块区 域的道路提取,这是该算法较其他算法的一个显著优点。
- 本算法计算量比较大,这主要跟图像要处理的尺寸有关系,对于如前 所示小块区域的道路特征提取来说,其图像尺寸大小大约为 1000×1000左右,所需时间在 Pentium IV 上为15分钟;而大块区域 的道路特征提取所需时间为12个小时(尺寸为7000×3000左右)。

尽管本算法不能保证待提取的道路区域特征精度,但对于图像与 GIS 数据的配准来说已足够了,该问题将在下一章详细阐述介绍。

第五章 基于二维 FFT 的多源数据配准算法研究

5.1 引言

上一章,我们已经完成了高分辨率卫星图像城区主干道特征区域的自动提取,本章将研究如何利用图像商提取的这些道路区域特征与 GIS 数据层的道路特征实现俩数据之间自动配准,即完成图像的特征配准并找到它们之间的变换模型。

由于我们道路区域提取方法主要追求全局结构而非局部精度,因此所 对应的配准方法应该能够有效利用特征提取所提供的几何结构信息,同时 并能够避免对提取的特征高精度要求。也即要解决这样一个问题:如果两 种特征数据的整体骨架结构相同,但是在局部存在细微差别时,如何能将 它们比较准确的匹配起来。对于这样问题的研究,存在两种可能的解决方 案:一种是直接使用图像中的象素作为基准,对道路特征区域及它们之间 的几何分布关系进行合理数学描述,再根据这些数学描述建立对应关系模 型,在这过程中可能要用到图论、最优化等许多复杂数学工具;另一种方 法则基于傅立叶变换,先将图像数据从空域转换到频域,在频域中寻找它 们的对应关系,该种方案里则可能需要边缘、区域轮廓等低级特征信息。 就本文所提问题来说,后一种方案较前一种可行,这是因为:前者所涉及 到的理论瓶颈较后者多,无论是数学模型及最优化还是图论,这些问题的 研究并不成熟目操作起来比较复杂,最后的总体方案未必能实现自动化目 对提取的道路特征区域精度要求较高;而后者从特征的频域信息着手,其 主要利用的实际是特征的整体结构信息而非局部位置信息,同时它未涉及 太多的理论瓶颈,因而实现起来要容易的多。

接下来分析如何对两种数据之间变换模型进行评估,由于我们所处理 图像数据为基本级图像数据,它并未投影到北京地方坐标,变换模型将随 图像所覆盖区域大小而变化,对于小块区域,比较合适的变换模型是相似 变换或仿射变换;而大块区域的变换模型则可能是多项式变换或更复杂的 变换。而我们使用的基于傅立叶变换的配准方法所能求解的变换模型大多 是相似变换情况,因此我们先着眼于实现小块区域的数据配准研究。

5.2 基本理论基础

5.2.1 二维 FFT 定义

傅立叶变换是为人熟知的正交变换,有关它的具体介绍可以参见[57]。 图像处理中常用的为二维有限傅立叶变换(Finite Fourier Transform),其 定义如下:

假设二维函数 f(x,y) 满足如下狄里赫条件:

- (1) 具有有限个间断点
- (2) 具有有限个极值点
- (3) 绝对可积
- 那么其对应的二维傅立叶变换为:

$$F(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy$$
 (5-1)

相应的, F(u,v)的逆傅立叶变换为:

$$f(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(u,v) e^{j2\pi(ux+vy)} du dv$$
(5-2)

其推广到离散域的形式为,设f(x,y)为 $-N \times N$ 的矩阵,那么其离散

傅立叶变换(Discrete Fourier Transform)为:

$$F(u,v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) e^{-j2\pi(u\frac{x}{N}+v\frac{y}{N})}$$
(5-3)

而相应的离散傅立叶逆变换形式为:

$$f(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u,v) e^{j2\pi(u\frac{x}{N}+v\frac{y}{N})}$$
(5-4)

5.2.2 二维 FFT 性质

傅立叶变换有多条性质,这里我们介绍与图像配准有关的四条性质: 平移、旋转及缩放性质。

1. 平移性质:

若 f(x,y)的傅立叶变换为 F(u,v),则 f(x-a,y-b) 对应的傅立叶变

换为: $e^{-j2\pi(au+bv)}F(u,v)$, 根据这一定理可以推出著名的相位相关定理 (phase correlation), 设 $f_1(x,y) = f_2(x,y)$ 为均满足狄里赫条件的二维 函数, 且两者之间存在平移:

$$f_2(x,y) = f_1(x - x_0, y - y_0)$$
(5-5)

则根据平移性质对应的傅立叶变换F₂,F₁存在如下关系:

$$F_2(u,v) = e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)} F_1(u,v)$$
(5-6)

 $f_1 与 f_2$ 的均值协功率频谱被定义为:

$$\frac{F_1(u,v)F_2^*(u,v)}{|F_1(u,v)F_2^*(u,v)|} = e^{j2\pi(ux_0+vy_0)}$$
(5-7)

其中*F*₂^{*}(*u*,*v*)为*F*₂(*u*,*v*)的共轭。对均值协功率频谱求其逆傅立叶变换,可以得到一脉冲函数,该脉冲发生在(*x*₀,*y*₀)处。根据这一原理,假如两幅图像之间仅存在平移变换,我们可以通过寻找该脉冲位置来确定平移参数。

2. 旋转不变性质

设 *f*₁(*x*,*y*) 与 *f*₂(*x*,*y*) 均为满足狄里赫条件的二维函数且两者之间存 在旋转关系:

$$f_2(x,y) = f_1(x\cos\theta + y\sin\theta, -x\sin\theta + y\cos\theta)$$
(5-8)
则其对应的傅立叶变换函数也存在相同的旋转关系,即:

 $F_2(u,v) = F_1(u\cos\theta + v\sin\theta, -u\sin\theta + v\cos\theta)$ (5-9) 利用这一性质,假如两幅图像之间仅存在旋转关系,我们可以通过寻 找其对应频域中的旋转关系确定它们之间的旋转角度。

3. 冲激响应垂直定理

假设 f(x,y) 为空域空间直线 y = kx + b 方向上的冲激响应函数:

$$f(x,y) = \begin{cases} 1, \ y = kx + b; \\ 0, \ y \neq kx + b; \end{cases}$$
(5-10)

则其对应频域中过频域中心与y = kx + b垂直的方向上也存在一冲激响应函数,即:

$$F(u,v) = \begin{cases} 1, ku + v = 0; \\ 0, ku + v \neq 0; \end{cases}$$
(5-11)

由于很少有书籍提到改性质,而该性质却为本文所提图像配准算法的 一个重要理论依据,下面将给出此性质的详细证明: *y* = *kx* + *b* 可以看作是*y* = 0经过旋转平移后得到,由旋转不变性与平移频谱幅度不变特性,我们只需证明该性质在*y* = 0情况下成立,即可以将函数模型简化为一在*x*轴上的冲激响应函数,即:

$$f(x,y) = \begin{cases} 1, y = 0; \\ 0, y \neq 0; \end{cases}$$
(5-12)

那么, 接下来我们应该证明 F(u,v) 为发生在v轴上的冲激响应:

$$F(u,v) = \begin{cases} s, \ u = 0, s \neq 0; \\ 0, \ u \neq 0; \end{cases}$$
(5-13)

分四种情况证明:

①
$$u \neq 0, v \neq 0$$
 時:
 $F(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy = \int_{-0}^{+0} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy$
 $= \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi ux} dx \int_{-0}^{+0} e^{-j2\pi vy} dy = \lim_{x \to +\infty} \frac{\sin 2\pi ux}{\pi u} \bullet \lim_{y \to +0} \frac{\sin 2\pi vy}{\pi v}$
(5-14)

上式中,由于前一个项极限值不超过固定值 $\frac{1}{\pi u}$,而后一项极限值为 0,因而此时 F(u,v) = 0。

②
$$u \neq 0, v = 0$$
 时:

$$F(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy = \int_{-0}^{+0} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy$$
$$= \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi ux} dx \int_{-0}^{+0} e^{-j2\pi vy} dy = \lim_{x \to +\infty} \frac{\sin 2\pi ux}{\pi u} \bullet \int_{-0}^{+0} dy$$
$$= \lim_{x \to +\infty} \frac{\sin 2\pi ux}{\pi u} \bullet 0$$
(5-15)

与上一种情况类似,此时
$$F(u,v) = 0$$
。

③
$$u = 0, v \neq 0$$
时

$$F(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi ux} dx \int_{-0}^{+0} e^{-j2\pi vy} dy$$
$$= \int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-0}^{+0} e^{-j2\pi vy} dy = \lim_{x \to +\infty} 2x \bullet \lim_{y \to +0} \frac{\sin 2\pi vy}{\pi v}$$
(5-16)

在上式第一个极限中令y为x的倒数,则可以得到:

$$F(u,v) = \lim_{y \to +0} \frac{2}{y} \bullet \lim_{y \to +0} \frac{\sin 2\pi v y}{\pi v} = \lim_{y \to +0} \frac{2\sin 2\pi v y}{\pi v y} = 4$$
(5-17)

④ u = 0, v = 0时

$$F(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy$$

= $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi ux} dx \int_{-0}^{+0} e^{-j2\pi vy} dy$
= $\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-0}^{+0} dy = \lim_{x \to +\infty} 2x \bullet \lim_{y \to +0} 2y$
= $\lim_{y \to +0} \frac{2}{y} \bullet \lim_{y \to +0} 2y = \lim_{y \to +0} \frac{2}{y} \bullet 2y = 4$ (5-18)

综上,我们可以得到:

$$F(u,v) = \begin{cases} 4, u = 0; \\ 0, u \neq 0; \end{cases}$$
(5-19)

该性质得证。进一步我们再分析矩形脉冲信号的频谱特性,类似的我 们首先研究以下简单的矩形脉冲信号,根据平移与旋转不变性原理可证明 更复杂的情况。

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, -a < y < a; \\ 0, y \neq 0; \end{cases}$$

其傅立叶变换为:

$$F(u,v) = \int_{-a}^{+a} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi ix} dx \int_{-a}^{+a} e^{-j2\pi iy} dy$$
$$= \frac{\sin 2\pi va}{\pi va} \bullet \lim_{t \to +\infty} \frac{\sin 2\pi ut}{\pi ut}$$
$$= \begin{cases} \frac{2\sin 2\pi va}{\pi va}, u = 0\\ 0, & , u \neq 0 \end{cases}$$
(5-20)

很显然 *a* → 0 时,(5-20)等同于(5-19),这说明冲激相应信号是矩 形脉冲信号特殊形式,由上式可知矩形脉冲信号有着与冲激信号类似的方 向频谱特性,利用该性质我们可以在频域空间确定图像上一线状区域的主 方向。



(C)

图 5-1 线状区域频域上的方向特性: (A)原始图像; (B)频谱图; (C)方向频谱函数 如图所示(A)为原始图像,在(A)中存在水平与对角两个方向上的线性 特征 (黑色区域),可以将它们近似看作两个方向的矩形脉冲信号。(B)为 (A)对应的傅立叶变换频谱图,仔细观测(B)后不难发现,通过中心点 O 与 (a)中线状区域主方向垂直的方向上谱幅比较大 (亮的区域)。定义θ为(B) 中过 O 点任一方向与水平右向的夹角。则对各方向上谱幅进行统计可以 得到(C)中所示曲线,我们将其定义为方向频谱函数 *DS*(θ) (Directional Spectrum Function),该函数的极值的极大值位置为θ等于 45,90 处,根 据冲激响应垂直定理,可确定其线状区域的主方向为水平与对角两个方 向。

4. 相似性质

设 $f_1(x,y)$ 与 $f_2(x,y)$ 均为满足狄里赫条件的二维函数且两者之间存 在旋转关系:

$$f_2(x, y) = f_1(ax, by)$$
 (5-21)

则其对应的傅立叶变换函数也存在相同的旋转关系,即:

$$F_{2}(u,v) = \frac{1}{|ab|} F_{1}(\frac{u}{a}, \frac{v}{b})$$
(5-22)

注意到在对数域,存在如下形式:

$$F_1(\frac{u}{a}, \frac{v}{b}) \equiv F_1(\log(u) - \log a, \log(v) - \log b)$$
(5-23)

相似性质并不能直接被应用到图像配准过程中,但是它与 Fourien-Mellin 变换结合起来可用于求图像中的旋转与缩放。其定义如下: 设f(x,y)为满足狄里赫条件的二维函数,首先将函数所在空间由(x,y)笛 卡儿空间投影到 (r,θ) 极坐标空间,得 $f(x,y) \rightarrow f(r,\theta)$,则f(x,y)对应的 标准 Fourier-Mellin 变换为:

$$M_{f}(k,v) = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} f(r,\theta) r^{-iv} e^{-ik\theta} d\theta \frac{dr}{r}$$
(5-24)

5.3 现有基于傅立叶变换配准技术综述

基于傅立叶变换的配准方法应属于区域配准范畴,其最早应用是使用 相位相关方法配准只存在平移变换的图像。后来[36]将相位相关定理应用 扩展到存在旋转变换的场合;[59,60,61]又在其基础上增加了缩放情况, [37,62,63,64,65,66]对于傅立叶变换的应用进行了进一步的探索与 论证。。总体上,现有的基于傅立叶变换进行图像配准方法从原理上可以 分为如下两类:

一类[37,62,63,64,65]是首先对待配准图像进行傅立叶变化,然 后将得到的频谱幅度图进行笛卡儿空间到对数一极坐标空间的变换,在对 数一极坐标空间寻找旋转与缩放因子,然后再利用相位相关定理获得平移 量。该类算法基本原理如下:

如果 $f_2(x,y)$ 是 $f_1(x,y)$ 通过平移、旋转与缩放后所得。即

$$f_2(x, y) = f_1(cx\cos\theta_0 + cy\sin\theta_0 - x_0, -cx\sin\theta_0 + cy\cos\theta_0 - y_0)$$
(5-25)

其中 x_0, y_0 为平移量, θ_0 为旋转角度,c为缩放因子。

根据平移、旋转不变性,相似性质,其应傅立叶变换*F*₁(*u*,*v*)、*F*₂(*u*,*v*) 存在如下关系:

$$F_2(u,v) = \frac{e^{-j2\pi(ux_0+vy_0)}}{c^2} \left| F_1(\frac{u\cos\theta_0 + v\sin\theta_0}{c}, \frac{-u\sin\theta_0 + v\cos\theta_0}{c}) \right|$$
(5-26)

对应的频谱幅度关系则为:

$$\left|F_{2}(u,v)\right| = \frac{1}{c^{2}} \left|F_{1}\left(\frac{u\cos\theta_{0} + v\sin\theta_{0}}{c}, \frac{-u\sin\theta_{0} + v\cos\theta_{0}}{c}\right)\right|$$

忽略掉乘法因子 $\frac{1}{c^2}$,将频谱幅度图进行笛卡儿空间到对数一极坐标空间转换后,得如下关系

$$M_{2}(\xi,\theta) = M_{1}(\xi - \xi_{0}, \theta - \theta_{0}), \qquad (5-27)$$

其中有 $M_1(\xi, \theta) = |F_1(\rho\cos\theta, \rho\sin\theta)|, M_2(\xi, \theta) = |F_2(\rho\cos\theta, \rho\sin\theta)|$

 $\xi = \log \rho$, $\xi_0 = \log c$ 。利用相位相关定理可以求得到 ξ_0 , θ_0 的值,也即旋转与缩放比例参数,再此基础上对测量图像作相应旋转与缩放,则变化后的图像与参考图像之间仅存在平移关系。再次利用相位相关定理将可以获得平移量 x_0 , y_0 。

另一类方法[66]是先将图像映射到对数一极坐标空间,如果两幅原始 图像之间存在旋转与缩放,则两幅转换后的图像上之间为平移关系,利用 相位相关定理即可获得旋转与缩放因子,然后在此基础上求取平移因子。 该方法的基本原理与上一类方法相似。

总之,无论哪一类算法,其基于的原理都是 Fourier-Mellin 变换及前述傅立叶变换三大性质。这些算法理论上较为完备,但实际应用上还存在如下问题:

- 算法的有效性与两图像之间的变化程度有关,如果两幅图像之间存在 较大的旋转与缩放,有效性将大为下降。尽管[66]强调其算法能解决 较大的尺度缩放问题,这一特性还有待进一步验证,因为它所使用数 据为理想无噪声数据且两数据之间不存在较大变化。
- 与图像的灰度特性无关,但只限于变化较小或无变化的两幅图像:如 果两幅图像之间存在较大的变化区域,算法很有可能会失效,本文所 用数据就是一典型例子。
- 如果图像尺寸比较大,第二类算法运算量将很大,因为它要通过对测 量图像中每一象素点的检测以确定两幅图像之间的平移量。
本文所使用数据分为提取的道路特征数据与 GIS 的道路特征层数据, 由于我们只提取了主干道路区域,两数据之间存在较大的变化区域;同时 我们所使用数据尺寸很大,因而上述第二类算法的处理速度将会很慢且未 必有效。基于这些问题,下一节我们将结合所使用数据的特性提出自己的 解决方案。

5.4 一种基于傅立叶变换的新配准算法

上一节分析可知:由于所要配准的数据尺寸较大且数据之间存在较大 变换区域,前述在对数一极坐标空间来确定旋转与缩放参数的方法失效。 但是注意到我们所使用数据都包括了主干路特征区域,而这些区域可以近 似看作若干线状区域连接而成。下面我们将围绕这一特点结合前述傅立叶 变化的主要性质提取自己配准方案,该方案总体上包括两个主要步骤:

 利用线性区域频谱的方向特性确定旋转角度。根据第二节可以得知: 任一幅图像都对应一方向频谱函数*DS(θ)*,由旋转不变性可知,当图 像旋转θ₀时,对应频谱函数将平移θ₀,即为*DS(θ-θ₀)*。但是由于所 要配准的两数据之间还包括了平移与旋转变换,而且两数据之间存在 较大的变化区域,两数据之间的方向频谱函数不是简单的平移关系, 因此有必要在方向频谱函数中寻找对平移、缩放及区域变化的不变 量。又根据第二节,线状区域的主方向可通过寻找方向谱幅函数的极 值来确定,而主干道路区域可看作由多个线状区域连接而成,因此一 个包含主干道区域的图像所对应方向频谱函数可能包含若干个极值, 这些极值所在位置不随图像的平移、缩放变化而变化,因此通过寻找 两幅图像的方向频谱函数极值将可以求得两幅图像之间的旋转角度。 具体的步骤如下:

(1) 对于两幅图像 $I_1 \subseteq I_2$, 计算其对应的方向频谱函数 $DS_1(\theta) \subseteq DS_2(\theta)$ 。

(2) 为了抑制噪声意向以避免检测出伪主方向,使用高斯滤波器平滑 方向频谱函数: $\hat{DS}(\theta) = DS(\theta) * g(\theta)$;其中 $g(\theta)$ 为一高斯滤波器

61



图 5-2 高斯平滑效果示意图: (A) 原始方向频谱函数(DS)曲线; (B)高斯平滑后的

方向频谱函数(DS)曲线:

(3) 求取 $\hat{DS}_1(\theta)$ 、 $\hat{DS}_2(\theta)$ 极大值位置的集合 L_1 , L_2

(4) 要确定*I*₁与*I*₂之间的旋转角度,则首先需知*L*₁,*L*₂元素之间的对应关系,这些对应元素之间的差值即为旋转角度。而这些对应关系未知,但是我们知道差值为旋转角度的情况下所能确定的*L*₁,*L*₂之间元素对应关系数目最多,因此可以使用以下方法来确定*I*₁、*I*₂之间的旋转角度及*L*₁,*L*₂元素之间的对应关系:

对于 L_1 中的第i个元素 $L_{1,i}$,我们使用 $f(\theta,i)$ 来表示 L_2 在假定旋转 角度为 θ 的情况下与 $L_{1,i}$ 对应元素的个数:

$$f(\theta, i) = \begin{cases} 1, & \text{if } \exists b, b \in L_2 \land | d - \theta | \le 0.5 \text{ deg;} \\ 0.5, & \text{if } \exists b, b \in L_2 \land | d - \theta | \le 1 \text{ deg;} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

(5-28)

其中, $d = |b - L_{1,i}|$, 上式表明如果 L_2 中存在元素使得d, θ 之间差值

在0.5**deg**以内,则 L_2 中有1元素与 $L_{1,i}$ 对应,如果在0.5~1**deg**之间,则 L_2 中有0.5个元素与 $L_{1,i}$ 对应,否则对应个数为0。因而,给定 θ 的情况下, L_1 , L_2 元素对应个数为: $\sum_{i=1}^{m} f(\theta,i)$,其中m为 L_1 元素的个数, I_1 、 I_2 之间的旋转角度可被计算为:

$$\hat{\theta} = \arg\max\sum_{i=1}^{m} f(\theta, i)$$
(5-29)

应该注意到:我们是假定配准数据所覆盖区域存在明显的线装区域, 再利用线状区域的方向频谱特性来求取配准数据之间的旋转角度。对 于覆盖较大都市场景(北京,纽约等)的数据来说,这一假设能够成 立。其中*DS*中极大值点的个数取决于场景的具体模式。

 使用多尺度策略求取平移量与缩放因子。获得旋转角度θ角后,将I₂ 顺时针方向旋转θ角,则可以认为旋转后图像I₂与I₁之间的旋转角度
 0,也即图像I₂、I₁之间仅存在平移与缩放变化。我们已经知道,当 两幅图像仅仅存在平移变化时,在其协功率频谱的逆傅立叶变换图上 存在一尖锐的峰值,该峰值位置对应着它们之间的平移量。



图 5-4 两幅仅存平移变换图像的协功率频谱的逆傅立叶变换图 在外加缩放变换的情况下,我们可以使用多尺度策略求取 *I*₂、*I*₁之间 的平移量与缩放因子,具体步骤如下:

(1) 将图像 *I*₂ 缩放 *s* 倍后得到图像 *I*₂(*s*), 计算 *I*₁ 与 *I*₂(*s*)的均值协功率 频谱的逆傅立叶变换后的频谱图,记做 *C*(*s*)

(2) 求取 C(s) 的均值与最大值,用最大值与均值之间的比率来估计
 C(s) 最大值处的锐度 φ(s)

(3) 重复前述两步,寻找 $\varphi(s)$ 的最大值,最大值情况下的 \hat{s} 则为 $I'_2 、 I_1$ 之间的尺度变化因子。

(4) 对 I_2' 缩放ŝ 倍之后得 $I_2'(\hat{s})$,则 $I_2'(\hat{s})$ 与 I_1 之间仅存在平移变换,使 用相位相关定理即可获得它们之间的平移参数< $x_0, y_0 > 0$

5.5 实验结果与分析

我们的实验主要验证以下三方面内容:配准方法对旋转角度的自适应 性;对不同尺度的自适应性以及对场景数据类型的自适应性。

5.5.1 验证对旋转角度的自适应性

由于求解数据之间旋转角度是整个配准过程的首要步骤,它直接影响着最终配准结果,因此很有必要对本配准算法中所提出求解旋转角度方法的有效性进行验证。该实验中,我们将填充后的 GIS 道路层数据按照顺时针分别旋转 15、30、45,60、75、90 度,然后使用我们的方法求解旋转后数据与特征图像数据之间的夹角。具体实验如下图所示,该图中我们列出了图像的 DS 曲线与局部极值集合 L_2 ,不同角度下 GIS 数据的 DS 曲线及其所对应的局部极值集合 L_2 .









(G) 逆时针旋转 45 度后 GIS 数据对应 DS 曲线, $L_2 = \{49,138\}, \hat{\theta} = 45$

图 5-4 算法对数据旋转角度自适应性验证结果图

分析上述实验结果不难发现,本算法在确定两数据之间的旋转角度过 程中有以下特点:

- 不同旋转角度下 DS 取值范围不同但曲线形状很相似,其大致可以看 作原始数据曲线沿着θ方向平移。因而通过寻找曲线的极大值点并求 出其与对应原始数据 DS 极大值点位置差可以确定其旋转角度。
- 本算法适用于配准数据存在较大旋转角度的场合。这相对于其他基于 傅立叶变换配准方法是一个很明显的优点。
- 理论上讲θ 可以精确到小数位,但实际操作过程中为了减少计算量, 其值最多精确到 0.5 个单位,因而使用本算法所求旋转角度精度不高,

这是本算法的主要缺点。

5.5.2 验证对不同尺度的自适应性。

由上节可知,我们使用多尺度方法求解图像数据之间的缩放比,其主要原理是通过调整测量图像的尺度以获得 $\varphi(s)$ 曲线, $\varphi(s)$ 最大值位置即对应着参考图像与测量数据的尺度比。本实验将验证这一原理的正确性:如下图所示,对图(b)所示 GIS 数据分别进 2、4、5、0.8、0.5 倍数的缩放后,则(a)与缩放后数据的尺度比应为 0.5、0.25、0.2、1.25、2;通过求取不同缩放倍数下的 $\varphi(s)$ 曲线,我们将检验其对应极大值位置是否与实际缩放尺度相对应。





图 5-5 算法对数据尺度缩放自适应性验证结果图

图 5-5 所示结果表明,当配准数据之间存在较大尺度变化时,本算法 也能有效工作,这又是本算法与其他频域配准算法相比较的一优点。值得 注意的是,由于本算使用了多尺度求解方法,对于大尺寸数据直接使用该 方法可能耗时量也会很大。为了避免这一弊端,我们可以将大尺度的参考 数据与测量数据同比例缩小,则缩放数据之间的尺度比例与原是数据相 同,而其对应计算量却会大幅下降。另外一个值得注意的问题是,为了提 高所求缩放因子的精度,我们采用一种又粗到细的多尺度策略,该策略可 以简要描述如下:假设尺度因子范围为[0.5,2],则首先在[0.5,2]范围内 均匀采样 16 个值即 $s = 0.5 + 0.1 \times m_1, (m_1 \text{为}1 \sim 16 \text{的整数})$,求得最大值位置 所在为 \hat{m}_1 ,则在 $[0.5 + 0.1 \times \hat{m}_1 - 0.05, 0.5 + 0.1 \times \hat{m}_1 + 0.05]$ 范围内均采样 11 个值即 $s = 0.5 + 0.1 \times \hat{m}_1 - 0.05, 0.5 + 0.1 \times \hat{m}_1 + 0.05$]范围内均采样 11 个值即 $s = 0.5 + 0.1 \times \hat{m}_2, (m_2 \text{为} - 5 \sim 5 \text{的整数})$,求取最大值位置 所在为 \hat{m}_2, ∞ 。依此类推,则最终求取的尺度因子为:

$$\arg\max\varphi(s) = 0.5 + \sum_{i=1}^{n} 0.1^{n} \times \hat{m}_{i} , \qquad (5-30)$$

其中n控制着所求尺度因子的精度。

5.5.3 对场景与数据类型的自适应性

以上,我们通过对同一组数据不同旋转角度与尺度比例的实验来验证 本文算法对旋转与缩放的自适应性。本节将使用五组不同数据验证本算法 对数据所示场景及数据类型的自适应性。我们试验主要包括以下三方面: 同一地区不同时节图像与 GIS 数据的配准;不同地区的图像与 GIS 数据 配准;不同类型图像与 GIS 数据的配准。五组实验所使用的数据特性如 下表所示,

| 组号 | 获取时间 | 类型 | 图像分辨率 |
|----|------------|-----|-------|
| 1 | 3/14/2002 | 全色彩 | 0.6m |
| 2 | 12/27/2002 | 多光谱 | 2.44m |
| 3 | 3/14/2002 | 多光谱 | 2.44m |
| 4 | 12/27/2002 | 多光谱 | 2.44m |

表 5-1 算法对场景与图像类型自适应性实验中所用数据的说明

图 5-6 分别给出这五组实验对应的配准结果,每幅图中左上为填充的 GIS 数据道路层图像;左下为提取的道路特征图像;中间为配准后 GIS 道路层数据叠加到图。



(A)第1组试验结果图



(B) 第2组试验结果图



(C) 第3组试验结果



(D)第4组试验结果图 5-6 算法对场景、数据类型自适应性验证的结果图



(A) 左边白色方框区域



(B)右边白色方框区域 图 5-7 第一组实验中局部区域的全分辨率显示效果图

图像上的整体效果图;右上、右下是整体效果图中白框部分的放大显示。 图 5-7 为第1组实验中白色方框区域的全分辨率效果图,可以看出配准 效果比较良好。

我们在每一组数据中手工选取了 20 对具有良好分布的控制点,使用 其中 10 对来求取相似变换模型与仿射变换模型,另外 10 对用于检验本算 法所得变换模型,手工控制点所得相似变换模型及仿射变换模型的精度。 设(*X*,*Y*)与(*x*,*y*)为控制点对,(*x*',*Y*')为(*x*,*y*)根据变换模所得控制点对, 我们使用下式来本算法的配准精度:

$$\begin{cases} RMSE_{x} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (X_{i} - X_{i}^{'})^{2}} \\ RMSE_{y} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (Y_{i} - Y_{i}^{'})^{2}} \\ RMSE_{total} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} [(X_{i} - X_{i}^{'})^{2} + (Y_{i} - Y_{i}^{'})^{2}]} \end{cases}$$
(5-31)

| 组号 | R | S | TX | TY | $RMSE_x$ | $RMSE_y$ | RMSE |
|----|-----|-------|------|-----|----------|----------|-------|
| 1 | -1 | 4.051 | -26 | 13 | 1.125 | 1.237 | 1.672 |
| 2 | 0 | 1.015 | -14 | 5 | 3.725 | 2.638 | 4.565 |
| 3 | 9.5 | 1.5 | -156 | -67 | 3.143 | 2.173 | 3.821 |
| 4 | 1 | 0.985 | -14 | 15 | 4.235 | 4.258 | 6.005 |

表 5-2 给出了对四组数据使用本算法所得变换模型参数及配准精度:

表 5-2 算法对场景与图像类型自适应性验证实验的结果比较

表 5-3 给出了对四组数据使用手工配准求取相似变换模型参数及配准

| 业主 | HT. | |
|-------|-----|---|
| 小百 | 1号 | • |
| 1111/ | × | • |

| 组号 | R | S | TX | TY | $RMSE_x$ | RMSE _y | RMSE |
|----|--------|--------|----------|---------|----------|-------------------|--------|
| 1 | -0.993 | 4.053 | -25.132 | 15. 765 | 1.021 | 0.996 | 1.426 |
| 2 | -0.021 | 1.032 | -15. 539 | 5.002 | 2.175 | 1.628 | 2.717 |
| 3 | 9.713 | 1.486 | -151.725 | -69.265 | 1.278 | 1.961 | 2.521 |
| 4 | 1.785 | 0. 987 | -12.326 | 17. 298 | 1.978 | 2.861 | 3. 478 |

表 5-3 手工配准方法求取相似变换模型参数及配准精度

| 117/20 | | | | | | | |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|---------|---------|-------|
| 组号 | <i>a</i> ₀ | <i>a</i> ₁ | <i>a</i> ₂ | b_0 | b_1 | b_2 | RMSE |
| 1 | 4.052 | -0.070 | 33. 799 | 0.081 | 4.119 | 15. 765 | 1.271 |
| 2 | 1.032 | -0.023 | 2.903 | 0.042 | 1.027 | 5.0020 | 1.428 |
| 3 | 1. 465 | 0.251 | -151.72 | -0. 243 | -1. 485 | 149.603 | 1.567 |
| 4 | 0.987 | 0.031 | -12.326 | -0.027 | 0.990 | 48.811 | 1.213 |

表 5-4 给出了对四组数据使用手工配准求取相似变换模型参数及配准 精度,

表 5-4 手工配准方法求取仿射变换模型参数及配准精度

通过对以上实验分析与比较,我们可以得出如下结论:

- 对于覆盖不同场景区域或生成时间不同的图像与 GIS 数据对,本算法 都能够有效的求解出图像与 GIS 数据之间的变换模型。但是一个必要 的前提是:数据覆盖了城区的部分主干道区域。
- 在第3组实验中,图像数据与GIS数据所覆盖区域有一定差别,而第 4组实验中,提取的图像道路特征与GIS数据道路特征层存在较大差 异。试验结果证明本算法能够容忍这上述差异,这也是本算法相对于 其他基于傅立叶变换的配准方法一个显著优点。
- 3. 通过与手工配准模型比较可以发现:对于前3个实验,使用本算法所得配准精度略低于手工所得相似变换模型配得配准精度,明显低于手工所得仿射变换模型的配准准精度。这说明了仿射变换模型较相似变换模型更能准确描述数据之间的空间变换关系。未来工作可以此为基础使用仿射变换作为数据之间的变换模型来提高配准精度。

5.5.4 特征道路完整性对配准结果影响的研究

根据 4.3.3 我们已经知道,检测线段长度L的选择对道路网络提取有着很大的影响。不同的L值可能使得该方法特征提取处于"过剩"、"欠缺", 良好三种状态。也即可能导致该方法提取一些多余的"伪"道路特征,或 者遗露一些实际的道路特征。本节我们通过对同一区域进行三种状态下的 特征提取并使用本文所提配准方法将其与 GIS 数据配准来研究特征道路 完整性对配准结果的影响。



图 5-8 显示了我们实验所用原始数据及三种状态下的图像道路特征提取结果。

图 5-8 图像道路三种状态下的道路特征提取示意图:(A) 原始图像数据;(B) 原始 GIS 数据;(C):"过剩"特征图;(D):填充后 GIS 数据;(E)"良好"特征图; (F) "欠缺"特征图。

| 提取状态 | R | S | TX | TY | $RMSE_x$ | RMSE _y | RMSE |
|------|----|-------|----|-----|----------|-------------------|---|
| "过剩" | _ | | _ | _ | | _ | _ |
| "良好" | -1 | 1.051 | 19 | -31 | 1.147 | 1.053 | 1.557 |
| "欠缺" | -1 | 1.047 | 18 | -31 | 1.231 | 1.125 | 1.667 |
| | | | | | | " 小士山 | <u>ــــــــــــــــــــــــــــــــــــ</u> |

使用本文所述方法将三种状态下的特征数据与 GIS 填充道路层匹配 后,所得结果及评估的精度如下表所示:

表 5-5 三种特征提取状态下的配准结果及精度:"一"代表失效

从上表可以看出:使用本方法未能完成"过剩"状态下提取的特征与 填充 GIS 数据的配准;而"欠缺"状态下的配准精度接近于"良好"状 态。这主要是因为,"过剩"状态下主道路特征被杂乱的"伪"特征干扰, 其方向频谱函数曲线严重变形;而"欠缺"状态下能够保留大部分主干道 特征,较好的保留了方向频谱函数的极大值点位置,因而能够正确求得图 像与 GIS 数据之间的夹角。因此为了能够实现图像与 GIS 数据的配准, 应该倾向于"良好"或"欠缺"状态下进行道路特征提取。

5.5.5 多模态或多时相下的城区卫星图像配准

除了能够有效完成卫星图像数据与 GIS 数据之间的配准外,该配准方 法还可用于解决不同模态或不同时相下高分辨率卫星图像之间的配准以 及,我们选取了如下两组数据进行实验:

| | | 第1组 | | 第2组 | | | |
|------|------|-----------|-----|-------|------------|-----|--|
| | 分辨率 | 拍摄时间 | 类型 | 分辨率 | 拍摄时间 | 类型 | |
| 参考图像 | 2.8m | 3/14/2002 | 多光谱 | 2.8m | 3/14/2002 | 多光谱 | |
| 测试图像 | 0.6m | 3/14/2002 | 全色彩 | 2.44m | 12/27/2002 | 多光谱 | |

表 5-6 图像间配准实验所选数据列表

所得实验结果如下表所示:

| 组号 | R | S | TX | TY | $RMSE_x$ | RMSE _y | RMSE |
|-----|-----|-------|-----|----|----------|-------------------|-------|
| 第1组 | 0. | 0.224 | -12 | -9 | 1.235 | 1.377 | 1.850 |
| 第2组 | 0.5 | 0.812 | -25 | 12 | 1.426 | 1.295 | 1.926 |

表 5-7 图像间配准实验结果及误差估计

图 5-9 给出了两组图像数据配准后两组数据所对应的棋盘分布示意图



图 5-9 图像配准后的棋盘示意图((A)中高亮显示部分为配准后的全色彩图像;(B) 中比较阴暗部分为冬季拍摄多光谱图像;(A)(B)底层春季拍摄均为多光谱图像).

从误差估计及棋盘示意图可以看出,两组数据实现了比较精确的配 准。这表明本算法能够有效扩展到多模态多时相下数据之间的配准。

5.6 小块 GIS 数据在大块图像的定位问题

上节主要完成了覆盖区域大致相同的图像与 GIS 数据的配准实验; 我们已经知道,图像与 GIS 数据之间存在平移关系时,满足该种关系的 范围仅限于其重叠区域。而若两数据的重叠区域或重叠区域所占比例较小 时,满足平移关系的取值范围也相应变小,因而直接使用相位相关定理可 能难以确定其平移量。对于该情况,应该首先确定数据之间的重叠区域, 然后再对重叠区域数据使用相位相关定理确定其平移量。本节将初步探讨 小块 GIS 数据在大块图像的定位问题,我们假定 GIS 数据所覆盖区域完 全在图像数据区域中,并取 GIS 数据大小为1024×1024,图像数据为 3072×6144,由于给定的图像数据与 GIS 数据之间的夹角较小,可以假定数据之间仅存在缩放与平移。从理论上讲,我们以图像上每一点为中心截取一定尺寸的区域,然后使用本文所提方法验证该区域数据是否与 GIS 数据相关即可确定 GIS 数据的位置,但是由于所使用图像尺寸很大,这种逐点求相关的方法计算量也会很大。因此,为了节省时间,我们采用分块配准的策略来解决此问题,其主要由以下两步构成:

 对图像数据按照特定方式分割成若干小块图像数据,分块目的是保证 存在小块图像数据,其与 GIS 数据拥有较大的重叠区域。设m、n分 为0与10及0与4之间整数,则在图像坐标系上以(512m,512n)为左 上点可获取55个1024×1024的小块图像数据,如下图所示:

×512



图 5-10 分块策略示意图

为了描述方便,我们首先做如下约定: $I_{m,n}$ 为分块图像数据,G为原始 GIS 数据,G'为定位到图像空间上的 GIS 数据且其面积为 S_1 , $I_{\hat{m},\hat{n}}$ 为具有与 G最大重叠区域的数据块且其面积为 S_2 ,重叠区域的面积为 S_3 。同时我们定义,重叠区域在待配准数据所占比率为:

$$\rho = \frac{S_3}{\max(S_1, S_2)} \tag{5-32}$$

设 $I_{\hat{m},\hat{n}}$ 与 G的比例尺度为s,则我们可以分以下几种情况研究 ρ : (1). $s \leq 1/2$ 时。

有 $S_1 = S_2 \times s^2 \leq S_2/4$, $\rho = S_3/S_2$, 此时G'总在 $I_{\hat{m},\hat{n}}$ 内, 所以有

$$\rho = s^2$$
(2). $s \ge 2$ 时。

有 $S_1 = S_2 \times s^2 \ge 4S_2$, $\rho = S_3/S_1$, 此时G'总在 $I_{\hat{m},\hat{n}}$ 内,所以有 $\rho = 1/s^2$ (3). $1/2 \le s \le 1$ 时。 有 $S_1 = S_2 \times s^2 \le S_2$, $\rho = S_3/S_2$,此时 $S_3 = G'$ 在图像中的具体位置有 关,设G'左上角点位于以(512*m*,512*n*)为左上点512×512的矩形内, 如下图所示:



图 5-11 GIS 数据位置说明图(1)

我们以(512*m*,512*n*)为原点建立如上图所示坐标系,设G'左上角点坐标为(*x*,*y*),令*a*=1024(1-*s*),*b*=1024(3/4-*s*/2)则*ρ*可用下式来表示:

$$\rho = \begin{cases} s^2, & x \le a \land y \le a; \\ \frac{(1024 - x)s}{1024}, & a < x \le b \land y \le a; \\ \frac{(1024s - 512 + x)s}{1024}, & b < x \land y \le a; \\ \frac{(1024 - y)s}{1024}, & x \le a \land a < y \le b; \\ \frac{(1024 - x)(1024 - y)}{1024}, & a < x \le b \land a < y \le b; \\ \frac{(1024s - 512 + x)(1024 - y)}{1024}, & b < x \land a < y \le b; \\ \frac{(1024s - 512 + y)s}{1024}, & x \le a \land y > b; \\ \frac{(1024s - 512 + y)s}{1024}, & x \le a \land y > b; \\ \frac{(1024s - 512 + y)s}{1024}, & a < x \le b \land y > b; \\ \frac{(1024s - 512 + x)(1024s - 512 + y)}{1024}, & a < x \le b \land y > b; \end{cases}$$

ſ

当
$$x = b, y = b$$
时, ρ 取最小值为 $\left(\frac{1}{4} + \frac{s}{2}\right)^2$ 。

(4) $1 \le s \le 2$ 时.

有 $S_1 = S_2 \times s^2 \ge S_2$, $\rho = S_3 / S_1$, 我们建立与图 5-11 相同的坐标系, 令a = 1024(3/4 - s/2), b = 1024(3/2 - s)则 ρ 可用下式来表示:

$$\rho = \begin{cases} \frac{(1024 - x)(1024 - y)}{1024 \times 1024s^2}, & x \le a \land y \le a; \\ \frac{(1024 - b + x)(1024 - y)}{1024 \times 1024s^2}, & a < x \le b \land y \le a; \\ \frac{1024 - y}{1024s^2}, & b < x \land y \le a; \\ \frac{(1024 - x)(1024 - b + y)}{1024 \times 1024s^2}, & x \le a \land a < y \le b; \\ \frac{(1024 - b + x)(1024 - b + y)}{1024 \times 1024s^2}, & a \le x \le b \land a < y \le b; \\ \frac{1024 - b + y}{1024s^2}, & b < x \land a < y \le b; \\ \frac{1024 - x}{1024s^2}, & x \le a \land y > b; \\ \frac{1024 - b + x}{1024s^2}, & a < x \le b \land y > b; \\ \frac{1024 - b + x}{1024s^2}, & a < x \le b \land y > b; \end{cases}$$

当x = a, y = a时, ρ 取最小值为 $\left(\frac{1}{4} + \frac{s}{2}\right)^2$

令g(s)表示s尺度下p可能的最小值,则根据以上分析有

$$g(s) = \begin{cases} s^{2}, & s \leq \frac{1}{2} \\ \left(\frac{1}{4} + \frac{s}{2}\right)^{2}, & \frac{1}{2} < s \leq 1 \\ \left(\frac{1}{4s} + \frac{1}{2}\right)^{2}, & 1 < s \leq \frac{3}{2} \\ \frac{1}{s^{2}}, & \frac{3}{2} < s \end{cases}$$
(5-33)

当s取值在[1/2,2]之间时,g(s)≥1/4,这说明了该分快方法能够保 证分快后存在小块图像数据与GIS数据有较大的重叠区域。

2. 对于每一分快图像数据,利用 5.4 所述方法实现其与 GIS 数据的配准

可以得到同尺度下其与 GIS 数据的协功率频谱逆傅立叶变换幅度图, 求取幅度图中最大值点处的锐度后,则我们可获得图像分块后的锐度 分布图 (如下图),通过确定锐度分布图的峰值即为与 GIS 数据拥有最 大重叠区域的分块图像所在位置。根据该分块图像所在位置以及其与 GIS 数据配准过程所得变换模型参数,我们可以精确的将小块 GIS 数 据配准到大块图像上去,也即实现小块 GIS 数据在大块图像数据上的 定位。



图 5-12 图像数据分块后的锐度分布图

我们的实验使用了两块1024×1024 GIS 数据与一块3072×6144 的图 像数据来验证本文所提策略的有效型。在实验中为了减少计算量,我们对 这三块数据尺度分别缩小了 2 倍,利用缩小后的数据确定具有最大重叠区 域分块位置。图 5-8 所示为实验效果图,我们可以清楚看到 GIS 数据被 较为准确的定位到图像数据所在空间。



(A) 小块 GIS 数据在大图像中的定位



(B)放大后左上绿色边框所在区域(C)放大后左上绿色边框所在区域图 5-13 小块 GIS 数据在大块图像数据中的定位实验结果图

5.7 总结与讨论

本章以高分辨率光学卫星图像与北京市城区 GIS 数据为参考, 对多源 数据的自动配准进行了探讨研究。本章主要工作可以概括如下:

 在假定卫星图像数据与 GIS 数据中包含丰富城区主干道信息且其变 换模型可用相似变换近似描述的前提下,提出了一基于傅立叶变换的 配准自动方案。该方案与其他基于傅立叶变换的配准方法本质区别在 于它充分利用了空间上的线状特征在频域中的方向特性,且该种方向 特性不受图像的平移与旋转变换的影响。核心部分主要由以下两部分 构成:

基于线状特征求取旋转角度: 该部分,我们将提取的城区道路区域近 似看作若干连接起来的线状区域,并利用线状区域在频域中谱幅集中 在与区域住方向垂直的方向上且不随图像尺度及平移变换的特性,确 定图像数据与 GIS 数据的空间旋转角度。该方法在求解过程中仅使用 数据的方向频谱函数而无需确立区域特征的对应关系,因而其自动化 程度很高且具备较强的鲁棒性。

使用多尺度策略获取尺度与平移变换参数:根据相位相关定理,当两数据之间仅存平移变换时,其对应的协功率频谱图的逆傅立叶变换存在一尖锐峰值;因而本部分我们首先调整 GIS 的尺度,然后求取其与图像数据协功率频谱图的逆傅立叶变换是否存在峰值的锐度;则锐度最大处即为图像数据与 GIS 数据之间的尺度变换参数;最后利用相位相关定理可获图像与 GIS 数据之间的平移变换参数。运用多尺度策略的最大优点在于其能够有效解决尺度变换较大的情况。

- 通过对多组图像与 GIS 数据的配准实验表明:本策略对于数据之间存 在较大旋转、缩放变换及变化区域有很强的自适应性。尽管本方法配 准精度不是很高,但是考虑到图像的高分辨率特性,它具有较高的空 间配准精度(2m~10m);同时以改方法配准结果可以为更高精度的配 准提供基础。另外实验表明:该方法也适于多模态,多时项图像数据 之间的配准。
- 3. 进一步,又将该方法扩展到小块区域 GIS 数据在大块图像中的自动定位问题研究上。在这一部分,我们采用了分块匹配的方法:即首先对图像按照一定方式进行分块,其目的保证存在分块图像数据与 GIS 数据相有较大重叠区域;使用本文所提方法寻找该分块图像数据位置并求得其与 GIS 数据的变换模型参数,根据这些信息可以准确定位小块GIS 数据在大块图像中的位置。该方法与逐点相关匹配的方法相比计算量大为减小,同时能够保证较高的定位精度。

第六章 结束语

本章,我们将对本文的工作及主要贡献进行总结,并对下一步的工作进行展望。

6.1 本文主要工作

多源数据是通过不同手段获得具有多时空性、多尺度性、多语义性 和存储格式多样性的数据。利用多源遥感数据的信息集成技术实现多源信 息的优势互补已经成为目前信息科学领域研究的主要内容,而实现多源数 据的自动几何配准则是多源信息有机集成的前提与基础。

在 3S 领域里通常存在两种获取方式截然不同的数据: 遥感图像数据 和地理信息系统数据。空间技术的迅速发展及新型传感器的不断涌现,使 得遥感图像数据的获取在及时性,准确性,以及类型多样化方面得到了充 分的发展:对于同一地区,我们可以及时获得大量的来自不同传感器,具 有不同空间分辨率,覆盖不同电磁波谱段的多源遥感数据。另一方面,信 息技术日新月异的革命以及硬件水平突飞猛进的提高,导致了具有海量数 据存储能力的新一代地理信息系统的诞生;海量存储能力造成了数据更新 工作量的爆炸式膨胀,使如对两种数据进行有效集成以实现 GIS 数据自动 更新研究工作变得尤为紧迫;同时由于图像数据与 GIS 数据所使用数据语 义或特性的差异使得卫星图像数据与 GIS 数据的配准成为二者信息有效 集成的"瓶颈"。这也使得卫星图像数据与 GIS 数据之间的配准成为目前 多源数据配准的研究热点及难题。

本文在对以前多源数据配准技术的分析与总结基础上,结合项目的应用北京,以QuickBird卫星图像与GIS数据为实验数据,围绕多源图像自动配准这一主题,进行了高分辨率光学卫星图像与GIS数据自动配准技术的研究。

本文主要工作及贡献包括如下:

 图像滤波:对于高分辨率卫星图像来说,其噪声来源主要有两个:一 是在成像及数字化过程采样、量化、压缩等处理过程中形成的热噪声 及椒盐噪声;另一类是其他特征对于被提取特征来说造成的"噪声", 如:提取道路特征时覆盖在道路表面上的汽车、树木、阴影等。这些 噪声加剧了特征提取的困难。本文将均值漂移的方法成功应用到高分 辨率卫星图像上以抑制这些噪声,其特点是对灰度分布较为均匀区域 进行有效平滑同时保存了边缘特征

- 2. 特征提取:本文在对高分辨率卫星图像的特征分析基础上,提出了一种新的将灰度信息与几何形状信息结合起来提取城区主干道区域的方法。由于该方法采用逐点检测的方法,其计算量较大,但是跟其它方法相比它能够实现特征区域自动提取且对同一类型图像不同场景具有很强的鲁棒性。它是实现图像数据与 GIS 数据自动配准的关键步骤。
- 3. 道路特征图像与 GIS 数据的自动配准:在假定卫星图像数据与 GIS 数据中包含丰富城区主干道信息且其变换模型可用相似变换近似描述的前提下,提出了一基于傅立叶变换的自动配准方案。跟其他傅立叶配准方法不同的是,该方法首先运用线装区域在频域中的方向特性求取数据之间的旋转角度,然后采用多尺度策略求取数据之间的缩放与平移参数。实验证明,该方法对数据之间存在较大旋转、缩放或变化区域都有很强的自适应性。
- 4. 小块区域 GIS 数据在大块图像中的自动定位问题研究:在这一部分, 我们以上述配准方法为基础,解决小块 GIS 数据与大块图像数据的配 准也即定位问题。我们采用了分块匹配的方法:即首先对图像按照一 定方式进行分块,其目的保证存在分块图像数据与 GIS 数据拥有较大 重叠区域;使用本文所提方法寻找该分块图像数据位置并求得其与 GIS 数据的变换模型参数,根据这些信息可以准确定为小块 GIS 数据 在大块图像中的位置。该方法与逐点相关匹配的方法相比计算量大为 减小,同时能够保证较高的定位精度。

6.2 未来工作展望

本文围绕"多源数据自动配准"这一主题,在高分辨率卫星图像的滤 波、道路特征提取及特征图像与 GIS 数据配准方面做了一定的工作,提出 了一套新的基于傅立叶变换的配准方案,较好解决了由于图像数据与 GIS 数据语义特性不同及较大变化区域时的配准问题。但本文所提方法还需要 进一步的完善,未来工作可以在以下几方面展开:

- 进一步提高图像与 GIS 数据的配准精度: 配准评估结果表明我们所 提的配准方案精度不是很高,这主要由两方面原因造成: 相似变换模 型只能近似而非精确描述图像与 GIS 数据的空间变换关系; GIS 数据 本身精度也不很高。在以后的工作中,通过对图像与 GIS 数据进行角 点、边缘等特征提取,并以此变换模型为依据建立征征对应关系,根 据对应关系使用新的变换模型来描述数据之间的变换关系。
- 2. 根据 GIS 先验知识提高道路特征区域的提取精度:在完成图像与 GIS 数据配准的基础上,我们可以 GIS 数据道路层特征为先验知识,通过 所得变换模型得到其图像中对应位置,然后使用主动轮廓等方法获得 其在图像中的精确区域即为道路特征区域。这个过程中一个关键问题 是当图像与 GIS 数据存在变化区域时如何识别和检测该变化区域。

参考文献

 Brown L.G, "A survey of Image Registration Techniques," ACM Computer Surveys, Vol.24, No.4, 1992

[2] Maintz, J.B. Antoine and Viergever, Max A. "A Survey of Medical Image Registration", Medical Image Analysis, Vol.2, pp 1- 37,1998.

[3] Fonseca, M.G. and Manjunath, "Registration Techniques for Multisensor Remotely Sensed Imagery" Photogrametric Engineering & Remote Sensing, Vol.62, No.9, pp.1049-1056, 1996.

[4] Rignot, E.J., Kowk, M.R., Curlander, J.C. and Pang, S.S., "Automated Multisensor Registration: Requirements and Techniques", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 57, No.8, pp.1029-1038, 1991.

[5] Barbara Zitova'*, Jan Flusser, "Image registration methods: a survey", Image and

Vision Computing 21, pp.77-1000,2003

- [6] Digital Global Inc., "QuickBird Imagery Products-Product Guide", 30 Dec. 2002.
- [7] 张力果等,"地图学",高等教育出版社,1990
- [8] 汤国安,陈正江等,"ArcView 地理信息系统空间分析方法",科学出版社, 2002
- [9] 赵英时等,"遥感应用原理分析与方法",科学出版社,2003
- [10] L.Kitchen and A.Rosenfeld, "Gray level Corner detection". Pattern Recognition Letters, 1:95-102, 1982
- [11] K.Brunnstrom, T.Lindeberg, and J.O. Eklundh. "Active detection and classification of Junctions. Proc. 2nd European Conf. Computer Vision, LNCS 588:701-709, St.Margherita, Italy, 1992.
- [12] O.A.Zuniga and R.Haralick. "Corner detection in color images by multiscale combination of end-stopped cortical cells", Proc IEEE Conf. Computer Vision and pattern Recognition.
- [13] P. R. Beaudet." Rotationally invariant image opertations". Proc. Intl. Joint Conference on Pattern Recognition on Pattern Recognition, pages579-583,Kyoto,Japan,1978.
- [14] L.Drescher and H.Nagel. "Volumetric model and 3-D trajectory of a moving car derived from monoculare TV-frame sequence of a street scene". Proc.Int. Joint Conf. Artificial Intelligence, pages692-697, Vancouver, Canada, 1981.
- [15] W.Fostner. "A feature based correspondence algorithm for image matching." Intl.Arch.Photogramn. Remote Sensing.26:150-166,1986.
- [16] Christmas, W.J., "Structural Matching in Computer Vision Using Probabilistic Reasoning", P.H.D. Thesis, University of Surrey, U.K., 1995.
- [17] Goshtasby, A., Stockman, G.C. and Page, C.V., "A Region-Based Approach to Digital Image Registration with Sub-pixel Accuracy", IEEE Transactions on

GeoScience and Remote Sensing, Vol. GE-24, No.3, pp.390-399, 1986

- [18] Stockman, G., Kopastein, S. and Bennett, S., "Matching Images to Models for Registration and Object via Clustering", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intellegence, Vol. PAMI-4, No.3, pp.229-241, 1982.
- [19] Borgefors, G. "Hierarchical Chamfer Matching: A Parametric Edge Matching Algorithm." IEEE Transanctions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.10, No.6, pp.849-865, 1988
- [20] Flusser, J, and Suk, T, "Pattern Recognition by Affine Moment Invariants," Pattern Recognition, Vol.26, pp.167-174, 1993.
- [21] Flusser,J. and Suk, T., "A Moment-Based Approach to Registration of Images with Affine Geometric Distortion,", IEEE Transanctions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.32, No.2, pp.382-387,1994.
- [22] Flusser, J., "Invariant Shape Description and Measure of Object Similarity," Proc. 4th International Conference on Image Processing, Masstricht, the Netherlands, pp.139-142, 1999
- [23] Goshtasby, A., "Transformation functions", downloaded from http://citeseer.nj.nec.com/ 407549.html
- [24] Flusser, J. and Suk, T, "An adaptive method for Image Registration", Pattern Recognition, Vol.25, No.1, pp.45-54,1992.
- [25] Goshtasby, A., "Registration of Images with Geometric Distortions," IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.26, No.1,pp.60-64,1988.
- [26] Sprengel, R., Rohr, K. and Stiehl, H.S. "Thin-Plate Spline Approximation for Image Registration," acquired from website.
- [27] Fogel, D.N., and Tinney, L.R., "Image Registration using Multiquadric Functions, the Finite Element Mehtod, Birvariate Mapping Polynomials and Thin Plate Spline," Technical Report, NCGIA, 1996.
- [28. Goshtasby, "Piecewise Linear Mapping functions for Image Registration", Pattern Recognition, Vol.19, No.6, pp.459-466, 1986.
- [29] A. Goshtasby, "Piecewise Cubic Mapping Function For Image Registration", Pattern Recognition, Vol.20, No.5, pp.525-533, 1987
- [30] Yuan Chsieh, D.M. McKeown, F. Perlant, "Performance evaluation of scene registration from stereo-matching for cartographic features extraction", 1990, CMU report CMU-CS-90-193
- [31] M. Lhuillier, Long Quan, "Robust dense matching using local and global geometric constraints", International Conference of Pattern Recognition, 2002 (also INRIA repor RR3382)
- [32] Bruce D.Lucas, Takeo Kanade, "An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision" DARPA81(121-130). BibRef 8100,1981
- [33] Paul A. Viola, and W. Wells, "Alignment by Maximization of Mutual Information", International Conference in Computer Vision, 1995, pp.16-23.
- [34] 杨清友,王超,"干涉雷达复图像配准与干涉条纹的增强",遥感学报,Vol. 3,No.2,1999.

- [35] R.N. Bracewell, "The Fourier Transform and Its Applications", McGraw-Hill, NewYork, 1965.
- [36] E.D. Castro, C.Morandi, Registration of translated and rotated images using finite Fourier transform, IEEE Trasanctions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 9 pp.700-703 1987
- [37] H.Foroosh, J.B.Zerubia, M.Berthod, Extension of phase correlation to subpixel registration, IEEE Transactions on Image Processing 11 pp.188-200 2001
- [38] G. Stockman, S. Kopstein, and S. Benett, "Matching Images to Models for Registration and Object via Clustering", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-4, No.3, May, 1982.
- [39] J. Ton, and A. K. Jain, "Registering Landsat image by point matching", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.27, No.5, 1989.
- [40] A. D. Ventura, A. Rampini, and R. Schettini, "Image Registration by Recognition of Corresponding Structures", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.28, N0.3, 1990.
- [41] Zhengyou ZHANG, Rachid DERECHE, Oliver FAUGERAS, Quangtuan LUONG "A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Images Through the Recovery of the Unkown Epipolar Geometry" INRIA Technique Report No 2273 May 1994.
- [43] J.Matas, O.Chum, M.Urban, T. Pajdla "Distinguished regions for wide baseline stereo", Technical report, CTU-CMP-2001-33, Center for machine perception, 2001
- [43] J. Flusser, and T. Suk, "A Moment-based Approach to Registration of Images with Affine Geometric Distortion", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.32, No.2, 1994, pp.382-387.
- [44] Li, H., Manjunath, B.S. and Mitra,S.K., "A Contour-Based Approach to Multi-Sensor Image Registration", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 4, No. 3, pp.320-324, 1995.
- [45] J. Le Moigne, "Parallel Registration of Multi-sensor remotely sensed imagery using wavelet coefficients", Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, Orlando, Florida, 2242, pp.281-291.
- [46] Hild,H., Haala, N., and Fritsch, D., "A Strategy for Automatic Image to Map Registration.", IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000.
- [47] R. Bonnefon, P. Dhérété, J. Desachy, "Geographic Informaton System Updating using Remote Sensing Images", Pattern Recognition Letters, Elsevier Science, V. 23 N. 9, pp. 1073-1083, juillet 2002
- [48] Yasuharu Yanamura, Hitoshi Saji, "Automatic Registration of Aerial Image and Digital Map for Detection of Earthquake Damaged Areas". Digital Image Computing: Techniques and Applications pp.117-126, 2003
- [49] Taravudh Tipdecho, "Automatic Image Registration between Image and Object Spaces", Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference 2002
- [50] Ts. Purevdorj and R.Yokoyama,Geometric, "Registration Method For 10-Day Composite Avhrr Data For Asian Region", Asian Conference on Remote

Sensing.2003

- [51] M.F.Auclair, Fortier, D.Ziou, C.Armenkis and S.Wang, "Survey of Work on Road Extraction in Areial and Satellite Images", Center for Topographic Information Geomatics, Ontario, Canada. Technical Report No.241.1999
- [52] WenZhong Shi, Changqing Zhu, "The Line Segments Matched Method for Extracting Road Network From High-Resolution Satellite Images". IEEE Trans .Geosci .Remote Sensing, vol.40, pp511-515 Feb. 2002
- [53] Huijing Zhao, Jun Kumagai, Massafumi Nakagawa, Ryosuke Shibasaki, "Semi-automatic Road Extraction From High-resolution Satellite Image", International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003.
- [54] Xiaoying Jin, Curt H.Davis, "Automatic Road Extraction from High-Resolution Multispectral IKNOS Imagery", International Geosciece and Remote Sensing Symposium, 2003.
- [55] Stefan Hinzi "A Fusion Strategy for Extraction of Urban Road Nets from Multiple Images", International Geosciece and Remote Sensing Symposium, 2003.
- [56] R. Bajcsy and M. Tavakoli, "Computer recognition of roads from satellite pictures," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 6, no. 9, pp. 623–637, 1976.
- [57] 阮秋琦,"数字图像处理学", 电子工业出版社,2001.
- [58] Comanicu, D. and Meer, P., "Mean shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.24, No.5, pp.1-18,2002.
- [59] Q.Chen, M.Defrise, F.Deconinck, "Symmetric phase-only matched filtering of Fourier Mellin transform for image registration and recognition," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intellgience Vol. 16, pp.1156-1168.1994.
- [60] B.S.Reddy, B.N. Chatterji, "An FFT-Based technique for translation, rotation and scale-invariant image registration", IEEE Transactions on Image Processing, Vol.5 pp.1266-1271, 1996.
- [61] B.Rezaie, M.D. Srinath, "Algorithms for fast image registration", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 20, pp.716-728, 1984.
- [62] P.E. Andersen, "Spatial registration of multi-spectral and multi-temporal digital imagery using Fast Fourier Transform", IEEE Transactions on Geoscience Electronics Vol. 8, pp.353-368,1970.
- [63] L.Lucchese, G. Doretto, G.M. Cortelazzo, "A frequency domain technique for robust multimodal image registration," IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol 21, pp.462-469, 2002.
- [64] F.Maes, A.Collignon, D.Vandermeulen, G.Marchal, P.Suetens, "Multimodality image registration by maxization of mutual information", IEEE Trasanctions on Medical Imaging, Vol.16, pp.187-198, 1997.
- [65] A.V. Ciderciyan, "Registration of ocular funds images", IEEE Engineering in Medcine and Biology, Vol 14, pp.52-58, 1995.
- [66] G.Wolber, S.Zokai, "Image Registration Using Log-polar Transform". Proceedings of

the IEEE International Conference on Image Processing, Canada, September 2000.

- [67] Bernd-M Straub, Markus Gerke, Andreas Koch, Automatic Extraction of Trees and Buildings from Image and Height Data in an Urban Environment, International Workshop on Geo-Spatial Knowledge Processing for Natural Resource Management, June 28-29, pp. 59-64.
- [68] Christophe Vestri, Using Robust Methods for Automatic Extraction of Buildings, Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 208-213, Hawaii, December 2001.
- [69] C. Lin, R. Nevatia, Building detection and description from a single intensity image, Computer Vision and Image Understanding, vol. 72, pp. 101-121, November 1998.
- [70] T.Kim,J.P.Muller, Development of a graph-based approach for building detection, Image and Vision Computing, vol. 17, pp. 3-14, January 1999.
- [71] C. Steger, W. Eckstein, C. Wiedemann, Update of Roads in GIS from Aerial Imagery: Verification and Multi-Resolution Extraction, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (1996), Volume XXXI, Part B3, 53-58.
- [72] Jie Shan, D. Scott Lee, Generalization of building polygons extracted from IKONOS imagery. Geospatial theory, processing and applications, ISPRS Commission IV Symposium, July 9-12, Ottawa.

攻读硕士学位期间撰写及发表的论文

Zhanwu Yu, et.al, "A Novel Two-step Strategy for Automatic Image-GIS Registration", Proceedings of ICIP2004, Singapore,2004. (Accepted).

致谢