

基于不规则三角网的遥感影像 自动配准系统设计

陈振庭, 陈富强, 许丽娟

(广州华商学院 人工智能学院, 广州 511300)

摘要: 在遥感影像配准中, 因多种因素导致影像存在几何畸变、平均正确配准点率低的问题; 为解决此问题, 利用不规则三角网技术设计遥感影像自动配准系统; 通过改装采集器、传感器、处理器, 调整电源电路连接方式优化硬件系统保障数据安全可靠; 基于采集器光学原理生成影像并经大气校正、影像提高保证质量; 采用 Harris 算子提取特征点构建不规则三角网实现影像自动分割纠正偏移; 经粗配准、精配准和误配准剔除三步实现自动配准功能; 经系统测试实验, 与传统系统相比, 优化后的系统对低、高分辨率遥感影像的正确配准点率分别提高 3.5% 和 1.9%, 系统运行加速比明显提升。

关键词: 不规则三角网; 遥感影像; 遥感技术; 影像配准; 自动配准系统

Design of Remote Sensing Image Automatic Registration System Based on Irregular Triangular Network

CHEN Zhenting, CHEN Fuqiang, XU Lijuan

(School of Artificial Intelligence, Guangzhou Huashang College, Guangzhou 511300, China)

Abstract: In remote sensing image registration, there are problems such as geometric distortion and low average correct registration point rate due to various factors. To solve this problem, an automatic registration system for remote sensing images is designed using irregular triangulation technology. By modifying the collector, sensor, and processor, adjusting the power circuit connection method, optimizing the hardware system to ensure data security and reliability; Generate images based on the optical principles of the collector and ensure quality through atmospheric correction and image enhancement; Using Harris operator to extract feature points and construct an irregular triangular network to achieve automatic image segmentation and correction of offset; The automatic registration function is achieved through three steps; coarse registration, fine registration, and error registration removal. According to system testing experiments, compared with traditional systems, the optimized system has improved the correct registration rate of low and high-resolution remote sensing images by 3.5% and 1.9% respectively, and the system's acceleration ratio has been significantly improved.

Keywords: irregular triangular network; remote sensing imagery; remote sensing technique; image registration; automatic registration system

0 引言

率遥感技术具有可视范围广、信息丰富、分辨率高等优势, 在地质、城市规划、林业等领域具有重要的应用价值。然而, 要充分发挥这些遥感影像的潜力, 需要对影像展开高精度的配准处理。遥感影像的配准是将不

同传感器、不同分辨率、不同谱段、不同时相的遥感数据进行信息综合的过程, 是遥感领域中的一项重要的图像处理技术。配准精度直接影响到后续图像融合、变化检测等处理的效果^[1-2]。在正射投影图像的配准过程中, 通常会在矩形框顶点展开排序, 以便进行后续的配准处理。然而, 由于地物场景的复杂性, 如山区、城市等地

收稿日期:2024-11-08; 修回日期:2024-12-16。

基金项目:广州华商学院校内导师制科研基金资助项目(2024HSDS12)。

作者简介:陈振庭(1993-),男,硕士,助教。

许丽娟(1979-),女,硕士,副教授。

引用格式:陈振庭,陈富强,许丽娟. 基于不规则三角网的遥感影像自动配准系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4): 232-240.

形变化剧烈的区域,遥感影像中的特征区域往往难以准确区分。同时,由于影像采集过程中传感器的平移和旋转,相同地物在不同影像中的位置存在偏移现象,难以准确反映影像之间的对应关系。因此,针对遥感影像自动配准系统设计的研究显得尤为重要。

遥感影像自动配准系统是指一种能够自动处理遥感影像数据,将具有重叠区域的影像统一到相同坐标系统中,使影像同名点在空间位置上达到最佳对齐的系统。目前发展较为成熟的配准系统中,文献[3]提出的基于多维 Beltrami 正则化的图像配准系统引入了一种新的 nD 拓扑保持图像配准模型,通过正则化所提出的 Beltramicconsistent 系数,应用广义高斯-牛顿格式建立了一个快速的多级数值求解器,根据数值求解结果完成图像的配准任务。遥感影像中的地物场景具有高度的多样性和复杂性,导致影像中的特征区域在不同影像中的相对位置和形状发生变化。即使采用基于多维 Beltrami 正则化的配准方法,也会因为平移和旋转的复杂性而无法完全消除这种几何变形。文献[4]提出的基于方向相位稠密特征的遥感影像配准系统采用光照与对比度恒定的相位一致性模型,获取方向相位密集特征,将其转换至频率域,实现快速子像素级的精确匹配。虽然相位一致性模型对光照和对比度具有不变性,但由于内外方位元素的微小变化,会导致遥感影像产生几何误差,进而影响系统的配准效果。文献[5]提出的基于 SIFT 与互信息筛选优化的遥感影像配准系统运用尺度不变特征变换(SIFT, scale-invariant feature transform)算法来检测特征点,利用快速最近邻搜索算法实现待配准影像配准结果输出。即使 SIFT 算法能够提取出一定数量的特征点并进行匹配,但由于几何变形的复杂性,这些匹配点无法准确反映影像之间的整体对应关系。文献[6]提出的一阶高斯方向可调滤波器引导的影像配准系统依据影像几何信息,确定重叠区并均匀分块,通过仿射变换粗配准。采用分块均匀策略获取均匀特征点,基于最近邻匹配并剔除误配,通过有理函数模型平差校准影像,实现精配准。遥感影像的几何信息往往非常复杂,即使采用一阶高斯方向可调滤波器进行特征提取,也会因为几何信息的复杂性而无法完全消除特征点之间的误差。文献[7]提出的基于风格迁移不变特征的配准系统训练 SAR 转光学风格迁移网络,生成人工光学图及差异图,利用小波多尺度增强边缘,二值化后提取人工图边缘特征,提取光学基准图边缘特征,通过互相关性匹配边缘特征,实现 SAR 与光学基准图的精确配准。遥感影像中的几何变形包括线性变形和非线性变形等多种类型。该方法虽然优化了配准过程,但仍然无法完全消除这些几何变形对配准精度的影响。

综上所述,传统配准系统均存在明显的效果不佳的

问题,难以解决配准过程中的几何畸变。为此,引入不规则三角网技术,设计遥感影像自动配准系统。不规则三角网是基于矢量的数字地理数据的一种形式,采用一系列相连接的三角形来拟合地表或其他不规则表面。通过不规则三角网技术的应用对遥感影像自动配准系统的优化设计,最大程度地提升系统的配准功能与性能。

1 遥感影像自动配准硬件系统设计

影像配准是产生一个空间配准的影像集合或匹配某一景物影像的过程,其本质是在两幅或多幅影像之间建立映射关系,确定相应变换参数,消除其不一致性,从而获得具有几何一致性的两幅或多幅影像。然而,遥感影像所覆盖的地物场景较为复杂,包括城市、山区、水域、植被等多种类型。这些场景在影像中的表现形式各不相同,使得特征提取和匹配变得困难。影像采集传感器在采集过程中会因为平移、旋转等运动而产生形变,导致影像中的特征区域发生偏移。所设计系统的硬件部分通过配备遥感影像采集器、高精度的角度传感器和数据处理设备,实时记录传感器的运动状态,从而在后续处理中进行精确的几何校正。

1.1 硬件系统组成框图

遥感影像自动配准硬件系统主要由遥感影像采集器、角度传感器、数据处理器以及系统电路组成,其组成如图1所示。

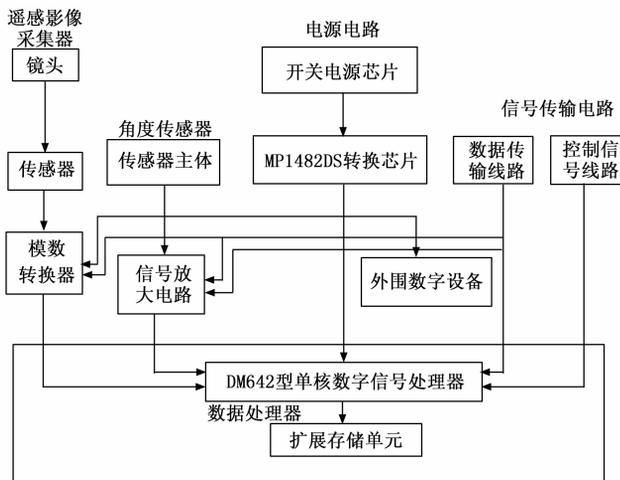


图1 硬件系统组成框图

1.2 优化设计遥感影像采集器

在遥感影像自动配准系统设计中,遥感影像采集器是硬件系统的基础部分。由于地物场景多样以及影像采集传感器存在平移、旋转等多变性,这就需要采集器获取影像数据以便后续处理。因此,为获取系统配准对象,在硬件系统中安装遥感影像采集器,并以提升遥感影像采集质量为目的,在传统遥感影像采集器基础上对其进行优化处理^[3]。

优化设计的遥感影像采集器由镜头、传感器、模数转换器等部分组成,镜头采用的是焦距为 50 mm、光圈为 F/1.8 的玻璃透镜,图像传感器使用分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$ 像素、捕捉光强为 120 dB 的双侧传输结构线阵列 CCD 摄像器件双,在优化设计过程中,将光电转换效率为 90%、每个像素点存储 10 000 个电荷的光电二极管矩阵与 CCD 移位寄存器被整合于单一半导体硅芯片上,它们各自受不同脉冲信号驱动。此整合结构中的光电二极管,其光电转换及电荷存储机制,与光电二极管矩阵和 CCD 移位寄存器分立设计的原理一致^[4]。在实际运行过程中,遥感影像采集器基底材料为 P 型硅,光电二极管矩阵的各单元通过二氧化硅相互隔离,排列成直线,每个二极管代表一个图像像素。当行扫描信号处于高电位时,所有光电二极管处于反向偏置状态,光激发的电子一空穴对中,空穴受 PN 结内电场排斥并流向基底接地,而电子则被捕获在 PN 结的耗尽层内,得出遥感影像像素点的生成结果。在 CCD 摄像器件中加设一个滤光片,用来提高图像的色彩还原度和对比度。

1.3 角度传感器

由于传感器的旋转会导致影像的几何变形,角度传感器能够监测采集过程中的角度变化信息,为校正因旋转带来的影像变形提供依据。在遥感影像配准系统运行过程中,角度传感器负责检测并测量物体或平台的倾斜与旋转角度,通常基于物理效应来精确捕捉这些角度变化^[5]。

将测量范围为 $\pm 45^\circ$ 、精度为 0.1° 的 Honeywell 的 HMC5883L 型号磁敏感角度传感器安装到遥感平台中,并通过 I2C 接口与硬件系统电路板相连。当遥感平台发生倾斜或旋转时,角度传感器即时反馈相应的角度数据,这些数据对于校正影像因视角差异产生的形变至关重要,确保影像能够准确对齐和融合^[6]。为校正影像因视角差异产生的形变,确保影像能够准确对齐和融合,在传统角度传感器基础上,嵌入一个 NA128 型号信号放大电路,以提高传感器的输出传感信号强度。

1.4 数据处理器

在配准过程中,正射投影图像在矩形框顶点展开排序时,由于地物场景和传感器的影响,影像特征区域重叠覆盖程度高,数据处理器可以对采集到的影像数据进行复杂分析,处理这些复杂的影像关系以提高配准的准确性。为了给遥感影像数据的处理工作提供硬件支持,在硬件系统中安装 DM642 型单核数字信号处理器。该处理器核心为 DSP 芯片,采用哈佛结构分离程序与数据存储,运用流水线技术,并配备专用硬件乘法器和特殊 DSP 指令^[7]。在保证系统能够支持不规则三角网技术的运行要求,设置优化设计处理器在 600 MHz 时钟频率下运行,每周能并行处理 8 条 32

位指令,达到 4 800 MIPS 的峰值性能^[8]。综合考虑遥感影像数据特征,该数据的处理需要更大的存储空间,因此对数据处理器基础上对其存储空间进行扩展,扩展后的存储器拥有 8 个并行功能单元,共享 32 个 32 位宽的通用寄存器资源,由此实现影像数据处理器存储空间的优化。

1.5 电源设计

系统电路为整个硬件系统提供电力和信号传输的支持,保障各个部件正常工作。这些硬件组件协同工作,以解决因传感器平移、旋转等因素导致的影像几何变形,以及由此产生的相同地物在不同影像中位置偏移、正确配准点率低等问题,从而实现遥感影像的自动配准。稳定可靠的电源电路是遥感影像自动配准系统高效运行的基本保障,综合考虑硬件系统元件的优化设计结果,对系统的供电电源进行调整。遥感影像采集器和角度传感器的供电电压为 3.3 V,处理器电压为 2.5 V,外围数字电压为 1.2 V,为实现多种不同等级电压之间的相互转换,调整系统的供电电路,调整结果如图 2 所示。

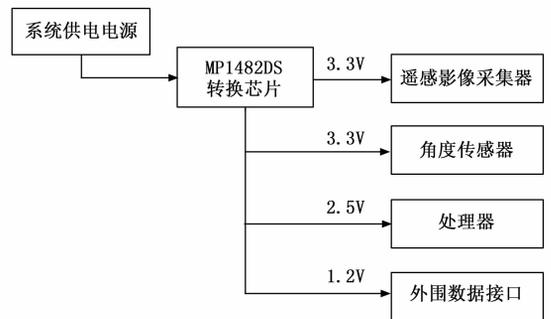


图 2 系统供电电路框图

按照图 2 所示的原理,采用能够承担较大负载的高质量开关电源芯片,通过 3 路 MP1482DS 转换芯片产生 3.3、2.5、1.2 V 共 3 种电压,采用能够承担较大负载的高质量电源芯片开关,根据设备电源需求调整开关状态,输出不同等级电压。

2 遥感影像自动配准系统软件设计

2.1 数据库设计

遥感影像自动配准系统数据库可以存储大量的遥感影像及其特征点信息。这些特征点是在影像预处理阶段通过算法提取的,具有代表性且能够用于影像配准的关键点。在配准任务中,系统可以利用这些关键点对影像校正,从而减小几何变形的影响,提高配准精度。系统数据库中任意实体的构建结构如图 3 所示。

优化设计系统构建的数据库包含遥感影像数据库表、角度测量数据库表、配准参数数据库表、配准参数数据库表等,其中遥感影像数据库表的构建结果,如表

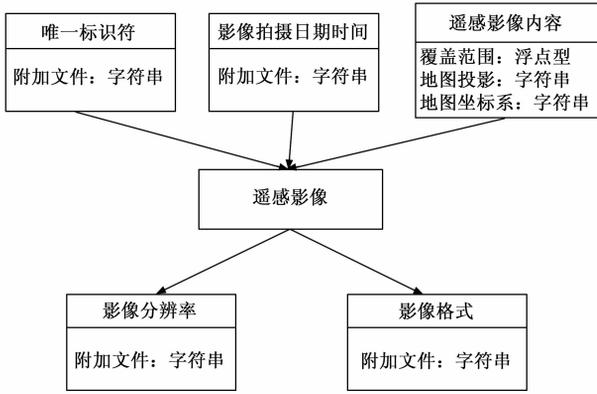


图 3 数据实体构建结构图

1 所示。

表 1 遥感影像数据库表

字符名称	字符说明	数据结构	数据存储大小/byte
ImageID	影像唯一标识符	VARCHAR	50
AcquisitionDate	影像拍摄日期时间	DATETIME	8
Resolution	影像分辨率	FLOAT	4
SpectralRange	光谱范围	VARCHAR	50
ImageFormat	影像格式	VARCHAR	50
FileSize	影像文件大小	INT	4
CloudCover	云覆盖百分比	INT	4
GeoReferenceSystem	地理参考系统	VARCHAR	100

按照上述方式可以得出数据库中其他数据库表的构建结果。为了增强数据库中数据的存储安全性, 系统需验证用户身份, 保证使用者的合法性。对已登录系统的用户, 需实施访问控制, 确保只有经系统授权的合法用户能够安全访问数据库内的信息, 同时有效阻止未经授权用户的任何访问尝试^[9]。另外, 还需对数据库数据进行定期或临时的自动及手动备份, 以便在需要时能够顺利恢复数据。

2.2 软件功能设计

针对影像特征区域重叠覆盖程度高且可区分性差, 导致地物在不同影像中位置出现偏移的问题, 遥感影像自动配准系统的软件部分主要利用特征提取、特征匹配、几何变换等算法, 对输入或生成的遥感影像进行自动配准。遥感影像自动配准系统软件功能系统总体框架如图 4 所示。

在遥感影像自动配准系统中, 系统首先会提取影像中的特征点或特征区域, 这些特征通常是影像中具有明显区分度且在不同影像中相对稳定的部分^[10]。系统会对这些特征进行匹配, 找到不同影像中的同名特征点, 根据匹配的特征点计算几何变换参数, 如平移、旋转、缩放等, 将这些参数应用于待配准的影像, 使

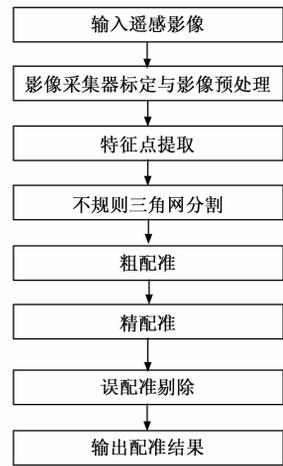


图 4 遥感影像自动配准系统软件功能系统总体框架

其与参考影像在空间位置上达到最佳对齐。并引入不规则三角网, 自动分割遥感影像, 以解决因传感器平移和旋转造成的影像几何畸变, 从而提高相同地物在不同影像中的配准精度。优化遥感影像的自动配准过程如图 5 所示。

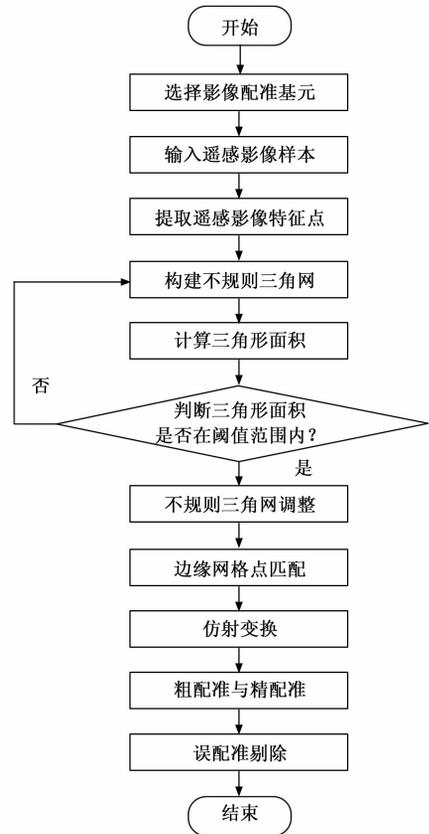


图 5 优化遥感影像自动配准流程图

在优化设计系统中, 在图 5 表示的配准流程的基础上, 应用不规则三角网技术对遥感影像进行分割处理, 在此基础上实现遥感影像的匹配, 得出遥感影像的自动

配准结果。

2.2.1 标定遥感影像采集器生成对比度增强的遥感影像

遥感影像采集器在采集遥感影像过程中的微小平移会导致同一地物在不同影像中的相对位置发生变化,若出现旋转现象则会改变地物的方向角度。这种几何畸变会使得在配准过程中,相同地物难以准确匹配,进而降低平均正确配准点率。如果不进行对比度增强,遥感影像的边界会模糊不清。因此,需要对遥感影像采集器的摄像机设备进行标定处理,保证遥感影像比对标准的采集质量,并通过与其他波段的灰度值进行回归分析校正影像的灰度值,进而实现对遥感影像的对比度增强。

根据光学原理,依赖搭载在卫星、飞机或无人机等遥感平台上的光学传感器,捕获地表反射或辐射的特定波段电磁波,在采集时,传感器通过其镜头系统接收来自地球表面的光线,这些光线经过镜头的折射和聚焦后,在传感器内部的感光元件上形成图像^[11]。原始的遥感影像数据,可以量化表示为:

$$I_0(x_0, y_0) = \begin{cases} \kappa_{gather} \cdot \kappa_{ADC} \cdot x \cdot H \cos\theta \\ \kappa_{gather} \cdot \kappa_{ADC} \cdot y \cdot H \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中: κ_{gather} 和 κ_{ADC} 分别为遥感影像信号的采集系数和模数转换器的转换系数, (x, y) 为遥感成像目标的实际作为坐标值, H 为遥感平台的飞行高度, θ 为遥感影像的生成角度,即遥感平台与成像目标之间的夹角^[12]。为降低大气环境以及周围干扰环境对遥感影像生成结果产生的影响,对初始采集遥感影像进行处理,具体包括大气校正、影像增强、影像滤波等。大气校正的目的是消除大气对遥感影像的影响,恢复地表真实的光谱和辐射信息,设影像像元亮度值与反射率之间的关系为:

$$\lambda = g\mu + \psi$$

其中: λ 、 g 、 μ 和 ψ 分别为影像像元亮度值、增益、反射率和偏移值。对于特定波段,如果受到大气散射的影响,可以通过与其他波段的灰度值进行回归分析来校正,灰度值的校正结果 $q_{correct}(x_0, y_0)$ 为:

$$q_{correct}(x_0, y_0) = I_0(x_0, y_0)(1 - \lambda)q_0(x_0, y_0) \cdot q_B \quad (2)$$

式中, $q_0(x_0, y_0)$ 、 q_B 分别为初始遥感影像中像素点 (x_0, y_0) 位置上的灰度值、波段的标准灰度值^[13]。采用均值滤波处理方式,设定一个合适的滤波窗口,遍历整个影像中的每个像素,用窗口内所有像素值的平均值来替换窗口中心像素的原始值,这样就能够显著减少影像中的噪声,同时保留影像的主要特征和结构信息^[14]。影像增强处理目的是提高遥感影像的视觉效果,优化设计系统采用对比度增强处理方式,处理过程可以量化表示为:

$$q_{enhance}(x_0, y_0) = \frac{q_{correct}(x_0, y_0) - q_{min}}{255 \times (q_{max} - q_{min})} \quad (3)$$

式中,变量 q_{min} 和 q_{max} 分别为遥感影像中灰度的最小值和最大值。按照上述过程,将遥感影像的处理结果赋值给初始生成结果,将其记为 $I(x, y)$,将其作为配准系统的遥感影像处理对象。

2.2.2 结合数据处理器提取遥感影像特征点

遥感影像采集传感器存在平移、旋转等多变性,导致相同地物在不同影像中的位置存在偏移现象。特征点的提取能够帮助补偿这种几何变形的影响。当传感器旋转时,影像中的地物会发生角度变化,但某些特征点的相对位置关系在一定程度上可以反映这种变形。通过在不同影像中准确识别这些特征点,进而实现对影像的配准。DM642 型单核数字信号处理器在获取到采集器的影像数据后,其与其他硬件部件协同工作,展开特征点提取, HMC5883L 型号磁敏感角度传感器记录的运动状态数据会被用于辅助特征点提取过程中的几何校正等相关操作。如果由于传感器的旋转和平移导致影像存在几何变形,数据处理设备在提取特征点时可以利用 HMC5883L 型号磁敏感角度传感器的数据来调整算法参数,以更准确地提取特征点。

采用 Harris 算子提取方式,以采集并处理完成的遥感影像作为处理对象,提取遥感影像中的特征点,以此作为遥感影像的配准目标。Harris 算子通过设计一个局部检测窗口,在图像中移动该窗口并考察窗口内灰度值的变化。当窗口沿各个方向做微小移动时,如果窗口内的平均能量超过设定的阈值,则将该窗口的中心像素点视为特征点^[15]。在实际的遥感影像特征点提取过程中,首先利用公式(4)计算遥感影像中任意节点在水平和竖直方向上的梯度值。

$$\begin{cases} d_x = q_{enhance}(x_0, y_0)I(x+1, y) - I(x, y) \\ d_y = q_{enhance}(x_0, y_0)I(x, y+1) - I(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

对于遥感影像中的任意像素点构建一个 2×2 的自相关矩阵,构建结果如下:

$$K = \begin{bmatrix} d_x^2 & d_x d_y \\ d_x d_y & d_y^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: d_x^2 和 d_y^2 分别为像素点在 x 方向和 y 方向上的梯度平方, $d_x d_y$ 表示 x 方向和 y 方向梯度的乘积。根据自相关矩阵的构建结果,计算角点响应值,以此反映窗口内灰度值的变化情况。角点响应值的计算结果如下:

$$\chi = h_{det}(K) - \kappa_{exp}[h_{trace}(K)] \quad (6)$$

式中, κ_{exp} 为经验常数, $h_{det}()$ 和 $h_{trace}()$ 分别为行列式和矩阵迹求解函数。根据自相关矩阵的行列式和迹的平方差值的计算,判断角点特征是否存在^[16]。将角点响应值的计算结果 χ 与阈值 χ' 进行比较,如果角点响应值大于阈值,则将该点视为遥感影像的特征点,重复上述

操作, 实现遥感影像中所有像素点的判断与比较, 得出特征点的提取结果, 将其标记为 $\tau(x, y)$ 。

2.2.3 利用不规则三角网自动分割遥感影像

在遥感影像配准过程中, 正射投影图像会在矩形框顶点展开排序。不规则三角网自动分割可以更好地适应这种排序方式。与矩形分割相比, 不规则三角网分割后的三角形区域在正射投影图像的排序过程中可以提供更灵活的匹配单元。在矩形框顶点展开排序时, 三角形区域根据其顶点坐标等信息更精确地在不同影像间进行匹配, 避免了因矩形分割带来的在边缘区域匹配不准确以及几何畸变等问题, 有助于提高配准的精度。在 DM642 型单核数字信号处理器中运行基于不规则三角网的分割算法, 处理器中的图形处理器 (GPU, graphics processing unit) 能够执行这些大量的计算指令, 以实现自动分割。

为了将初始采集遥感影像分解为多个三角形区域, 以遥感影像特征点 $\tau(x, y)$ 为顶点构建不规则三角网, 在每个三角形区域内进行独立的仿射变换或其他几何变换, 从而更精确地纠正影像间的差异^[17]。不规则三角网的构建原理如图 6 所示。

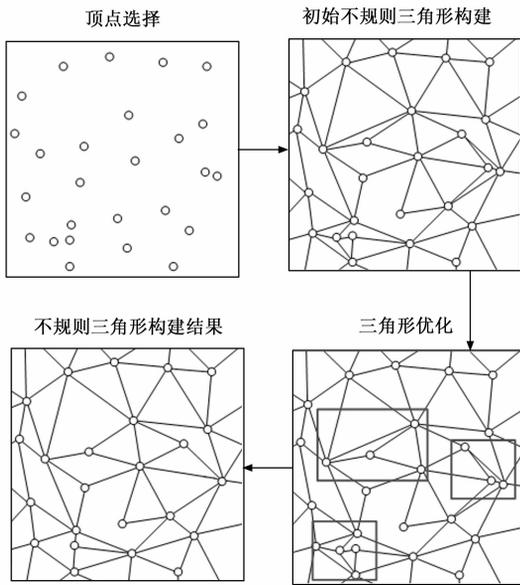


图 6 不规则三角网构建原理图

不规则三角网的构建包含顶点选择、三角形构建和调整 3 个步骤, 选择遥感影像中的特征点提取结果作为不规则三角网的顶点, 利用公式 (7) 计算任意特征点之间距离, 判断特征点是否能够连接在一起形成三角形。

$$l(\tau_i, \tau_j) = \chi \sqrt{\tau_i(x_i, x_j)^2 + \tau_j(y_i, y_j)^2} \quad (7)$$

其中: $\tau_i(x_i, y_i)$ 和 $\tau_j(x_j, y_j)$ 分别表示第 i 和第 j 个特征点的提取结果。根据距离计算结果, 判断特征点之

间是否满足 Delaunay 准则, 若满足说明第 i 和第 j 个特征点可以进行连接处理, 否则两特征点不进行连接。重复上述操作, 实现所有提取特征点的连接判断, 并形成形状良好、分布均匀的三角形网格, 记为 W 。在此基础上, 对初始构建的不规则三角形网络进行面积计算, 从而实现对构建三角形形状的评估, 由此判断是否需要调整初始构建的不规则三角形网络。不规则三角形网络的面积计算过程如下:

$$A = l(\tau_i, \tau_j) | x_{w1}(y_{w2} - y_{w3}) + x_{w2}(y_{w3} - y_{w1}) + x_{w3}(y_{w1} - y_{w2}) | \quad (8)$$

式中, (x_{w1}, y_{w1}) 、 (x_{w2}, y_{w2}) 和 (x_{w3}, y_{w3}) 分别表示构建不规则三角形的 3 个顶点坐标值。若计算得不规则三角形网络面积为正整数, 则无需对其进行调整, 否则无需执行调整操作^[18]。将构建好的不规则三角网以适当的数据格式存储, 并可以将其可视化表达。以构建不规则三角网的网格线为遥感影像的分割线, 分割过程可以表示为:

$$I_{\text{seg}}(x, y) = \frac{I(x, y)[y_{\text{seg}} : x_{\text{seg}}]}{A}, (x_{\text{seg}}, y_{\text{seg}}) \in W \quad (9)$$

式中, $[y_{\text{seg}} : x_{\text{seg}}]$ 为构建不规则三角网中的任意边, 记为遥感影像分割线。将遥感影像代入公式 (9) 中, 按照上述操作, 即可得出遥感影像的自动分割结果。

将 ENVI 作为基于不规则三角网的遥感影像自动配准软件系统的开发工具, 并通过多通道缓冲串口 (McBSP) 接口快速传输数据。在此基础上, 将硬件系统部分接入到软件系统中, 实现硬件与软件的协同运行。将遥感影像样本输入到优化设计系统的运行程序中, 即可得出基于不规则三角网的遥感影像样本自动配准结果, 如图 7 所示。

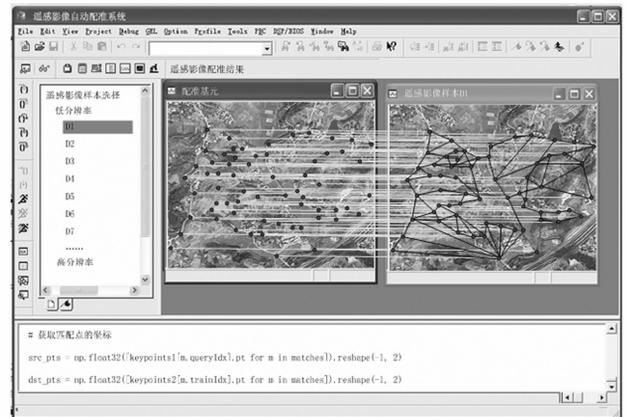


图 7 遥感影像自动配准系统输出界面

从图 7 结果中可知, 在处理包含复杂地物场景的遥感影像时, 系统能够准确识别和匹配影像中的特征点, 在处理因传感器平移或旋转导致的影像几何变形时, 系

统能够通过几何校正有效补偿这些变形,并构建合理的不规则三角网,从而实现高精度的配准。

2.2.4 实现遥感影像自动配准

由于地物场景多样以及影像采集传感器的平移和旋转多变,影像存在几何畸变。以分割的遥感影像为处理对象,粗配准首先对影像进行初步的调整,能够快速处理较大范围的偏移,将偏移较大的影像初步拉到一个相对接近的位置,为后续更精确的配准奠定基础。由于影像特征区域之间重叠覆盖程度高、可区分性差,粗配准后的影像仍然存在一定的误差。因此,精准匹配能够更精准地调整粗配准后影像之间的位置关系,从而实现系统的遥感影像自动配准功能。

遥感影像粗匹配的基本原理为:计算分割遥感影像特征点与选择配准基元之间的相似度,根据相似度与设置阈值之间的关系,判断特征点之间是否满足匹配标准^[19]。分割遥感影像中任意特征点与配准基元之间的相似度计算结果如下:

$$s = \frac{I_{\text{seg}}(x, y) \cdot \tau_j}{\|\tau_j\|} \quad (10)$$

式中, τ_j 为设定的配准基元,最终计算得出特征相似度取值若高于阈值 s' ,证明当前遥感影像子块中的特征点与配准基元相匹配,否则无需进行匹配操作,由此实现遥感影像的粗匹配操作。

遥感影像的精配准是在粗配准的基础上,进一步精确调整影像间的几何关系,使待配准影像与参考影像达到更程度的对齐。遥感影像的精配准处理过程如下:

$$I_f(x, y) = sf_0 + f_1 I(x) + f_2 I(y), I(x, y) \in I_{\text{wide}} \quad (11)$$

式中, f_0 、 f_1 和 f_2 均为仿射变换参数,通过最小二乘法等优化算法,利用匹配的特征点确定仿射变换参数的具体取值, I_{wide} 为粗匹配处理结果,将遥感影像的粗匹配处理结果代入公式(11)中,即可完成遥感影像的精配准功能。

尽管经过粗配准和精匹配,但由于影像的复杂性(如噪声、部分相似地物的误匹配等),仍然可能存在一些误配准的特点。这些误配准点会影响最终的配准结果,降低配准的准确性。因此,采用随机抽样一致算法,在每次迭代中,它随机选择一部分数据点作为样本集,并假设这些点是“良好”匹配点,即符合透视变换模型。然后,根据这个样本集计算模型参数,并将所有其他点按照它们与当前模型的兼容性分为支持点和反例点^[20]。支持点是与模型误差较小的点,而反例点则被视为误匹配点并被剔除。通过多次迭代,随机抽样一致算法能够逐渐逼近真实的匹配点集,从而实现误配准的剔除。

重复上述 3 个环节,实现遥感影像中所有像素点和特征点的精准配准,并将配准结果以可视化的形式输出,实现系统的自动配准功能。

3 系统测试

为了测试优化设计基于不规则三角网的遥感影像自动配准系统的配准功能和运行性能,设计系统测试实验。根据实验目的,将实验分成两个部分,在配准功能测试过程中,对准备的遥感影像样本进行配准,并对预期的配准结果进行记录,将系统输出的配准结果与预期数据进行比对,得出反映系统配准功能的测试结果。配准系统运行性能的测试主要是对系统的运行性能进行测试,最终通过与传统配准系统的对比,证明优化设计系统在配准功能和运行性能方面的优势。

3.1 准备遥感影像样本

根据遥感影像的分辨率、光谱范围、覆盖范围等需求,选择遥感卫星和无人机作为遥感平台,并将遥感设备安装在稳定的平台上,确保其在采集过程中能够保持水平、避免抖动。对于无人机平台,还需进行飞行前的校准和测试,确保飞行安全和数据采集质量。综合考虑遥感平台与成像目标之间的距离,选择可见光至短波红外作为光谱范围,覆盖 13 个波段,设置视场角和辐射分辨率分别为 120° 和 12 位,根据空气质量监测数据,在遥感影像样本生成过程中,气溶胶光学厚度为 0.2 mm,水汽含量约 2.5 g/m^3 ,样本影像采集数据格式为 GeoTIFF。初始遥感影像样本的生成情况如图 8 所示。



图 8 遥感影像样本示意图

根据遥感影像样本的采集参数,将生成的遥感影像样本分为低分辨率样本和高分辨率样本两个部分,两种类型样本的影像格式相同,分辨率分别为 480×800 和 $1\,920 \times 1\,080$ 。实验共准备 300 个遥感影像样本,高、低分辨率影像样本分别 150 个,并对准备样本进行编号处理。

3.2 配置遥感影像自动配准硬件系统

根据优化设计基于不规则三角网的遥感影像自动配准硬件系统的优化设计结果, 将相关硬件设备安装到实验环境中, 并保证安装设备与遥感平台之间距离不超过 2 km。

以硬件系统中的角度传感器为例, 用螺钉、螺母或压板固紧在电路板上, 传感器出轴与其他机件连接时, 确保轴心线保持在一直线上。按照上述方式实现遥感影像自动配准硬件系统中其他元件的安装, 完成安装与调试后, 进行必要的测试和验证, 确保设备性能符合要求。

3.3 设定不规则三角网技术运行参数

为保证性能不规则三角网技术能够在优化设计遥感影像自动配准系统中正常运行, 需要对不规则三角网技术的运行参数进行设定。设置不规则三角网输入栅格的范围为 1/10, 根据系统运行需求对三角网的 Z 容差进行调整。另外, 构建不规则三角网允许包含的最大点数为 200, 将上述参数的设定结果输入到系统的软件运行程序中。

3.4 设置系统测试实验指标

实验设置文献 [3] 的基于多维 Beltrami 正则化的图像配准系统和文献 [4] 的基于方向相位稠密特征的遥感影像配准系统作为实验对比, 在相同实验环境下完成对比系统的开发, 并得出相应的影像配准结果。

针对文献 [3] 方法在本实验中, 设置正则化项权重为 0.1, 迭代次数为 50 次, 寻找对应特征点时, 设定搜索半径为 10 像素。配准精度阈值为 0.01。在文献 [4] 方法, 设置特征提取窗口大小为 7×7, 特征匹配阈值为 0.8, 特征描述子的维度设置为 128, 配准变换模型为仿射变换。

此次实验从配准功能和系统运行性能两个方面设置测试指标, 配准功能的测试指标为正确配准点率, 该指标的测试结果为:

$$\eta = \left(\frac{n_s}{n_c} \right) \times 100\% \quad (12)$$

其中: n_s 和 n_c 分别为正确配准点个数和参与配准的特征点个数, 计算得出正确配准点率取值越大, 证明对应系统的配准功能越优。另外, 系统运行性能的测试指标为加速比, 该指标的测试结果如下:

$$\alpha = \frac{t_{\text{Serial}}}{t_{\text{parallel}}} \quad (13)$$

式中, t_{Serial} 和 t_{parallel} 分别为系统串行和并行运行过程所用的时间, 串行状态指的是系统在同一时间仅匹配一组遥感影像, 并行状态指的是系统同时匹配两组及以上遥感影像。计算得出系统加速比取值越大, 说明系统的运行性能越优。

3.5 系统测试实验结果与分析

3.5.1 低分辨率遥感影像配准功能测试实验结果

统计所有低分辨率遥感影像的输出结果数据, 得出系统配准功能的测试结果, 如表 2 所示。

表 2 低分辨率遥感影像配准功能测试数据表 个

遥感影像样本编号	参与配准特征点数量	基于多维 Beltrami 正则化的图像配准系统的正确配准点数量	基于方向相位稠密特征的遥感影像配准系统的正确配准点数量	基于不规则三角网的遥感影像自动配准系统的正确配准点数量
D1	68	61	63	68
D2	104	98	100	102
D3	228	221	224	225
D4	156	150	152	155
D5	135	127	130	133
D6	82	76	78	81
D7	113	104	110	112
D8	152	147	150	151

将表 2 中的数据代入公式 (12) 中, 计算得出基于多维 Beltrami 正则化的图像配准系统的平均正确配准点率为 93.7%, 基于方向相位稠密特征的遥感影像配准系统的平均正确配准点率为 95.9%, 基于不规则三角网的遥感影像自动配准系统的平均正确配准点率为 98.5%。由此可见, 优化设计系统在低分辨率遥感影像配准方面表现出更高的精度。

3.5.2 高分辨率遥感影像配准功能测试实验结果

提取系统输出的高分辨率遥感影像配准结果输出, 得出对应的测试结果, 如表 3 所示。

表 3 高分辨率遥感影像配准功能测试数据表 个

遥感影像样本编号	参与配准特征点数量 / 个	基于多维 Beltrami 正则化的图像配准系统的正确配准点数量	基于方向相位稠密特征的遥感影像配准系统的正确配准点数量	基于不规则三角网的遥感影像自动配准系统的正确配准点数量
G1	212	202	206	210
G2	198	190	192	197
G3	304	300	301	303
G4	258	251	254	256
G5	264	257	260	263
G6	196	191	193	195
G7	217	210	212	215
G8	275	266	270	273

通过公式 (12) 的计算, 得出基于多维 Beltrami 正则化的图像配准系统的平均正确配准点率为 96.5%, 基于方向相位稠密特征的遥感影像配准系统的平均正确配准点率为 97.8%, 基于不规则三角网的遥感影像自动配准系统的平均正确配准点率为 99.3%。这一结果表明, 优化设计系统在高分辨率遥感影像配准方面同样具有显著优势。

3.5.3 遥感影像配准系统运行性能测试实验结果

通过系统运行数据的统计与公式 (13) 的计算, 得出系统加速比的测试对比结果, 如图 9 所示。

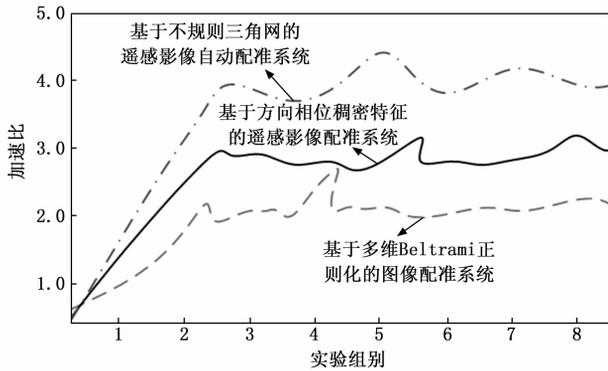


图 9 遥感影像配准系统运行性能测试结果

图 9 中表示的实验组别表示遥感影像配准系统的运行次数。从图 10 中可以看出, 3 种配准系统加速比的平均值分别为 2.0、2.5 和 3.3。这表明优化设计系统在运行性能方面优于其他两个对照组系统, 能够更高效地处理遥感影像配准任务。

综上所述, 通过本次系统测试实验, 验证了优化设计基于不规则三角网的遥感影像自动配准系统在配准功能和运行性能方面的优势。同时, 通过引入对照组系统并详细描述其设计及参数设置, 增强了实验结果的可信度和说服力。

4 结束语

遥感影像自动配准系统的出现极大地提高了遥感影像处理的效率和精度, 降低了人工配准的成本和难度。该系统在灾害防控、环境监测、资源勘探等众多领域都具有广泛的应用前景, 为遥感技术的推广和应用提供了有力的支持。在此次研究中, 通过不规则三角网技术的应用, 有效提升系统的遥感影像分割效果, 进而提升系统的配准功能, 对于提高遥感影像的应用价值具有积极意义。

参考文献:

[1] 秦川, 高翔. 基于卷积神经网络的遥感图像目标识别仿真 [J]. 计算机仿真, 2024, 41 (4): 274-278.
 [2] 朱柏, 叶沅鑫. 多模态遥感图像配准方法研究综述 [J]. 中国图象图形学报, 2024, 29 (8): 2137-2161.
 [3] HUANG C, CHEN K, HUANG M, et al. Topology-preserving image registration with novel multi-dimensional Beltrami regularization [J]. Applied Mathematical Modelling, 2024, 125: 539-556.
 [4] 叶沅鑫, 王蒙蒙, 杨超, 等. 基于方向相位稠密特征的多传感器遥感影像配准方法和系统 [J]. 遥感学报, 2024, 28 (6): 1525-1538.

[5] 薛庆, 杨树文, 闫恒, 等. 基于 SIFT 与互信息筛选优化的遥感影像配准 [J]. 遥感技术与应用, 2022, 37 (5): 1209-1216.
 [6] 王密, 樊仲黎, 皮英冬, 等. 一阶高斯方向可调滤波器引导的多源卫星遥感影像配准方法 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2024, 49 (5): 681-690.
 [7] 陈世伟, 夏海, 杨小冈, 等. 基于风格迁移不变特征的 SAR 与光学图像配准算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44 (5): 1536-1542.
 [8] 储光涵, 范大昭, 董杨, 等. 结合图论的异源影像点云配准方法 [J]. 光学学报, 2023, 43 (12): 264-272.
 [9] 闫恒, 杨树文, 薛庆, 等. 基于边缘特征的多源高分辨率影像配准 [J]. 遥感技术与应用, 2022, 37 (5): 1259-1266.
 [10] 赵卫东, 刘俊德, 王慢慢, 等. 基于改进 AKAZE 算法的快速图像配准方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60 (6): 90-96.
 [11] 张永军, 王梦欣, 万一, 等. 高分七号卫星影像融合中的全色-多光谱配准误差补偿模型 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2023, 48 (7): 1029-1038.
 [12] 高莎, 袁希平, 甘淑, 等. 集成 SIFT 算法与检测模型优化的 UAV 影像匹配方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42 (5): 1497-1503.
 [13] 王丽娜, 梁怀丹, 王中石, 等. 面向可见光和 SAR 影像配准的特征点检测 [J]. 光学精密工程, 2022, 30 (14): 1738-1748.
 [14] 金利强, 黄桦, 刘微微. 利用 Zernike 多项式的 LiDAR 点云和光学影像配准方法 [J]. 测绘科学, 2022, 47 (10): 124-131.
 [15] 范光宇, 宫宇宸, 饶蕾, 等. 基于灰度相似性的激光点云与全景影像配准 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2022, 56 (8): 1633-1639.
 [16] 刘金成, 郭义军, 曾嘉, 等. 基于树冠最高点和地面树干中心的森林影像点云配准方法 [J]. 农业工程学报, 2024, 40 (15): 127-134.
 [17] 黄磊, 朱柏, 游晋卿, 等. 利用稠密结构特征的航空影像与 LiDAR 数据配准 [J]. 遥感信息, 2023, 38 (1): 56-62.
 [18] 温育杜, 郭士增, 刘晟, 等. 基于尺度配准的航拍图像与卫星影像匹配方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55 (10): 19-26.
 [19] 王龙号, 蓝朝楨, 姚富山, 等. 多源遥感影像深度特征融合匹配算法 [J]. 地球信息科学学报, 2023, 25 (2): 380-395.
 [20] 于丰华, 赵丹, 郭忠辉, 等. 水稻分蘖期无人机高光谱影像混合像元特征分析与分解 [J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42 (3): 947-953.