

## 基于误差分析的岩芯高光谱数据几何校正方法

姜宇<sup>1</sup>, 李娜<sup>1\*</sup>, 孟令杰<sup>2</sup>, 蔡辉<sup>3</sup>, 巩学美<sup>1</sup>, 赵慧洁<sup>1</sup>

- (1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191; 2. 国家航天局对地观测与数据中心, 北京 100101;  
3. 中国人民解放军 96901 部队, 北京 100094)

**摘要:** 南京地质调查中心研制的推扫式岩芯成像光谱仪由可见近红外成像光谱仪、短波红外成像光谱仪以及载有岩芯盘的导轨构成。导轨匀速运动的控制误差、两台独立成像光谱仪不同的空间分辨率不同以及不重合的视场范围, 导致所获得的数据存在几何畸变, 无法直接进行应用处理。针对上述问题, 在分析了畸变产生机理的基础上, 提出了基于三角形靶标的拉伸压缩畸变校正方法以及像元级与亚像元级联合配准方法。通过在岩芯盘一侧布设等腰直角三角形靶标, 实现无位置姿态参数下的几何拉伸压缩畸变检测与校正; 同时将尺度不便特征变化与扩展的相位相关方法相结合进行图像配准, 提高图像配准的精度。实验结果表明, 利用南京地质调查中心研制的岩芯成像光谱仪的实测高光谱数据进行方法性能验证, 经过几何校正处理后的岩芯高光谱数据, 拉伸压缩畸变校正精度为 0.28 个像元, 配准精度优于 0.1 个像元。

**关键词:** 岩芯成像光谱仪; 几何校正; 图像配准

**中图分类号:** TP751.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0526004

## Geometric correction method of core hyperspectral data based on error analysis

Jiang Yu<sup>1</sup>, Li Na<sup>1\*</sup>, Meng Lingjie<sup>2</sup>, Cai Hui<sup>3</sup>, Gong Xuemei<sup>1</sup>, Zhao Huijie<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Education Ministry of Precision Opto-mechatronics Technology, School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;  
2. Center of Earth Observation and Data, China National Space Administration, Beijing 100101, China;  
3. The 96901 Unit of PLA, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The core imaging spectrometer developed by Nanjing Center of China Geological Survey consisted of a visible near infrared (VNIR) imaging spectrometer, a short wave infrared (SWIR) imaging spectrometer and a guide railway on which the core plate was mounted. The control accuracy of the uniform-speed moving guide railway and the different spatial resolutions and fields of view (FOV) of the VNIR imaging spectrometer and the SWIR imaging spectrometer caused geometric distortions on the core data. So the data obtained cannot be directly used for subsequent applications. In the face of these

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-01-20

基金项目: 国家重大仪器专项(2012YQ05250, 2016YFF0103604); 国家重大研发计划(2016YFB0500505); 高分五号卫星应用共性关键技术(04-Y20A35-9001-15/17, 04-Y20A36-9001-15/17)

作者简介: 姜宇(1988-), 男, 博士生, 主要从事高光谱遥感数据预处理方面的研究。Email: jiangyu@buaa.edu.cn

导师简介: 赵慧洁(1966-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事高光谱数据预处理与应用处理方面的研究。Email: hjzhao@buaa.edu.cn

potential problems, on the basis of analysis error mechanism, geometric correction method based on the triangle calibration and joint image registration method of pixel and sub-pixel level were proposed. By setting triangle calibration target on one side of a core plate, geometric stretch and compression distortion was detected and corrected. By introducing scale invariant feature transform and extensible phase correlation, registration accuracy was improved. Experimental results using core hyperspectral data produced by Nanjing Center of China Geological Survey show that this improved geometric correction method can achieve a stretch and compression correction accuracy of 0.28 pixel and registration accuracy better than 0.1 pixel.

Key words: core imaging spectrometer; geometric correction; image registration

## 0 引言

通过钻井取心的方法获得岩芯,是地质岩性、物性研究的重要手段。随着高光谱成像技术的不断发展,利用高光谱成像仪所获得的岩芯成像光谱图像进行地质分析研究已经逐渐成为行业趋势<sup>[1]</sup>。高光谱数据具有图谱合一的特性,既能体现岩芯的空间信息,又包含了丰富的岩芯辐射及光谱信息,更有利于岩芯数据的精确分析,也推进了岩芯数据的数字化存储<sup>[2]</sup>。

近年来,澳大利亚和加拿大分别启动了 Online Drilling 与 Deep Search 研究项目,对深层岩芯开展光谱测量<sup>[3-4]</sup>;在国内,中科遥感公司、中国地质调查局油气资源调查中心等单位引进了澳大利亚 Hylogger 高光谱岩芯扫描仪开展岩芯高光谱数据研究。此外,南京地质调查中心依托国家仪器重大专项“岩芯光谱扫描仪研发与产业化”,面向我国深部找矿、资源勘查等战略需求,研发了自主知识产权的岩芯成像光谱仪。但是国内在岩芯高光谱数据预处理方面还处于起步阶段。

在岩芯高光谱数据获取过程中,受其高光谱成像仪工作方式、光学系统误差以及扫描平台机械运动精度等内外因素的影响,所获得的原始岩芯高光谱数据存在不同类型的几何畸变,无法被用户直接使用,因此必须要对岩芯成像光谱数据进行几何校正处理<sup>[5]</sup>。

但是针对南京地质调查中心研制的推扫式岩芯成像光谱仪,由于其特殊的推扫成像过程以及短波红外可见红外相互分离的光学系统设计,产生了两个现有几何校正方法无法解决的问题:(1) 装载岩芯盘的导轨在运动过程中,控制系统存在系统误

差,导致岩芯盘出现非匀速运动,进而使所获得的数据图像产生几何上的拉伸或压缩畸变,但是由于缺少姿态位置信息,现有几何校正算法无法对上述畸变进行处理;(2) 推扫式岩芯成像光谱仪短波红外与可见近红外光学系统相互分离,即可见近红外波段与短波红外波段分区域、分时成像,所获得数据的空间分辨率、视场范围都不相同,现有图像配准方法无法满足此类情况下的岩芯高光谱数据应用精度要求。

针对上述问题,文中开展了岩芯成像光谱仪数据几何校正技术研究。在对畸变、误差进行建模分析的基础上,提出了基于三角靶标的几何畸变校正方法以及像元级与亚像元级联合配准方法。通过在岩芯盘边缘布设等腰直角三角形靶标,提取三角形长边并检测长边斜率与两腰长度来判断扫描行是否出现拉伸压缩畸变,进而对畸变处进行校正;同时将尺度不便特征变化与扩展的相位相关方法相结合进行图像配准,只利用图像的相位信息,抗光照变化能力强,提升了图像配准的精度。

## 1 岩芯高光谱数据误差分析与几何校正建模

### 1.1 基于三角形靶标的几何畸变校正方法

岩芯成像光谱仪采用推扫成像的方式(如图 1 所示)。载荷固定在导轨上方的机械架中,装有岩芯柱的岩芯盘放置在载荷下方的导轨上。理想状态下,导轨带动岩芯盘沿载荷沿轨方向匀速运动(图 1 中从 A 处移动到 B 处),载荷对正下方成像区域内岩芯盘数据进行采集,通过岩芯盘与载荷的相对运动,实现推扫成像。

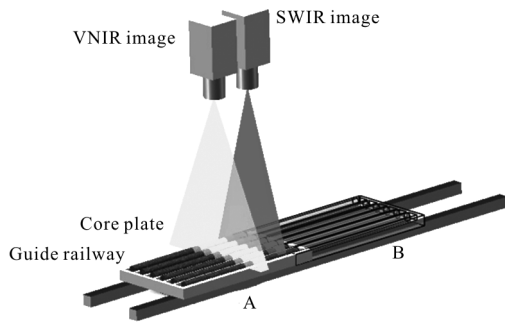


图 1 岩心成像光谱仪

Fig.1 Core imaging spectrometer

但是由于导轨实际运动中速度控制模块的系统误差及随机误差的影响,岩芯盘在载荷成像区域的运动有时会出现非匀速。当岩芯盘运动速度变快,产生几何压缩畸变;当岩芯盘运动速度变慢,产生几何拉伸畸变。由于岩芯盘在运动过程中并未装载任何速度测量装置,因此无法直接获得由速度异常所产生的几何畸变区域。基于这种情况,文中提出了基于三角形靶标的几何畸变检测与校正方法,通过识别岩芯盘一侧的等腰直角三角形靶标斜边的直线变化情况,进而判断岩芯盘数据的拉伸压缩情况(如图 2 所示)。

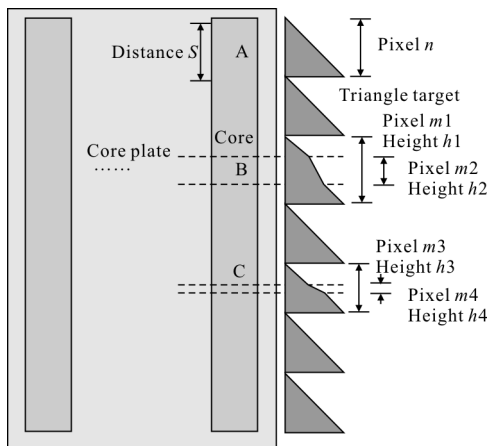


图 2 三角形靶标示意图

Fig.2 Diagram of triangle calibration target

无几何拉伸压缩畸变下,等腰直角三角形靶标(图 1 中 A 处)的腰长像元数为  $n$ ,实际长度为  $S$ ;B 处岩芯出现了拉伸畸变,此处靶标三角形占  $m_1$  个像元,实际高度为  $h_1$ ,畸变处占  $m_2$  个像元,畸变处高度为  $h_2$ ;C 处岩芯出现了压缩畸变,此处靶标三角形占  $m_3$  个像元,高度为  $h_3$ ,畸变处占  $m_4$  个像

元,畸变处高度为  $h_4$ 。由于三角形靶标为等腰直角三角形,因此可以根据等腰三角形以及相似三角形进行判断及处理。

B 处像元数  $m_1 > n$ ,即出现了拉伸畸变。通过对三角形斜边直线检测<sup>[6-7]</sup>,可以获得畸变的起始位置,因此可以获得畸变处的畸变量  $m_2$ ,而畸变处的正常像元数应为  $\Delta m = m_1 - n$ 。根据相似三角形规则,可以获得畸变处等腰直角三角形真实高度:

$$\Delta h = \frac{S}{n} (m_1 - n) \quad (1)$$

在获得真实高度  $\Delta h$  后,就可以将畸变区域由当前的  $h_2$  高度通过仿射变换还原为  $\Delta h$ ,则三角形靶标所对应的横向岩芯区域数据,也得到了校正。

同理,当 C 处出现压缩畸变时,满足像元数  $m_3 < n$ ,通过对三角形斜边直线检测,可以获得畸变的起始位置,因此可以获得畸变处的畸变量  $m_4$ ,而畸变处的正常值应为  $\Delta m = n - m_3$ 。根据相似三角形规则,可以获得畸变处等腰直角三角形真实高度:

$$\Delta h = \frac{S}{n} (n - m_3) \quad (2)$$

在上述核心算法的基础上,结合三角形边缘检测、直线检测等图像处理基本算法,设计了基于三角形靶标的几何畸变检测与校正基本流程,如图 3 所示。

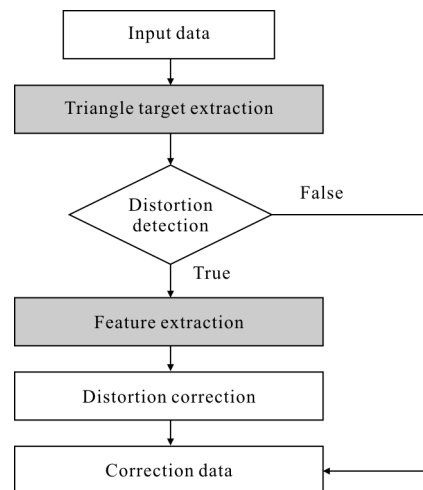


图 3 基于三角形靶标的几何畸变检测与校正算法

Fig.3 Detection and correction algorithm of geometric distortion based on triangle calibration target

首先输入原始岩芯成像光谱数据,接着提取图像中三角形靶标区域,对三角形靶标区域进行畸变

搜索,如果未出现畸变,则证明该图像在成像过程中没有出现几何拉伸压缩畸变;若该区域出现了畸变,则提取畸变特征点,确定校正的畸变区域,获得待校正区域高度与实际高度,进行仿射变换,最后再将图像合成,得到校正后的岩芯高光谱图像。

### 1.2 像元级与亚像元级联合配准方法

岩芯成像光谱仪的可见近红外与短波红外数据分别由两套光学成像系统获得。可见近红外相机与短波红外相机平行放置,相机间间隔一定距离,具有不同的成像视场与分辨率(如图 1 所示)。当载有岩芯盘的导轨进行正向移动移动时(图 1 中由 A 处移动至 B 处),由可见近红外相机对岩芯盘进行扫描成像;随后,导轨反向移动并回到原点(图 1 中由 B 处移动至 A 处),移动过程中由短波红外相机对岩芯盘进行扫描成像。通过一次正向移动与一次反向移动,实现岩芯数据从可见近红外到短波红外的采集。通过这种方式获得的岩芯数据,在可见近红外与短波红外波段上图像方向相反,视场大小不同、分辨率也不同,无法直接将数据合并,影响后期的数据应用处理。因此,在几何校正过程中必须要对原始高光谱数据进行配准处理。

遥感图像配准的方法大致可分为基于遥感图像灰度信息与基于空间特征信息两类<sup>[8-9]</sup>。基于灰度信息的配准方法鲁棒性差,具有一定的局限性,基于空间特征的匹配方法具有较高的配准精度。但是由于岩芯成像光谱仪所获取的数据分辨率较高,单纯基于空间特征进行可见近红外与短波红外数据的配准难以满足数据精确要求。针对上述问题,文中提出了一种像元级与亚像元级联合配准方法,算法流程如图 4 所示。

由于可见近红外数据与短波红外数据成像区域重合度较高,具有较多的匹配特征点,因此首先对可见近红外数据与短波红外数据进行尺度不变特征变换 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT) 变换<sup>[10-14]</sup>,将可见近红外数据以短波红外数据的空间分辨率进行重采样,获取具有同名特征点的公共区域。

像元级粗配准后的图像,不同区域仍然具有不同的亚像元失配误差,因此需要对图像分区域采用扩展相位相关法,进行亚像元级精校正<sup>[15-16]</sup>。由于

同一像元在可见近红外与短波红外波段的反射率不同,为了减少像元亮暗关系对配准精度的影响,选择灰度相关性较好的 10 个波段数据,分别进行最小噪声分离变换 (Minimum Noise Fraction Rotation, MNF) 得到参考图与待配准图,划分图像块作为计算窗口。

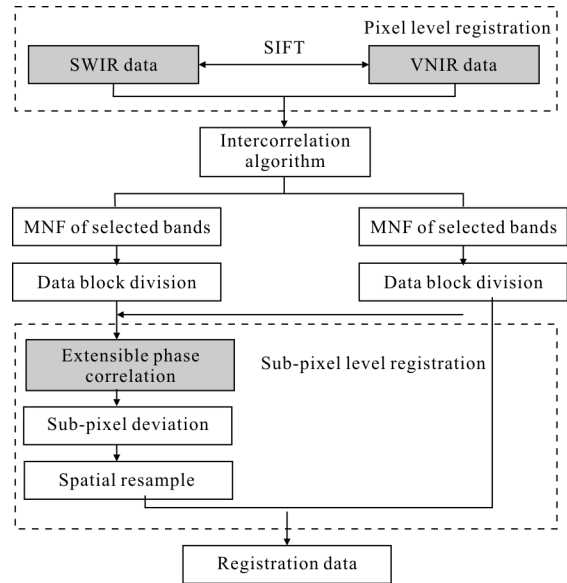


图 4 像元级与亚像元级联合配准算法

Fig.4 Joint image registration method of pixel and sub-pixel level

采用扩展的相位相关方法进行亚像元配准,令可见近红外数据块  $f_{v_m} = f(x_m, y_m)$ , 其傅里叶变换为  $FV_m$ ; 短波红外数据块  $f_{s_m} = f(x_m - \Delta x_m, y_m - \Delta y_m)$ ,  $\Delta x_m$  与  $\Delta y_m$  分别表示短波红外数据块中心在  $x$  轴与  $y$  轴方向的失配量, 其傅里叶变换为  $FS_m$ 。则可见近红外与短波红外数据块的互功率谱为:

$$P(u_m, v_m) = FS_m \cdot \overline{FV_m} \cdot \frac{1}{|FS_m \cdot \overline{FV_m}|} \quad (3)$$

其相位相关函数为:

$$C(x_m, y_m) = F^{-1} \left( FS_m \cdot \overline{FV_m} \cdot \frac{1}{|FS_m \cdot \overline{FV_m}|} \right) \quad (4)$$

用 sinc 函数在峰值邻域进行拟合:

$$C_{\eta}(x_m, y_m) = \alpha_m \frac{\sin \pi(x_m - \Delta x_m)}{\pi(x_m - \Delta x_m)} \cdot \frac{\sin \pi(y_m - \Delta y_m)}{\pi(y_m - \Delta y_m)} + \eta(x_m, y_m) \quad (5)$$

式中:  $\alpha_m$  为相关系数;  $\eta(x_m, y_m)$  为噪声, 噪声项可视为常量。则  $C_{\eta}(x_m, y_m)$  在  $x$  轴与  $y$  轴方向上分离变量:

$$C_{\eta}(x_m) = \alpha_{xm} \frac{\sin \pi(x_m - \Delta x_m)}{\pi(x_m - \Delta x_m)} + \gamma_{xm}$$

$$C_{\eta}(y_m) = \alpha_{ym} \frac{\sin \pi(y_m - \Delta y_m)}{\pi(y_m - \Delta y_m)} + \gamma_{ym} \quad (6)$$

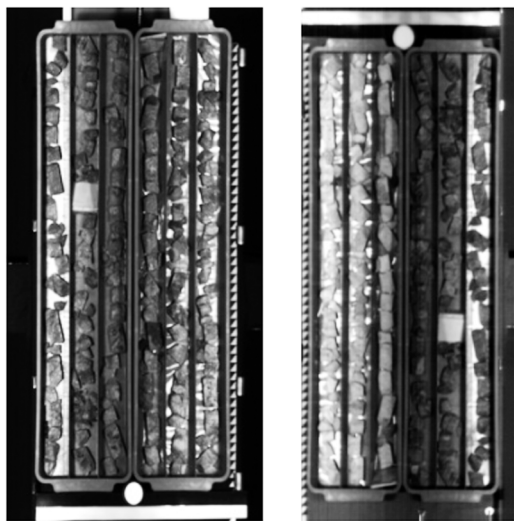
通过最小二乘法确定系数  $\alpha_m$ 、 $\Delta x_m$ 、 $\Delta y_m$  以及  $\gamma_m$ 。

在此基础上,进行空间重采样计算。根据图像块中心点亚像素失配量,采用三次样条插值得到每个像元的失配量。对短波红外通道子视场所有波段空间重采样,进行视场拼接和波段融合,实现双通道图像配准,得到从可见近红外到短波红外连续波长范围的高光谱图像。

## 2 实验验证与分析

### 2.1 实验数据

实验采用的数据由南京地质调查中心研制的推扫式岩芯成像光谱仪获得,数据图像如图 5 所示。



(a) 可见近红外数据 (a) VNIR data  
(b) 短波红外数据 (b) SWIR data

图 5 岩芯高光谱实验数据

Fig.5 Core hyperspectral experimental data

由图 5 可以看出,可见近红外数据与短波红外数据中的三角形靶标有明显的拉伸压缩畸变,且数据的视场大小与空间分辨率各不相同,图像方向相互倒置,无法直接进行数据合并,获得从可见近红外到短波红外连续的光谱信息。

### 2.2 基于三角形靶标的几何畸变校正方法实验分析

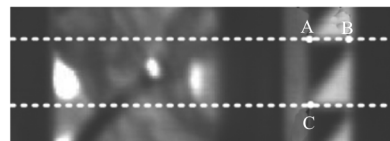
以可见近红外数据为例,首先对数据进行边缘检测,提取图像中三角形靶标,并提取三角形斜边,在获取三角形靶标基础上,以三角形靶标的腰长对岩芯盘进行纵向划分,分区域进行处理(如图 6 所示)。实验中,岩芯盘一侧共包含 50 个三角形靶标,共识别出 50 个三角形斜边,识别率为 100%。对原始可见近红外数据按三角形靶标进行分割,每个数据块包含且仅包含一个等腰直角三角形靶标,对分割后的高光谱岩芯数据逐块进行拉伸压缩畸变检测与校正。



图 6 岩芯高光谱数据分割

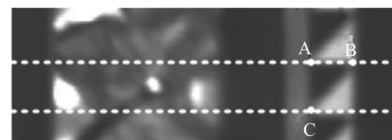
Fig.6 Division of core hyperspectral data

以第 47 块三角形靶标数据块为例,如图 7(a) 所示。A、B、C 三个点为所检测出三角形靶标的 3 个角点,A 点在原图像中坐标为 (891, 1 282),B 点在原图像中坐标为(909, 1 282),C 点在原图像中坐标为(891, 1 305)。AC 间距为 23 个像元,AB 间距为 18 个像元。由于实际靶标为等腰直角三角形,且成像过程中水平方向上系统误差较小,因此该数据块在成像过程中出现了几何拉伸,产生了 5 个像元的拉伸畸变量。



(a) 几何拉伸畸变数据块

(a) Core data block of geometric stretch distortion



(b) 几何拉伸畸变校正后数据块

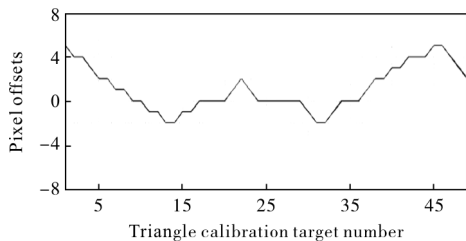
(b) Core data block after geometric stretch distortion correction

图 7 第 47 块三角形靶标数拉伸压缩畸变处理

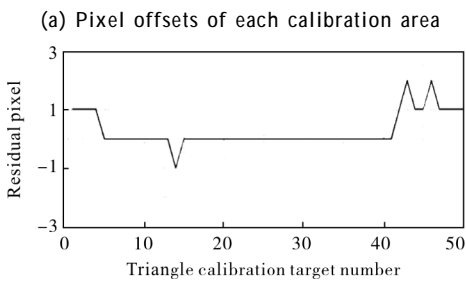
Fig.7 Stretch and compression distortion correction of No.47 triangle calibration target

经过几何拉伸畸变处理后数据块如图 7 (b) 所示, 校正后的靶标三个角点, A 点在原图像中坐标为(891,1 038), B 点在原图像中坐标为(909,1 038), C 点在原图像中坐标为(891, 1 055)。AB 与 AC 间距都是 18 个像素, 校正后靶标为等腰直角三角形, 消除了拉伸畸变。

对原始可见近红外数据进行拉伸压缩畸变检测, 所获得各个靶标区域内的像素几何偏移量如图8(a)所示。在成像开始和结束阶段, 由于导轨具有一定的加速度, 偏移像素量较大; 在成像过程中, 由于导轨的颤振会产生随机偏移量。像素偏移范围为-2~5个像素, 平均偏移量为 1.74 个像素。在此基础上进行拉伸压缩畸变校正处理, 通过对比各数据块所对应的三角形靶标两腰长像素进行比较, 获得靶标的几何拉伸压缩畸变校正残余误差(如图 8(b)所示), 进而计算得到岩芯高光谱数据的几何拉伸压缩畸变校正精度为 0.28 个像素。



(a) 各靶标区域内像素偏移量



(b) 几何拉伸压缩畸变校正后残余误差

(b) Residual error of geometric stretch and compression distortion correction

图 8 几何拉伸压缩畸变校正精度分析

Fig.8 Accuracy analysis of geometric stretch and compression distortion correction

### 2.3 像素级与亚像素级联合配准方法实验分析

对经过几何拉伸压缩畸变校正后的岩芯数据进行岩芯盘提取, 获得岩芯盘内岩芯的高光谱数据图像。基于 SIFT 算法对可见近红外与短波红外数

据进行特征点提取与匹配, 获得的特征点匹配结果如图 9 所示。

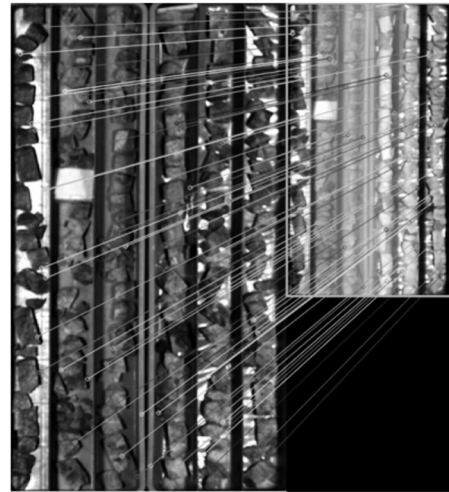


图 9 可见近红外与短波红外岩芯数据特征点匹配

Fig.9 Feature points matching of VNIR and SWIR core data

由于可见近红外与短波红外在成像时, 成像角度与成像高度并未发生变化, 在两次扫描过程中, 岩芯盘并未发生变化, 所存在的拉伸压缩畸变也已经被消除, 因此降低了特征点检测的难度, 通过 SIFT 算法可以获得精确的匹配特征点对, 进而计算出可见近红外到短波红外的变换矩阵  $H$  如下。

$$H = \begin{bmatrix} 0.599 & -1.787 \times 10^{-6} & -0.267 \\ -8.986 \times 10^{-5} & 0.599 & -0.085 \\ -1.411 \times 10^{-7} & -7.867 \times 10^{-8} & 1 \end{bmatrix}$$

在此基础上, 将可见近红外数据通过仿射变换, 对可见近红外与短波数据进行粗配准。

经过粗配准后, 可见近红外与短波红外数据大小为 264 pixel×575 pixel, 分别进行 MNF 变换。数据分块的细化度越高, 所获得的失配量精度越高, 但对应的运算效率越低。综合考虑算法精度与运算效率, 将数据分为 22×53 块, 依据扩展的相位相关匹配方法, 计算各数据块中心的亚像素失配量, 所获得的失配向量如图 10 所示。

由计算结果可知, 分割后的岩芯数据块在列方向上的亚像素失配量范围为 -0.493~0.498 pixel, 行方向上的亚像素失配量为 -0.493~0.763 pixel。根据图像块中心点亚像素失配量, 采用三次样条插值得到每个像素的失配量, 进而对可见近红外数据

进行空间重采样,获得精确配准后包含可见近红外到短波红外连续光谱信息的高光谱数据。经过像元级与亚像元级联合配准方法处理后的岩芯高光谱数据如图 11 所示。

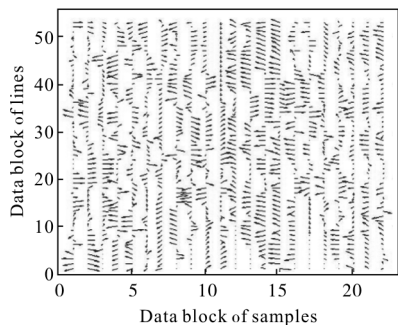
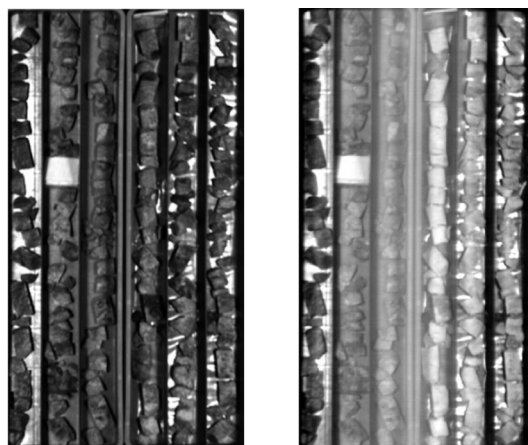


图 10 可见近红外与短波红外岩芯数据亚像元失配量  
Fig.10 Sub-pixel level mismatch vector of VNIR and SWIR core data



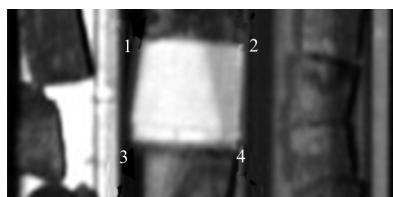
(a) 可见近红外岩芯数据 (450 nm) (b) 短波红外岩芯数据 (1 303 nm)

(a) VNIR core data(450 nm) (b) SWIR core data(1 303 nm)

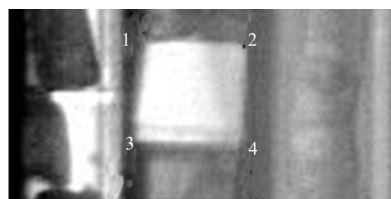
图 11 像元级与亚像元级联合配准后岩芯高光谱数据

Fig.11 Core hyperspectral data after joint image registration of pixel and sub-pixel level

在配准后的可见近红外与短波红外数据中,选取 6 个明显的特征目标(部分特征目标如图 12 所



(a) 可见近红外数据中特征目标  
(a) Feature points in VNIR data



(b) 短波红外数据中特征目标  
(b) Feature points in SWIR data

图 12 可见近红外与短波红外数据特征目标配准对比

Fig.12 Comparison of feature targets registration between VNIR and SWIR data

示),选择特征目标周围 3×3 邻域窗口,利用灰度值加权求质心,作为特征点的几何位置。对比可见近红外与短波红外对应地物的几何坐标(如表 1 所示),可知经过像元级与亚像元级联合配准后的可见近红外数据与短波红外数据几何误差小于 0.1 个像元。

表 1 特征目标几何位置误差

Tab.1 Geometric position errors of feature targets

Point	Coordinates of VNIR	Coordinates of SWIR	Error/pixel
1	(49.32, 195.18)	(49.25, 195.14)	0.081
2	(81.49, 193.54)	(81.50, 193.48)	0.061
3	(45.07, 219.44)	(45.16, 219.47)	0.092
4	(82.57, 230.47)	(82.55, 230.49)	0.082
5	(224.47, 350.49)	(224.42, 350.46)	0.058
6	(165.51, 83.52)	(165.46, 83.51)	0.051

### 3 结论

针对南京地质调查中心研制的岩芯高光谱成像仪,基于误差机理建模,开展了数据几何校正方法研究,提出了基于三角形靶标的几何畸变校正方法和像元级与亚像元级联合配准方法,并利用成像光谱仪采集的岩芯数据进行了实验分析与验证。实验结果表明,在高光谱成像仪成像过程中,产生了几何拉伸或压缩畸变,每个靶标区域内的像元偏移范围为-2~5 个像元,平均偏移量为 1.74 个像元,经过几何拉伸压缩畸变校正处理后的校正精度为 0.28 个像元。在此基础上基于尺度不变特征变换进

行特征点提取,实现像元级的粗配准。利用扩展的相位相关法对配准后的数据进行亚像元级失配量计算,获得列方向的失配量范围-0.493~0.498、行方向失配量范围-0.493~0.763。对失配量进行补偿,进而获得精确配准后包含可见近红外到短波红外连续光谱信息的高光谱数据。配准后高光谱数据的配准误差小于 0.1 个像元。下一步,将结合成像光谱仪成像机理开展辐射校正算法研究,形成完整的岩芯高光谱数据预处理方法。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Guotian. Principle and image acquisition of core imaging technology[J]. *Mud Logging Engineering*, 2013, 24(2): 37-40. (in Chinese)
- [2] Tong Qingxi, Zhang Bin, Zheng Lanfen. *Hyperspectral Remote Sensing*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [3] Xiu Liancun, Zheng Zhizhong, Yin Liang, et al. Research on assessment methods of spectrum data quality of core scan [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(8): 2352-2356. (in Chinese)
- [4] Guanter L, Kaufmann H, Segl K, et al. The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for earth observation[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(7): 8830-8857.
- [5] Zhao Yingshi. *Analysis Principle and Method of Remote Sensing Application* [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd, 2013. (in Chinese)
- [6] Sun Fengrong, Liu Jiren. Fast hough transform algorithm[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2001, 24(10): 1103-1109. (in Chinese)
- [7] Tang Qingju, Liu Junyan, Wang Yang, et al. Infrared image edge recognition and defect quantitative determination based on the algorithm of fuzzy C-means clustering and Canny operator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0928001. (in Chinese)
- [8] Gao Ya, Zhou Jialin, Hou Xue, et al. Registration algorithm for hyperspectral image based on Gaussian fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S2): S223002. (in Chinese)
- [9] Li Y, Chen Y, Xue Z, et al. A new method for automatic fine registration of multi-spectral remote sensing images[C]// 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2015: 4829-4831.
- [10] Zhang Jiadong, Li Na, Zhao Huijie, et al. Automatic geometric precision correction of hyperspectral data based on SIFT feature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2414-2420. (in Chinese)
- [11] Li Yufeng, Li Guangze, Gu Shaohu. Image mosaic algorithm based on area blocking and SIFT [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1197. (in Chinese)
- [12] Zhao Aigang, Wang Hongli, Yang Xiaogang, et al. Compressed sense SIFT descriptor mixed with geometrical feature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1085-1091. (in Chinese)
- [13] Qi Bingjie, Liu Jinguo, Zhang Boyan, et al. Research on matching performance of SIFT and SURF algorithms for high resolution remote sensing image [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 331-339. (in Chinese)
- [14] Chen Yue, Zhao Yan, Wang Shigang. Fast image stitching method based on SIFT with adaptive local image feature[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 415-422. (in Chinese)
- [15] Li Fangbiao, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Sub-pixel image registration based on super resolution reconstruction [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 477-484. (in Chinese)
- [16] Wang Yun, Yan Changxiang. Sub-pixel image registration of spectrometer images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 661-667. (in Chinese)