

文章编号 1004-924X(2012)03-0661-07

光谱仪图像的亚像素配准

王 运^{1,2*}, 颜昌翔¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对超光谱成像遥感存在的光谱仪图像间失配变形,影响地物目标光谱信息纯度的问题,提出了一种结合超光谱图像特点的亚像素配准方法来校正图像间的失配变形。首先,对待配准的可见光近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)光谱仪图像分别进行波段选择和主成分变换,将变换后的第一主分量图像作为待配准图像。然后,将待配准图像均匀划分为具有一定重叠率的图像块,利用相位相关方法估计对应图像块的亚像素平移参数,通过相位相关系数剔除错误的平移参数估计生成图像的光流场。最后,通过光流场来实现光谱仪图像的配准。实验结果显示,该方法配准精度优于0.1 pixel,满足超光谱图像后续处理对配准精度的要求。

关键词:超光谱图像;图像配准;亚像素配准;相位相关

中图分类号: TP391.4; TP751.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122003.0661

Sub-pixel image registration of spectrometer images

WANG Yun^{1,2*}, YAN Chang-xiang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: qingyun2007@163.com

Abstract: For the inherent misregistration between the two sets of spectral bands and its effect on the spectral purity of each pixel hyperspectral imagery, a sub-pixel image registration method was proposed based on the characteristic of the hyperspectral imagery. Firstly, band selection and principal component transformation were used to process the Visible Near Infrared (VNIR) and Short Wave Infrared (SWIR) spectral bands, and the first principal component was chosen as the input image. Then, the input image was evenly divided into the image block with a certain overlap rate. Furthermore, the phase correlation method was taken to estimate the sub-pixel motion and the phase correlation coefficient was used to remove a few mismatches in the correlation output and to generate an optical flow field. Finally, the spectrometer images were registered by the calculated optical flow field. Experimental results show that the accuracy of registration is superior to 0.1 pixel, which meets the accuracy requirement of advanced image processing.

收稿日期:2011-06-10;修订日期:2011-07-19.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. O5001SA050)

Key words: hyperspectral imagery; image registration; sub-pixel registration; phase correlation

1 引言

超光谱成像仪遥感能同时获得目标的空间和光谱信息。受技术的限制,超光谱成像仪通常采用两个光谱仪^[1]来获取目标较宽范围内的光谱信息,如机载可见光/红外成像光谱仪(AVIRIS)和地球观测卫星 EO-1 的 Hyperion 均采用两个光谱仪分别获取目标的可见光近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)光谱信息。由于各个光谱仪都有独立的光学参数及安装矩阵,很难保证获取图像的空间一致性,导致相同像素点对应不同的地物目标,造成光谱仪图像的失配变形,影响了从超光谱图像中获取目标光谱信息的纯度。因此,要从超光谱图像中准确提取光谱信息,必须对光谱仪图像进行配准。文献[2]指出,光谱图像失配误差高于 0.2 pixel 时,对非监督分类会产生较大的影响,也就是说光谱仪图像配准对配准精度有较高的要求。

文献[3]通过严格几何成像模型来实现模块化成像光谱仪(MISI)可见光(VIS)和近红外(NIR)光谱仪图像的配准;这种方法在一定程度上能减轻光谱仪图像之间的失配变形,但是由于不能保证计算严格几何成像模型所需各个测量参数的精度,如平台姿态、位置等参数,因此该方法配准精度有限。

与基于严格几何成像模型的配准方法相比,基于图像的配准方法是目前较常用的方法。该方法不考虑具体的几何成像模型,而是利用图像信息来实现图像的配准,计算简单、精度高。图像配准方法按照配准原理可以分为两类:基于特征的配准方法和基于灰度的配准方法。基于特征的配准方法^[4]需要从待配准图像中提取特征,但是特征提取过程中难免会引入定位误差,影响配准的精度;基于灰度的配准方法无需特征提取而是直接利用图像灰度信息来实现图像的配准,配准精度较高,目前光谱图像的配准多是采用这类方法。

罗欣^[5]采用多元互信息作为相似性测度,利用仿射变换来实现超光谱图像的配准;文献[6-7]将光谱图像均匀分块,采用相位相关方法作为图像块匹配方法,将图像块中心坐标作为控制点,利用二次多项式变换实现光谱图像的配准。由于光谱仪图像一般变形较为复杂,采用仿射变换、多项

式变换等全局变换无法精确地描述光谱仪图像的变形情况,限制了图像配准的精度。因此,本文提出一种基于光流场的图像配准方法:将图像均匀划分为具有一定重叠率的图像块,通过块匹配方法估计对应图像块的平移参数,得到图像的光流场,实现光谱仪图像的配准。

2 图像块匹配方法

图像块的匹配精度直接决定了最终图像配准结果,相位相关方法^[8]具有对图像的灰度依赖较小,有较强的抗干扰能力和很高的匹配精度等特点,是目前常用的图像匹配方法。

2.1 相位相关方法

相位相关方法是一种基于傅里叶平移特性的平移参数估计方法,它建立了图像在空域的平移运动和频域线性相位差变化的对应关系。

设 f_1 和 f_2 是两幅存在平移关系的图像,大小均为 $M \times N$, $f_1 = f(x, y)$, $f_2 = f(x - \Delta x, y - \Delta y)$, $(\Delta x, \Delta y)$ 分别为沿 x 轴和 y 轴的平移参数,两幅图像的傅里叶变换分别为:

$$F_1(u, v) = F(u, v), \quad (1)$$

$$F_2(u, v) = F(u, v) \exp \left[-j2\pi \left(\frac{u\Delta x}{M} + \frac{v\Delta y}{N} \right) \right]. \quad (2)$$

两幅图像的相位相关矩阵 $P(u, v)$ 可以通过计算 F_1 、 F_2 的归一化功率谱求出:

$$P(u, v) = \frac{F_2}{F_1} = \exp \left[-j2\pi \left(\frac{u\Delta x}{M} + \frac{v\Delta y}{N} \right) \right]. \quad (3)$$

对归一化互功率谱进行傅里叶逆变换,得到单位脉冲函数 δ :

$$C(x, y) = F^{-1}(P(u, v)) = \delta(x - \Delta x, y - \Delta y). \quad (4)$$

δ 函数是一个含有尖锐脉冲的函数,脉冲的位置代表了平移值的大小。

相位相关方法是估计两幅图像平移参数一种较为常用的方法,相比归一化互相关方法,相位相关方法的相关峰更加尖锐,位置更加精确。由于相位相关方法只利用图像的相位信息,所以它受图像光照强弱变化影响较小,比空域方法具有更好的抗光照变化能力。

2.2 扩展的相位相关方法

相位相关方法仅适合图像间存在整数平移时的情况,不能估计图像间的亚像素平移量。近年来许多学者提出了扩展的相位相关法^[9],一般是在相位相关峰邻域利用函数拟合的方法将相位相关方法的估计精度扩展到亚像素级,其中拟合函数的选择是决定最终图像亚像素估计精度的关键,常用的拟合函数有抛物线^[10]和高斯曲线^[11]。选择抛物线、高斯曲线作为拟合函数,主要是因为数学描述简单并且能直接得到它们的闭合形式解,计算方便。实际上任何单峰的偶函数都可以作为拟合函数,但是这种近似没有考虑相位相关面在空域内的分布情况,很大程度上限制了平移的估计精度。

文献^[12]认为两幅图像间的亚像素平移可以在存在整数平移的高分辨率图像下采样得到,由此得到相位相关函数的表达式,利用2维 sinc 函数近似:

$$C(x) = \frac{\sin\pi(x-\Delta x)}{\pi(x-\Delta x)} \frac{\sin\pi(y-\Delta y)}{\pi(y-\Delta y)}. \quad (5)$$

sinc 函数能在一定程度上逼近相位相关函数在空域的分布,但是在实际中,混叠和边缘效应的影响以及图像的非重叠区域会引入一些附加噪

声,并且还会降低相位相关峰值,所以 sinc 函数并不能完全描述相位相关面的分布情况。忽略这些因素的影响会导致拟合函数不精确,造成平移估计的偏差。考虑相位相关峰值下降和噪声等因素,相位相关函数可以写为:

$$C_{\eta}(x) = \alpha \frac{\sin\pi(x-\Delta x)}{\pi(x-\Delta x)} \frac{\sin\pi(y-\Delta y)}{\pi(y-\Delta y)} + \eta(x, y), \quad (6)$$

式中 α 为相位相关系数, $\alpha \leq 1$ 。理想情况下 $\alpha = 1$, 实际由于图像的不重叠区域,噪声干扰等因素的影响, $\alpha < 1$ 。

将相位相关函数在空域上分离变量,得到相位相关函数的1维表示形式:

$$C_{\eta}(x) = \alpha \frac{\sin\pi(x-\beta)}{\pi(x-\beta)} + \eta(x). \quad (7)$$

一般来说,对于存在亚像素平移的图像,噪声水平相对较低,因此可将噪声项视为常量,将修改后的一维相位相关函数定义为 $msinc$:

$$msinc(x) = \alpha \frac{\sin\pi(x-\beta)}{\pi(x-\beta)} + \gamma. \quad (8)$$

可以利用相位相关峰值邻域的相位相关值来拟合1维相位相关函数,从而估计系数 α, β, γ 的值,转换为拟合函数的最小二乘求解方式:

$$\begin{aligned} (\alpha, \beta, \gamma) = \arg \min_{(x_m-R) \leq x_i \leq (x_m+R)} \sum_{(x_m-R) \leq x_i \leq (x_m+R)} (C_{\eta}(x_i) - msinc(x_i))^2 = \\ \arg \min_{(x_m-R) \leq x_i \leq (x_m+R)} \sum_{(x_m-R) \leq x_i \leq (x_m+R)} \left[C_{\eta}(x_i) - \alpha \frac{\sin\pi(x_i-\beta)}{\pi(x_i-\beta)} - \gamma \right]^2, \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中, x_m 为相关峰位置的整数坐标, R 为选择参与计算点的半径, R 一般选1, $msinc(x)$ 是一个非线性方程,无法得到平移参数估计的闭合形式解,可以通过非线性曲线拟合方法计算方程的系数,其中 β 的值即为所要估计的 x 方向的亚像素平移参数。同理,也可以计算出 y 方向的平移参数。

在执行过程中,为了减轻混叠和边缘效应带来的影响,可以采用加窗处理:在图像傅里叶变换之前使用窗函数对图像进行加权处理来代替图像本身,这样可以避免由于周期性带来的边界不连续,减少图像在频域的边缘效应,使峰值更加尖锐,进一步提高配准精度。本文采用 Hanning 窗对图像进行加窗处理,2D Hanning 窗定义为:

$$w_{\text{hanning}} = \frac{1 + \cos(\pi x/M)}{2} \frac{1 + \cos(\pi y/N)}{2}. \quad (10)$$

3 光谱仪图像亚像素配准方法

光谱仪图像亚像素配准方法包括以下5个步骤:

3.1 光谱仪图像预处理

与一般图像配准不同,光谱仪图像均含有一定数量的波段图像,而图像配准一般要求在两幅灰度图像之间进行。从理论上讲,对于光谱仪图像,需要选择其中一个合适的波段图像或几个波段图像的合成图像作为待配准图像,以保证图像之间光谱特性和灰度分布的一致性,使得两幅图像间呈现最大的相似性,但是由于光谱仪图像光谱分辨率高,光谱范围宽,不同的波段图像具有不同的灰度属性和结构特征。另外,光谱仪各波段图像均不同程度受到噪声的干扰,信噪比不高,很

难从中仅选择一个波段图像来完成配准。因此,可以选择几个波段图像的合成图像作为待配准图像,其中主成分变换是一种较好的波段图像合成方法。主成分变换是一种去相关技术,即把所选波段图像在信息损失最小的情况下变换为一组互不相关的新图像,在变换后的图像空间中,前三个主分量图像基本包含了变换前图像空间的绝大部分信息,其余主分量图像基本上为噪声,其中第一主分量图像的特征值通常为总特征值的 80% 以上,因此第一主分量图像较其它主分量图像具有更高的信噪比,所以选择信噪比最高的第一主分量图像作为光谱仪图像的待配准图像。

3.2 图像块划分和匹配

将待配准图像按照一定的大小和间隔均匀划分为图像块,图像块的大小要选择适当,选的过小由于包含的图像信息较少会影响图像块匹配的精度,选的过大无法精确描述图像的局部变形,本文图像块的大小选取为 64 pixel,图像块间隔为 32 pixel。图像块划分后,就可以利用相位相关方法进行图像块匹配,估计对应图像块的平移参数。

3.3 错误平移估计剔除

在图像块匹配过程中,一些无显著特征和光谱差异较大的图像块往往会给出错误的平移估计结果,因此需要剔除这些错误估计。由于在相位相关计算过程中可以求出对应图像块的相位相关系数 α ,相位相关系数反映了图像块之间的相关程度。因此,可以借助 α 值来剔除掉图像块匹配过程中的错误平移估计,设定阈值 $T_\alpha = \text{mean}(\alpha_i) - \text{std}(\alpha_i)$,将 α 值小于 T_α 的平移估计结果剔除并设为空值。

3.4 平移估计中值调整

为了得到完整的图像光流场,需要赋予平移估计值为空值的图像块新的平移值。扫描每一个图像块的平移估计值,若估计值为空,则以该图像块邻域 3×3 图像块的非空平移估计值的中值替代,中值调整在 x 、 y 方向上分别进行,直到每个图像块平移估计值非空。

3.5 灰度插值和重采样

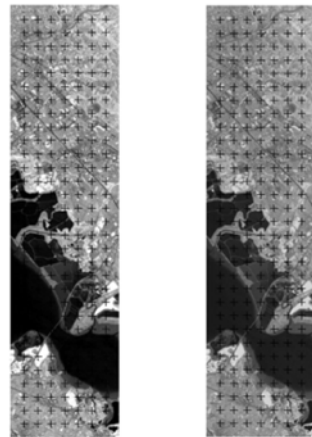
得到图像的光流场后,通过插值可以计算出待配准图像中每一像素点位置的平移参数,通过灰度插值和重采样可以将待配准图像校准至参考图像,实现图像的配准。

4 实验和分析

为了验证文中算法的有效性,选择两组超光谱图像 L1R 产品进行实验。

4.1 仿真图像实验

实验图像为 Hyperion 的 VNIR 相邻波段图像 B55 和 B54,将 B54 波段图像向左平移 0.59 pixel,向上平移 0.38 pixel 作为待配准图像,如图 1,图像大小均为 1 024 pixel \times 256 pixel。为了验证本文提出的方法的配准精度,与文献[10]提出的抛物线拟合、文献[10]提出的高斯曲线拟合、Hoge^[13]提出的奇异值分解相位相关方法和 Foroosh^[12]提出的 sinc 函数拟合方法进行了比较。



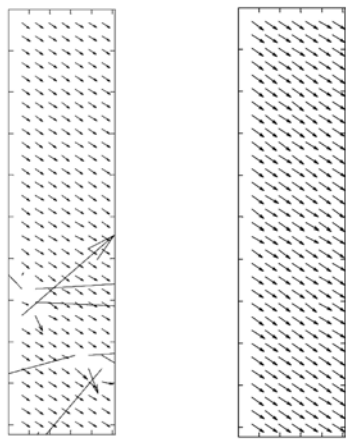
(a) 波段 55 (b) 波段 54
(a) band 55 (b) band 54

图 1 仿真实验图像

Fig. 1 Simulation experiment images

图 2(a)为初始光流场计算结果,从图中可以看出有几个图像块的平移估计值与实际值有很大的偏差,图像水平方向偏差最大达到了 17.81 pixel,垂直方向最大偏差达到了 6.68 pixel,这些错误的平移估计都分布在图 1 中灰度变化比较平缓的图像块。由于在相位相关计算过程中可以求出对应图像块的相位相关系数,从实验结果来看这些图像块的相位相关系数都很小,因此可以设定阈值将其剔除,图 2(b)为最终得到的光流场。

由于已知图像的平移参数,可以采用平移估计误差的均值与标准差来评估该方法的配准精度。表 1 为 5 种方法的最终估计结果,本文提出的相位相关方法在 x 、 y 方向估计误差的均值分



(a) 初始光流场 (b) 最终光流场
(a) Raw optical flow (b) Final optical flow

图 2 仿真实验结果

Fig. 2 Simulation experiment results

别为 0.016 0 pixel 和 0.018 6 pixel, 标准差为 0.012 3 pixel 和 0.014 1 pixel, 配准精度在 5 种方法中最高, 其次为 Hoge 提出的 sinc 函数拟合方法, 抛物线拟合方法精度最低, Hoge 提出的频域相位向量拟合方法精度较高, 但是不够稳健。

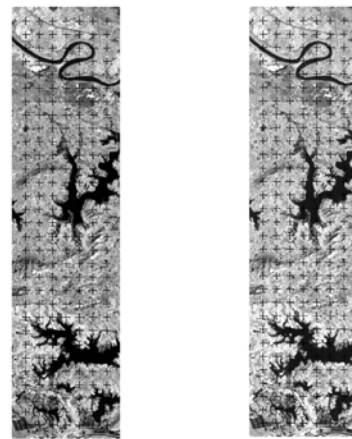
表 1 几种拟合函数结果比较

Tab. 1 Results of fitting functions

拟合函数	x 方向 均值	y 方向 均值	x 方向 标准差	y 方向 标准差
抛物线	0.098 4	0.098 2	0.052 3	0.054 6
高斯曲线	0.079 1	0.073 3	0.063 4	0.062 0
SVD+LS	0.043 6	0.053 0	0.064 3	0.085 1
sinc 函数	0.025 8	0.031 8	0.045 5	0.046 9
msinc 函数	0.016 0	0.018 6	0.012 3	0.014 1

4.2 真实图像实验

实验图像为 Hyperion 的 VNIR 波段图像和 SWIR 波段图像, Hyperion 通过两个光谱仪分别获得地物的可见光近红外光谱信息和短波红外光谱信息, 因此 VNIR 波段图像和 SWIR 波段图像不可避免存在着失配变形。通过光谱仪图像预处理方法选择 VNIR 波段: band52-band57, SWIR 波段: band88-band93, 图 3 为对所选波段进行主成分变换后的第一主分量图像。由于无法预知实际的图像平移参数, 无法采用常规的评价方法来评估本文方法的配准效果, 这里采用归一化相关系数来评估配准方法的精度。

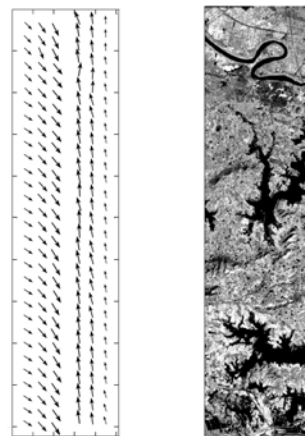


(a) VNIR 第一主分量图像 (b) SWIR 第一主分量图像
(a) The first principal component of VNIR (b) The first principal component of SWIR

图 3 真实实验图像

Fig. 3 Real experiment images

图 4(a) 为估计的光流场, 从图中可以看出 Hyperion 两个光谱仪图像之间的变形比较复杂。SWIR 图像左边部分相对于 VNIR 图像向右下方方向移动, 右边部分图像相对于 VNIR 图像向左上方方向移动, x 方向的失配变形为 $-0.1 \sim 0.3$ pixel, y 方向的失配变形为 $-0.4 \sim 0.4$ pixel, 可见原始 Hyperion 超光谱图像无法满足后续处理的要求。图 4(b) 为配准后的 SWIR 波段 91 图像。图 5 为配准前后 VNIR 波段 55 图像与 SWIR 部分波段图像的归一化相关系数, 配准后归一化相关系数较配准前均有明显提高, 验证了本文方法的有效性。



(a) 光流场 (b) 配准图像
(a) Optical flow (b) Registered image

图 4 真实实验结果

Fig. 4 Real experiment results

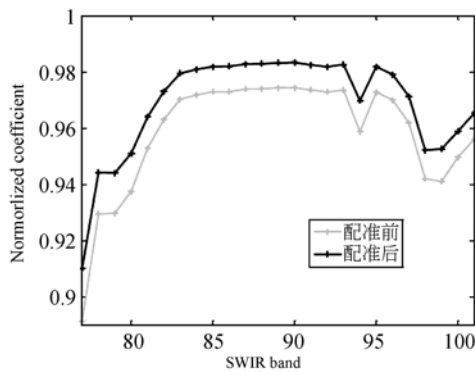


图 5 配准前后归一化互相关系数

Fig. 5 Normalized cross correlation coefficients before and after image registration

参考文献:

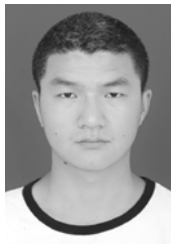
- [1] 沈中. 航天超光谱成像仪原理分析[J]. 航天返回与遥感, 2002, 23(2): 28-34.
SHEN ZH. The principle of the spaceborne hyperspectrum imager [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, 23(2): 28-34. (in Chinese)
- [2] 于海洋, 甘甫平, 党福星, 等. 高分辨率遥感影像波段配准误差试验分析[J]. 国土资源遥感, 2007(3): 39-43.
YU H Y, GAN F P, DANG F X. An experimental analysis of band to band registration error in high resolution satellite remote sensing imagery [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2007(3): 39-43. (in Chinese)
- [3] JASON C, STEPHEN L, JOHN K. Processing mis-registered hyperspectral data [J]. *SPIE*, 2007, 6565: 1-10.
- [4] 冯宇平, 戴明, 孙立悦, 等. 图像自动拼接融合的优化设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 470-476.
FENG Y P, DAI M, SUN L Y, *et al.*. Optimized design of a automatic image mosaic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 470-476. (in Chinese)
- [5] 罗欣, 郭雷, 杨诸胜, 等. 基于互信息和随机优化的超光谱遥感图像配准[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(1): 61-66.
LUO X, GUO L, YANG ZH SH. Registration of remote sensing hyperspectral imagery using mutual information and stochastic optimization [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2006, 21(1): 61-66. (in Chinese)
- [6] HECTOR E, GLENN F. Automatic subpixel registration for a tunable hyperspectral imaging system [J]. *IEEE Geoscience and Remotesensing Letters*, 2006, 3(3): 397-400.
- [7] HECTOR E, GLENN F, THOMAS C. Non-rigid registration of hyperspectral imagery for analysis of agronomic scenes [J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 98(3): 267-275.
- [8] 陈治, 朱洪程, 胡晓东, 等. 基于相位相关技术的 MEMS 旋转角度高分辨率测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1884-1889.
CHEN Z, ZHU H C, HU X D, *et al.*. High resolution measurement of MEMS rotation angle by phase correlation method. [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1884-1889. (in Chinese)
- [9] 黎俊, 彭启明, 范植华, 等. 亚像素级图像配准算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(11): 2070-2075.
LI J, PENG Q M, FAN Z H. A survey of sub-pixel image registration methods [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(11): 2070-2075. (in Chinese)
- [10] 孙辉, 李志强, 孙丽娜, 等. 基于相位相关的亚像素配准技术及其在电子稳像中的应用[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(5): 480-485.
SUN H, LI ZH Q, SUN L N, *et al.*. Sub-pixel registration based on phase correlation and its application to electronic image stabilization [J]. *Chi-*

5 结 论

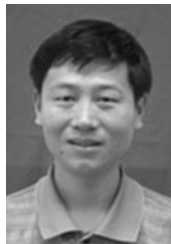
由于光谱仪图像的失配变形降低了超光谱图像的质量, 限制了超光谱图像的后续应用, 本文提出了一种结合超光谱图像特点的亚像素配准方法, 光谱仪图像预处理方法保证了待配准图像光谱特性的一致性, 提高了待配准图像的信噪比。基于光流场的配准方法能更精确地描述图像间的失配变形情况; 改进的相位相关方法保证了所得光流场的精度, 是光谱仪图像亚像素配准的关键技术。实验结果表明, 该方法配准精度优于 0.1 pixel, 能明显改善超光谱图像的质量, 满足超光谱遥感图像的后续应用。

- nese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(5): 480-485. (in Chinese)
- [11] VASILEIONS A, THEODORE V. On the estimation of subpixel motion using phase correlation [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2007, 16(3):1-8.
- [12] FOROOSH H, ZERUBIA J, BERTHOD M. Extension of phase correlation to sub-pixel registration [J]. *IEEE Trans. On Image Processing*, 2002, 11(3):188-200.
- [13] HOGE W S. A subspace identification extension to the phase correlation method [J]. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 2003, 22(2):277-280.

作者简介:



王 运(1984—),男,湖北洪湖人,博士研究生,2006年于长春理工大学获得学士学位,主要从事遥感图像处理、像移补偿方面的研究。E-mail: qinghyun2007@163.com



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,博士,研究员,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得机械制造及自动化专业工学博士学位,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yancx@ciomp.ac.cn

●下期预告

大范围计量型原子力显微镜的位移测量系统

李 伟*,高思田,卢明臻,施玉书,杜 华
(中国计量科学研究院,北京 100013)

纳米结构的表征和纳米制造的质量控制需要高精度的计量型原子力显微镜。中国计量科学研究院设计建立了一台大范围计量型原子力显微镜用于纳米几何结构的测量。为了将位移精确溯源到国际单位米,研制了单频8倍程干涉仪用于位移测量,样品表面形貌由接触模式的原子力显微镜测量。一个立方体反射镜与原子力显微镜的测头固定,作为干涉仪的参考镜。两个互相垂直的干涉仪用于测量样品与探针的在 $x-y$ 方向的相对位置。样品台位于具有三面反射镜的零膨胀玻璃块上,由压电陶瓷位移台驱动。另外两台干涉仪测量样品与探针在 z 方向位移。探针针尖位于干涉仪光束的交点以减小 Abbe 误差。光学器件的缺陷产生的相位混合会引起非线性误差,采用谐波分离法对干涉信号进行拟和来修正误差。结果表明干涉仪测量误差经过修正后减小为 0.7 nm。