

一种高光谱图像高精度配准波段选择方法

杨韩, 厉小润*, 赵辽英, 陈淑涵

浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 针对高光谱图像和高空间分辨率图像配准过程中,各波段之间差异较大难以选择高精度配准波段的问题,提出一种基于 Cram'er-Rao 下限(CRLB)理论的高光谱图像高精度匹配波段选择算法。利用波段选择的方法选出高光谱图像中若干信息量大、相关性小的波段;将其分别与高空间分辨率图像做配准,并计算配准结果相应的 CRLB;根据 CRLB 选择高精度配准波段。通过比较配准后的 CRLB 和均方根误差,验证 CRLB 具有较好配准质量评价性能。通过 CRLB 与其他方法的选择波段配准结果比较可知,本文算法选择的波段配准精度较高。上述波段为高光谱图像和高空间分辨率图像的配准提供更好的数据。

关键词 图像处理; 高光谱图像; 高空间分辨率图像; 配准; Cram'er-Rao 下限理论; 波段选择

中图分类号 TN911.73; TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0910004

Band Selection Method for High Precision Registration of Hyperspectral Image

Yang Han, Li Xiaorun*, Zhao Liaoying, Chen Shuhan

College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Aiming at the process of the registration of hyperspectral images and high spatial resolution images, it is difficult to choose the high-precision registration band because of the large difference between the bands of hyperspectral images. An algorithm for selecting high precision matching band of hyperspectral image based on Cram'er-Rao lower limit (CRLB) theory is proposed. Several bands with large amount of information and a small correlation in the hyperspectral image are selected by the band selection method. These bands are registered with the high spatial resolution image, respectively. The CRLB for each band's registration result is calculated. The high accuracy registration band is selected according to CRLB. The CRLB's registration quality evaluation performance is verified to be better by comparing CRLB and root mean square errors after each registration. And compared with the selected band registration results of CRLB and other methods, it is proved that the accuracy of the band registration selected by the proposed algorithm is high. The above band provides better data for the registration of hyperspectral images and high spatial resolution images.

Key words image processing; hyperspectral image; high spatial resolution image; registration; Cram'er-Rao lower limit theory; band selection

OCIS codes 100.2000; 100.4145

1 引 言

高光谱图像具有丰富的光谱信息,可以探测全色和多光谱等高空间分辨率图像中不可探测的物质。相对于高光谱图像,多光谱图像具有更高的空间分辨率,因此对于同一地区的高光谱图像和高空间分辨率图像协同处理,将有助于实现高光谱图像中未知目标的检测和识别。由于成像环境或成像机

制不同等原因造成的图像之间存在形变差异,多源遥感图像的配准是高光谱图像和高空间分辨率图像协同处理的前提。但是如分辨率为 30 m 的遥感图像,像素级别的配准精度将导致 ± 15 m 的误差,这样的配准是不实用的^[1]。为了减小误差,就必须提高配准精度。因此,研究高光谱图像和高空间分辨率图像的精确配准对提高目标检测和识别精度,推动遥感图像的应用,具有重要的学术意义和实用价值。

收稿日期: 2018-03-19; 修回日期: 2018-04-02; 录用日期: 2018-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(61671408)

* E-mail: lxrlly@zju.edu.cn

总的来说,高光谱图像和高空间分辨率图像的配准方法分为 2 种,即基于特征的方法和基于灰度的方法。基于灰度的配准方法有互相关法^[2]、最大互信息法^[3]、基于快速傅里叶变换的相位相关法^[4]和小波变换法^[5]。基于灰度的配准方法直接利用全部可用的图像灰度信息,故精度高,但是由于高光谱图像和高空间分辨率图像尺度相差大,无法直接基于图像灰度匹配。基于特征的方法有基于边缘强度特征的算法^[6-7]、基于几何特征和形态学和地理位置特征的图像配准算法^[8]、基于二值稳健尺度不变关键点(BRISK)^[9]和快速稳健性特征(SURF)的图像配准算法^[10]。基于特征的配准算法的配准结果只决定于匹配的特征对,对于尺度差异较大的多源遥感图像配准,高光谱图像各波段的灰度纹理等差异较大,导致匹配特征对的数量和质量差异较大,故配准精度差异较大,因此选择高精度匹配波段是提高高光谱图像和高空间分辨率图像配准的关键。

文献[11]对图像梯度进行主成分分析(PCA)变换,将高光谱图像在梯度协方差矩阵的最大特征值对应的特征向量上的投影参与配准; Goncalves 等^[12]选择多波段数据 PCA 变换的第一分量参与配准;王运等^[13]先做波段选择,对选择的波段做 PCA 变换,选第一主分量参与配准。另外,陈杭等^[14]根据纹理信息的清晰度选择高光谱图像的一个波段参与配准。但这些方法都只是选择一个特征或者一个波段直接进行配准,特征或波段的选择没有以配准精度定量评价指标为依据,配准精度有待提高。

由于参数的方差能反应参数估计的准确性,方差越小估计就越准确,因此采用 Cram' er-Rao 下限(CRLB)来评价参数是可行的^[15]。文献[16]中, Bond 等把 CRLB 理论应用到配准领域,通过 CRLB 衡量图像的噪声方差下限,评价图像的配准性能。文献[17]把 CRLB 理论应用到配准参数评价上,理论推导了不同配准方法的 CRLB 计算方法。文献[18-19]在不同的场景计算了配准参数的 CRLB,通过实验证明了 CRLB 应用到配准领域,是可以作为图像配准性能评价的有效工具。

高光谱图像通常具有几百个波段,如果每个波段都与高空间分辨率图像做配准计算 CRLB,计算量太大。高光谱图像波段之间的相关系数往往很高,包含大量的冗余信息,有效的波段选择可以降低数据处理的复杂度,同时提高处理精度。目前国内外学者已提出了各种波段选择^[20]方法,常见的有基于信息量的波段选择方法和基于类间可分性的波段

选择方法^[21]。但是这些方法大都是针对数据降维和目标分类等提出来的。本文提出了一种基于 CRLB 理论的高光谱高精度配准波段选择方法,既减小了数据运算量,又选出高光谱图像中匹配性能比较好的波段。

2 相关理论介绍

2.1 仿射形变模型

仿射形变模型^[22]是最常见的几何形变模型。配准采用仿射模型时,待配图和基准图之间的几何关系式为

$$\begin{bmatrix} s_{ix} \\ s_{iy} \end{bmatrix} = a \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} o_{ix} \\ o_{iy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{ix} \\ t_{iy} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:特征点集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_l\}$, 其中 $s_i = [s_{ix} \ s_{iy}]^T$; 待配图中对应点集 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_l\}$, 其中 $o_i = [o_{ix} \ o_{iy}]^T$; a 为比例系数; θ 为旋转角度; (t_{ix}, t_{iy}) 为 x, y 方向上的平移量。假设 D 为形变矩阵, T 为平移向量, (1) 式可简写为

$$s_i = D \cdot o_i + T, \quad (2)$$

式中点集 S 对应到待配图中的真实位置为 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_l\}$, 其中 $r_i = [r_{ix} \ r_{iy}]^T$; 假设待配图中的对应点和真实点之间只存在高斯白噪声, 则 $o_i = r_i + n_{oi}$, 协方差矩阵为 $\Sigma_o = \text{diag} [\sigma_{ox}^2, \sigma_{oy}^2]$, $\Sigma_s = \text{diag} [\sigma_{sx}^2, \sigma_{sy}^2]$ 。其中, $n_{oi} = [n_{oix} \ n_{oiy}]^T$, $n_{si} = [n_{six} \ n_{siy}]^T$, 则

$$\begin{bmatrix} s_{ix} \\ s_{iy} \end{bmatrix} = a \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{ix} \\ r_{iy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{ix} \\ t_{iy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{six} \\ n_{siy} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

简写为

$$s_i = D \cdot r_i + T + n_{si} = h_i + n_{si}. \quad (4)$$

2.2 CRLB 理论

CRLB 是对于参数估计问题提出, 为无偏估计量方差确定一个下限, 参数的无偏估计方差只能无限逼近 CRLB 却不能到达。

引理 1: 当某个参数估计的概率密度函数 $p(x; \theta)$ 对所有的 θ 满足 $E \left[\frac{\partial \ln p(x; \theta)}{\partial \theta} \right] = 0$ 时, $1 / \left\{ - \frac{\partial^2 \ln p [x[0]; \theta]}{\partial \theta^2} \right\}$ 是最小方差, 定义为参数 θ 的 CRLB 下限。

引理 2: 当某个参数(向量)估计的概率密度函数

$p(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta})$ 对所有的 $\boldsymbol{\theta}$ (向量) 满足 $E\left[\frac{\partial \ln p(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right] = 0$ 时, $\mathbf{C}_{\hat{\theta}} - \mathbf{I}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \geq 0$, 其中 $[\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta})]_{ij} = -E\left[\frac{\partial^2 \ln p(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i \partial \theta_j}\right]$ 定义为 FIM 信息矩阵。

$\text{var}(\hat{\theta}_i) = [\mathbf{C}_{\hat{\theta}}]_{ii} \geq [\mathbf{I}^{-1}(\boldsymbol{\theta})]_{ii}$, $\mathbf{I}^{-1}(\boldsymbol{\theta})$ 为协方差下限矩阵^[15]。

2.3 配准参数的 CRLB 下限计算

CRLB 是通过参数估计的似然函数求二阶导来求解, 因此把 CRLB 理论应用到配准参数评价上, 应构造出似然函数, 通过对似然函数求导, 得到如下推导过程。

配准模型采用仿射形变模型, 如(3)和(4)式, 形变参数 $\mathbf{A} = [a \ \theta \ t_x \ t_y]^T$, G 是待配图点集 O 对应的基准图点的真实位置, 令 $H = [h_1, h_2, \dots, h_L]$, $\mathbf{C}_o, \mathbf{C}_s$ 分别是 L 个 Σ_o, Σ_s 的对角阵, 则两幅图像形变参数的对数似然函数为

$$\ln p(\mathbf{O}, \mathbf{S}; \mathbf{A}) = -\frac{1}{2} \cdot [(\mathbf{O} - \mathbf{R})^T \mathbf{C}_o^{-1} (\mathbf{O} - \mathbf{R}) + (\mathbf{S} - \mathbf{G})^T \mathbf{C}_s^{-1} (\mathbf{S} - \mathbf{G})] + x \text{const}, \quad (5)$$

式中 $x \text{const}$ 是误差常量。因此, Fish 信息矩阵的各个分量为

$$J_{A_m, A_n} = -E\left\{\frac{\partial^2 \ln [p(\mathbf{O}, \mathbf{S}; \mathbf{A})]}{\partial A_m \partial A_n}\right\}. \quad (6)$$

把似然函数代入展开可得:

$$J_{A_m, A_n} = \frac{1}{\sigma_{sx}^2} \sum_{i=1}^L \left(\frac{\partial h_{ix}}{\partial A_m} \cdot \frac{\partial h_{ix}}{\partial A_n} \right) + \frac{1}{\sigma_{sy}^2} \sum_{i=1}^L \left(\frac{\partial h_{iy}}{\partial A_m} \cdot \frac{\partial h_{iy}}{\partial A_n} \right), \quad (7)$$

$$\text{CRLB}(\mathbf{A}) = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{A}). \quad (8)$$

2.4 配准性能评价

相较配准参数的 CRLB, 配准位置差更能直观反应图像的配准性能。因此, 在配准参数 CRLB 基础上, 计算配准位置精度下限, 更能直观地反映出配准性能。位置误差可以写为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L S_i - \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (Dr_i + T) = \boldsymbol{\varepsilon}_1 - \boldsymbol{\varepsilon}_2. \quad (9)$$

显而易见, $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ 的协方差为

$$\text{Cov}(\boldsymbol{\varepsilon}_1) = \text{diag}\left(\frac{\sigma_{sx}^2}{L}, \frac{\sigma_{sy}^2}{L}\right). \quad (10)$$

令 $g(\mathbf{A}) = \boldsymbol{\varepsilon}_2$, 其中 $\mathbf{A} = [a \ \theta \ t_x \ t_y]^T$, 代入(9)式可得

$$\text{Cov}(\boldsymbol{\varepsilon}_2) \geq \frac{\partial g(\mathbf{A})}{\partial \mathbf{A}} \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{A}) \left[\frac{\partial g(\mathbf{A})}{\partial \mathbf{A}} \right]^T. \quad (11)$$

因此, 可以求得位置误差的下限为

$$\text{Cov}(\boldsymbol{\varepsilon}) \geq \frac{\partial g(\mathbf{A})}{\partial \mathbf{A}} \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{A}) \left[\frac{\partial g(\mathbf{A})}{\partial \mathbf{A}} \right]^T + \text{diag}\left(\left[\frac{\sigma_{sx}^2}{L}, \frac{\sigma_{sy}^2}{L}\right]\right). \quad (12)$$

所求出的矩阵的对角元素分别是 x, y 方向上的位置误差下限。

3 高精度匹配波段选择算法

匹配波段选择算法是在高光谱图像大量波段中, 选择高精度匹配波段与高分辨率图像配准, 减小匹配计算量, 提高匹配精度。算法流程图如图 1 所示。算法流程分为以下部分: 1) 对高光谱图像做初步的波段选择, 从上百个波段中选择信息量丰富且相关性小的波段若干; 2) 把选择的若干波段分别和高分辨率图像做配准, 记录配准结果; 3) 根据配准结果计算不同波段配准参数的 CRLB, 根据 CRLB 选出 2~3 个配准性能较好的波段。

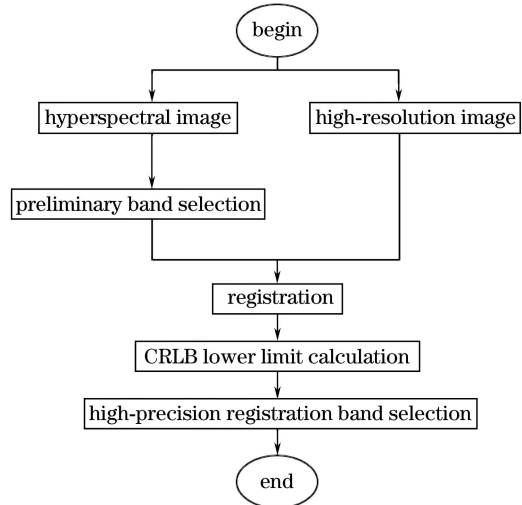


图 1 最佳匹配波段子集选择流程图

Fig. 1 Flow chart of high-precision registration band selection algorithm

3.1 波段初步选择

高光谱图像波段太多, 对高光谱图像做初步的波段选择, 减少数据量, 以减小后续的计算量。在波段选择的方法中, 相对熵(KL)散度的方法充分考虑了波段之间的相关性, 所选波段具有代表性, 因此采用 KL 散度来初步挑选波段。

统计高光谱图像每个波段的灰度分布, 计算各个波段与其附近 1/3 波段的 KL 散度值:

$$D(P \parallel Q) = \sum \{P(x) \ln [P(x)/Q(x)]\} + \sum \{Q(x) \ln [Q(x)/P(x)]\}, \quad (13)$$

式中 P 和 Q 即两个波段的灰度分布, x 为对应灰度值。计算每两个波段之间的 KL 散度值, 挑选散度值最大的波段若干, 即高光谱图像波段中信息量丰富, 相关性小的波段。

3.2 匹 配

为了挑选出最佳匹配波段集, 需要必要的匹配过程。经过匹配, 挑选出匹配效果比较好的波段。其主要目的是计算出不同波段的配准参数, 而不是精确地做某个波段的配准, 因此理论上常用的配准方法都是可以应用的。高光谱图像波段比较多, 考虑到算法速度, 选择常用的基于点特征的尺寸不变转换特征 (SIFT) 算法^[13]。

通过 SIFT 算法对图像进行特征点的提取和描述, 比较高光谱图和高分辨率图特征点之间的欧氏距离并进行匹配, 采用仿射形变模型计算配准形变参数。

3.3 高精度匹配波段选择

通过上述配准参数计算每组配准参数的 CRLB 和位置精度下限, 并根据位置精度下限, 选择配准误差较小的波段, 即高精度匹配波段。

4 实验分析

通过选择算法选择的波段, 实验验证高精度配准波段是匹配效果比较好的波段。基于此, 设计了 2 组仿真实验和 1 组真实实验, 比较均方根误差 (RMSE) 和 CRLB, 观察 CRLB 能否反应配准性能, 并验证由 CRLB 选择的波段是否为高精度匹配波段。

4.1 参数设置

实验总共有 3 组, 其中 2 组仿真实验和 1 组真实实验, 2 组仿真实验用的是同一组图, 其中基准图是一幅 2005 年的航拍高光谱图, 总共 124 个波段, 10 m 的空间分辨率, 尺寸为 325 pixel \times 500 pixel。待配图是从基准高光谱图中取出第 1、42、92 波段的图像, 放大 4 倍并顺时针旋转 20° 构成的多光谱图。真实实验中的基准图是一组 2014 年太湖附近的卫星 (EO-1) 高光谱图, 总共 179 个波段, 7.5 m 的空间分辨率, 尺寸为 239 pixel \times 256 pixel。待配图是对应区域 2017 年的 RGB 图像, 4 m 的分辨率, 尺寸为 508 pixel \times 543 pixel。

4.2 评价指标

4.2.1 RMSE

实验用 RMSE 作为评价配准精度的指标。随机产生 N 对点 (x_i, y_i) , 通过所求的参数构成的仿射变换模型求得对应点对 (x'_i, y'_i) , 通过真实参数

构成的仿射变换模型求得的对应对 (x''_i, y''_i) , RMSE 的求解式为

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x''_i - x'_i)^2 + (y''_i - y'_i)^2]} \quad (14)$$

4.2.2 正确匹配点个数及百分比

正确匹配点个数及百分比主要是用来反映配准的精度和效率。

4.3 实验结果及分析

4.3.1 仿真实验

仿真实验总共做了两组。

第一组: 根据波段相似性的特点, 实验取高光谱所有波段每隔 2 个波段选择 1 个波段分别和 3 个波段的高分辨率图像匹配并计算 CRLB。为了说明 CRLB 的配准评价性能, 实验比较了 CRLB 和 RMSE 随波段变化趋势, 由于 CRLB _{x} 与 CRLB _{y} 的走势是一致的, 因此实验中只呈现了 CRLB _{x} 与 RMSE 的比较结果图, 该组实验是参考文献[19]设计的。配准后的 CRLB 位置精度下限和 RMSE 随波段的变化趋势图如图 2(a)~(c) 所示。

图 2(a)~(c) 分别为高光谱图分别与高分辨率图 3 个波段匹配后的 CRLB 位置精度下限 x 方向上的值和 RMSE。其中, 趋势图的横坐标为高光谱图像的波段编号, 纵坐标是 RMSE 值和 CRLB 值。图 2(a) 的高分辨率图来自高光谱图的第 1 波段做仿射变换, 图 2(b) 的高分辨率图来自高光谱图的第 42 波段做仿射变换, 图 2(c) 的高分辨率图来自高光谱图的第 92 波段做仿射变换。由于高分辨率图的 3 个波段分别来自高光谱的第 1、42、92 波段, 且高光谱图像相邻的波段之间具有相似性, 因此高光谱图像的这几个波段附近的波段应该和高分辨率图像的相应波段灰度差异比较小, 比较容易做配准。而从图中恰好可以看出, 3 幅图分别第 1、42、92 波段周围时 CRLB 值比较小, 离这几个波段远的, CRLB 值大, CRLB 自身的分布和走势说明此指标能评价图像配准结果。

取 3 幅 CRLB 差异比较大的图配准后分别做融合图, 截取河流的转折点, 效果如图 3 所示。比较图 3(a)~(c) 可以看出, 图 3(a) 的 CRLB 下限小, 基准图和待配图的河流连接处几乎没有偏差; 图 3(b)、(c) 中, 河流连接处有不同程度的断层, 而且随着 CRLB 下限的增大, 断层越来越明显, 说明随着 CRLB 的增大, 配准结果趋向变差。

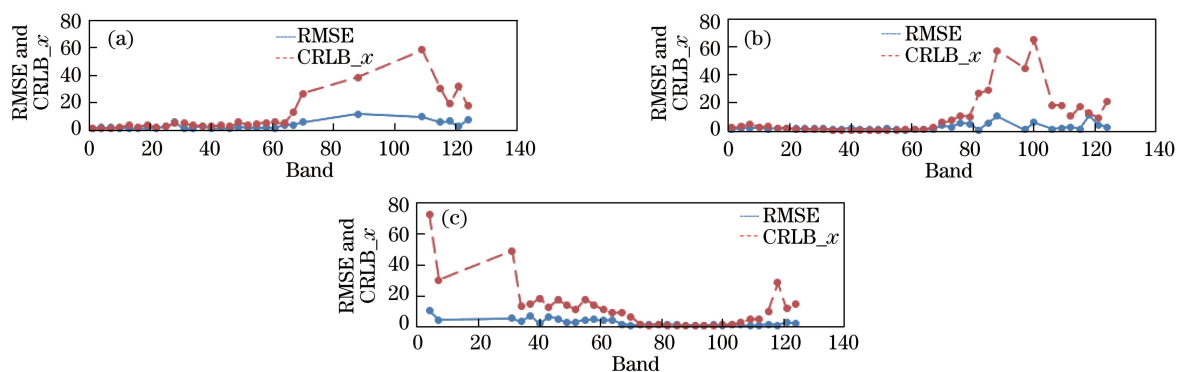


图 2 高分辨率图波段与高光谱图像各波段匹配的 RMSE 值和 CRLB 值折线图。(a)波段 1;(b)波段 2;(c)波段 3

Fig. 3 RMSE value and CRLB value line chart of high-resolution map band matching with each band of hyperspectral image.

(a) Band 1; (b) band 2; (c) band 3

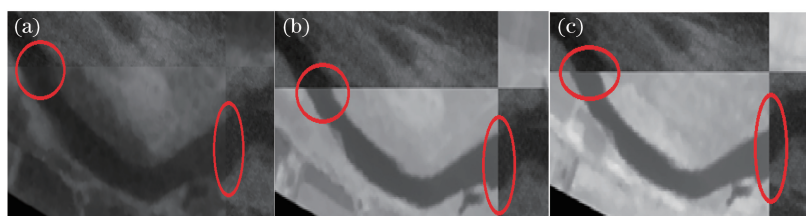


图 3 河流连接处配准融合图。(a)第 7 波段,CRLB_x 为 2.23;(b)第 68 波段,CRLB_x 为 14.78;

(c)第 88 波段,CRLB_x 为 38.72

Fig. 3 Registration fusion diagram for the river junction. (a) 7th band, CRLB_x is 2.23;

(b) 68th band, CRLB_x is 14.78; (c) 88th band, CRLB_x is 38.72

第二组:实验将原高光谱图像先通过 KL 散度进行初步的波段选择,选出 20 个波段,分别与 3 个波段的高分辨率图像做配准并计算 CRLB 位置精度下限,分别用文献[12-13]中的方法对同样的数据

进行配准,通过 RMSE、正确匹配点个数、正确匹配点占总匹配点的百分比等指标,比较根据 CRLB 下限挑选的图像和采用 PCA 映射的图像的配准性能,如图 4 所示。

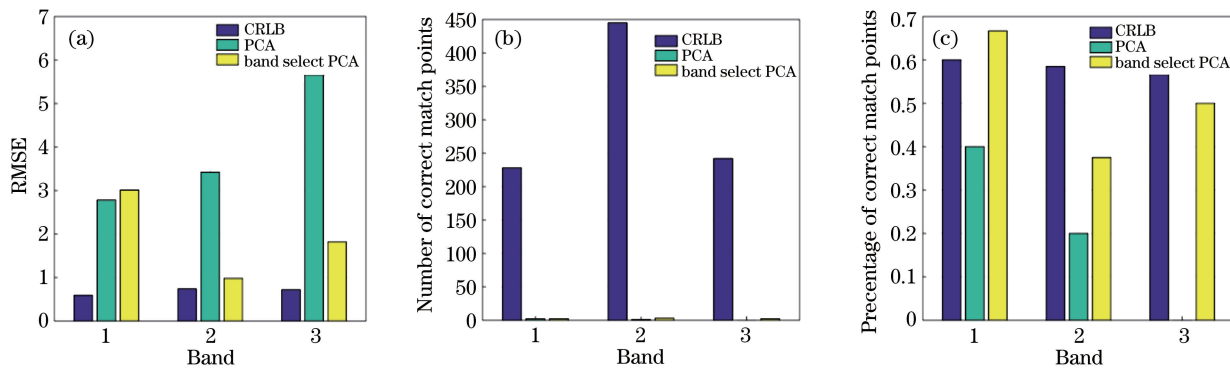


图 4 3 种方法选择波段的配准结果条形图。(a) RMSE 值;(b)正确匹配点个数;(c)正确匹配点百分比

Fig. 4 Registration results bar chart of the three methods for selecting bands.

(a)RMSE values; (b) number of correct matching points; (c) percentage of correct matching points

由图 4(a)可知,用 CRLB 下限选出来的波段分别和高分辨率图像 3 个波段匹配的 RMSE 都达到亚像素级别,比用 PCA 第一主分量和用波段选择后取 PCA 变换的第一主分量的方法的配准误差都要小;而且从图 4(b)、(c)也可以看出,用 CRLB 下限

选择的波段做配准的正确匹配点个数远远多于其他两种方法,正确匹配点占总匹配点的百分比也比较高。因此从第二组实验结果可以看出,通过 CRLB 下限选择的波段比用 PCA 第一主分量生成的波段的配准性能好。

4.3.2 真实实验

真实实验是先将高光谱图通过 KL 散度进行初步的波段选择,选出 20 个波段,再和高分率图像做配准并计算 CRLB,并分别用文献[12-13]中的方法对同样的数据配准。

由于 PCA 和波段选择后的 PCA 合成图丢失了很多图像细节信息,在真实实验中两幅图重叠区域不多且存在局部形变,因此在真实实验中这两种方法配准结果非常差, RMSE 达到几百,无法与 CRLB 选择的波段比较,因此不采用这两种方法的配准结果。

图 5 是经初步波段选择挑出的 20 个波段配准后的 CRLB 值和 RMSE 值(真实实验的形变参数由 ENVI 软件人工选 20 组点求得)。由图可以看出,真实实验中 CRLB 下限和 RMSE 的变化趋势基本相同,因此在真实实验中直接挑选 CRLB 下限小的波段即是配准性能好的,不需要进行繁琐的人工选点计算。

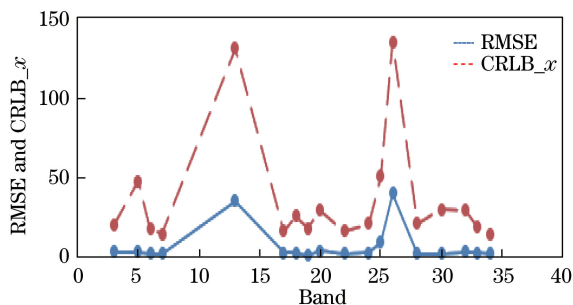


图 5 RMSE 和 CRLB_x 随波段变化折线图

Fig. 5 Line chart of RMSE and CRLB_x varying with the band

图 6(a)、(b)是实验融合图,由两幅图对比可以看出,CRLB 下限小的图相应的配准融合图误差小,CRLB 下限大的图相应的配准融合图误差大。通过真实实验,验证了用 CRLB 选择的波段配准性能好。

5 结 论

针对高光谱图和高分率图像的配准问题,提出了一种基于 CRLB 理论的选择高光谱高精度匹配波段的算法,通过初步的波段选择和配准以及 CRLB 位置精度下限的计算,从高光谱图众多的波段中挑选出若干个适合做高光谱图与高分率图配准的波段。通过实验证明本文方法选择的波段配准性能较好。

该方法在不知道基准图和待配图之间真实形变参数的情况下,对配准结果做出准确的评判,并且选择配准性能较好的波段,为提高高光谱图像和高分率图像高精度配准提供良好的数据。

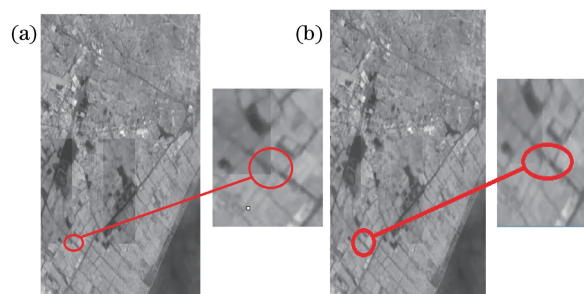


图 6 道路连接处融合图。(a)第 19 波段 RMSE 为 5.3, CRLB_x 为 50;

(b)第 19 波段 RMSE 为 1.9,CRLB_x 为 17

Fig. 6 Road junction fusion image. (a) 19th band, RMSE is 5.3, CRLB_x is 50; (b) 19th band, RMSE is 1.9, CRLB_x is 17

参 考 文 献

- [1] Li J, Peng Q M, Fan Z H. A survey of sub-pixel image registration method[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(11): 2070-2075.
黎俊, 彭启民, 范植华. 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.
- [2] Gao D Y, Zhao X A, Pan X. Cross-correlation image registration based on sparse fast fourier [J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017(2): 25-28, 64.
高东阳, 赵西安, 潘昕. 基于稀疏快速傅里叶的互相图像配准[J]. 北京建筑大学学报, 2017(2): 25-28, 64.
- [3] He R J, Rao L Y, Liu S, *et al.* The method of maximum mutual information for biomedical electromagnetic inverse problems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36 (4): 1741-1744.
- [4] Bhati S H, Pati U C. Phase correlation based algorithm using fast fourier transform for fingerprint mosaicing [C] // Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Computing, Networking and Informatics, 2016: 507-514.
- [5] Wu Y Q, Wang Z L. Remote sensing image registration algorithm based on improved SURF in wavelet domain [J]. Journal of Tianjin University (Science and Techonolgy), 2017, 50 (10): 1084-1092.
吴一全, 王志来. 基于小波域改进 SURF 的遥感图像配准算法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(10): 1084-1092.
- [6] He P P, Wan Y C, Yang W, *et al.* Automatic registration of urban laser point cloud with aerial image data based on straight-lines [J]. Acta Optica

- Sinica, 2015, 35(5): 0528001.
- 何培培, 万幼川, 杨威, 等. 基于线特征的城区激光点云与影像自动配准[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0528001.
- [7] Huang Y, Da F P, Tao H Q. An automatic registration algorithm for point cloud based on feature extraction[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0308002.
- 黄源, 达飞鹏, 陶海路. 一种基于特征提取的点云自动配准算法[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308002.
- [8] Qiao C, Ding Y L, Xu Y S, *et al.* Image registration method based on geo-location information and precision analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0828001.
- 乔川, 丁亚林, 许永森, 等. 基于地理位置信息的图像配准方法及精度分析[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0828001.
- [9] Li X H, Yao J. Normalized product correlation Brisk image registration algorithm [J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2017(2): 167-173.
- 李秀华, 姚佳. 归一化积相关 Brisk 图像配准算法[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2017(2): 167-173.
- [10] Zhang H J, Li G H, Liu C, *et al.* Reliable initial guess based on SURF feature matching in digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1112005.
- 张华俊, 李桂华, 刘程, 等. 基于 SURF 特征匹配的数字图像相关变形初值可靠估计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1112005.
- [11] Xu M, Chen H, Varshney P K. Registration of high-dimensional remote sensing data based on a new dimensionality reduction rule [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, 2009: 581-584.
- [12] Goncalves H, Corte-Real L, Goncalves J A. Automatic image registration through image segmentation and SIFT [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011, 49(7): 2589-2600.
- [13] Wang Y, Yan C X. Sub-pixel image registration of spectrometer images [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 661-667.
- 王运, 颜昌翔. 光谱仪图像的亚像素配准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 661-667.
- [14] Cheng H, Du X P, Xia L R, *et al.* Registration method for hyperspectral image based on control points[J]. Journal of Academy of Equipment, 2013, 24(3): 109-113.
- 陈杭, 杜小平, 夏鲁瑞, 等. 基于控制点的一种高光光谱图像配准方法[J]. 装备学院学报, 2013, 24(3): 109-113.
- [15] Kay S M. Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory[M]. Englewood Cliff: Prentice hall, 1993.
- [16] Bond J S, Matters G L, Banerjee S, *et al.* Performance of optimal registration estimators [J]. Proceedings of the SPIE, 2005, 5817(15): 133-144.
- [17] Yetik I S, Nehorai A. Performance bounds on image registration [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(5): 1737-1749.
- [18] Xu B S, Shi Z L, Chen F L. Image registration error characterization method based on Cramer-Rao lower bound [C] // National Academic Conference on Information Acquisition and Processing, 2012: 338-341.
- 徐保树, 史泽林, 陈法领. 基于 Cramer-Rao 下限的图像配准误差表征方法[C] // 全国信息获取与处理学术会议, 2012: 338-341.
- [19] Li J, Huang P K, Wang X H. Registration precision study based on CRLB theory for optical base image and SAR image[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5): 2049-2055.
- 李静, 黄培康, 王小虎, 等. 基于 CRLB 理论的光学基准图与 SAR 图像匹配精度研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2049-2055.
- [20] Wang Q, Yang G, Zhang J F, *et al.* Band selection based on local joint skewness and kurtosis for Hyperspectral image [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111004.
- 王琪, 杨桃, 张俭峰, 等. 基于局部联合偏度-峰度的高光光谱图像波段选择方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 111004.
- [21] Wang Z, Wang B H, Wang Y T. A survey of the band selection for the hyperspectral remote sensing image [C] // The 11th National Symposium on Safe Geophysics, 2015.
- 王喆, 王百合, 王艺婷. 高光光谱图像波段选择方法综述[C] // 第十一届全国安全地球物理专题研讨会, 2015.
- [22] Gong M, Zhao S, Jiao L, *et al.* A novel coarse-to-fine scheme for automatic image registration based on SIFT and mutual information[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 52(7): 4328-4338.
- [23] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.