

采用 SIFT 特征的高光谱数据自动几何精校正

张佳栋, 李娜, 赵慧洁, 李旭东, 徐秋

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要: 针对几何精校正过程中人工选取控制点误差大、未考虑高光谱数据光谱特征一致性问题, 提出了基于 SIFT 特征的自动几何精校正方法。首先提取图像的 SIFT 特征, 利用高光谱数据的地理坐标定位进行局部特征匹配, 然后为了进一步提取高精度、分布均匀的控制点, 提出了一种分区域的随机采样一致(Random Sample Consensus, RANSAC)算法。利用航空高光谱成像仪 Hymap 获取的新疆东天山数据进行算法性能的分析与验证, 并采用 CE90/CE95 以及均方根误差等指标进行定位精度的评价, 提出的基于 SIFT 特征的自动几何精校正方法能够达到 0.8 像元的定位精度, 并且校正前后光谱的光谱角小于 0.01 rad。

关键词: 几何精校正; 高光谱遥感; 地面控制点; 光谱一致性; 定位精度

中图分类号: TP751.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2414-07

Automatic geometric precision correction of hyperspectral data based on SIFT feature

Zhang Jiadong, Li Na, Zhao Huijie, Li Xudong, Xu Qiu

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Education of Ministry, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Duo to including the ground control points that choosed by manual geometric precision correction were not precise, and the existing methods ignorded the spectrum consistency of hyperspectral data, an automatic geometric precision correction method based on SIFT feature was proposed to solve the problems. SIFT feature was extracted from the image and the geographic coordinate of the hyperspectral data was used to accomplish local feature matching. In order to extract high-precision and uniformly distributed ground control points, a sub-regional Random Sample Consensus (RANSAC) algorithm was proposed. The airborne hyperspectral data collected by HyMap in Dongtianshang, Xinjiang Autonomous Region, was used to analyze and validate the performance of the algorithm. The CE90/CE95 and root mean square error were calculated to evaluate the geopositional accuracy. The results show that the automatic geometric correction method based on SIFT feature can achieve 0.8 pixel geopositional accuracy, and the spectrum of the spectrum angle between warp image and corrected image is less than 0.01 radian.

Key words: geometric precision correction; hyperspectral remote sensing; ground control point; spectrum consistency; geopositional accuracy

收稿日期: 2013-01-08; 修订日期: 2013-02-15

基金项目: 国家 863 计划(2008AA12121102, 2009AA12Z119); 国家自然科学基金(61008047, 61177008); 中国地质调查局项目(1212011120227); 长江学者和创新团队发展计划(IRT0705)

作者简介: 张佳栋(1988-), 男, 硕士生, 主要从事高光谱遥感数据应用处理方面的研究。Email: zhang_jiadong@163.com

导师简介: 李娜(1978-), 女, 讲师, 主要从事模式识别、高光谱遥感数据建模及应用处理技术等方面的研究。Email: lina_17@buaa.edu.cn

0 引言

遥感信息定量化研究是当前遥感发展的前沿,对高光谱数据进行几何精校正处理,实现高光谱数据精确的地理编码,是高光谱数据定量化应用的基础。控制点的高效、准确获取是几何精校正的关键,其精度直接影响了几何精校正的定位精度。传统的几何精校正方法采用人工选择控制点的方法,该方法受主观影响较大,且效率低,无法满足业务化、工程化的应用需求,因此,自动化、高精度的几何精校正方法成为急需解决的关键技术问题。目前,自动匹配控制点的方法主要有基于灰度的匹配方法和基于特征的匹配方法^[1-4]。基于灰度的匹配方法主要利用图像区域的灰度信息,匹配的自动化程度高,但对光照变化等的鲁棒性差,不太适合遥感图像的几何精校正。基于特征的匹配方法,主要利用图像的局部特征,不受图像灰度特征的影响。基于特征的算法较多,Mikolajczyk 对 11 种最具代表性的算子(如不变矩、互相关、SIFT 等)进行了实验和性能比较,结果表明,在对光照变化、图像旋转、尺度变化、几何变形、模糊和图像压缩等 6 种情况下,SIFT 特征描述的性能最好^[5]。但是,现有的方法将 SIFT 特征应用于几何精校正的控制点提取时,没有利用遥感数据的地理坐标,也没有考虑控制点在图像上的分布情况。另外,对于高光谱数据还必须考虑几何精校正过程中光谱信息的一致性情况。

文中针对上述问题,提出了基于 SIFT 特征的高光谱数据自动几何精校正方法。提取图像的 SIFT 特征点,通过高光谱数据的地理坐标信息,确定了特征点搜索的范围,使特征点的匹配在局部区域内进行,提高了控制点提取的效率。提出了分区域的 RANSAC 算法,在提高控制点的匹配精度的同时使选取的控制点较均匀地分布在影像上。分析了几何精校正前后高光谱数据光谱信息的一致性情况以及几何精校正的定位精度。

1 高光谱数据自动几何精校正

1.1 几何精校正建模

待校正高光谱图像的几何畸变可视为平移、缩放、旋转、偏扭、弯曲等基本畸变的综合作用结果,在

几何精校正时,可以直接对图像变形进行数学模拟,用多项式模型来表示校正前后图像对应点之间的坐标关系:

$$\begin{cases} u = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} x^i y^j \\ v = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} x^i y^j \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x,y) 为任意像元在待校正图像中的坐标; (u,v) 为该像元在基准图像中的实际坐标, n 为多项式的次数。该模型中 $N=(n+1)(n+2)/2$ 个多项式系数,可以通过地面控制点(ground control point, GCP)利用最小二乘原理解出:

$$\begin{cases} \Delta_x = (A^T A)^{-1} (A^T L_x) \\ \Delta_y = (A^T A)^{-1} (A^T L_y) \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$\Delta_x = [a_{00} \ a_{01} \ a_{02} \ a_{10} \ a_{11} \ a_{20} \ \dots]^T \quad (3)$$

$$\Delta_y = [b_{00} \ b_{01} \ b_{02} \ b_{10} \ b_{11} \ b_{20} \ \dots]^T \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & y_1 & y_1^2 & x_1 & x_1 y_1 & x_1^2 & \dots \\ 1 & y_2 & y_2^2 & x_2 & x_2 y_2 & x_2^2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & y_m & y_m^2 & x_m & x_m y_m & x_m^2 & \dots \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L_x = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ \dots \ u_m]^T \quad (6)$$

$$L_y = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ \dots \ v_m]^T \quad (7)$$

常用的多项式模型有二次多项式和三次多项式。二次多项式可以纠正由坐标轴平移、旋转、缩放及倾斜等引起的变形,三次多项式除了可以纠正上述变形外,还可以纠正坐标轴的扭曲和凹凸等变形^[6]。但需要注意的是,高阶多项式对于控制点周围是精确的,但对于控制点之外的区域,高阶多项式在外推时可能会产生很大的误差。文中几何精校正时采用二次多项式模型。

1.2 自动匹配控制点

文中在几何精校正自动匹配控制点时,首先分别对待校正图像和基准图像提取 SIFT 特征点,再通过地理坐标定位在局部区域内匹配生成的特征点集,最后通过分区域的 RANSAC 方法得到均匀分布的地面控制点。其流程如图 1 所示。

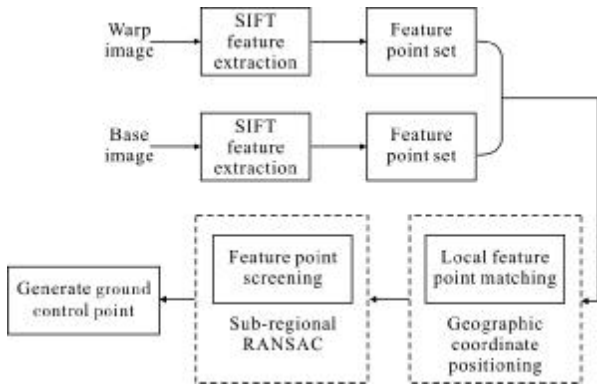


图 1 自动匹配控制点

Fig.1 Automatic matching ground control point

1.2.1 局部 SIFT 特征匹配

SIFT 算法是一种提取局部特征的算法，其对平移、旋转、尺度缩放、亮度变化保持不变性，对光照变化、视角变化、仿射变换、噪声也保持一定程度的稳定性，具有较强的鲁棒性。文中在对高光谱数据进行自动几何精校正时，首先采用参考文献[7]中的方法，提取图像的 SIFT 特征向量，即关键点描述子。

下一步需要匹配这些关键点。由于遥感图像的尺寸通常会比较大，在待校正图像与基准图像中提取的关键点会比较多。传统的方法在对关键点进行匹配时，是在整幅图像内进行搜索匹配，这样会耗时较多，影响了几何精校正的效率。而文中首先通过高光谱数据的地理坐标进行定位，得到粗匹配点坐标，然后在以粗匹配点为中心的一定大小的窗口内进行搜索匹配，如图 2 所示。

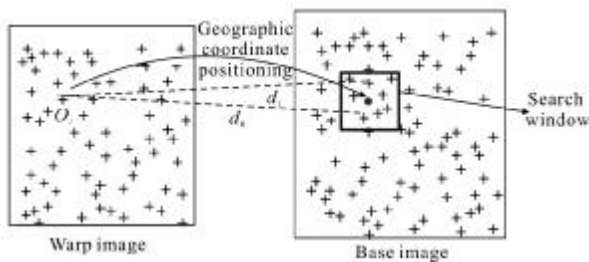


图 2 特征点匹配示意图

Fig.2 Feature point matching diagram

局部 SIFT 特征匹配的步骤如下。

(1) 对于待校正图像中的某个关键点 O_i ，计算该关键点在待校正图像中的地理坐标，根据计算得到的粗略地理坐标定位到基准图像中的某一点。

(2) 选择基准图像中以该粗匹配点为中心的一

定大小的匹配点搜索窗口(例如 21×21 ，可以根据待校正图像的畸变程度适当扩大或缩小窗口)内的关键点 $S_j(S_a, S_b, S_c, \dots)$ ，分别计算这些关键点与待校正图像中关键点 O_i 的欧氏距离 $d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=0}^{m-1} (O_{ik} - O_{jk})^2}$ (m 为关键点描述子的维数)。

(3) 比较 d_{ij} 的大小，找出其中最近的距离 d_0 与次近的距离 d_1 ，计算 d_0/d_1 的值，如果 d_0/d_1 小于某个比例阈值(如 0.8)，则接受与 d_0 对应的关键点作为一对匹配点，否则， O_i 没有相应的匹配点。如果降低这个比例阈值，匹配点数目会减少，但更加稳定。

1.2.2 选取合适的控制点

在几何精校正中应该使控制点的分布尽量均匀，且能覆盖整个图像，特别是在待校正图像的四角最好能有控制点。为了在图像中选取能均匀覆盖整个图像的控制点，并且在匹配点中进一步选择高精度的控制点，文中提出了一种分区域的 RANSAC 算法，该算法采用分区域的策略，在每个区域中选取一个点保证了控制点的均匀分布，然后通过选择的特征点求解出多项式校正模型中的参数，并用其他的特征点测试模型的准确性，最后通过一定次数的迭代，在正确的校正模型中选择误差最小的一组特征点作为几何精校正的控制点，保证了控制点的精度。具体步骤如下。

(1) 在待校正图像的四角选择一定区域大小，根据这 4 个区域的坐标，在所有匹配点中，选择落在这些区域的匹配点；然后再将待校正图像分成 $(n+1) \times (n+2)$ 块 (n 为校正模型的次数)，根据各块的坐标，将剩下的匹配点划分成不同的区域，得到 $(n+1)(n+2)+4$ 个区域的匹配点集合。

(2) 在各个匹配点集合中随机地选择一个点，构成控制点集 C_i ，由 C_i 计算得到多项式校正模型中的参数。

(3) 用步骤(2)中得到的模型来测试待校正图像中的所有特征点，若这些特征点通过模型计算得到的值与标准图像中对应点的坐标的误差 Δ ，满足 $\Delta < e$ (e 为校正精度)，则认为这对匹配点是正确的匹配点，记录该模型 M_i 下正确匹配点的个数和总的误差，若正确匹配点的个数大于事先给定的阈值则保留 M_i 。

(4) 计算模型 M_i 下的平均误差，若该误差足够小，则选择 C_i 作为控制点，否则重复步骤(2)和(3)k次，

选择平均误差最小的 M_i 对应的 C_i 作为控制点。其中: $k = \log(1-p)/\log(1-e^N)$, p 为笔者期望达到的概率, e 为每次计算后正确的匹配点与总点数的比值, N 取 $(n+1)(n+2)+4$ 。

1.3 光谱信息一致性检验

高光谱数据在几何精校正后数据的结构信息与光谱信息不发生较为明显的变化, 应与校正前保持一致, 所以采用图像结构相似度 (SSIM, structural similarity) 指标进行结构信息评价, 采用同名点地物的光谱比对进行光谱信息检验。

图像结构相似度从整个图像出发, 通过对两幅图像的亮度比较、对比度比较以及灰度结构比较^[8], 实现了对校正前后图像结构相似程度的度量, 具有宏观性。

亮度比较:

$$I(X, Y) = \frac{2\mu_x \mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_2} \quad (8)$$

对比度比较:

$$c(X, Y) = \frac{2\sigma_x \sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (9)$$

灰度结构比较:

$$s(X, Y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_3} \quad (10)$$

校正前后图像结构相似度:

$$SSIM(X, Y) = I(X, Y) \cdot c(X, Y) \cdot s(X, Y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (11)$$

式中: μ_x 、 μ_y 分别为 X 、 Y 图像的均值; σ_x 、 σ_y 分别为 X 、 Y 图像的标准差; σ_{xy} 为 X 、 Y 图像的协方差; $C_1 = (K_1L)^2$, $C_2 = (K_2L)^2$ 。为避免分母为 0 而出现不稳定的情况, 一般取 $K_1=0.01$, $K_2=0.03$, $L=225$ 。

同名点地物的光谱比对是针对像元进行的, 采用基于光谱差异分析和光谱角填图的方法。这两种方法从不同的角度定量化分析说明校正前后同名点地物光谱的相似程度, 基于光谱差异的方法分析了校正前后幅值的差异; 而基于光谱角填图的方法从整个光谱形状和走势分析比对了校正前后同名点地物光谱的相似程度。基于光谱差异方法计算公式如下:

$$ASDS(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i/x_i - 1)^2 \quad (12)$$

基于光谱角匹配的方法计算校正前后图像中同名点地物光谱矢量之间的广义夹角, 具体公式如下:

$$SAM(X, Y) = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (13)$$

式中: n 为波段数; (x_1, x_2, \dots, x_n) 为校正前图像像元的光谱; (y_1, y_2, \dots, y_n) 为校正后图像中同名地物的光谱。

2 实验及结果分析

2.1 实验数据

文中采用航空高光谱成像仪 Hymap 在新疆东天山获取的高光谱数据作为实验中几何精校正的待校正数据, 该数据获取时间为 2002-12-02, 大小为 $4911 \times 5325 \times 122$, 波长范围 400~2500 nm, 地面分辨率 5.4m, 光谱分辨率 10~20nm。选取已经经过几何精校正具有正确地理坐标的 ETM+Hymap 数据作为基准图像。

2.2 光谱信息一致性评价

几何精校正时, 分别采用了最近邻插值法、双线性插值法、三次卷积插值法进行重采样。对几何精校正前后数据的各个波段之间分别计算 SSIM, 分别计算了 20 个同名地物点光谱之间的 ASDS 与 SAM, 如图 3 所示。取平均值, 得到的结果见表 1。

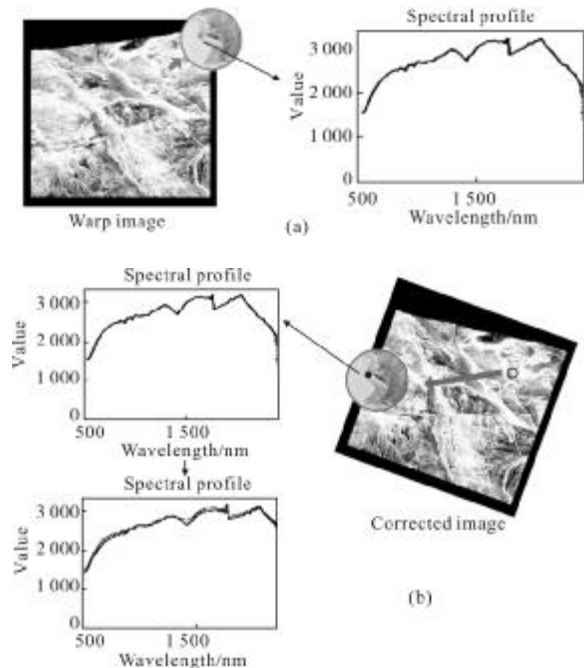


图 3 校正前后图像及光谱比对

Fig. 3 Spectral comparison of warp image and corrected image

表 1 高光谱数据光谱信息一致性评价

Tab.1 Hyperspectral data consistency evaluation of spectral information

Resampling methods	SSIM	ASDS	SAM/rad
Nearest neighbor interpolation	0.774 472	0.000 46	0.009 62
Bilinear interpolation	0.779 874	0.001 98	0.009 41
Cubic convolution interpolation	0.778 107	0.001 83	0.008 31

由表 1 可以看出,采用文中的方法进行几何精校正,校正前后的 SSIM 在 0.77 以上,ASDS 小于 0.002, SAM 小于 0.01。在采用不同的重采样方法时结果略有差别:三次卷积插值法在保持光谱曲线的幅值与形状、走势方面效果最好,双线性插值法在宏观上保持图像的相关性效果最好,最近邻插值法在图像中的边缘处可能导致光谱曲线出现较大偏差,但保持了原图像的灰度值。

2.3 几何精校正定位精度评价

实验中校正模型为二次多项式模型,通过利用地理坐标进行匹配以及对匹配点进行筛选最后得到 16 个控制点,如图 4 所示。

文中采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)与圆点误差(Circular Error, CE)来评价校正精度。单个 GCP 的 RMSE 表示在用转换矩阵对一个 GCP 进行转换时,期望输出坐标(u,v)与实际输出坐标(x,y)之间的偏差。其计算公式为: $RMSE = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} = \sqrt{(u-x)^2 + (v-y)^2}$ 。常用的圆点误差有

CE90 和 CE95, NMAS(National Map Accuracy Standard) 的定义为:一幅图像或地图中包含 90%(95%)的数据点误差的半径范围,即影像中 90%(95%)以上两点之间测得的距离与实测值之间的误差在 CE90 (CE95) 以内。

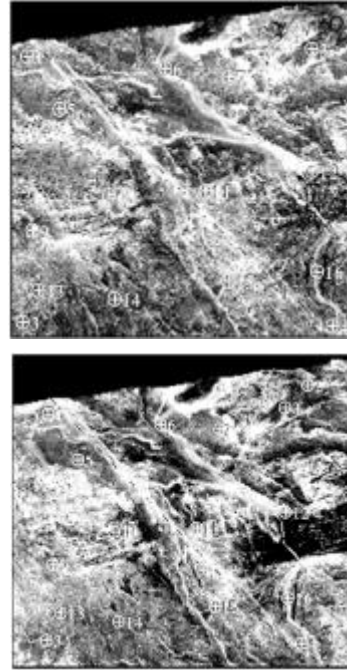


图 4 地面控制点分布情况

Fig.4 Distribution of ground control points

自动匹配的控制点在基准图像、待校正图像和校正后图像中的具体坐标位置及误差见表 2,控制点的圆点误差与误差向量分布如图 5 所示,控制点误

表 2 地面控制点坐标位置及误差情况

Tab.2 Ground control point coordinate and error

GCP	Base image		Warp image		Corrected image		$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	RMSE/m
	x	y	x	y	x	y			
1	16 903.61	2 672.21	15 492.55	2 305.09	15 492.44	2 304.98	-0.594 0	-0.594 0	0.840 0
2	20 076.46	2 375.95	18 430.73	2 031.00	18 430.44	2 030.89	-1.566 0	-0.594 0	1.674 9
3	16 853.91	5167.84	15 446.64	4 615.82	15 446.61	4 615.42	-0.162 0	-2.160 0	2.166 1
4	19 983.98	5195.93	18 343.91	4 640.73	18 343.59	4 640.80	-1.728 0	0.378 0	1.768 9
5	17 201.82	3 159.28	15 768.73	2 756.27	15 768.58	2 755.90	-0.810 0	-1.998 0	2.155 9
6	18 264.98	2 780.04	16 753.00	2 405.27	16 752.97	2 404.84	-0.162 0	-2.322 0	2.327 6
7	18 938.10	2 847.03	17 376.00	2 466.00	17 376.21	2 466.86	1.134 0	4.644 0	4.780 4
8	19 765.73	2 601.76	18 142.73	2 240.09	18 142.62	2 239.87	-0.594 0	-1.188 0	1.328 2

续表 2 地面控制点坐标位置及误差情况

Tab.2 Ground control point coordinate and error

GCP	Base image		Warp image		Corrected image		$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	RMSE/m
	x	y	x	y	x	y			
9	16 944.67	4 299.15	15 530.45	3 810.73	15 530.56	3 811.18	0.594 0	2.430 0	2.501 5
10	17 717.19	3 973.94	16 245.27	3 509.91	16 245.68	3 510.04	2.214 0	0.702 0	2.322 6
11	18 680.96	3 919.91	17 137.91	3 459.18	17 137.89	3 459.94	-0.108 0	4.104 0	4.105 4
12	19 768.97	3 740.56	18 144.64	3 294.18	18 145.17	3 293.86	2.862 0	-1.728 0	3.343 2
13	16 988.97	4 854.50	15 572.00	4 325.18	15 571.59	4 325.31	-2.214 0	0.702 0	2.322 6
14	17 761.49	4 962.55	16 286.36	4 425.27	16 286.62	4 425.20	1.404 0	-0.378 0	1.454 0
15	18 914.33	4 786.44	17 353.73	4 262.27	17 353.70	4 261.99	-0.162 0	-1.512 0	1.520 7
16	19 822.99	4 705.40	18 194.82	4 186.91	18 194.79	4 186.83	-0.162 0	-0.432 0	0.461 4

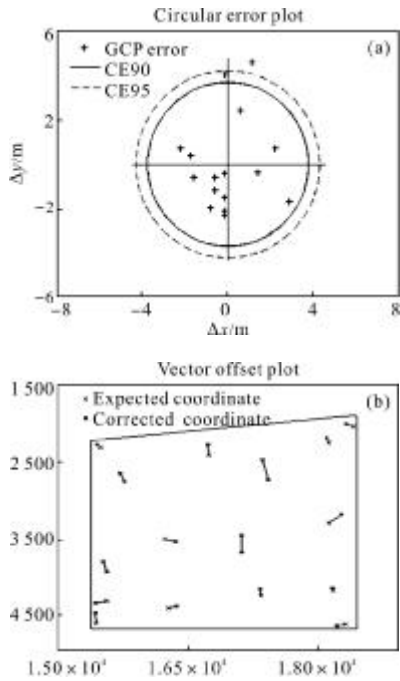


图 5 控制点圆点误差与误差向量

Fig.5 Circular error and error vector of the ground control point

差的均值、方差以及 x 方向、y 方向的均方根误差等值见表 3。

从表 2、表 3 和图 5 可以看出,文中实验得到的控制点的误差都在一个像元以内, RMSE 从选择的控制点的实际误差进行评价,总的 RMSE 在 0.5 个像元以内, CE 从控制点的统计分布及变化趋势进行评价, CE90 在 0.7 个像元以内, CE95 在 0.8 个像元以内,同时控制点较均匀地分布在图像上。

表 3 控制点误差统计 (单位: m)

Tab.3 Ground control point error statistics (Units: m)

Mean Δx	Mean Δy	Standard deviation Δx	Standard deviation Δy
-0.003 4	0.003 3	1.378 9	2.116 8
RMSE X	RMSE Y	RMSE	CE90
1.335 1	2.049 6	2.446 1	3.750 9
			CE95
			4.278 2

3 结 论

文中提出了一种基于 SIFT 特征的几何精校正方法。利用地理坐标的定位得到粗匹配点坐标,然后在以粗匹配点为中心的一定大小的窗口内进行搜索匹配,提高了特征点匹配的效率;采用分区域的 RANSAC 算法,通过分区域的策略使控制点均匀分布,通过在正确的校正模型中选择误差最小的一组特征点作为几何精校正的控制点保证了控制点的精度。该方法解决了人工选取控制点效率低下以及控制点分布不均匀的问题,实现了高光谱数据几何精校正的自动化处理,为实现大批量、高精度的高光谱数据产品自动生产提供了技术支持。并从光谱信息一致性以及定位精度两方面进行了算法分析与验证,实验表明该方法能够达到 0.8 像元的定位精度,并且校正前后光谱的光谱角小于 0.01 rad。

参考文献:

[1] Di Nan, Li Guiju, Wei Yajuan. Image matching technology based on SIFT for terminal-guiding system[J]. Infrared and

- Laser Engineering, 2011, 40(8): 1589-1593. (in Chinese)
邸男, 李桂菊, 魏雅娟. 采用 SIFT 的末制导图像匹配技术 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1589-1593.
- [2] Li Xiaochang, Zhu Dan. Image registration method based on region selection and scale-invariant feature[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 537-542. (in Chinese)
李小昌, 朱丹. 采用尺度不变特征和区域选择的图像配准方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 537-542.
- [3] Wang Hong, Ji Xiaoqiang, Dai Ming, et al. Improved speed up robust features matching algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 811-817. (in Chinese)
王洪, 嵇晓强, 戴明, 等. 一种改进的快速鲁棒性特征匹配算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 811-817.
- [4] Yang Xiaomin, Wu Wei, Qing Linbo, et al. Image feature extraction and matching technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(9): 2276-2282. (in Chinese)
杨晓敏, 吴炜, 卿琳波, 等. 图像特征点提取及匹配技术 [J]. 光学 精密工程, 2009, 17(9): 2276-2282.
- [5] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1615-1630.
- [6] Baltasavias E P, Stallmann D. Metric information extraction from SPOT images and the role of polynomial mapping functions [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1992, 29: 358-364.
- [7] Lowe D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [8] Zhou Wang, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.