

文章编号: 1007 4619(2006) 05 0690 07

北京一号小卫星多光谱图像波段 配准和图像变形评价

陈正超¹, 罗文斐¹, 张 浩^{1,2}, 刘 翔¹, 张 靓¹

(1 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 北京一号小卫星是中国和英国联合研制的一颗实用型、对地观测微小卫星, 星上携带中分辨率 32m 多光谱(近红外、红和绿波段)和 4m 全色两种有效载荷。为了提高多光谱图像的宽度和时间分辨率, 北京一号小卫星的每个多光谱波段都是由两个相机独立成像然后拼接而成。由于这种成像方式很难保证 6 个相机的主光轴平行, 导致图像配准精度较低。针对北京一号小卫星的这种成像特点, 本文在图像灰度交叉相关匹配的基础上, 发展了一种高精度波段配准算法来评价北京一号小卫星的波段配准精度, 并在波段配准的基础上, 评价北京一号小卫星多光谱图像的变形一致性。

关键词: 北京一号; 在轨测试; 波段配准; 图像变形; 图像质量评价

中图分类号: TP732 **文献标识码:** A

The Geometric Evaluation of Beijing 1 Microsatellite Multispectral Images

CHEN Zheng-chao¹, LUO Wen-fei¹, ZHANG Hao^{1,2}, LIU Xiang¹, ZHANG Liang¹

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Beijing-1 microsatellite is an applied earth observing microsatellite of China. It combines SSTL's standard Disaster Monitoring Constellation (DMC) multispectral camera with a high resolution panchromatic imager. To enlarge its swath and shorten the revisiting time, every multispectral band is combined by two part images which were captured by two separate cameras. This design must add the error of the band registration. To assess Beijing-1 microsatellite, this paper introduces an effective method to evaluate the band registration accuracy. The method is based on cross correlation of image digital number. Based on the result of band registration, this paper presents a new method to assess the images' distortion and its coherence of three bands.

Key words Beijing-1; band registration; image match; image distortion; image quality assessment

1 引 言

北京一号小卫星是中国和英国联合研制的一

颗实用型、对地观测微小卫星, 于 2005 年 10 月 27 日发射成功, 卫星总重量约 147kg, 设计寿命 5 年, 三轴稳定太阳同步轨道, 携带中分辨率 32m 多光谱(近红外、红和绿波段)和 4m 全色两种有效载

收稿日期: 2006-04-10 修订日期: 2006-05-25

基金项目: 中国科学院百人计划项目(编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目(编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目(编号: KJSX0401)。

作者简介: 陈正超(1976—), 男, 2005 年获得中国科学院遥感应用研究所的地图学与地理信息系统专业博士学位, 同年留所工作。目前从事两方面研究工作: 卫星在轨测试、在轨定标和真实性检验; 高光谱遥感机理及其应用研究。已经发表文章 10 余篇, 参加编写专著两部。

荷。为了提高多光谱图像的宽度和时间分辨率, 北京一号小卫星的每个多光谱波段都是由两个相机独立成像然后拼接而成, 图 1 是北京一号小卫星多光谱相机的组成示意图^[1]。由于北京一号小卫星的多光谱三个波段由 6 个独立相机组成, 这

必然增加波段间配准的误差和波段间变形的不一致性。众所周知, 多光谱图像的波段配准精度是影响图像分类精度的一个重要指标, 因此, 有必要正确评价北京一号小卫星的波段配准精度和图像变形。

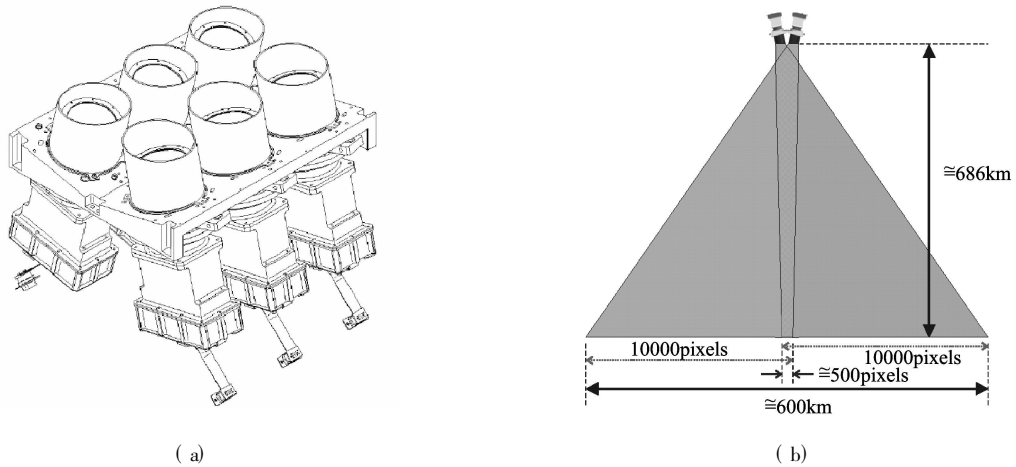


图 1 北京一号小卫星多光谱波段成像方式

(a) 三个波段由 6 个独立相机构成; (b) 每个波段的两个相机的成像方式示意图

Fig 1 The imager schematic (a) and the large swath schematic of the Beijing 1 m icrosatellite multispectral bands (b)

对于北京一号小卫星, 由于在发射前实验室的几何定标数据不能支持对卫星图像进行波段配准的检校工作, 因此只能通过图像处理的方法进行波段配准和校正。图像波段配准精度评价的关键在于:

(1) 图像配准方法的选择: 最常用的图像配准方法是基于灰度的配准和基于特征的配准^[2-4]。基于灰度的配准算法简单易行, 但是对于不同波长位置成像的图像来说, 可能出现错误匹配, 其原因是由于图像的波段位置不同导致相同的地物在不同的波段上的灰度值差异很大。基于特征的匹配算法需要经过特征提取等预处理, 而这些预处理可能会引进新的误差。

(2) 亚像元定位方法的选择: 航天工程对图像的波段配准精度要求高, 一般是 0.2-0.3 个像元^[5], 所以要求配准算法一定要能够达到亚像元的定位精度。亚像元定位一般有 4 种方法^[6-8]: 基于图像高分辨率重采样的方法、基于曲面拟合的方法、微分法和幅角法。在实际应用中, 经常使用重采样法和曲面拟合方法。重采样方法是对图像和匹配模

板进行放大 n 倍重采样, 在采样后图像上进行模板匹配。这种方法的缺点在于重采样后许多相邻点会产生相同的值。曲面拟合法是以像素级上的最佳匹配像素为中心, 利用该像素及其周围的匹配系数进行曲面拟合, 通过求得拟合曲面的极值点来获取匹配的最佳精确位置。

本文结合北京一号小卫星图像的特点, 在图像灰度相关的基础上, 选择曲面拟合法进行亚像元定位, 发展一种高精度的波段配准算法来评价北京一号小卫星多光谱图像的波段配准精度, 并在波段配准结果的基础上, 对图像变形一致性进行拟合分析。

2 方 法

2.1 波段配准

考虑到基于灰度和特征两种匹配算法的特点, 本文在灰度相关的基础上, 采用交叉相关算法^[9-11]来进行图像匹配, 交叉相关系数的计算公式是:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{i=-M/2}^{M/2} [(f(j, i) - \bar{f})(g(x+j, y+i) - \bar{g})]}{\left[\sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{i=-M/2}^{M/2} [(f(j, i) - \bar{f})^2] \right] \left[\sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{i=-M/2}^{M/2} [(g(x+j, y+i) - \bar{g})^2] \right]^{1/2}} \quad (1)$$

式中, $R(x, y)$ 是相关系数

$$\bar{f} = \frac{1}{(M+1)(N+1)} \sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{i=-M/2}^{M/2} f(j, i) \quad (2)$$

$$\bar{g} = \frac{1}{(M+1)(N+1)} \sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{i=-M/2}^{M/2} g(x+j, y+i) \quad (3)$$

为了消除由于同种地物在不同波段图像上的灰度值差异造成的误匹配, 本文用控制点(块)控制图像匹配。在图像上选择光谱平坦的目标作为控制点, 对于北京一号小卫星的三个波段(近红外、红和绿波段), 避免用植被和水体等反射光谱曲线变化大的目标作为控制点, 然后, 以每个控制点为种子点, 在待匹配图像上提取一定大小的匹配窗口, 使用匹配窗口进行交叉相关匹配。匹配过程分两步:

(1) 像元级匹配

搜索控制点在两个波段的同名点, 在像元级对两个对应匹配窗口进行匹配。像元级匹配的初始位置, 也是匹配中心控制点在图像上的行列号, 计算控制点(块)在参考图像上一定范围内每一点的相关系数。图 2 是以 3×3 的匹配范围为例, $R(i, j)$ 是匹配的初始位置(中心位置)的相关系数。根据灰度相关理论, 相关系数最大的点的位置就是像元级匹配的结果。设 (X_0, Y_0) 和 (X_1, Y_1) 分别是控制点在参考图像和匹配图像上的行列号, 那么两图像配准误差的整数部分 ΔX 和 ΔY 是:

$$\begin{cases} \Delta X = X_1 - X_0 \\ \Delta Y = Y_1 - Y_0 \end{cases} \quad (4)$$

$R(i-1, j-1)$	$R(i-1, j)$	$R(i-1, j+1)$
$R(i, j-1)$	$R(i, j)$	$R(i, j+1)$
$R(i+1, j-1)$	$R(i+1, j)$	$R(i+1, j+1)$

图 2 像元级匹配结果(相关系数)

Fig 2 The match results of pixel correlation

一般情况下, 卫星图像波段间的匹配误差不大于 20 像元, 为了提高匹配速度, 可以对匹配范围进行限制; 另外, 考虑到匹配范围越大, 在图像上和控制点(块)相似的图块就越多, 也就是增加了误匹配的可能性, 因此, 本文对匹配范围进行了限制。

(2) 亚像元级匹配

如果图像采样间隔无限小, 则相关系数在二维平面空间上应该是连续的, 那么相关系数最大值对应的位置就是精确匹配位置。而在一般情况下, 卫

星图像的采样间隔较大, 相关系数在二维平面空间不连续, 那么相关系数最大值对应的位置就不一定是精确匹配位置。在这种情况下, 可以用每个像素点所在位置为自变量, 用在这个位置上的相关系数为因变量进行曲面拟合, 拟合曲面的最高点就是两个波段的最佳匹配位置, 如图 3 所示。根据这种理论, 在图 4 中, 假设拟合曲面的最大值点位于 O_1 , 图中虚线方框表示像元级匹配位置, O_0 是像素级匹配得到的像元中心点, 那 O_0O_1 之间的位置相对差异就是亚像素匹配的误差。

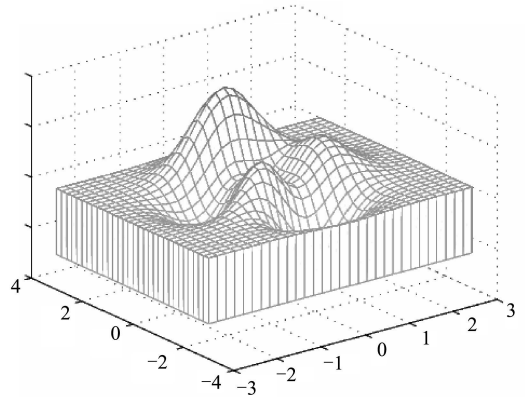


图 3 曲面拟合示意图

Fig 3 The graph of curved faces fitting

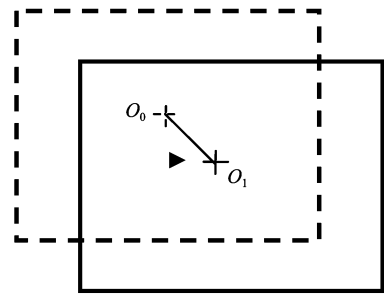


图 4 亚像元级匹配误差

Fig 4 The error of sub pixel matching

即亚像元匹配误差为:

$$\begin{cases} \Delta x = X_{O_1} - X_{O_0} \\ \Delta y = Y_{O_1} - Y_{O_0} \end{cases} \quad (5)$$

总的波段配准误差是:

$$\begin{cases} \Delta\Delta X = \Delta X + \Delta x \\ \Delta\Delta Y = \Delta Y + \Delta y \\ \Delta(X - Y) = \sqrt{(\Delta\Delta X)^2 + (\Delta\Delta Y)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\Delta\Delta X$, $\Delta\Delta Y$ 和 $\Delta(X - Y)$ 分别表示在水平方向、垂直方向和平面方向的匹配误差。

进行曲面拟合时选择的曲面模型直接关系到亚

像元匹配精度。实验中发现, 如果曲面模型中含有 $a * xy$ (a 是系数) 二次项, 拟合效果较差, 本文采用旋转抛物面进行拟合, 根据最小二乘法计算模型参数 p 和 q 计算时初值 $x_0 = 0$ $y_0 = 0$ 。旋转抛物面函数模型是:

$$\frac{(x - x_0)^2}{2p} + \frac{(y - y_0)^2}{2q} = z \quad (7)$$

式中, (x, y) 是进行图像匹配的像元位置, z 是每个像元位置上的相关系数。

对于图像的波段配准误差, 需要计算每个控制点的配准误差, 然后统计所有控制点误差的均值和方差再评价整个图像的波段配准误差。

2.2 图像变形及其一致性

对于图像变形的一种常用的评价方法是长度变形^[11-12]评价, 一般做法是在经过系统几何校正后的图像上选择控制点, 计算控制点在图像上的长度和真实长度之间的差异来评价, 但如果要评价零级卫星图像的变形就不能用这种方法了。而对于多光谱

图像用户来说, 他们不一定关心图像的局部的绝对变形, 而对图像整体变形趋势和波段间的变形一致性更为关心。因为图像整体变形趋势对选择图像几何纠正模型和计算图像采样间隔等工作很有参考价值, 而波段间变形的一致性会直接影响图像的分类精度等。因此, 本文提出: 图像变形评价应该重在评价图像变形的整体趋势和波段间变形的一致性。对于图像变形的整体趋势, 可以用控制点在不同波段间的相对误差配准误差和其所在位置的拟合曲线来表达, 对于多光谱图像波段间变形的一致性, 可以通过比较各个波段拟合曲线来评价。拟合的曲线可供选择几何纠正的模型时参考。由于是评价图像整体变形, 所以要求控制点尽量在图中均匀分布。

3 北京一号小卫星多光谱图像几何精度评价

本文选择的北京一号小卫星测试数据见表 1, 其中 P 相机和 S 相机分别是多光谱的两组相机。

表 1 测试数据说明

Table 1 Information of tested data

成像时间	范围	处理级别	图像大小	控制点个数	
				P 相机	S 相机
2005-11-14	华北平原	0 级	10000 列 × 10000 行	165	159
2005-12-13	华北平原	0 级	10000 列 × 10000 行	135	142
2006-01-12	西藏高原	0 级	10000 列 × 12000 行	175	168

根据前面的讨论, 对北京一号小卫星多光谱图像的几何精度评价过程如下:

第一步, 选控制点: 以任意一个波段为参考波段, 在参考波段上选择若干控制点, 控制点要求尽量均匀分布, 而且控制点周围灰度在三个波段上差异不大。以每个控制点为中心, 提取控制点块, 本文试验中选择的控制点块大小是 16 像元 × 16 像元。

第二步, 像元级匹配: 把控制点块在待匹配图像上, 在以控制点为中心的范围进行卷积运算, 本文试验的匹配范围是 40 像元 × 40 像元大小, 分别计算每个位置上的相关系数, 并提取相关系数最大的位置作为同名点。

第三步, 亚像元级匹配: 提取同名像点 3×3 邻域的相关系数, 根据相关系数及其所在位置拟合旋

转抛物面, 计算旋转抛物面的最大值, 并计算亚像元匹配误差。

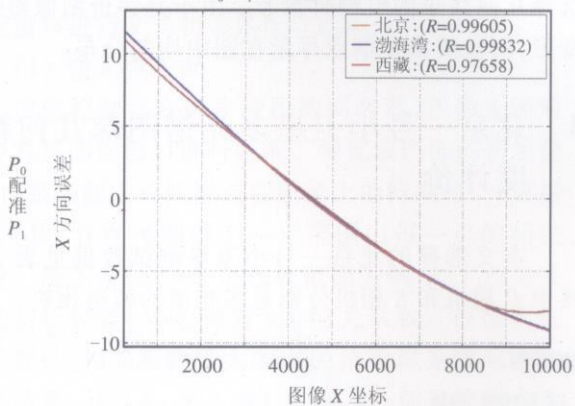
第四步, 波段配准误差计算: 根据像元级匹配误差和亚像元级匹配误差计算每个控制点的配准误差, 统计整个图像上所有控制点的误差的均值作为该图像的配准误差。北京一号小卫星多光谱图像的波段配准误差见表 2。

第五步, 图像变形拟合与分析: 根据控制点的配准误差和其在图像上的位置来拟合分析图像的变形情况, 进而对比各相机变形情况来评价波段间图像变形的一致性。图 5 是北京一号小卫星多光谱图像每个波段的变形规律及其之间的一致性。图中横坐标表示像元位置, 纵坐标表示配准误差, 每个图中的三条曲线是三个波段间的配准误差拟合曲线。

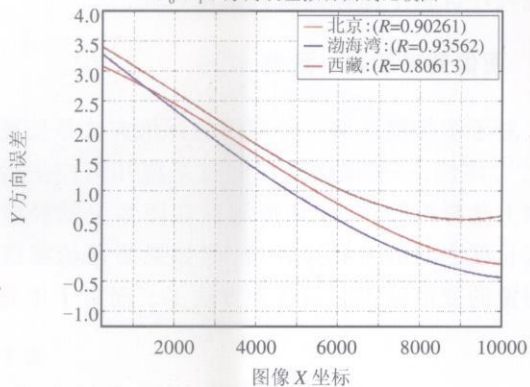
表 2 北京一号小卫星多光谱图像的波段配准误差
Table 2 The band registration error of Beijing 1 m multispectral bands

	波段	P_1		P_2		波段	S_1		S_2	
		X	Y	X	Y		X	Y	X	Y
配准误差	P_0	7.00	1.47	13.55	1.45	S_0	3.084	9.72	3.39	12.63
标准差		8.90	1.28	8.64	2.09		3.75	0.94	4.13	0.21
配准误差	P_1	—	—	14.75	2.94	S_1	—	—	4.19	3.23
标准差		—	—	1.978	0.17		—	—	0.74	0.95

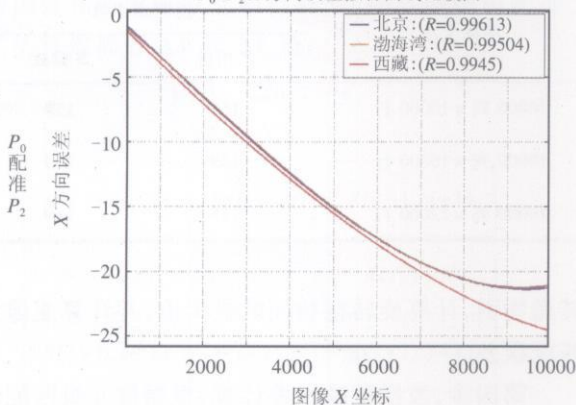
P_0-P_1 X方向误差拟合曲线比较图



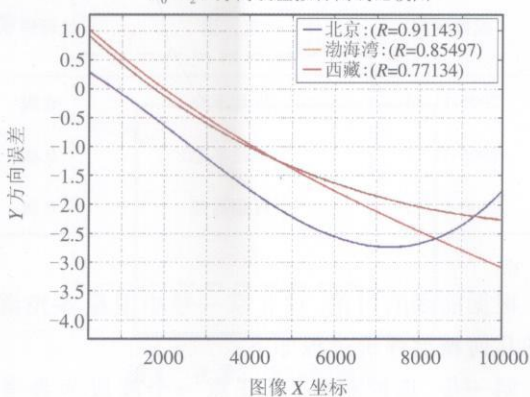
P_0-P_1 Y方向误差拟合曲线比较图



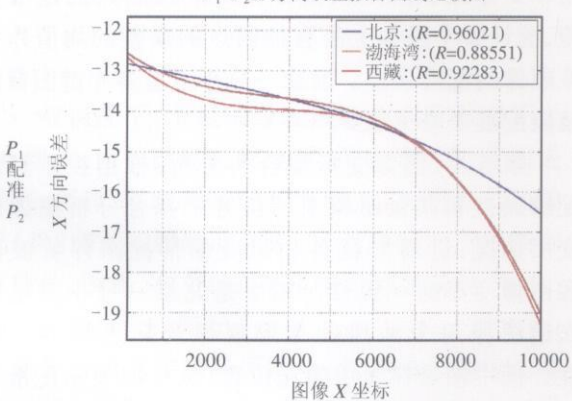
P_0-P_2 X方向误差拟合曲线比较图



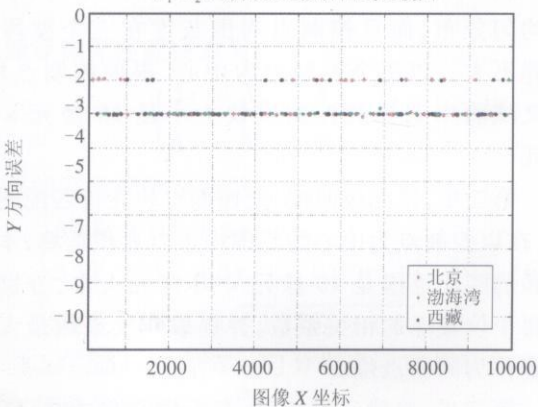
P_0-P_2 Y方向误差拟合曲线比较图



P_1-P_2 X方向误差拟合曲线比较图



P_1-P_2 Y方向误差拟合曲线比较图



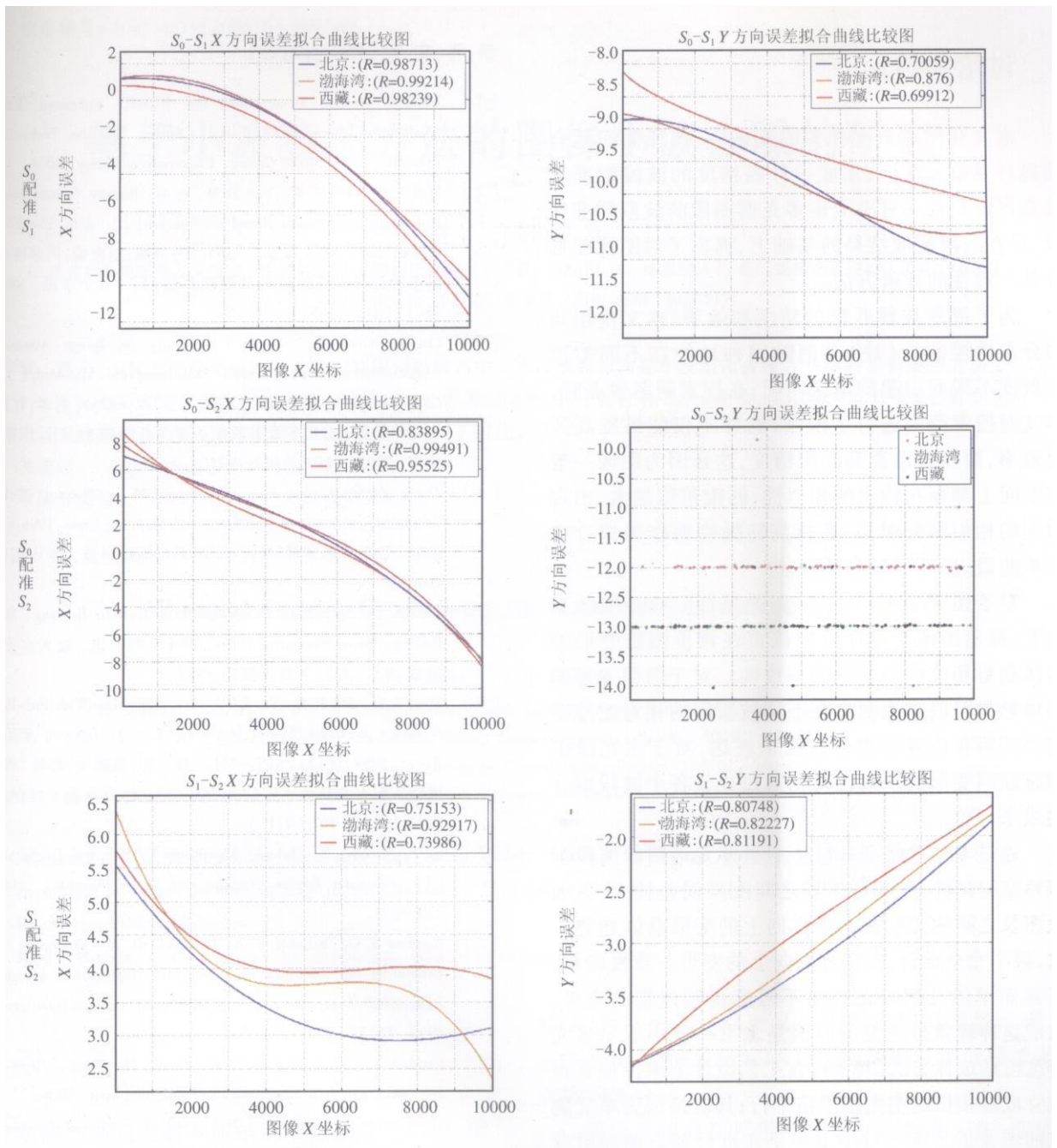


图 5 北京一号多光谱图像变形及其波段间一致性拟合曲线图

Fig 5 The image distortion and its uniformity of Beijing 1m multispectral bands

根据计算结果可以看出:北京一号小卫星多光谱图像各波段之间配准误差较大,尤其在 X 方向上 P_0 与 P_2 及 P_1 与 P_2 之间偏移平均可达 13—14 个像元。各波段之间配准误差的标准差较大,除了 S_1 与 S_2 之间的平均误差在 1 个像元之内以外,其他波段之间的误差都较大,这说明各波段图像之间的变形不一致。

图 5 中的单条曲线越平缓且越接近直线则说明该图像的变形越小;三条曲线越一致,则说明波段间的变形一致性好。从图中可以看出,北京一号小卫

星多光谱图像存在较大的图像变形; X 方向上的变形趋势一致,都是在影像中心较小,越向边缘越大,但三条曲线不能完全重合,这说明三个波段在 X 方向上的变形一致性不十分理想,这与卫星是 6 个相机独立成像,而且成像方式是侧视成像有关; Y 方向上的变形一致性较差,这与卫星姿态有关。由于选择图像的成像时间分别是卫星刚发射的第 17 天、46 天、75 天,而这段时间内北京一号正好处在不同的姿态调整期内。

4 讨论和结论

本文在图像灰度相关的基础上,选择曲面拟合法进行亚像元定位,发展一种高精度的波段配准算法来评价北京一号小卫星多光谱图像的波段配准精度,并在波段配准结果的基础上,提出了对图像变形及其一致性的评价方法。

为了提高波段匹配的精度和效率,本文使用均匀分布的控制点(块)来消除同种地物在不同波段上灰度不同而引起的错误匹配;在搜索同名像点时,本文对搜索范围进行了限制,这样不仅能够提高匹配效率,而且可以提高匹配精度,这是因为图像一般在空间上都存在较大的相似性,匹配范围越大,出现错误的相似匹配越多;选择旋转抛物面作为拟合的二次曲面,提高了拟合精度。

对于图像变形,本文从图像处理和应用的角度出发,提出图像变形评价应该重在评价图像变形的整体趋势和波段间变形的一致性。对于图像变形的整体趋势可以用控制点在不同波段间的相对配准误差和其所在位置的拟合曲线来表达,对于多光谱图像波段间变形的一致性可以通过比较各个波段拟合曲线来评价。

通过本文对北京一号小卫星多光谱图像波段配准精度的评价,发现各波段之间配准误差较大,各波段图像之间的变形在水平方向上的变形总体趋势一致,但不完全重合,在竖直方向上的变形一致性较差,仅靠简单的几何校正模型不可能得到理想的效果。造成这种现象最主要的原因是北京一号小卫星多光谱波段的成像方式(图 1),在工艺设计上难保证 6 台独立成像相机的主光轴严格平行;其次是因为本文测试的图像是北京一号小卫星正在进行姿态调控时获取的试验图像,在这段成像期间,卫星都被指令在一定侧摆角度,而且侧摆角度在随时变化,再加上北京一号小卫星卫星平台自身重量很小,很难保存惯性。

致 谢 本文试验数据是北京宇视蓝图信息技术有限公司提供。

参 考 文 献 (References)

- [1] Detailed Design Description for BLIMIT Enhanced Earth Observation Microsatellite [R]. Surrey Satellite Technology Limited Surrey Space Centre University of Surrey 2004.
- [2] Wei Y F, Zhao Z M, Yan D M, *et al*. Remote Sensing Image Automatic Registration Based on Feature [J]. *Acta Electronica Sinica* 2005 33(1): 161—165 [韦燕凤, 赵忠明, 闫冬梅等. 基于特征的遥感图像自动配准算法 [J]. 电子学报, 2005 33(1): 161—165]
- [3] Liu Z, Gong P, Shi P J. Study on Image Automatic Registration based on Layered Multi template Matching [J]. *Computer Applications* 2005 25(2): 322—325. [刘臻, 宫鹏, 史培军. 基于分层多模板匹配的影像自动配准 [J]. 计算机应用, 2005 25(2): 322—325.]
- [4] Zhang Z X. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press 1996 [张祖勋. 数字摄影测量 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996]
- [5] Han X Z. Spaceflight Multi spectrum Remote Sensing [M]. Beijing: Space Navigation Press 1991 [韩心志. 航天多光谱遥感 [M]. 北京: 宇航出版社, 1991.]
- [6] Zhao L G, Shi P F, Yu Y. A New Algorithm With Sub Pixel Accuracy In Image Model Matching [J]. *J. Infrared Millim. Waves* 1999 18(5): 407—411. [赵立初, 施鹏飞, 俞勇. 模板图像匹配中的亚像元定位新方法 [J]. 红外与毫米波学报, 1999 18(5): 407—411.]
- [7] Qi T, Michael N. Hubin's Algorithm for Subpixel Registration [J]. *Computer Vision Graphics and Image processing* 1986 220—233
- [8] Ingemar J G, Kuskal J B, Wallach D A. Predicting and Estimating the Accuracy of a Subpixel Registration Algorithm [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1990 12(8): 721—734]
- [9] Landsat 7 Science Data Users Handbook [M]. http://lpwww.gsfc.nasa.gov/las/handbook/handbook_toc.html 2006
- [10] SPOT user's handbook [M]. vol 1: reference manual documentation of CNES and SPOT IMAGE 1988
- [11] SPOT user's handbook [M]. vol 2: SPOT handbook documentation of CNES and SPOT IMAGE 1988
- [12] Tang H R. Study on 2003 Landsat 7 ETM+ Data Process Technique [D]. Thesis for Doctor's Degree of Chinese Academy of Sciences 2003 [唐海蓉. Landsat 7 ETM+ 数据处理技术研究 [D]. 中国科学院电子学研究所博士学位论文, 2003]