

一种利用物方定位一致性的多光谱卫星 影像自动精确配准方法

王 密¹ 杨 博¹ 金淑英¹

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要:提出了一种基于物方定位一致性的卫星多光谱影像自动配准方法。首先采用类似于相对定向的方式恢复各波段影像间精确的相对几何成像关系;然后基于同名像元物方定位一致性的约束条件,在无需影像匹配的情况下实现子像素级的多光谱影像自动配准。该方法是一种真正几何意义上的配准,波段间的纠正模型为严密几何成像模型,不仅在理论上具有严密性,而且配准结果与影像质量无关。为了验证本文方法的正确性和可行性,对资源三号卫星的多光谱影像进行了实验。目前该方法已应用于卫星影像预处理软件中。

关键词:卫星多光谱影像;波段配准;相对几何成像关系;物方定位一致性;纠正模型

中图法分类号:P237.3

多光谱相机由于能够获取多个波段的影像,通过后期的配准、融合等处理,能够生成各种专题影像产品,极大地丰富了影像信息,提高了影像数据的应用潜力,已成为当前遥感卫星搭载的重要成像载荷。各波段影像之间的配准是多光谱影像处理的重要环节,配准精度直接影响其后续处理和应用的质量^[1]。由于高程起伏、传感器内部畸变等因素的影响,卫星多光谱相机获取的原始影像各波段之间通常存在较大的非线性几何变形^[2],通过简单的片间平移实现多光谱影像的波段间配准,无法满足产品质量的精度要求。因此,卫星多光谱影像数据的高精度配准方法一直是遥感领域的研究热点,具有重要的理论意义和应用价值。

影像配准的目的在于消除影像间的相对几何变形,确定同名像元的映射关系^[3]。现有的影像配准方法多是基于影像匹配的像方配准。通过影像匹配,在待配准的影像之间获取同名像点,然后采用几何纠正模型(如仿射变换模型)建立待配准影像之间同名像点坐标的映射关系。早在 20 世纪 90 年代,张祖勋等采用多级影像概率松弛整体匹配技术对 SPOT 全色影像和 TM 多光谱影像进行了配准,取得了良好的效果^[4];Keller 等人提出基于梯度幅度最大值的多传感器影像配准方法^[5];Li 等人针对 SIFT 算子给出了一种效果更

好的自适应主方向求解方法,使影像配准精度及可靠性均得到提升^[6];李芳芳等人对传统 SIFT 算法在特征点提取效率以及匹配精度上进行了优化,用于遥感影像的配准取得了良好的效果^[7];王瑞瑞等人则采用一种基于虚拟匹配窗口的 SIFT 算法,选取角度和尺度偏差较大的 SPOT5 和 TM 影像进行配准,配准精度优于一个像素^[8]。此外,基于小波的影像配准方法在遥感影像中也得到了研究与应用^[9]。总的来说,这种基于像方匹配的影像配准方法由于未对影像间的相对几何变形进行分析,所采用的几何纠正模型理论上缺乏严密性,有时不能很好地顾及影像间复杂的相对几何变形;同时,对匹配质量的依赖使其适用性受到了一定限制,对于那些纹理特征不明显、辐射差异较大的区域,基于像方匹配的影像配准方法此时不再适用。另外,由于每次配准前都必须进行影像匹配,必然会降低效率,影响后续的应用。基于此,在卫星影像地面预处理中,有必要研究一种不依赖影像匹配的配准方法,避免此类问题的出现。严明等人通过统计各波段同名像元的像方偏差,拟合出一个固定的波段配准模型来实现多光谱影像的自动配准,在 BJ-1 和 DMC_UK2 小卫星多光谱影像的配准中,取得了亚像素级的配准精度^[10]。由于该方法仅仅简单统计了各波段影像

收稿日期:2013-04-17。

项目来源:国家 973 计划资助项目(2012CB719902)。

上同名像元的偏差,并未从严格几何成像模型出发对各波段影像间的相对几何变形进行分析,理论上缺乏严密性。因此,本文提出了一种基于物方定位一致性的卫星多光谱影像配准方法,并以资源三号卫星多光谱相机为例,对本文方法进行了验证。

1 基本原理

1.1 波段间几何关系模型

构建波段间成像几何关系模型是实现本文配准方法的几何基础。以其中两个波段 B_1 和 B_2 为例,如图 1 所示,假设 P 是 B_1 、 B_2 两个波段成像地面覆盖重叠区内的某一物方点, B_1 、 B_2 先后对其成像,且像点分别为 p_1 和 p_2 , S_1 和 S_2 分别为对应的投影中心,根据同名点空间交会的摄影几何约束关系,光线 $S_1 p_1$ 、 $S_2 p_2$ 必然相交于物方点 P 。根据卫星多光谱相机严格几何成像模型,有:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} Xp_1 \\ Yp_1 \\ Zp_1 \end{bmatrix}_{\text{WGS84}} = \begin{bmatrix} X_{S_1} \\ Y_{S_1} \\ Z_{S_1} \end{bmatrix}_{\text{WGS84}} + m_1 \mathbf{R}_{T_1} \mathbf{R}_{B_{J_1}} \mathbf{R}_{BS} \begin{bmatrix} x_{c_1} \\ y_{c_1} \\ -f \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} Xp_2 \\ Yp_2 \\ Zp_2 \end{bmatrix}_{\text{WGS84}} = \begin{bmatrix} X_{S_2} \\ Y_{S_2} \\ Z_{S_2} \end{bmatrix}_{\text{WGS84}} + m_2 \mathbf{R}_{T_2} \mathbf{R}_{B_{J_2}} \mathbf{R}_{BS} \begin{bmatrix} x_{c_2} \\ y_{c_2} \\ -f \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中, m_1 和 m_2 为摄影比例尺因子; $(X_{S_1}, Y_{S_1}, Z_{S_1})$ 和 $(X_{S_2}, Y_{S_2}, Z_{S_2})$ 为投影中心 S_1 和 S_2 在 WGS84 坐标系下的坐标; \mathbf{R}_{BS} 为相机在卫星本体坐标系下的安装角矩阵; $\mathbf{R}_{B_{J_1}}$ 和 \mathbf{R}_{T_1} 分别为 p_1 成像时卫星本体坐标系与 J2000 坐标系、J2000 坐标系与 WGS84 坐标系之间的旋转矩阵; $\mathbf{R}_{B_{J_2}}$ 和 \mathbf{R}_{T_2} 则为 p_2 成像时相应的旋转矩阵。

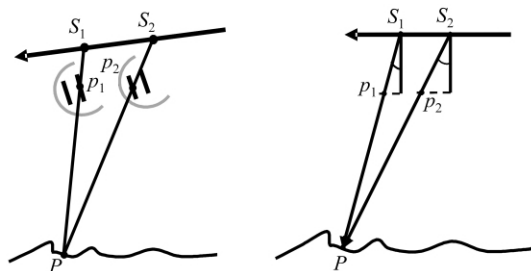


图 1 卫星多光谱相机波段间成像几何关系

Fig. 1 Band-to-band Geometric Imaging Relationship

利用严格几何成像模型以及物方高程信息可以实现像点坐标与地面点大地坐标之间的正反换

算,为了便于描述,这里采用映射关系式(2)、式(3)简化表示本文方法中涉及的几种坐标换算:

$$(x, y) \xrightarrow{f_1} (X, Y, Z) \quad (2)$$

$$(X, Y, Z) \xrightarrow{f_2} (x, y) \quad (3)$$

式中, f_1 表示基于严格几何成像模型,利用物方高程信息将像点 (x, y) 正投影至物方,获取其对应的物方点坐标 (X, Y, Z) ; f_2 表示基于严格几何成像模型将物方点坐标 (X, Y, Z) 反投影至像方,获取其像点坐标 (x, y) 。

1.2 配准方法及流程

利用波段 B_1 的几何成像参数以及物方高程信息,对同名像点 p_1 执行坐标正投影公式 f_1 ,解算得到物方点 P 的坐标为 $(Xp_1, Yp_1, Zp_1)^T$; 利用波段 B_2 的几何成像参数,将 $(Xp_1, Yp_1, Zp_1)^T$ 代入式(3)执行坐标反投影计算 f_2 ,获得 B_2 波段影像上对应的同名像点 p_2 的坐标为 (x'_{c_2}, y'_{c_2}) 。理想情况下,当各波段影像几何成像参数以及物方高程信息均准确无误时,根据同名像点几何定位一致性的约束关系,上述计算得到的同名像点 p_2 的坐标 (x'_{c_2}, y'_{c_2}) 与其真实坐标 (x_{c_2}, y_{c_2}) 应相等,由此可建立 B_1 、 B_2 两波段影像上同名像点之间的映射关系,实现多光谱影像的配准,这就是基于物方定位一致性的多光谱影像配准原理。基于此原理,对于 B_1 波段影像上的像点 p_1 ,执行图 2 所示的运算流程,即可确定其在 B_2 波段影像上的同名像点 p_2 的坐标,实现多光谱影像的自动配准。

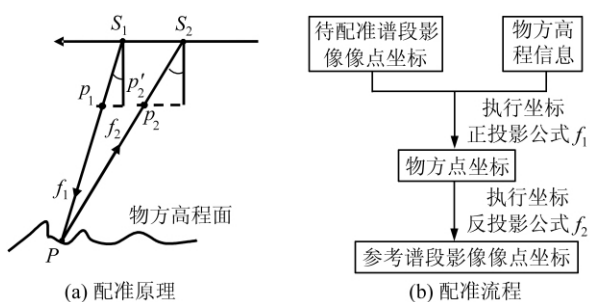


图 2 配准原理及流程

Fig. 2 Principle and Route of Registration

2 误差分析

在实际情况下,由于各波段影像的几何成像参数以及物方高程信息总存在一定的误差,因此 (x'_{c_2}, y'_{c_2}) 与 (x_{c_2}, y_{c_2}) 不可能完全相等,总存在误差 (v_x, v_y) ,如式(4)所示。本文把 (v_x, v_y) 称为同名像元 p_1 和 p_2 的配准误差,该误差直接反映了同名像元 p_1 和 p_2 的配准精度。

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{c_2} \\ y_{c_2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x'_{c_2} \\ y'_{c_2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

基于以上分析,欲实现基于同名像元物方定位一致性的多光谱影像高精度配准,建立同名像元的精确映射关系,必须对影像波段间同名像元配准误差的因素进行分析,并消除其影响,保证波段间同名像元的精确配准。从式(1)不难看出,导致波段间同名像元配准误差的因素主要包括外定向参数(姿态、轨道)误差、传感器内部几何畸变差以及物方高程误差,这三类误差都会引起各波段间同名像元几何定位的不一致。由于卫星多光谱相机各波段间同名像点的成像时差很短,考虑到卫星在轨运行状态较为平稳,因此,各波段影像同名像元的外定向参数之间的相对误差很小,其引起的配准误差可以忽略不计。

2.1 高程误差分析

如图 3(a)所示, H 代表轨道高度, f 为相机主距, θ_1 和 θ_2 分别代表波段 B_1 和 B_2 沿轨方向的视场角。若存在高程误差(或高程起伏) ΔH , 由其引起的波段间配准误差 $\overrightarrow{p_2 p'_2}$ 主要表现为沿轨方向, 计算公式为:

$$p_2 p'_2 = f \cdot (\tan\theta_2 - \tan\theta_1) \cdot \frac{\Delta H}{H + \Delta H} \quad (5)$$

以资源三号卫星多光谱相机为例,绿波段(B_2 波段)作为参考波段,利用式(5)可以定量分析高程误差对蓝波段、红波段以及近红外波段与绿波段间配准误差的影响规律,如图 3(b)所示。通过分析可知,随着高程误差的增大,配准误差也相应增大。当高程误差大于 500 m 时,近红外与绿波段影像的配准误差达到 0.3 像素以上,因此,对于资源三号卫星多光谱影像进行波段间物方配准时,高程误差对于配准精度的影响不可忽略。利用全球 Aster G-DEM 数据作为物方高程信息可以解决此问题。Aster G-DEM 数据作为 2009 年公开的全球 DEM 数据,平面采样精度达到 30 m,高程精度约为 10 m,完全能够满足卫星多光谱影像物方配准的精度要求。

2.2 传感器内部误差分析

由于多光谱相机各波段单独成像,卫星在轨运行过程中受到各种因素的影响,各波段成像单元均会发生不同程度的物理畸变和位置错移,如旋转、平移、弯曲、缩放以及离焦等。另外,相机的物镜系统也存在一定程度的径向畸变、偏心畸变等,这类非线性的光学畸变对于焦平面上不同位置的探元引起的像方偏差是不一致的。若 B_1 、 B_2 两波段成像单元在同名像元 p_1 、 p_2 处分别存在几何畸变误差 (dx_1, dy_1) 、 (dx_2, dy_2) , 由此导致的配

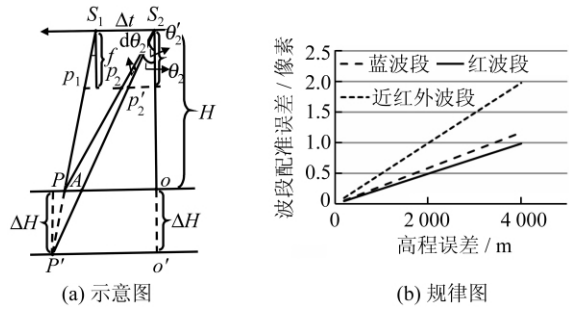


图 3 配准误差与高程误差之间的几何关系
Fig. 3 Relationship Between Elevation Error and Registration Error

准误差 (v_x, v_y) 近似满足关系式(6):

$$\begin{cases} v_x = r_x = dx_1 - dx_2 \\ v_y = r_y = dy_1 - dy_2 \end{cases} \quad (6)$$

其中, (r_x, r_y) 称为波段间的相对几何畸变。式(6)说明,各波段间的相对几何畸变将导致相同大小的配准误差。因此,补偿各波段成像单元之间的相对几何畸变,恢复各波段成像单元之间精确的相对位置关系,是满足高精度物方配准的关键环节和必要前提。

3 基于附加多项式系数的波段间相对几何定标

基于上述分析,为了对各波段成像单元之间的相对几何畸变进行补偿,本文提出基于附加多项式系数的波段间相对几何定标方法。其主要思想是:首先选取一个波段作为参考波段,对其余各非参考波段分别建立其与参考波段之间的相对几何定标模型,并对模型参数进行解算,从而恢复非参考波段成像单元与参考波段间精确的相对几何关系。下面以 B_1 和 B_2 波段为例,对该方法中涉及的关键技术进行阐述,其余波段类似。

3.1 波段间相对几何定标模型

为了对 B_1 、 B_2 两波段成像单元之间的相对几何畸变进行补偿,恢复它们在相机焦平面上的相对位置关系,在非参考波段 B_1 成像单元的内定向参数模型中引入附加参数项 Δx 和 Δy , 构建基于扩展共线条件方程的自检校平差模型,这是线阵传感器几何定标的常见方法^[11]。此时,波段 B_1 的严密几何成像模型转化为:

$$\begin{bmatrix} X_{S_1} & Y_{S_1} & Z_{S_1} \end{bmatrix}_{\text{WGS84}}^T + m_1 \mathbf{R}_{T_1} \mathbf{R}_{B_1} \mathbf{R}_{BS} \begin{bmatrix} x_{c_1} + \Delta x_1 \\ y_{c_1} + \Delta y_1 \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xp \\ Yp \\ Zp \end{bmatrix}_{\text{WGS84}} \quad (7)$$

考虑到卫星多光谱相机各波段均采用线阵 CCD 作为成像单元,共用同一个相机镜头系统,并且相机视场角通常较小,因此,对于附加参数项 Δx 和 Δy ,本文采用以探元号为自变量的三次多项式^[12],对非参考波段成像单元与参考波段成像单元之间的相对几何畸变进行拟合,在某种程度上讲是可行的,如式(8)所示:

$$\begin{cases} \Delta x_1 = ax_0 + ax_1 \times s + ax_2 \times s^2 + ax_3 \times s^3 \\ \Delta y_1 = ay_0 + ay_1 \times s + ay_2 \times s^2 + ay_3 \times s^3 \end{cases} \quad (8)$$

式中, s 代表探元号。

3.2 波段间相对几何定标模型参数解算

对各非参考波段建立相对几何定标模型后,接下来就是模型参数的解算。选择一景影像质量较优的多光谱影像,首先在 B_1 和 B_2 两波段影像上量测一定数量均匀分布的同名点对 (p_1^i, p_2^i) ($i=1, \dots, n$) (p_1^i, p_2^i 表示一对同名像点分别在 B_1 和 B_2 波段影像上的像点);然后对每对同名像点 (p_1^i, p_2^i) ($i=1, \dots, n$),利用 B_2 波段的几何成像参数及物方高程信息执行坐标正投影换算公式,将像点 p_2^i 投影至物方,获取其物方点 P^i 的坐标 $(X_{P_i}, Y_{P_i}, Z_{P_i})_{\text{WGS84}}$;最后将物方点 P^i 作为控制点,基于式(7),利用空间后方交会的原理解算 B_1 波段成像单元的相对几何定标模型参数,实现 B_1 、 B_2 两波段成像单元的相对几何定标。

按照上述方法,将得到的各非参考波段的相对几何定标参数记录下来,用于后续的影像配准。

4 实验与分析

为了充分验证本文方法的理论正确性和实践可行性,对资源三号卫星选择三景不同时间、不同轨道的多光谱影像进行实验,分别记为 M_1 、 M_2 、 M_3 ,全部都附带有几何成像参数文件,包括姿态数据文件、轨道数据文件、成像时间文件以及相机参数文件等。另外,本实验采用 Aster G-DEM 数据作为物方高程模型。

4.1 实验方法与结果

基于本文提出的方法,首先选择 M_1 影像进行波段间相对几何定标,其中以波段 B_2 (绿波段)作为参考波段,波段 B_1 (蓝波段)、 B_3 (红波段)、 B_4 (近红外波段)作为非参考波段;然后利用定标后的结果对 M_2 、 M_3 进行物方配准实验。为了检验物方配准的精度,首先利用高精度影像匹配方法在待配准的多光谱各波段影像上均匀提取 400 个同名像点,然后基于式(4)计算得到这些同名像点

各波段间的配准误差。插页 I 彩图 1 为资源三号卫星多光谱相机非参考波段相对于参考波段的几何畸变曲线;插页 I 彩图 2 为 M_2 与 M_3 的配准结果;表 1 列出了 M_2 、 M_3 两景影像的配准误差。

表 1 同名像元波段间配准精度
Tab. 1 Band-to-band Registration Accuracy

影像	地形	波段	配准精度/像素		
			x	y	总
M_2	山地	蓝-绿	0.182	0.148	0.234
		红-绿	0.083	0.076	0.113
		近红外-绿	0.179	0.168	0.245
M_3	平原	蓝-绿	0.188	0.134	0.231
		红-绿	0.081	0.085	0.117
		近红外-绿	0.192	0.155	0.247

4.2 结果分析

1) 对于资源三号卫星多光谱相机,插页 I 彩图 1 所示的实验结果表明,蓝、红、近红外波段与绿波段成像单元之间沿轨方向的相对几何畸变较小,基本在 0.2 像素以内;沿 CCD 方向的相对几何畸变则较大,最大达到 1.5 像素,因此,欲实现亚像素级的配准精度,必须进行波段间的相对几何定标。

2) 从表 1 可以看出,参与检验的同名像点各波段间的物方配准中误差均优于 0.25 像素,说明本文方法的配准精度完全能够满足亚像素级配准精度的要求。

5 结 语

本文针对卫星多光谱影像,提出了一种基于同名像元物方定位一致性约束的波段配准方法。该方法采用类似于相对定向的方式,恢复各波段影像间精确的相对几何成像关系;基于同名像元物方定位一致性的约束条件,实现波段间的高精度自动配准。实验结果表明,对于资源三号卫星多光谱影像,本文方法在无需匹配的情况下,能够实现优于 0.3 像素精度的波段间的自动配准,大大提升了处理效率。此外,本文方法是一种真正几何意义上的配准,波段间的几何纠正模型为严密几何成像模型,不仅在理论上具有严密性,而且配准结果与影像质量无关,对于水域、沙漠以及山地等纹理特征不丰富、匹配质量难以保证的区域,其配准质量也能得到保证。目前,该方法已成功应用于卫星影像预处理系统中。

参 考 文 献

[1] 王洪海,徐建艳,龙小祥.一种卫星多光谱图像亚像

- 元波段配准精度自动评价方法[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(3): 55-63
- [2] Chander G, Saunier S. SSTL UK-DMC SLIM-6 Data Quality Assessment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(7): 2 380-2 391
- [3] Alexander W, Claudi D A. ARRSI: Automatic Registration of Remote Sensing Images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(5): 1 483-1 493
- [4] 张祖勋, 张剑清, 廖明生, 等. 遥感影像的高精度自动配准[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 320-323
- [5] Keller Y, Averbuch A. Multisensor Image Registration via Implicit Similarity [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(5): 794-801
- [6] Li Qiaoliang, Wang Guoyou, Liu Jianguo, et al. Robust Scale-in-Variant Feature Matching for Remote Sensing Image Registration [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 287-291
- [7] 李芳芳, 肖本林, 贾永红, 等. SIFT 算法优化及其用于遥感影像的自动配准[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(10): 1 245-1 249
- [8] 王瑞瑞, 马建文, 陈雪. 多传感器影像配准中基于虚拟匹配窗口的 SIFT 算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(2): 163-166
- [9] Hong Gang, Zhang Yun. Wavelet-Based Image Registration Technique for High-Resolution Remote Sensing Images [J]. Computer & Geosciences, 2008, 34: 1 708-1 720
- [10] 严明, 王智勇, 伍菲, 等. CCD 几何偏差模型的多波段遥感影像配准[J]. 遥感学报, 2012, 16(6): 1 145-1 156
- [11] 胡芬. 三片非共线 TDI CCD 成像数据内视场拼接理论与算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010
- [12] Sebastien L, Pablo M, Jean-Philippe A. In-Flight CCD Distortion Calibration for Pushbroom Satellites Based on Subpixel Correlation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(9): 2 675-2 683

第一作者简介: 王密, 教授, 博士, 博士生导师。研究方向为新型传感器的数字摄影测量。

E-mail: wangmi@lmars.whu.edu.cn

A Registration Method Based on Object-Space Positioning Consistency for Satellite Multi-spectral Image

WANG Mi¹ YANG Bo¹ JIN Shuying¹

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: This paper proposes a registration method based on object-space positioning consistency for satellite multi-spectral images. The method includes two steps: restoring the precise band-to-band relative geometric imaging relationship by adopting a method similar to relative orientation, and realizing automatic registration with sub-pixel accuracy without image-matching using the constraint conditions of object-space positioning consistency of the homologous image points. The method uses a rigorous geometric imaging model as the rectification model, achieving true geometric registration and is theoretically strict. The results, furthermore, have no relationship with the image quality. In our experiment, ZY3 satellite multi-spectral images are tested to demonstrate the feasibility and correctness of our method. This method has been successfully applied in the satellite image pre-processing software.

Key words: satellite multi-spectral image; band-to-band registration; relative geometric imaging model; object-space positioning consistency; rectification model

About the first author: WANG Mi, professor, Ph. D, Ph.D supervisor. His major research is digital photogrammetry of new-type airborne and spaceborne imaging sensors.

E-mail: wangmi@lmars.whu.edu.cn

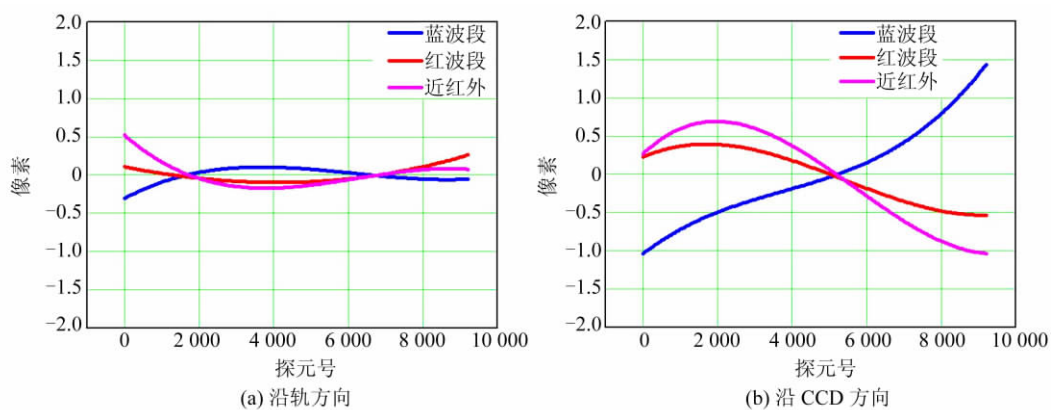


图 1 非参考波段与参考波段间相对几何畸变曲线

Fig. 1 Relative Geometric Distortion Curve Between Non-Reference Band and Reference Band

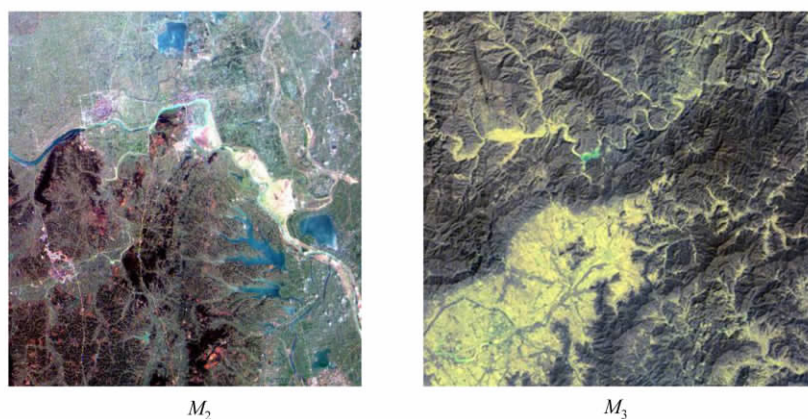


图 2 配准后的影像

Fig. 2 Overview of Images After Registration

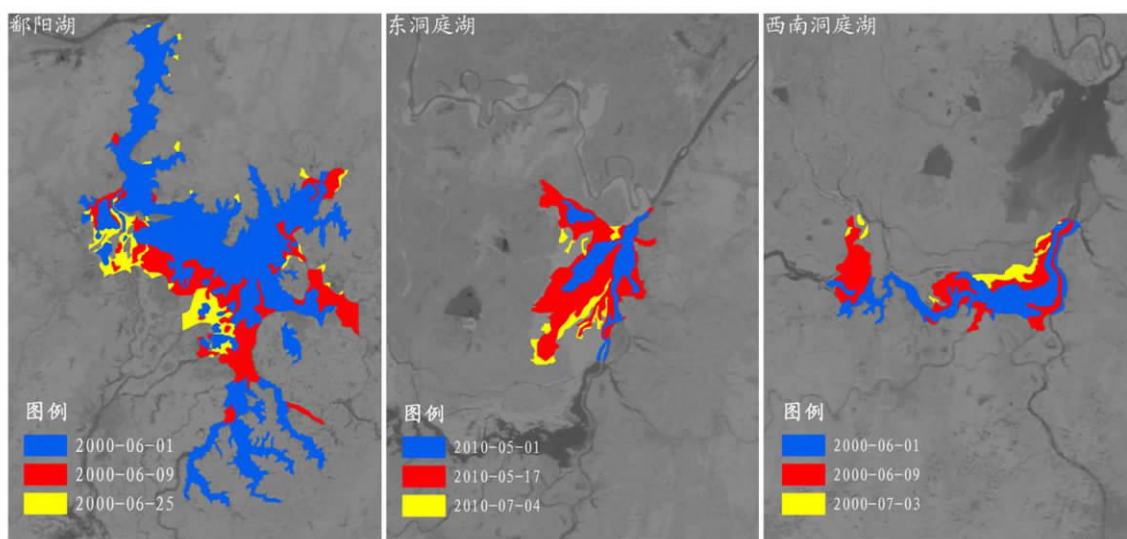


图 3 淹没面积动态变化监测

Fig. 3 Dynamic Changes of Submerged Area