

基于虚拟线阵的 ZY-1 02C 卫星 HR 相机内视场拼接方法

潘俊^{1,2} 胡芬³ 王密^{1,2} 金淑英^{1,2}

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

3 国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心,北京,101300

摘要:结合 ZY-1 02C 卫星高分辨率(HR)相机的成像特点,深入分析了各种潜在的误差来源,提出了一种基于虚拟线阵的非共线 TDI CCD 相机成像数据内视场拼接方法,采用 ZY-1 02C 卫星 HR 相机获取的影像数据进行了拼接实验。通过对拼接结果的定性和定量评价,验证了该方法的正确性和可行性。目前该方法已成功应用于 ZY-1 02C 卫星数据处理的业务化运行系统中。

关键词:非共线 TDI CCD;内视场拼接;虚拟线阵;精度评价

中图分类号:P236

文献标志码:A

时间延时积分电荷耦合元件(TDI CCD)采用时间延迟积分的方法对地物多次曝光,增加积分时间,成倍地提升系统光谱能量的采集能力,有效地提高了相机的成像灵敏度和信噪比,目前已广泛应用于 IKONOS、QuickBird、WorldView 以及我国资源一号 02C 星(ZY-1 02C)、资源三号(ZY-3)等卫星^[1-8]中。为了获得较大的视场,空间相机需要将多片 CCD 器件连接排列以克服单片 CCD 像元数的限制。将多片 TDI CCD 在焦平面上按照非共线方式排列是常见的一种设计方式,即将多片 TDI CCD 在焦平面上装配成上下交错的两列,在图像的运动方向上错开一定位置,使得相邻 CCD 之间有一定的重叠^[9-13]。IKONOS、QuickBird、Worldview、CBERS-02B、ZY-1 02C 等卫星均采用这种非共线设计。由于这种相机获取的原始影像是按照每片 TDI CCD 成像单独记录,受传感器焦平面位置、行积分时间跳变、地形起伏、姿态变化及平台颤振等因素的影响,相邻 TDI CCD 影像之间的水平和垂直偏移量既表现出系统性,又存在局部波动性^[12-13]。因此,对这种相机获取的原始数据进行高精度内视场拼接,以形成

一幅覆盖相机全视场的连续无缝扫描影像,是保证影像后续处理和应用的基础。

国外高分辨率商业卫星影像的前期视场拼接工作均由数据供应方完成,出于对卫星设计参数以及应用技术的保密,可供参考的技术文献较少。目前,针对以 CBERS-02B/HR 为代表的国产非共线 TDI CCD 相机成像数据的内视场拼接问题,国内学者开展了一些研究。李世威等^[10]和禄金波^[11]分别提出了基于片间匹配的内视场拼接方法;胡芬^[12]结合片间偏移特性分别提出了基于像面分段仿射变换的拼接方法和基于影像行积分时间归一化的拼接方法;Meng 等^[14]将 SHIFT 匹配算子和像面分段多项式变换模型相结合,提出了一种基于信息修补的拼接算法。上述方法均属像方拼接方法,具有模型简单、计算量小的优点,也能够保证拼接后影像目视无缝,但需要有较好的片间连接点匹配条件,且理论基础不严密,拼接后影像失去了摄影测量的投影几何特性,无法对其进行高精度几何建模,这会严重制约影像的后续应用。考虑拼接模型的严密性,胡芬^[12,15]从物方几何约束条件出发研究了物方拼接方法,但受数

收稿日期:2013-12-16

项目来源:国家 973 计划资助项目(2012CB719901);全国博士学位论文作者专项资金资助项目(201249);国家自然科学基金资助项目(41371430,40901210,91438112);测绘地理信息公益性行业科研专项资助项目(201412007)。

第一作者:潘俊,博士,副教授,主要从事高分辨率遥感图像质量改善、相对辐射校正以及无缝镶嵌等方面的研究。E-mail:panjun1215@lmars.whu.edu.cn

通讯作者:胡芬,博士。E-mail:huf@sasmac.cn

据条件限制只基于模拟数据进行了实验,并未得到真实数据的检验。张过等^[16]和唐新明等^[17]研究了基于虚拟线阵的内视场拼接方法,并分别用 ALOS/PRISM 扫描仪影像和 ZY-3 全色多光谱相机影像进行了验证。ALOS /PRISM 扫描仪和 ZY-3 全色多光谱相机不同 CCD 片之间并无明显错位^[7,18],而 ZY-1 02C 卫星 HR 相机由于采用了非共线设计,中间片 CCD 与两侧 CCD 错位明显,导致有大约 2 600 行的成像时延。因此,本文针对该类相机的成像特点,充分考虑各种潜在的误差来源,提出了一种基于虚拟线阵的非共线 TDI CCD 相机成像数据内视场拼接方法。

1 相机成像几何特性

1.1 成像模式

ZY-1 02C 卫星搭载了 2 台 HR 相机(HR1 和 HR2),均有三片 TDI CCD,采用非共线设计,地面分辨率为 2.36 m,幅宽约为 27 km^[8]。每片 CCD 有 4 096 个像元,像元尺寸为 0.01 mm。如图 1 所示,三片 CCD (用符号 L_1 、 L_2 和 L_3 表示)在焦平面上分两列偏视场平行排列, L_1 与 L_3 对齐排列, L_2 填充 L_1 和 L_3 之间的间隙, L_1 与 L_2 、 L_2 与 L_3 之间有大 约 0.3 mm 的水平重叠,两列之间的间距约为 26 mm。三片 CCD 在同一成像时刻获取的扫描行在地面的投影呈品字形分布,将每片 CCD 获取的影像按成像时刻(或扫描行计数)对齐后即构成原始影像。原始影像上相邻 CCD 影像在垂轨方向上约有 30 个像元 的重叠,两侧 CCD 相对于中间 CCD 约有 2 600 行的成像时延。

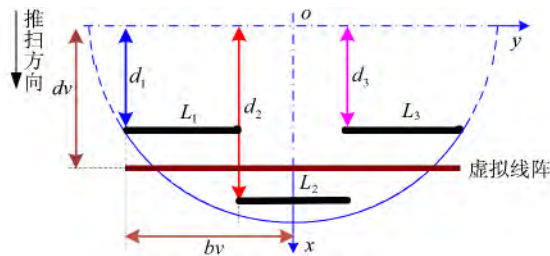


图 1 ZY-1 02C 卫星 HR 相机的焦平面示意图

Fig. 1 Focal Plane Assembly of ZY-1 02C/HR Camera

1.2 严格几何成像模型

每片 TDI CCD 的严格几何成像模型可用式(1)表示:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix}_{WGS84} + m\mathbf{R}_T\mathbf{R}_{GF}\mathbf{R}_{FB}\mathbf{R}_{BS} \begin{bmatrix} \tan\varphi \\ \tan\mu \\ -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, m 为摄影比例尺因子; $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS84}$ 为地面点的

WGS84 地心直角坐标; $\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix}_{WGS84}$ 为成像时刻卫

星在 WGS84 地心直角坐标系下的坐标; \mathbf{R}_{BS} 为相机坐标系与卫星本体坐标系之间的旋转矩阵; \mathbf{R}_{FB} 为卫星本体坐标系到轨道坐标系之间的姿态矩阵; \mathbf{R}_{GF} 为轨道坐标系与地球惯性坐标系 CIS 间的坐标转换矩阵; \mathbf{R}_T 为像点成像时刻地球惯性坐标系 CIS 到地球固定坐标系 CTS 的坐标转换矩阵; φ 、 μ 为像元光线相对于相机焦平面横轴和纵轴的指向角^[19]。

三片 TDI CCD 共有一套轨道姿态、扫描行积分时间、相机安装角、焦距及主点参数,但分别对应不同的指向角模型参数。

2 基于虚拟线阵的拼接方法

2.1 基本原理

基于虚拟线阵的内视场拼接方法原理为:在相机焦平面上构建一条覆盖相机全视场、零畸变的普通 CCD 线阵,利用分片 TDI CCD 影像的严格几何成像模型,建立拼接影像像点与原始影像像点的严格坐标映射关系。如图 1 所示,该虚拟线阵平行于焦平面横(y)轴,在推扫成像时,遵循线中心投影透视几何成像原理,与多片 TDI CCD 共享一套轨道姿态、焦距及主点参数,且行积分时间为固定值。该方法在模拟一条零畸变 CCD 线阵对地面推扫成像的过程中生成拼接影像,即通过对地面重成像使影像具备单线阵推扫成像的几何特性。该虚拟线阵的几何成像模型即为拼接影像的严格几何成像模型。

如图 2(a)所示,在每一个行积分时间内,该虚拟线阵所对应的地面成像区域被记录为拼接影像上的一条扫描行;对于该扫描行上的每一个像素,首先基于虚拟线阵的几何成像模型和给定的物方高程正算其对应的物点坐标,然后基于分片 TDI CCD 影像的严格几何成像模型反投影计算该物点在原始影像上的位置,进而通过灰度重采样获得该像素的灰度信息,由此生成拼接影像的每一条扫描行。

2.2 拼接误差来源分析

2.2.1 片间几何定位精度不一致的影响

良好的片间摄影几何约束是非共线 TDI

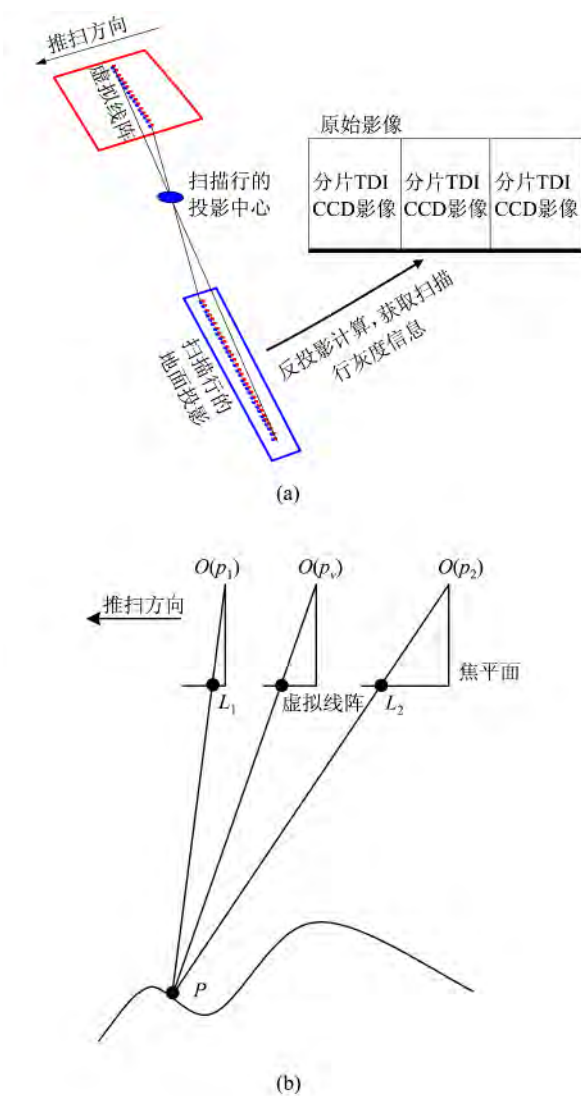


图2 基于虚拟线阵的拼接方法原理

Fig.2 Principle of the Stitching Method Based on Virtual CCD Line

CCD 成像数据严格内视场拼接的几何基础,即要求 TDI CCD 片间几何定位精度具有一致性。如图 2(b)所示,假设拼接影像上某像点 p_v 对应的物点 P 落在相邻两片 CCD (L_1 和 L_2) 影像地面覆盖的重叠区内,则分别基于 L_1 影像和 L_2 影像的严格几何成像模型对物点 P 进行反投影计算,得到一对像点 p_1 和 p_2 应满足共轭关系,即为同名像点。图 2(b)中 $O(p_v)$ 、 $O(p_1)$ 和 $O(p_2)$ 分别代表像点 p_v 、 p_1 和 p_2 的投影中心。因此,基于严格几何成像模型的同名像点坐标预测精度可用于衡量片间几何定位精度的一致性。为实现子像素级的拼接精度,应在拼接前对相机几何畸变及其安装角误差、时间系统误差、平台稳定性等参数进行检校,对各类系统误差进行补偿^[8,12],消除或降低这些观测误差对坐标预测精度的影响。

2.2.2 高程误差的影响

除了影响片间几何定位精度一致性的各类观测误差外,给定的物方高程面与实际地形之间的差异也会给拼接精度带来一定影响,主要表现在以下两方面。

1) 对虚拟线阵沿轨模拟成像精度的影响

像元指向角间接反映了传感器的偏场位置,也被称为偏场角^[12]。图 1 中, d_1 、 d_2 、 d_3 分别表示 L_1 、 L_2 、 L_3 与焦平面横 (y) 轴的垂直距离, $d_1 = d_3 = 40.38 \text{ mm}$, $d_2 = 66.38 \text{ mm}$ 。相机焦距 $f \approx 3.3 \text{ m}$, 令 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 和 γ 分别代表 L_1 、 L_2 、 L_3 和虚拟线阵的偏场角,有:

$$\varphi_1 = \varphi_3 = \arctan(d_1/f) = \arctan(d_3/f) \approx 0.7^\circ,$$

$$\varphi_2 = \arctan(d_2/f) \approx 1.15^\circ$$

如图 3(a)所示,假设拼接影像上某像点光线与实际地面的交点为 A ,且点 A 落在 CCD L_1 的成像地面覆盖区域, ΔH 表示给定的高程值与物点 A 高程的偏差, Δg 表示将物点 A 反投影至 L_1 影像时的像点定位误差在物方的投影距离,则有:

$$\Delta g = \Delta H \times (\tan\varphi_1 - \tan\gamma) \quad (2)$$

显然, Δg 反映的是物方高程误差对虚拟线阵沿轨成像模拟精度的影响, Δg 越小,则拼接影像越接近一幅无畸变 CCD 线阵获取的影像。由式(2)可知,该影响与虚拟线阵和分片 TDI CCD 的偏场角正切的差值成正比。将虚拟线阵平行安置于两列 TDI CCD 正中间,可以最大程度地降低该影响并将其平均分摊到每列 TDI CCD。图 1 中, b_v 为虚拟线阵最左侧像元与相机主点的水平距离, d_v 为虚拟线阵与焦平面横轴的垂直距离,由于 $d_v = (d_1 + d_2)/2$,有:

$$\gamma = \arctan(0.5 \times \tan\varphi_1 + 0.5 \times \tan\varphi_2) \approx 0.93^\circ \quad (3)$$

将 r 代入式(2),当 ΔH 为 600 m 时, $\Delta g \approx 2.36 \text{ m}$,即对应 1 个像元的模拟误差。因此将地物点高程用平均高程替代时,对地形起伏较大地区(小于 600 m),沿轨方向成像模拟误差可控制在 1 个像素以内;对于平原或丘陵地区,高程误差对沿轨方向成像模拟精度的影响甚微,可忽略不计。

2) 对沿轨方向拼接精度的影响

如图 3(b)所示,假设拼接影像上某像点的光线与实际地面的交点为 B ,且点 B 落在 L_1 (或 L_3) 和 L_2 影像地面覆盖的重叠区内, ΔH 表示给定的高程值与物点 B 高程的偏差, Δq 表示由 ΔH 引起的影像拼接误差在物方的投影距离,单位为 m,则有如下的关系式:

$$\Delta q = \Delta H \times |\tan\varphi_2 - \tan\varphi_1| =$$

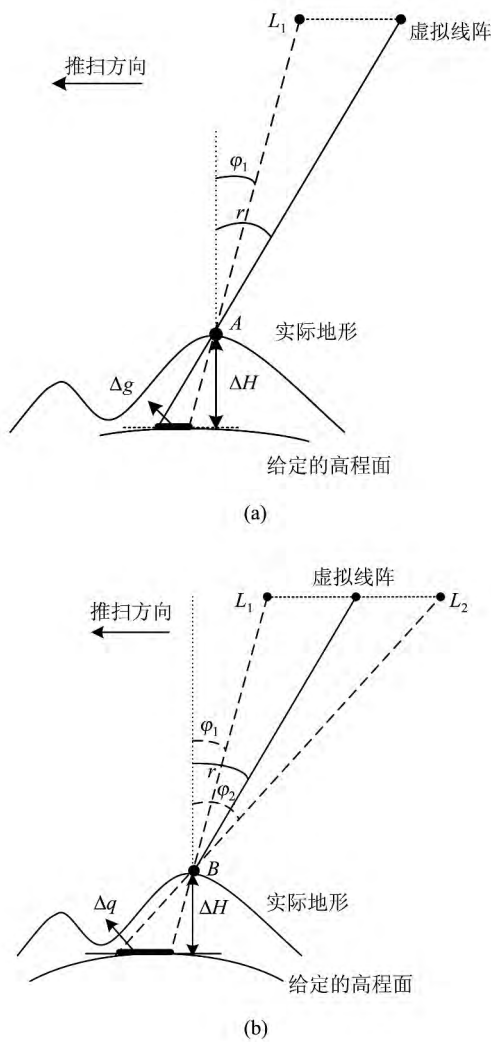


图 3 高程误差的影响

Fig. 3 Influence of the Elevation Error

$$\Delta H \times |\tan\varphi_2 - \tan\varphi_3| \quad (4)$$

Δq 反映物方高程误差对沿轨方向拼接精度的影响,与相邻两片 TDI CCD 偏场角正切的差值成正比。对于 HR 相机,当 ΔH 为 300 m 时,将在沿轨推扫方向上引起 2.36 m 即 1 个像元的拼接误差。在多数地形条件下,将地物点高程统一用平均高程替代,可降低地表模型复杂度,在保证精度的同时可提高拼接效率。

2.3 方法流程

本文方法流程如图 4 所示,描述如下:

1) 确定虚拟线阵每个像元在相机坐标系下的指向角向量。

将 L_1 最左侧像元与 L_3 最右侧像元之间的水平距离作为虚拟线阵的长度,并与虚拟线阵的像元尺寸求商,得到虚拟线阵的像元个数 S 。由式 (5) 计算虚拟线阵任意像元在相机坐标系下的指向角向量:

$$\begin{pmatrix} \tan\varphi' \\ \tan\mu' \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dv/f \\ (j \times pv - bv)/f \\ -1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, pv 为像元尺寸; φ' 、 μ' 分别为像元光线相对于相机焦平面横轴和纵轴方向的指向角; bv 表示虚拟线阵最左侧像元到相机主点 o 的水平距离; dv 表示虚拟线阵与焦平面横 (y) 轴的间距; j 为虚拟线阵像元的索引号 ($0 \leq j \leq S-1$); f 为相机焦距。

2) 计算拼接影像每条扫描行的成像时刻

TDI CCD 行积分时间会随地球自转的线速度、卫星轨道高度和侧摆角的变化而有规律地变化,所以原始影像行积分时间不是固定值^[12-13]。行积分时间跳变对影像高精度几何建模及其有理函数模型(RFM)拟合精度有一定的影响^[16-17],因此,本文虚拟线阵将按照固定的行积分时间成像。

令拼接影像行数与原始影像行数相等,用符号 L 表示,成像时长均为 t ,按照式 (6) 计算拼接影像的行积分时间 I :

$$I = t/L \quad (6)$$

令成像起始时刻为 t_0 ,按照拼接影像第 k 条扫描行的成像时刻 t_k 为:

$$t_k = k \times I + t_0, 0 \leq k \leq L-1 \quad (7)$$

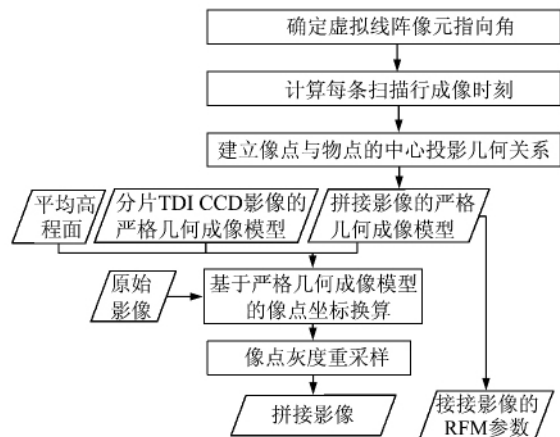


图 4 基于虚拟线阵的内视场拼接方法流程
Fig. 4 Flowchart of the Inner FOV Stitching Method Based on Virtual CCD Line

3) 建立拼接影像像点与对应物点的中心投影几何关系

假设像点所在的行号为 k ($0 \leq k \leq L-1$), 列号为 j ($0 \leq j \leq S-1$); 将 k 代入式 (7) 得到其成像时刻 t_k , 将 t_k 代入原始影像的轨道姿态模型^[8,12,19], 计算得到对应的外方位元素; 将 j 代入式 (5) 确定像点光线在相机坐标系下的指向角向量 $(\tan\varphi', \tan\mu', -1)$; 由成像时刻、外方位元素、指

向角向量等参数,基于扩展的共线条件方程建立拼接影像像点与对应物点的中心投影几何关系,即拼接影像的严格几何成像模型,如式(8)所示:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS84}} = \begin{bmatrix} X'_s \\ Y'_s \\ Z'_s \end{bmatrix}_{\text{WGS84}} + m' \mathbf{R}'_T \mathbf{R}'_{GF} \mathbf{R}'_{FB} \mathbf{R}'_{BS} \begin{bmatrix} \tan \varphi' \\ \tan \mu' \\ -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, m' 为摄影比例尺因子; (X, Y, Z) 为地面点的 WGS84 地心直角坐标, (X'_s, Y'_s, Z'_s) 为成像时刻卫星在 WGS84 坐标系下的坐标, \mathbf{R}'_{BS} 为是相机坐标系与卫星本体坐标系之间的旋转矩阵; \mathbf{R}'_{FB} 为卫星本体坐标系到轨道坐标系之间的姿态矩阵; \mathbf{R}'_{GF} 为轨道坐标系与 CIS 之间的坐标转换矩阵; \mathbf{R}'_T 为成像时刻 CIS 到 CTS 的坐标转换矩阵。

4) 逐像素确定拼接影像上像点的灰度值,最终生成拼接影像

对拼接影像上的每一个像点,首先基于分片 TDI CCD 影像的严格几何成像模型(参见 § 1.2)和拼接影像的严格几何成像模型进行像点坐标换算,即基于拼接影像的严格几何成像模型以及给定的平均高程值,计算得到其摄影光线与地面的交点,再基于分片 TDI CCD 影像的严格几何成像模型反投影计算该交点对应的原始影像像点坐标;然后通过灰度值重采样得到该像点的灰度值,从而生成拼接影像。在拼接影像严格几何成像模型的基础上拟合 RPC 参数^[19],建立拼接影像的 RFM,以满足影像后续处理应用的需求。

3 实验与分析

3.1 实验数据

本文给出了 ZY-1 02C 卫星 HR1 相机获取的登封地区数据的实验情况,数据获取时间为 2013 年 4 月 7 日,原始影像大小为 17 575 像素 × 12 288 像素,该区域平均高程约 340 m,最大高差约 1 450 m,参考数据为 1 m 分辨率航空正射影像以及 5 m 采样间隔 DEM。为了验证本文方法,对该数据进行拼接实验后,对生成的拼接影像分别进行目视评价和几何质量评价。

3.2 影像拼接及目视评价

目视拼接主要对拼接影像采用目视的方法检查拼接区域是否存在错位现象。登封地区属于山地地形,地物相对于平均高程的高差最大为 1 100 m 左右,由此会引起 1~3 个像素的局部拼接误差,为了克服该影响,在片间重叠区提取了若干连

接点,并在拼接区域进行了影像局部纠正,以达到子像素级的目视拼接精度^[20]。拼接前后影像分别如图 5(a)和图 5(b)所示,由拼接区域的放大图可以看出,拼接影像达到了目视无缝的精度要求。

3.3 拼接影像几何质量评价

本文从 RFM 拟合精度和影像几何定位精度两方面评价拼接影像几何质量。

1) 拼接影像 RFM 拟合精度

在拼接影像严格几何成像模型的基础上,按照与地形无关 RPC 参数求解方式^[19]构建上述两景拼接影像的 RFM,并对 RFM 拟合精度进行评价。具体方法如下:采用 256 像素 × 256 像素的像面格网,高程分层为 7,将这些格网点全部作为控制点;再平移半个格网距离,格网大小不变,计算出另一批虚拟格网点作为检查点;控制点用于求解分母不相等的三阶 RFM 参数^[19],检查点用于统计 RFM 相对于其严格几何成像模型的精度。经实验统计,登封地区数据所构建的拼接影像的 RFM 相对于严格几何成像模型的精度均优于 1×10^{-3} 像素。这是因为虚拟线阵具有零几何畸变特性,且在推扫成像时不存在行积分时间跳变,使构建的拼接影像严格几何成像模型较为平滑,满足高精度 RFM 拟合的条件。

2) 拼接影像几何定位精度

基于成像区域的参考数据,在拼接影像范围内自动提取了 197 个均匀分布的参考点作为精度评价所需的控制点和检查点。分别评价了无控制点和有控制点两种情况下拼接影像的几何定位精度,具体过程如下:先将所选参考点全部作为检查点,基于拼接影像 RFM 计算检查点的像点定位误差;然后将所有参考点作为控制点,基于像方仿射变换对拼接影像 RFM 的系统误差进行补偿^[21],并计算所有点残差。

在无控制条件下,影像行方向和列方向像点定位误差均值分别为 -32.96 和 76.18(单位是像素),中误差分别为 3.84 和 2.02;基于控制点校正之后,影像行方向和列方向的像点定位误差均值分别为 -2.5×10^{-3} 和 5.1×10^{-4} (单位是像素),中误差分别为 3.84 和 1.98。

像点定位误差均值体现了几何定位精度的高低,中误差体现了内部畸变的大小。上述实验结果表明,本文方法得到的拼接影像在定位误差均值方面,增加控制点校正后定位误差均值接近于 0,显然控制点在解决几何定位的系统性误差方面起到了主要作用。在中误差方面,无控制点情况

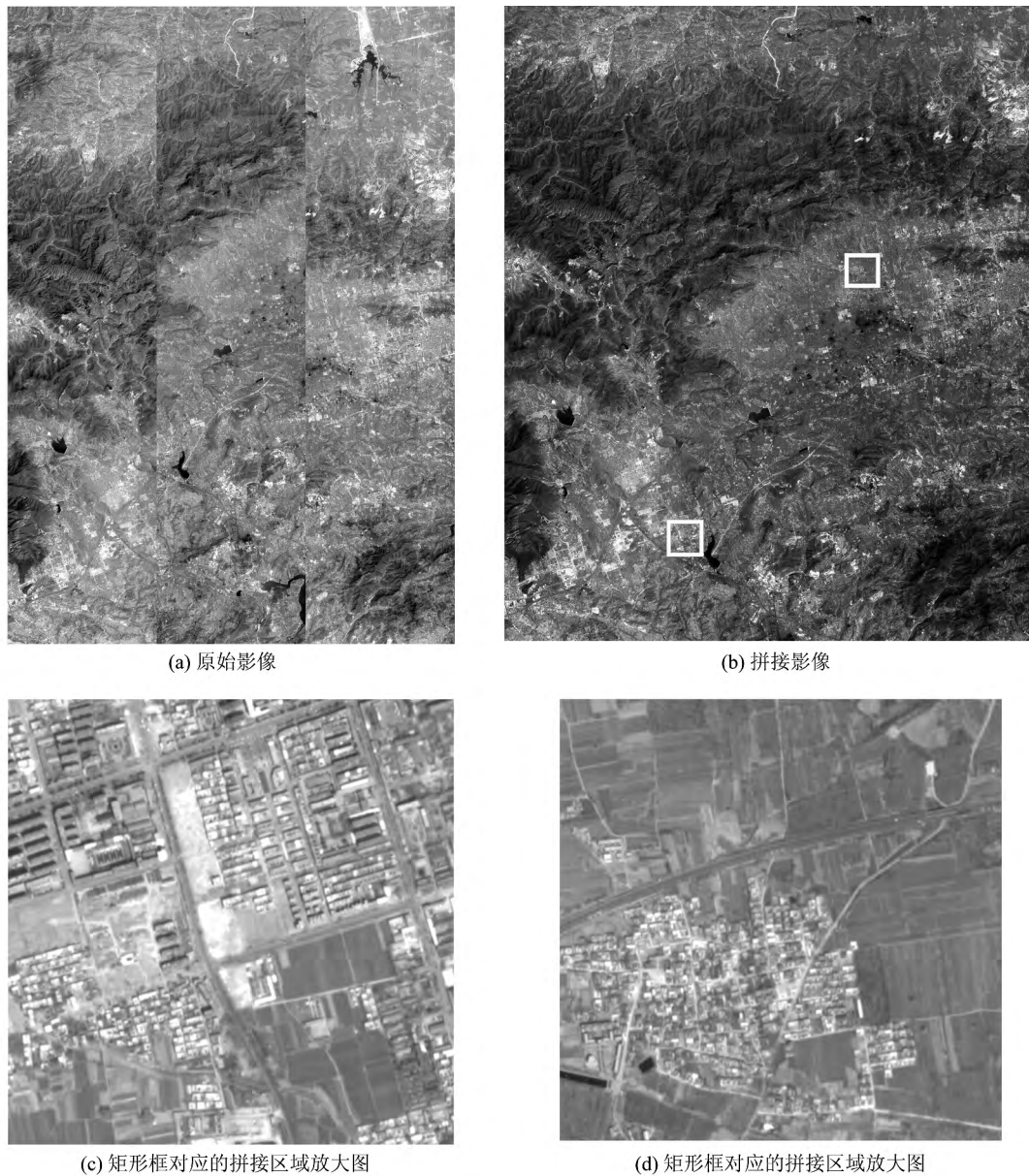


图 5 拼接实验

Fig. 5 Stitching Experimental Results

下像点几何定位中误差数值已经很小,增加控制点校正之后中误差并未发生明显变化。这也表明,生成的拼接影像已经较好地消除了系统性的内部畸变,因此增加控制点后对内部畸变的改善效果不明显。实际上,拼接影像的几何精度与拼接过程中所采用的原始影像严格成像几何模型的精度是一致的,通过引入相机内方位元素及几何畸变检校结果可有效消除拼接影像内部畸变。

4 结 语

本文提出了一种基于虚拟线阵的 ZY-1 02C 卫星 HR 相机内视场拼接方法,并用真实获取的 HR 相机成像数据进行了实验验证。实验表明,

本文方法能满足子像素级目视无缝拼接的要求,并具有较好的几何精度,为后续系统几何纠正及几何精校正等处理奠定了基础。基于该方法的内视场拼接在本质上等同于模拟一条 CCD 线阵对地面推扫成像的过程,垂直轨道方向的成像为理想无畸变的线中心投影成像,且行积分时间始终保持一致,更利于后续摄影测量处理。本文方法所构建的 RFM 对其严格几何成像模型的替代精度很高,可满足影像后续处理和应用的需。目前,该方法已成功应用于 ZY-1 02C 卫星数据处理的业务化运行系统中。该方法也适用于其他非共线设计的 TDI CCD 相机成像数据的内视场拼接处理。

致谢:感谢中国资源卫星应用中心提供的实验数据。

参 考 文 献

- [1] Yang Bingxin. Characteristics and Main Specifications of IKONOS and QuickBird2 Satellite Camera; Some Points for Developing such Like Satellite Camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, 23(4): 14-16(杨秉新. 美国 Ikonos 和 QuickBird-2 卫星相机的主要性能和特点分析及看法[J]. *航天返回与遥感*, 2002, 23(4): 14-16)
- [2] Updike T, Comp C. Radiometric Use of WorldView-2 Imagery, Technical Note (2010), DigitalGlobe, 1601 Dry Creek Drive Suite 260 Longmont, Colorado, USA, 80503[OL]. [http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/Radiometric_Use_of_WorldView-2_Imagery%20\(1\).pdf](http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/Radiometric_Use_of_WorldView-2_Imagery%20(1).pdf)
- [3] Dial G F, Bowen H, Gerlach B, et al. IKONOS Satellite, Sensor, Imagery, and Products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 88(1-2): 23-36
- [4] Jacobsen K. Calibration of Optical Satellite Sensors [C]. International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW, Casteldefels, 2006
- [5] Materne A, Bardoux A, Geoffray H, et al. Back-thinned TDI CCD Image Sensor Design and Performance for the Pleiades High Resolution Earth Observation Satellites [C]. The 6th International Conference on Space Optics, Netherlands, 2006
- [6] Feng Zhongkui, Shi Dan, Chen Wenxi, et al. The Progress of French Remote Sensing Satellite—from SPOT Toward Pleiades [J]. *Remote Sensing Information*, 2007, 4: 89-92 (冯钟葵, 石丹, 陈文熙, 等. 法国遥感卫星的发展—从 SPOT 到 Pleiades[J]. *遥感信息*, 2007, 4: 89-92)
- [7] Li Deren. China's First Civilian Three-line-array Stereo Mapping Satellite: ZY-3[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 317-322 (李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星—资源三号卫星[J]. *测绘学报*, 2012, 41(3): 317-322)
- [8] Yang Bo, Wang Mi. On-orbit Geometric Calibration Method of ZY-1 02C Panchromatic Camera[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(5): 1 175-1 190(杨博, 王密. 资源一号 02C 卫星全色相机在轨几何定标方法[J]. *遥感学报*, 2013, 17(5): 1 175-1 190)
- [9] Yang Hua, Guo Yue, Fu Ruimin. Study on Field Butting of TDI CCD[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(2): 226-228(杨桦, 郭悦, 伏瑞敏. TDICCD 的内视场拼接[J]. *光学技术*, 2003, 29(2): 226-228)
- [10] Li Shiwei, Liu Tuanjie, Wang Hongqi. Image Mosaic for TDI CCD Push-broom Camera Image Based on Image Matching[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(3): 374-378 (李世威, 刘团结, 王宏琦. 基于图像匹配的 CBERS-02B 卫星 HR 相机图像拼接方法[J]. *遥感技术与应用*, 2009, 24(3): 374-378)
- [11] Lu Jinbo. Automatic Mosaic Method of Large Field View and Multi-channel Remote Sensing Images of TDICCD Cameras[D]. Jilin: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of CAS, 2010 (禄金波. TDICCD 大视场多通道图像自动拼接方法[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010)
- [12] Hu Fen. Research on Inner FoV Stitching Theories and Algorithms for Sub-images of Three Non-collinear TDI CCD Chips[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010 (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)
- [13] Long Xiaoxiang, Wang Xiaoyan, Zhong Huimin. Analysis of Image Quality and Processing Method of a Space-borne Focal Plane View Splicing TDI CCD Camera[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2011, 41(sup): 19-31 (龙小祥, 王小燕, 钟慧敏. 星载焦面视场拼接 TDI CCD 相机成像质量及处理方法分析[J]. *中国科学: 信息科学*, 2011, 41(增刊): 19-31)
- [14] Meng W C, Zhu S L, Zhu B S, et al. The Research of TDI-CCDs Imagery Stitching Using Information Mending Algorithm[C]. SPIE, Beijing, 2013
- [15] Hu F, Wang M, Jin S Y. An Algorithm for Mosaicking Non-collinear TDI CCD Chip Images Based on Reference Plane in Object-space[C]. ISDE6, Beijing, 2009
- [16] Zhang Guo, Liu Bin, Jiang Wanshou. Inner FOV Stitching Algorithm of Spaceborne Optical Sensor Based on the Virtual CCD Line[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(6): 696-701 (张过, 刘斌, 江万寿. 虚拟 CCD 线阵星载光学传感器内视场拼接[J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(6): 696-701)
- [17] Tang Xinming, Zhou Ping, Zhang Guo, et al. Research on a Production Method of Sensor Corrected Products for ZY 3 Satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(3): 288-294 (唐新明, 周平, 张过, 等. 资源三号测绘卫星传感器校正产品生产方法研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2014, 39(3): 288-294)
- [18] Kocaman S, Gruen A. Orientation and Self-calibration of ALOS PRISM Imagery [J]. *The Photogrammetric Record*, 2008, 23(123): 323-340
- [19] Zhang Guo. Rectification for High Resolution Re-

- remote Sensing Image Under Lack of Ground Control Points[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005 (张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正[D]. 武汉: 武汉大学, 2005)
- [20] Hu Fen, Wang Mi, Jin Shuying. Satellite-borne Three-non-collinear TDI CCD(Time Delayed and Integration Charge Coupled Device) Image Splicing Method Based on Segmented Affine Transforma- tion:CN 101799293 B[P]. 2011-11-02 (胡芬, 王密, 金淑英. 基于分段仿射变换的星载三片非共线 TDI CCD 影像拼接方法: 中国, 10119968. 8[P]. 2011-11-02)
- [21] Tao C V, Hu Y. A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(12): 1 347-1 357

Inner FOV Stitching of ZY-1 02C HR Camera Based on Virtual CCD Line

PAN Jun^{1,2} HU Fen³ WANG Mi^{1,2} JIN Shuying²

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Collaborative Innovation Center for Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

3 Satellite Surveying and Mapping Application Center, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Beijing 101300, China

Abstract: Considering the imaging features for High Resolution (HR) camera of ZY-1 02C satellite, this paper proposes an inner Field of View (FOV) stitching method based on virtual CCD line. Then, the potential error sources of the method are analyzed deeply. Finally, image data of ZY-1 02C/HR camera are used in experiments. Both qualitative and quantitative evaluations on results validate the correctness and feasibility of the method. At present, the presented method has been embedded in the daily processing system of ZY-1 02C successfully.

Key words: non-collinear TDI CCD chips; inner FOV stitching; virtual CCD line; accuracy evaluation

First author: PAN Jun, PhD, associate professor, his research focuses on image quality improvement, relative radiometric normalization and seamless mosaicking for high resolution remote sensed images. E-mail: panjun1215@lmars.whu.edu.cn

Corresponding author: HU Fen, PhD. E-mail: huf@sasmac.cn

Foundation support: The National Basic Research Program of China (973 Program), No. 2012CB719901; Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of PR China FANEDD, No. 201249; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41371430, 40901210, 91438112; Special Fund for Surveying, Mapping and Geo-information Technology Research in the Public Interest, No. 201412007.

(上接第 435 页)

toring applications in Guiyang, including safety cruising, building change detection, which have proved it to be a feasible solution to civic environment.

Key words: geographical conditions monitoring; multi-source geographical data integration; POS; oblique photogrammetry; mobile mapping system; digital measurable images; urban change

First author: LI Deren, professor, PhD supervisor, Academician of Chinese Academy of Sciences, Academician of Chinese Academy of Engineering, Academician of Euro-Asia International Academy of Sciences. He is concentrated on the research and education in spatial information science and technology represented by RS, GPS and GIS, and promotes the construction of digital city, digital China, smart city and smart China. E-mail: drli@whu.edu.cn

Foundation support: The National Science and Technology Specific Projects, Nos. 2012YQ1601850, 2013BAH42F03; the National Natural Science Foundation of China, No. 61172174; the Program for New Century Excellent Talents in University, No. NCET-120426; the Basic Research Program of Hubei Province, No. 2013CFA024.