

一种光学遥感卫星多相机成像系统的高精度 影像拼接方法

程宇峰¹, 金淑英^{1*}, 王 密¹, 常学立², 朱 映¹

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 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079

摘要 提出一种基于虚拟大相机的光学遥感卫星多相机系统成像数据的拼接方法, 实现多相机影像的高精度拼接。该方法根据各单相机的几何成像模型, 构建虚拟大相机的几何成像模型; 利用坐标正算、反算过程对各单相机影像进行间接法几何纠正, 得到虚拟大相机图像坐标系下的各虚拟单相机影像; 将各虚拟单相机影像基于影像坐标信息拼接处理后得到最终的虚拟大相机影像。该方法利用虚拟大相机实现多相机影像的高质量拼接, 为后期处理提供了与之相对应的高精度有理函数模型, 可用于不同数量、不同分辨率的多相机系统实现全自动智能地面预处理。

关键词 遥感; 光学遥感卫星; 高精度拼接; 虚拟大相机; 多相机系统; 预处理

中图分类号 P236 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0828003

An High Accuracy Image Mosaicking Approach of Optical Remote Sensing Satellite for Multi-Camera System

Cheng Yufeng¹, Jin Shuying¹, Wang Mi¹, Chang Xueli², Zhu Ying¹

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

² School of Resource and Environment Sciences, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

Abstract A high accuracy image mosaicking method based on big virtual camera is proposed for multi-camera system on the optical remote sensing satellite to realize the high-precision stitching of multi-camera images. A big virtual camera is built according to the geometric imaging model of each single camera, and the geometric correction is performed by coordinate forward and back calculation based on their imaging models to obtain each single virtual image in the virtual camera image coordinate system. The final stitched image can be obtained by stitching single virtual image based on its coordinate information. By using the concept of big virtual camera, the high accuracy stitched image and corresponding rational function model for post processing are obtained at the same time. It can be used for multi-camera system with different quantities and resolutions to realize automatic intelligent ground preprocessing.

Key words remote sensing; optical remote sensing satellite; high accuracy image mosaicking; big virtual camera; multi-cameras system; preprocessing

OCIS codes 280.4788; 040.1490; 040.1520

收稿日期: 2017-03-23; 收到修改稿日期: 2017-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(91438111, 91438203)、国家 973 计划(2014CB744201)

作者简介: 程宇峰(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事高分辨率光学影像几何处理方面的研究。

E-mail: cyf_wuhu@126.com

导师简介: 王 密(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感卫星数据处理与应用方面的研究。

E-mail: wangmi@whu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jsy@whu.edu.cn

1 引 言

线阵推扫成像方式是当前获取高分辨率光学卫星影像的主要方式。长焦镜头能够提高光学影像的空间分辨率,但其会导致观测视场变窄,为了增加观测视场角,常采用多片 CCD 拼接或多台相机同时观测的成像方式^[1-5]。利用多台相机同时进行推扫观测时,每台相机拥有一套独立的光学系统,并遵循各自的几何成像模型,这给后续处理带来额外的工作。

随着实时宽覆盖获取卫星地面影像需求的增加以及宽视场多相机系统设计技术、宽视场影像拼接技术的发展,多相机系统在遥感成像领域的应用将会越来越广泛。中国高分辨率对地观测科技专项中的第一颗星高分一号(GF-1)卫星装载的4台宽幅相机(WFV)属于多相机系统的应用之一,全色空间分辨率为16 m,拼接后幅宽大于830 km,能够在4天内实现全球覆盖;高分二号(GF-2)卫星采用双相机系统,全色分辨率为1 m,与IKONOS卫星一致,双相机拼接后的影像数据幅宽为45 km,是IKONOS的4倍,在该卫星上实现了高分辨率成像和大幅宽的结合,有效提高了观测效率^[6-8]。因此,如何保证几何精度又不增加常规后续处理的遥感卫星多相机影像拼接方法是实现遥感数据智能处理的关键技术之一,其具有重要的理论意义和应用价值。

商业高分辨率卫星影像的前期多相机拼接工作由数据供应方完成,可供参考的文献较少,近年来仅针对多线阵 CCD 推扫成像影像的拼接有类似相关的研究。理论上,主要有基于像方和基于物方两类方法。其中,基于像方的方法不考虑原始单相机成像的几何条件,仅根据多相机影像的重叠区域基于同名点匹配的方法进行影像拼接处理^[9],如基于平移的方法^[10-11]和基于分段仿射变换的方法^[12-13],这类方法得到的拼接影像缺少严格的物理成像模型,几何精度较差,难以满足测绘等领域的需求;而基于物方的方法从相机的成像几何模型出发,利用相邻 CCD 的物方投影几何约束条件构建严格的相机内视场拼接模型,文献^[14-15]提出了虚拟线阵的内视场拼接方法,能够保证原有影像几何精度,同时具有良好的拼接效果。

本文提出的基于虚拟大相机重成像的光学遥感卫星多相机拼接方法借鉴基于虚拟线阵的内视场拼接方法,充分利用成像几何约束条件建立虚拟大相机影像与原始影像的坐标映射关系。利用 GF-1 与 GF-2 的多相机影像进行拼接实验,采用基于相机虚拟化方法在多相机系统中建立无畸变的虚拟大相机模型,对多相机影像在虚拟大相机坐标系下进行中心投影重成像,实现多相机的中心投影拼接,获得高质量的拼接影像,同时得到高精度的有理函数模型(RFM)信息。实验结果表明,该方法在不同影像分辨率、不同相机数量的情况下均能达到良好的精度效果,且整个过程为全自动的,无需人工干预,适用于智能地面预处理过程与星上实时处理过程。

2 多相机成像系统及严格几何成像模型

图 1 为 GF-2 所搭载的双相机系统及拼接示意图,当卫星进行推扫成像时,各相机共用一套轨道和姿态

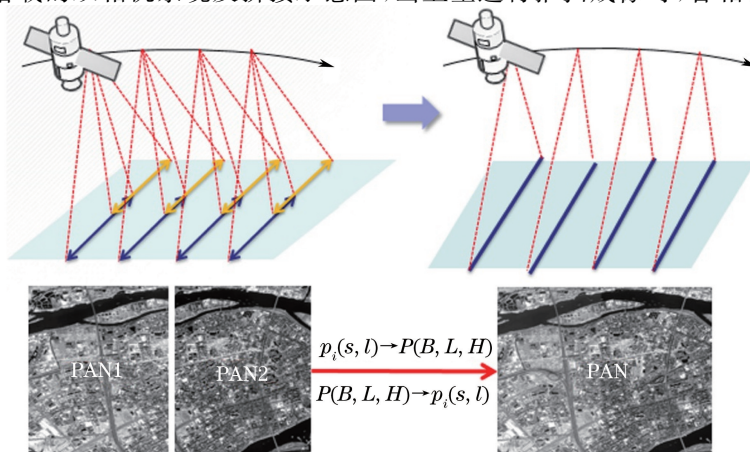


图 1 GF-2 卫星多相机系统成像及影像拼接示意图

Fig. 1 Sketch map of imaging and mosaicking of multi-camera system on GF-2

数据,但各自拥有一套相机安装角、焦距和主点等相机参数,相机获得的地面覆盖范围由两条扫描带构成。根据多相机的设计特点,在垂直轨道方向上各扫描带之间大约有 1000 个像元的重叠,而多相机的拼接是为了将各扫描带影像无缝高精度地拼接为一幅影像。

在进行推扫成像时,各相机遵循中心投影透视几何原理,各相机的成像几何模型可描述为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS84}} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix}_{\text{WGS84}} + \lambda \mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{WGS84}} \mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{J2000}} \mathbf{R}_{\text{camera}}^{\text{body}} \begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $x(s)$ 与 $y(s)$ 分别为成像探元 s 的光线在相机坐标系中沿轨、垂轨方向的指向^[16-17], $[X \ Y \ Z]_{\text{WGS84}}^T$ 为地面点的 WGS84 地心直角坐标, $[X_s \ Y_s \ Z_s]_{\text{WGS84}}^T$ 为成像时刻卫星的 WGS84 地心直角坐标, $\mathbf{R}_{\text{camera}}^{\text{body}}$ 为相机坐标系到卫星本体坐标系的旋转矩阵, $\mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{J2000}}$ 为卫星本体坐标系到地球惯性坐标系(CIS)的旋转矩阵, $\mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{WGS84}}$ 为像点成像时刻 CIS 到地球固定坐标系(CTS)的旋转矩阵。

由于各单相机同时推扫成像,且各成像中心距离很近,因此,所有相机具有相同的辅助数据,包括成像时间范围、卫星星历和卫星姿态数据,但分别具有不同的相机安装角与指向角模型参数。

3 一种基于虚拟大相机的多相机拼接方法

3.1 基本原理

本文方法是在本体坐标系下构建一个覆盖多相机全视场、零畸变的虚拟大相机,根据各相机的严格成像几何模型,构建虚拟大相机的严格成像几何模型,该模型即为拼接影像的严格几何成像模型。

为了获取各单相机影像对应的虚拟大相机坐标系下的影像,根据严格成像几何模型正算其像点对应高程面的物点坐标,再根据构建的虚拟大相机模型反算物点对应的虚拟像点坐标,建立虚拟大相机到原始单相机影像的坐标转换关系,如图 1 中公式所示。然后采用分块间接法的影像纠正方式对原始影像进行重采样以生成对应的虚拟影像。

3.2 方法步骤

3.2.1 虚拟大相机成像几何参数的确立

成像几何参数包括相机参数和辅助数据。由于各单相机同时进行推扫成像,因此虚拟大相机直接使用其共同的辅助数据即可。

虚拟大相机的相机参数包括相机坐标系下各探元的视线方向和相机坐标系与卫星本体坐标系的安装矩阵,两者共同决定虚拟大相机各探元在本体坐标系下的视线方向。多相机系统通常对称安装,因此可以假设虚拟大相机安装在卫星本体坐标系下,焦距介于多个单相机的焦距之间(一般相机焦距会有差异,可等于各相机焦距的均值),视场则扩大到多个单相机视场之和(相当于 CCD 探元数增加),主光轴位于多个单相机主光轴的中间(相当于安装角接近于 0)。从虚拟大相机坐标系到本体坐标系的安装矩阵可以假设为单位矩阵,此时,虚拟大相机坐标系下的各探元视线方向与本体坐标系下的视线方向完全一致。

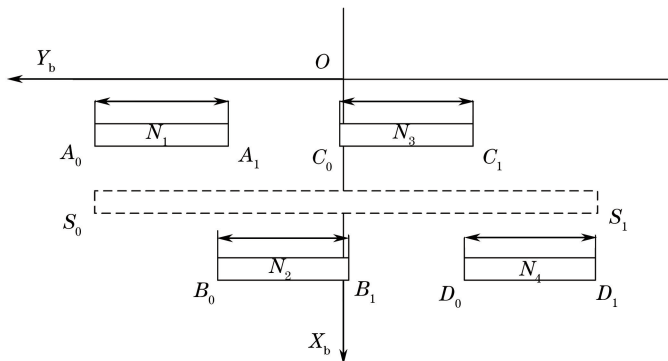


图 2 GF-1 WFV 多相机示意图

Fig. 2 Sketch map of multi-camera on GF-1

为了确定虚拟大相机在本体坐标系下的视线方向,首先需要确定虚拟大相机的探元数和视场范围。图 2 所示为以 GF-1 多相机系统为例的多相机示意。4 个 WFV 单相机分别记为相机 A、B、C、D,分别具有 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 个探元,根据设计参数 4 个相机在本体坐标系上的重叠探元数共 N_0 个,则虚拟大相机的总探元数为 $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 - N_0$ 。

通过严格的在轨几何定标,各相机可以获得精确的指向模型,设各相机的内方位元素分别为 $a_{0i}, a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}$ 和 $b_{0i}, b_{1i}, b_{2i}, b_{3i}$ ($i = A, B, C, D$)。则各相机中像点 $(s, l)_i$ 在各相机坐标系下的光线矢量为 $[x_i(s) \ y_i(s) \ 1]^T$,则有

$$\begin{aligned} x_i(s) &= a_{0i} + a_{1i}s + a_{2i}s^2 + a_{3i}s^3 \\ y_i(s) &= b_{0i} + b_{1i}s + b_{2i}s^2 + b_{3i}s^3, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 s 为探元编号, l 为影像行号。 $x_i(s)$ 、 $y_i(s)$ 分别为 i 相机坐标系下探元 s 对应的光线在沿轨和垂轨方向的指向。

相机 A 的 CCD 的探元编号为 $s=0, 1, \dots, N_1-1$ 即 $s=0, s=N_1-1$ 对应于相机 A 的 CCD 的两端点 A_0, A_1 ; 相机 D 的 CCD 的探元编号为 $s=0, 1, \dots, N_4-1$ 即 $s=0, s=N_4-1$ 对应于相机 D 的 CCD 的两端点 D_0, D_1 。设 A 和 D 相机相对于本体坐标系的安装矩阵分别为 $\mathbf{R}_A^B, \mathbf{R}_D^B$, 则可计算出 A 和 D 相机的 CCD 端点 A_0, A_1, D_0, D_1 在本体坐标系中的光线矢量 $[\overline{x_{A0}} \ \overline{y_{A0}} \ \overline{z_{A0}}]^T$ 、 $[\overline{x_{A1}} \ \overline{y_{A1}} \ \overline{z_{A1}}]^T$ 、 $[\overline{x_{D0}} \ \overline{y_{D0}} \ \overline{z_{D0}}]^T$ 和 $[\overline{x_{D1}} \ \overline{y_{D1}} \ \overline{z_{D1}}]^T$, 即有

$$\begin{bmatrix} \overline{x_{A0}} \\ \overline{y_{A0}} \\ \overline{z_{A0}} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_A^B \begin{bmatrix} x_A(0) \\ y_A(0) \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \overline{x_{A1}} \\ \overline{y_{A1}} \\ \overline{z_{A1}} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_A^B \begin{bmatrix} x_A(N_1-1) \\ y_A(N_1-1) \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \overline{x_{D0}} \\ \overline{y_{D0}} \\ \overline{z_{D0}} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_D^B \begin{bmatrix} x_D(0) \\ y_D(0) \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \overline{x_{D1}} \\ \overline{y_{D1}} \\ \overline{z_{D1}} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_D^B \begin{bmatrix} x_D(N_4-1) \\ y_D(N_4-1) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

再将 A_0, A_1, D_0, D_1 在本体坐标系中的光线矢量投影到平面 $Z_b=1$ 上, 即将其进行 Z_b 轴归一化处理, 得到 X_b 与 Y_b 方向的分量, 设 A_0, A_1 在本体坐标系中的平面投影坐标为 (x_{A0}, y_{A0}) 和 (x_{A1}, y_{A1}) , D_0, D_1 在本体坐标系中的平面投影坐标为 (x_{D0}, y_{D0}) 和 (x_{D1}, y_{D1}) , 则各端点的平面投影坐标分别为

$$x_{A0} = \frac{\overline{x_{A0}}}{\overline{z_{A0}}}, y_{A0} = \frac{\overline{y_{A0}}}{\overline{z_{A0}}}, x_{A1} = \frac{\overline{x_{A1}}}{\overline{z_{A1}}}, y_{A1} = \frac{\overline{y_{A1}}}{\overline{z_{A1}}}, x_{D0} = \frac{\overline{x_{D0}}}{\overline{z_{D0}}}, y_{D0} = \frac{\overline{y_{D0}}}{\overline{z_{D0}}}, x_{D1} = \frac{\overline{x_{D1}}}{\overline{z_{D1}}}, y_{D1} = \frac{\overline{y_{D1}}}{\overline{z_{D1}}}. \quad (4)$$

虚拟大相机的 CCD 两端点在本体坐标系下的平面投影坐标 (x_{v0}, y_{v0}) (x_{v1}, y_{v1}) 可表示为

$$x_{v0} = \frac{x_{A0} + x_{D0}}{2}, \quad y_{v0} = y_{A0}, \quad x_{v1} = \frac{x_{A0} + x_{D0}}{2}, \quad y_{v1} = y_{D1}. \quad (5)$$

虚拟大相机的 CCD 的探元编号为 $s=0, 1, \dots, N-1$, 经线性内插, 可以得到虚拟大相机的 CCD 每个探元 s 在本体坐标系中的光线矢量 $[x_v(s) \ y_v(s) \ 1]^T$, 其中

$$x_v(s) = x_{v0}, \quad y_v(s) = y_{v0} + \frac{y_{v1} - y_{v0}}{N-1}s. \quad (6)$$

则虚拟大相机的严格成像几何模型为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS84}} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix}_{\text{WGS84}} + \lambda \mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{WGS84}} \mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{J2000}} \mathbf{R}_{\text{camera}}^{\text{body}} \begin{bmatrix} x_v(s) \\ y_v(s) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

至此, 根据虚拟大相机的严格成像几何模型可以计算对应的有理函数模型。

3.2.2 虚拟大相机影像的生成

根据单相机和虚拟大相机的几何成像参数, 建立各自的几何成像模型, 并解算出单相机影像与虚拟大相机影像对应的有理函数模型。根据成像模型计算的坐标正算过程(从像方到物方)和坐标反算过程(从物方到像方)对各单相机影像分别进行间接几何纠正, 得到虚拟大相机图像坐标系下的多个虚拟单相机影像, 一般坐标正算过程基于共线方程模型实现, 而坐标反算过程基于有理函数模型实现。具体步骤如下:

1) 根据单相机的严格几何成像模型将原始单相机影像的像点 (s', l') 迭代投影, 得到对应的地面点 (B, L, H) 。

2) 利用虚拟大相机的有理函数模型将地面点 (B, L, H) 投影至虚拟大相机焦平面上得到像点 (s, l) 。

3) 建立从像点 (s', l') 到像点 (s, l) 的坐标映射关系, 通过灰度采样的方法将各单相机影像投影到虚拟大相机焦平面上, 获得各单相机影像在虚拟大相机坐标系下的虚拟影像。

4) 将虚拟大相机影像坐标系下的多个虚拟影像进行基于影像坐标的拼接, 为了克服局部拼接误差并保证拼接的稳定性, 可在各影像重叠区提取若干连接点, 在拼接区域进行影像的局部纠正^[9], 进而达到子像素级的目视拼接精度, 最终获得拼接后的虚拟大相机影像。

3.3 拼接误差源分析

3.3.1 多相机几何定位精度一致性的影响

多相机几何定位精度的高度一致性是确保多相机拼接精度的几何基础。如图 3 所示, 重叠区域中虚拟拼接影像上某像点 P 对应的物方点 G , 通过相邻相机的严格几何成像模型进行反投影计算, 得到的相邻单相机影像上的像点 p_1 和 p_2 应该满足共轭关系, 即为同名像点。换言之, 该过程单相机重叠区域影像的各同名点根据各自的严格几何成像模型, 前交的两个物方点应该尽量无限接近, 两个物方点间的距离可以反映各相机几何定位精度的一致性。由于各单相机主光轴近似处于同一平面, 因此重叠区域为各单相机同时推扫成像获得, 可认为其姿轨精度具有一致性, 因此, 为了确保子像素的拼接精度, 应在拼接前对各相机进行高精度的在轨几何标定, 消除各相机差异对几何定位精度一致性的影响^[18-19]。

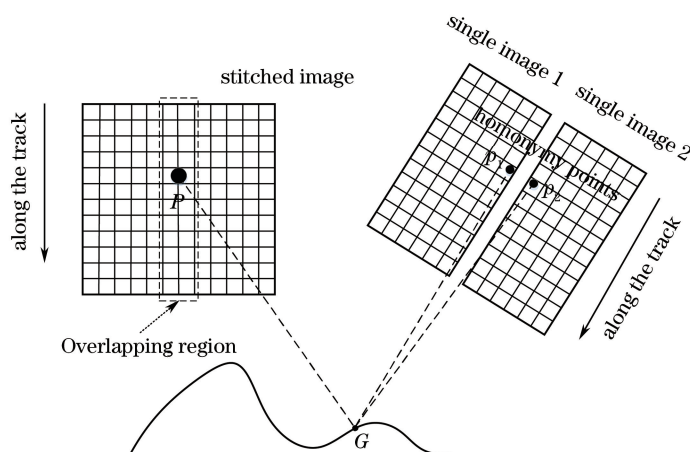


图 3 多相机系统重叠区域同名点映射关系示意图

Fig. 3 Sketch map of homonymy points in the overlapping region of multi-camera system

3.3.2 高程误差的影响

对于高程信息, 通过几何定位模型插值引入的误差是影响拼接精度的关键因素。通常情况下, 为了保证拼接精度采用高刚度一体化支架固定多相机以确保各相机的主光轴处于同一平面, 并使得重叠区内同一时间对同一地物成像。由于卫星发射过程中的振动以及器件老化等原因, 在轨的实际状态通常与理想状态之间存在微小偏移。各相机主光轴在轨道方向之间的微小夹角仅会造成高程误差, 从而对轨道方向拼接精度带来影响, 对于垂直轨道方向投影成像的特性不变。

如图 4 所示, 多相机重叠处的某同名像点与实际高程面的交点为 G , ΔH 为实际的高程面与初始高程面之间的偏差, Δl 为由 ΔH 引起的多相机影像拼接误差在物方上的投影距离, 即高程误差对轨道方向拼接精度的影响, 两者之间的关系可表示为

$$\Delta l = \Delta H \times |\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2|, \quad (8)$$

式中像元在本体坐标系下的指向角反映单相机的偏场位置, 称之为偏场角^[5], α_1 与 α_2 分别为相机 1、2 上的像元 P_1 和 P_2 在本体坐标系轨道方向的偏场角。

对于非重叠区的像点, Δv 为高程误差对虚拟大相机轨道成像虚拟化精度, 该值越小表示拼接影像越接近于无畸相机获取的影像, 其关系可表示为

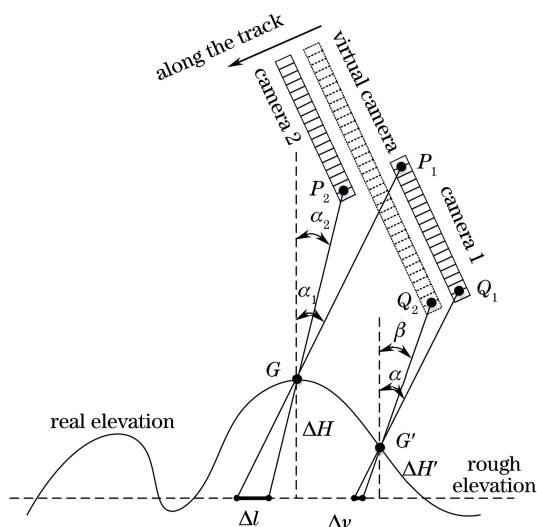


图 4 高程误差的影响

Fig. 4 Influence of elevation error

$$\Delta v = \Delta H' \times |\tan \alpha - \tan \beta|, \tag{9}$$

式中 α 与 β 分别为单相机与虚拟大相机上的像元 Q_1 和 Q_2 在本体坐标系轨道方向的偏场角。

由此可见,高程误差对拼接及虚拟化精度的影响与本体坐标系下各相机偏视场正切值的差值成正比,且与高程误差成正比。在相同的高程误差下,为了保证轨道方向亚像素的拼接精度,高分辨率影像比低分辨率影像对于相机的设计要求更加严格。为了尽量减小高程误差对拼接精度的影响,可以引入全球数字高程模型以减小高程误差;同时,将虚拟大相机设置于各相机的中间,可以最大程度地将高程误差对虚拟化精度的影响均摊至各个相机上,从而确保虚拟化及拼接精度。

4 实验与分析

4.1 实验数据

分别给出两组数据的实验情况。第一组数据为 GF-1 卫星 4 台 WFV 相机同时获取的 4 张覆盖长江中下流地区数据,影像分辨率为 16 m,相邻的左右影像约有 600 pixel 重叠,4 张影像总幅宽大于 800 km;第二组数据为 GF-2 卫星两台高分(HR)相机同时获取的 2 张覆盖伊犁地区数据,影像分辨率为 1 m,相邻的左右影像约有 1000 pixel 重叠,两张影像总幅宽大于 45 km,表 1 给出了实验数据的详细信息。为了验证所提方法的有效性,分别对拼接影像进行目视评价(定性)与 RFM 拟合精度及利用参考数字正射影像(DOM)与数字高程模型(DEM)的几何定位精度评价(定量)。

表 1 实验数据基本信息

Table 1 Specification of experimental data

Area	Imaging time	Sensor	Single image size / (pixel × pixel)	Terrain	Reference data
GF-1 Yangtze river basin	2016-05-16	WFV	12000 × 13400	Flatland, mountain elevation	DOM: 15 m
				Average: 50 m	Landsat8 panchromatic image DEM: 30 m GDEM2
				Difference: 3000 m	
GF-2 Yili	2016-06-22	HR	29200 × 27620	Flatland, mountain elevation	DOM: 0.3 m aerial image
				Average: 700 m	DEM: 2 m aerial image
				Difference: 900 m	

4.2 影像拼接及目视评价

检查拼接区域是否存在错位现象的主要方法是目视评价。两组影像均存在较大的高程起伏,因此可以有效地检验本文方法的无缝拼接能力。图 5 给出了 GF-1 卫星的拼接情况,其中,目标区 1 为高山区拼接

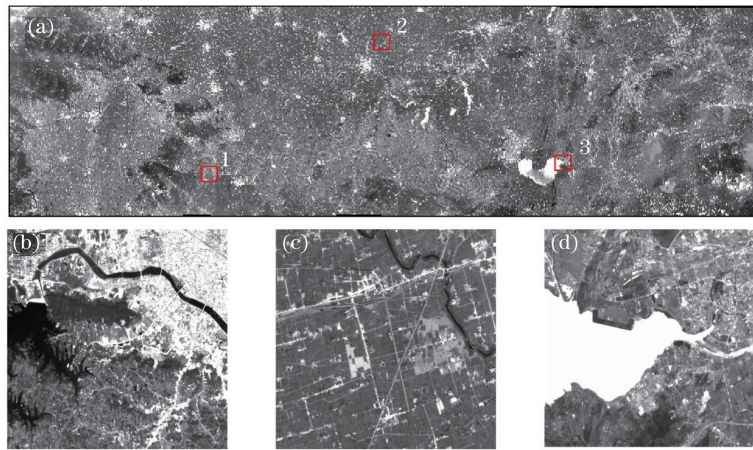


图 5 GF-1 拼接影像。(a)拼接影像全局图;(b)矩形框 1 区域;(c)矩形框 2 区域;(d)矩形框 3 区域
Fig. 5 Stitched images of GF-1. (a) Global graph of the stitched image; (b) box 1 region;
(c) box 2 region; (d) box 3 region

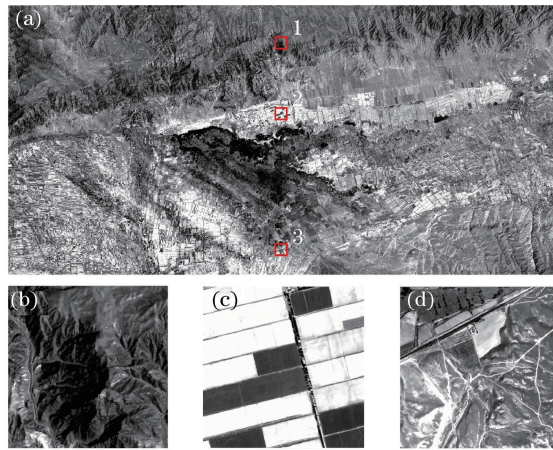


图 6 GF-2 拼接影像。(a)拼接影像全局图;(b)矩形框 1 区域;(c)矩形框 2 区域;(d)矩形框 3 区域
Fig. 6 Stitched images of GF-2. (a) Global graph of the stitched image; (b) box 1 region;
(c) box 2 region; (d) box 3 region

区;目标区 2 为平原区拼接区;目标区 3 为巢湖区拼接区。图 6 给出了 GF-2 卫星的拼接情况,其中,目标区 1 为高山区拼接区;目标区 2 为平原区拼接区;目标 3 为山地区拼接区。

分析图 5 与图 6 所示的实验结果可以发现,拼接区不仅达到了理想的无缝拼接效果,也没有出现由于局部改正造成的拼接区扭曲现象,充分说明通过严格的在轨几何定标和全球数字高程模型的引入,以及合理的虚拟大相机设计保证了相邻单相机几何定位精度的一致性。使得该拼接方法对于不同分辨率、不同单相机数量以及不同地形重叠区域的影像均可达到目视无缝且平滑的拼接精度。

4.3 拼接影像几何质量评价

从拼接影像的 RFM 拟合精度和几何定位精度两方面对拼接影像的几何质量进行客观评价。

1) RFM 拟合精度

由于各单相机都进行了严格的在轨几何标定,消除了自身畸变,因此虚拟大相机具有零几何畸变的特性,进而构建的拼接影像严格几何成像模型较为平滑。拼接影像 RFM 的拟合精度可以作为评价其几何质量的指标之一^[20]。采用与地形无关的有理多项式系数(RPC)求解方法对 RFM 拟合精度进行评价,具体的步骤如下:在拼接影像上打出均匀分布的格网点,高程分层数为 5,将这些格网点作为控制点;在每个格网中心取一点,计算出另一批虚拟格网点作为检查点;控制点用于求解 RFM 系数,检查点用于统计所求的 RFM 相对于其严格成像几何模型的精度。经统计分析,两组实验数据所构建的拼接影像 RFM 相对于严格几何

成像模型的标准误差(RMSE)均优于 1×10^{-3} pixel, 满足高精度 RFM 拟合的条件, 结果如表 2 所示。

表 2 拼接影像 RFM 拟合精度评价

Table 2 Fitting accuracy evaluation for RFM of stitched images

Satellite	Line /pixel		Sample /pixel	
	Maximum error	RMSE	Maximum error	RMSE
GF-1	0.0000237	0.0000132	0.0000258	0.0000143
GF-2	0.0003653	0.0002049	0.0003427	0.0002276

2) 拼接影像的几何定位精度

为了评价拼接处理对影像几何定位精度的影响, 本文测试了无控制点与有控制点两种情况下拼接影像的几何定位精度。具体方法如下: 利用参考影像数据分别在单相机影像与拼接影像上选取均匀分布的若干同名参考点; 将参考点全部作为检查点, 基于各自的 RFM 计算检查点的像点定位误差; 再将参考点全部作为控制点, 基于像方仿射变换方法^[21-22]对各影像的 RFM 进行系统误差补充, 并统计所有控制点的残差, 统计结果如表 3、4 所示。

表 3 GF-1 拼接影像几何精度评价

Table 3 Geometric accuracy evaluation of GF-1 stitched images

Camera	Absolute accuracy		Internal accuracy	
	(without ground control points) /pixel		(with ground control points) /pixel	
	Sample	Line	Sample	Line
Camera 1	2.275	-5.452	0.674	0.616
Camera 2	2.782	-5.561	0.779	0.722
Camera 3	2.153	-5.243	0.722	0.742
Camera 4	1.584	-5.289	0.806	0.742
Big virtual camera	1.985	-5.389	0.859	0.834

表 4 GF-2 拼接影像几何精度评价

Table 4 Geometric accuracy evaluation of GF-2 stitched images

Camera	Absolute accuracy		Internal accuracy	
	(without ground control points) /pixel		(with ground control points) /pixel	
	Sample	Line	Sample	Line
Camera 1	32.310	22.463	1.894	1.965
Camera 2	32.459	26.675	1.883	1.971
Big virtual camera	32.450	24.001	2.012	2.183

绝对定位精度表征影像直接几何定位精度的高低, 内精度表征影像的内部畸变的大小。分析表 3、4 结果可知, 在绝对定位精度方面, 拼接后的虚拟大相机影像近似等于各单相机绝对定位精度的均值, 这完全是本文虚拟大相机的设计特点造成的, 因为在本体坐标系下虚拟大相机位于各单相机的中间, 所以近似均匀分摊了各相机的直接定位误差; 在内精度方面, 虚拟大相机影像与各单相机内部精度基本保持一致, 说明本文方法能够获得良好的拼接影像, 同时很好地保持了各单相机影像原有的内部精度特征, 并未造成内精度的下降。由此可见, 通过本文方法的拼接处理, 并不会对影像的绝对定位精度与内精度造成影响, 充分保持了其原有几何定位特性。

5 结 论

从光学遥感卫星多相机系统的成像及设计特点出发, 提出了一种基于虚拟大相机的多相机影像高精度拼接方法。该方法在本体坐标系下构建了一个覆盖多相机全视场, 零畸变的虚拟大相机, 通过虚拟大相机与各单相机的几何成像关系, 得到虚拟大相机坐标系下的拼接影像, 同时获得拼接影像的高精度有理函数模型, 这为后期处理提供了整体宽覆盖的一级产品。

定性分析与定量计算表明, 该方法在不同相机数量、不同分辨率以及不同地形覆盖的复杂情况下均能实现目视无缝拼接, 并能保证较好的几何精度, 这为后续的系统几何纠正以及几何精校正等处理奠定了基础。

本文方法切实可行,已成功应用于 GF-1、GF-2 等多颗光学遥感卫星数据处理的业务化运行系统中。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Pan Jun, Hu Fen, Wang Mi, *et al.* An inner FOV stitching method for non-collinear TDI CCD images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(11): 1165-1173.
潘俊, 胡芬, 王密, 等. 一种非共线 TDI CCD 成像数据内视场拼接方法[J]. *测绘学报*, 2014, 43(11): 1165-1173.
- [3] Pan Jun, Hu Fen, Wang Mi, *et al.* Inner FOV stitching of ZY-1 02C HR camera based on virtual CCD line[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(4): 436-443.
潘俊, 胡芬, 王密, 等. 基于虚拟线阵的 ZY-1 02C 卫星 HR 相机内视场拼接方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(4): 436-443.
- [4] Zhang Guo, Liu Bin, Jiang Wanshou. Inner FOV stitching algorithm of spaceborne optical sensor based on 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.
- [5] Hu Fen. Research on inner FOV stitching theories and algorithms for sub-images of three non-col-linear 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.
- [6] 白照广. 高分一号卫星的技术特点[J]. *中国航天*, 2013, 8(8): 5-9.
- [7] Lu Chunling, Wang Rui, Yin Huan. GF-1satellite remote sensing characters[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(4): 67-73.
陆春玲, 王瑞, 尹欢. “高分一号”卫星遥感成像特性[J]. *航天返回与遥感*, 2014, 35(4): 67-73.
- [8] Pan Teng, Guan Hui, He Wei. GF-2satellite remote sensing technology[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(4): 16-24.
潘腾, 关晖, 贺玮. “高分二号”卫星遥感技术[J]. *航天返回与遥感*, 2015, 36(4): 16-24.
- [9] Wang Jing, Fang Junyong, Liu Xue, *et al.* A mosaic method of different ground resolution images[J]. *Optical Technique*, 2014, 40(4): 321-326.
王晶, 方俊永, 刘学, 等. 一种不同地面分辨率图像的拼接算法[J]. *光学技术*, 2014, 40(4): 321-326.
- [10] Li Shiwei, Liu Tuanjie, Wang Hongqi. Imagemosaic 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]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of Chinese Academy of Sciences, 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] 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(s1): 24-36.
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(s1): 24-36.
- [13] Hu Fen, Wang Mi, Jin Shuying. Satellite-borne three-non-colinear TDI CCD (time delayed and integration charge couple device) Image splicing method based on segmented affine transformation: 101799293B[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: 101799293B[P]. 2011-11-02.
- [14] Jiang Y H, Zhang G, Li D R, *et al.* Correction of distortions in YG-12 high-resolution panchromatic images[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015, 81(1): 25-36.
- [15] Hu Haiyan, Yang Yunlan, Fang Yong, *et al.* High accuracy sub-images stitching for DMZ airborne camera in kind of optical FOV splitting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(4): 0422001.
胡海彦, 杨蕴澜, 方勇, 等. DMZ 内视场光学分割型航摄相机子影像高准确度几何拼接[J]. *光子学报*, 2015, 44

(4): 0422001.

- [16] Jiang Yonghua, Zhang Guo, Tang Xinming, *et al.* High accuracy geometric calibration of ZY-3 three-line image[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(4): 523-529.
蒋永华, 张 过, 唐新明, 等. 资源三号测绘卫星三线阵影像高精度几何检校[J]. *测绘学报*, 2013, 42(4): 523-529.
- [17] Wang M, Yang B, Hu F, *et al.* On-orbit geometric calibration model and its applications for high-resolution optical satellite imagery[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(5): 4391-4408.
- [18] Cao Jinshan, Yuan Xiuxiao, Gong Jianya, *et al.* The Look-angle calibration method for on-orbit geometric calibration of ZY-3 satellite imaging sensors[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(10): 1039-1045.
曹金山, 袁修孝, 龚健雅, 等. 资源三号卫星成像在轨几何定标的探元指向角法[J]. *测绘学报*, 2014, 43(10): 1039-1045.
- [19] Zhang Y J, Zheng M T, Xiong J X. On-orbit geometric calibration of ZY-3 three-line array imagery with multistrip data sets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(1): 224-234.
- [20] Tao C V, Hu Y. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(12): 1347-1357.
- [21] Fraser C S, Hanley H B. Bias compensation in rational functions for IKONOS satellite imagery[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(1): 53-58.
- [22] Hanley H B, Yamakawa T, Fraser C S. Sensor orientation for high-resolution satellite imagery [J]. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2002, 34(1): 69-75.