

航空推扫式外拼接成像系统子视场相对定向方法

黎荆梅^{1,2}, 范永祥^{3*}, 王宁¹, 马灵玲¹, 成弘佳¹, 钱永刚¹, 牛沂芳¹, 李传荣¹, 唐伶俐¹, 郑青川⁴

¹中国科学院空天信息创新研究院定量遥感信息技术重点实验室, 北京 100094;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³季华实验室, 广东 佛山 528000;

⁴内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古 包头 014033

摘要 将多个阵列推扫式相机以阵列方向视场拼接的方式进行组合, 可以克服相机的探测器规模限制, 在保证空间分辨率的同时有效增加视场角。现有视场拼接方法多建立在各子视场严格几何定标的基础上, 需要高精度地面定标场数据或检校航带支持。本文提出了一种基于同名特征子视场相对定向方法, 从窄重叠区同名像点出发, 在数字高程模型的辅助下建立子视场相对定向模型, 同时辅以视场外侧稀少控制点的绝对约束, 准确恢复相邻相机之间的安装关系。利用仿真数据对该方法进行的验证实验表明, 本文方法解算得到的相对定向参数可支持子视场影像的无缝拼接, 影像拼接精度优于 2 pixel, 几何定位精度平面中误差优于 3 pixel。

关键词 成像系统; 外拼接成像系统; 相对定向; 航空推扫式; 图像拼接

中图分类号 P237

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1811001

Relative Orientation Method for Airborne Pushbroom Combined Imaging System

Li Jingmei^{1,2}, Fan Yongxiang^{3*}, Wang Ning¹, Ma Lingling¹, Cheng Hongjia¹, Qian Yonggang¹, Niu Yifang¹, Li Chuanrong¹, Tang Lingli¹, Zheng Qingchuan⁴

¹Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Ji HUA Laboratory, Foshan, Guangdong 528000, China;

⁴Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co., Ltd, Baotou, Inner Mongolia 014033, China

Abstract Combining multiple pushbroom cameras along the sampling direction can overcome the limitation of the detector scale, and effectively expands its field of view and improves the imaging efficiency. Existing stitching methods are based on strict geometric calibration of each sub-field, and strongly dependent on expensive calibration fields. This paper presents a relative orientation method of sub-field of view based on sparse ground control points. This method establishes a relative orientation model with tie points and digital elevation model. To ensure the stability of the solution, it is supplemented by the absolute constraints of the sparse control points. Relationship between adjacent cameras can be achieved by this method, and simulation data was used to verify the method. Results show that the relative orientation parameters can support seamless stitching of sub images. The accuracy of image stitching is better than 2 pixel, and the plane error of geometric positioning accuracy is better than 3 pixel.

Key words imaging systems; combined imaging system; relative orientation; airborne pushbroom; image stitching

OCIS codes 110.4234; 280.4788; 040.1490

收稿日期: 2021-02-22; 修回日期: 2021-03-15; 录用日期: 2021-04-01

基金项目: 科技部国家重点研发计划项目(2016YFB0500400)、全球遥感定标基准网课题(181811KYB20160040)

通信作者: *fanyx@jihualab.com

1 引言

高光谱成像技术能够同时获得反映地物真实物理属性的光谱特征和空间特征信息,在精准农业、环境监测等多种应用中可发挥重要作用。而航空高光谱遥感由于其更高的空间分辨率以及灵活性,在区域遥感应用中展现了巨大潜力,近年来得到了快速发展。航空高光谱成像仪有多种成像模式,其中推扫式是常用的一种成像模式,该模式具有系统积分时间长和信噪比更高、无需复杂的扫描机构、重量及体积小的优点,但同时由于探测器规模限制,也具有总视场角和单元视场角相互制约的缺点^[1]。为了在不降低空间分辨率的条件下提高数据采集效率,研究人员提出了利用多个高光谱相机在垂直于飞行方向上进行视场拼接来提高总视场角的方式,如由 2 个高光谱相机组成,总视场角 42° 的宽视场角高光谱成像仪^[2],以及由 3 个高光谱相机组成,总视场角 40° 的宽视角高分辨率的机载高光谱成像系统^[3]。这种新的成像模式在提高作业效率的同时,也为后续处理带来了图像拼接的新要求。准确实现图像拼接的前提是恢复相机之间的相对关系,然而为了获得尽量宽的视场,视场重叠度往往设计的比较小,难以确定多个高光谱相机之间的相对定向关系,给阵列推扫式影像的子视场拼接带来困难。

通过建立多个线阵相机之间的相对定向关系来实现拼接在星载影像几何预处理中已有成熟应用。为了增大观测视场,星载高分辨率遥感载荷普遍采用视场拼接的成像模式,如 IKONOS、QuickBird、资源三号等卫星载荷采用多片 CCD 内视场拼接,北京一号、高分一号、高分二号等卫星载荷采用多相机外视场拼接^[4]。在对各卫星载荷的多个子视场进行严格几何定标,获得各子视场间的相对定向关系后,学者们针对性地建立了子视场影像与虚拟拼接影像之间的严格坐标映射关系,从而实现大视场图像拼接^[5-12]。上述方法的重要前提是每个子视场均分别开展绝对几何定标^[7-8,12],保证了子视场间相对几何精度。由于几何定标效果高度依赖于大量地面控制点^[13-18],或者基于高精度底图提取控制点,因此卫星载荷多耗费大量人力物力构建具备大量高精度控制点的几何检校场,这对于飞行地点不固定的航空载荷而言较难实现。

目前,航空推扫式外拼接成像系统子视场拼接方面的研究较少,张丽媛^[19]提出了一种对几何校正后影像进行配准的方法,对机载双视场推扫式高光

谱成像仪的双相机影像分别进行几何校正,之后基于互信息配准,采用平移的方式进行几何校正后图像的拼接,而后对拼接图像利用正射影像进行系统误差校正。该方法需要逐幅影像配准处理,限制了处理效率,难以配合组合相机飞行作业效率提高的优势,并且在缺乏基础正射影像支持时,难以保证几何定位精度。

针对现有拼接方法对检校场或基础底图依赖性强的问题,本文提出一种基于窄重叠区同名像点的子视场相对定向方法,充分利用多相机间关系相对固定的条件,基于匹配的同名点以及数字高程模型 (DEM) 数据建立斜视相机与基准相机之间的相对定向模型,同时以视场外侧单个控制点作为绝对约束,解决窄重叠区相对定向模型求解的不稳定问题,准确恢复子视场间相对定向关系。从而在避免建立复杂几何检校场的情况下,实现子视场图像拼接。

2 成像模型及相对定向原理

2.1 航空推扫式外拼接成像系统成像模式

本文研究所针对的航空推扫式外拼接成像系统由三个可见光-近红外波段的高光谱相机组成,其中中间的相机垂直下视,两侧的相机向内倾斜成像,与中间相机的观测视场之间仅有 7% 的重叠。系统采用推扫式成像模式,高光谱相机面阵探测器的其中一维用来记录光谱信息,另一维记录空间信息,在几何成像方面可近似认为单线阵推扫成像。系统通过在飞行方向上的推扫运动获取地面目标的图像,其拼接成像原理如图 1 所示。随着飞行平台的运动,系统在地面上采集具有重叠的 3 个影像条带,通过拼接处理形成具有大幅宽的高光谱影像。为了后续对影像进行几何处理,同平台搭载可以按照固定频率测量记录载荷位置和姿态数据的定姿定位系统 (POS),其中全球导航卫星系统 (GNSS) 天线安装在飞机外侧,惯性传感器 (IMU) 与 3 个高光谱相机固联安装在三轴稳定平台内部,从而准确测量载荷的瞬时姿态数据。主控单元按照速高比设定积分周期,控制三个高光谱相机同步曝光,同时将曝光时刻的 GNSS 时间记录在影像辅助数据中。

航空推扫式外拼接成像系统具有以下特点: 1) 为保证较大的总视场角,影像间重叠会设计的比较小; 2) 考虑到全系统紧凑型结构设计,相邻相机之间距离很接近,这也意味着相邻相机基线短,重叠区内的同名点具有很小的基高比,通过交会的方式计算得到的高程误差很大; 3) 理论上系统装调时应保

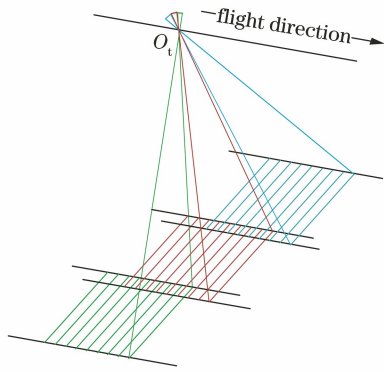


图 1 航空推扫式外拼接成像系统推扫成像示意图

Fig. 1 Pushbroom imaging diagram of airborne pushbroom combined hyperspectral system

证各相机的视场在一条直线上,当主控单元控制多个相机同步曝光时,在同一个积分周期内各相机在地面上的视场位于一条连续的扫描行上。然而由于机械安装误差等原因,相机之间存在微小的角度差异,造成相邻相机视场在飞行方向上存在一定的偏移,从而在地面上形成阶梯状或“品”字形的三个条带,也就是说重叠区的同名点采集时刻不一致。

2.2 相对定向模型

在相机装调完成后,飞行过程中各相机间的安装关系是固定的,影像拼接时直接利用该固定关系,可在影像几何校正的同时实现拼接。本文利用相邻视场重叠区的同名点,在视场边缘少量控制点的约束下实现相机间相对定向,计算得到相机间的安装角。以中间相机作为基准相机,若基准相机影像与待标定相机影像上的一对同名像点分别获得于时刻 t_1 与 t_2 ,则对于基准影像上的像点,以 t_1 时刻的 POS 数据以及 DEM 数据计算得到对应的物方坐标,将其转换至 t_2 时刻的像空间坐标系下,在该像空间坐标系中建立待标定相机与基准相机之间的旋转关系模型。

POS 系统采集的位置和姿态数据经组合导航解算后,可输出在导航坐标系下的姿态以及大地坐标系下的位置信息,经坐标系统转换后,可以为影像的几何处理提供外方位元素。对于推扫式影像,每行影像阵列均满足中心投影关系,根据摄影测量中的共线方程原理,每个成像瞬间的严格几何成像模型可表示为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R}_b^m \mathbf{R}_s^b \mathbf{R}_c^s \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: (X, Y, Z) 为地辅坐标系下地面点坐标; $(x,$

$y)$ 为对应像点的像平面坐标(对于线阵影像,每个成像时刻 $y=0$); f 为相机主距; λ 为比例系数; \mathbf{R}_c^s 为子视场像空间坐标系到载荷坐标系的旋转矩阵; \mathbf{R}_s^b 为载荷坐标系到 IMU 坐标轴的旋转矩阵,由视准轴检校得到; \mathbf{R}_b^m 为 IMU 坐标系到成图坐标系的旋转矩阵; (X_s, Y_s, Z_s) 为摄影瞬间的外方位元素。 \mathbf{R}_b^m 与 (X_s, Y_s, Z_s) 可分别利用 IMU 单元测定的 HPR (Heading, Pitch, Roll) 角度以及 GNSS 测定的 IMU 几何中心位置,经 IMU 坐标系到导航坐标、地心坐标系以及地辅坐标系的转换计算得到^[20]。

令 p_R 与 p_T 为位于基准影像和待检校影像上的一对同名点,在各自的影像上坐标分别为 $(x_R, y_R), (x_T, y_T)$, 分别在 t_i, t_j 时刻由基准相机和待检校相机获取。将 p_R 点从像平面坐标系转换至像空间辅助坐标系,得到坐标 \mathbf{A}_R 。

$$\mathbf{A}_R = \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{c,i}^m \begin{bmatrix} x_R \\ 0 \\ -f_R \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{c,i}^m, \quad (2)$$

式中: f_R 为参考相机的主距; 外方位元素 $\mathbf{R}_{c,i}^m, \mathbf{T}_{c,i}^m$ 利用 t_i 时刻的 POS 数据计算得到。

由于相邻影像基高比很小,利用同名点前方交会的方式计算物方坐标可能带来很大的高程误差,因此引入 DEM 数据,利用光束相交的方法通过多次迭代计算出地面点 A 的坐标。若设站点 S 与地面点 A 的高差为 H ,则地面点在地辅坐标系中的坐标 \mathbf{X} 可表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = -\frac{H}{z_R} \mathbf{A}_R. \quad (3)$$

将 A 点在地辅坐标系中的坐标 \mathbf{X} 转换至待检校相机在 j 时刻的像空间坐标系下的坐标 $\mathbf{X}_{T,j}$ 。

$$\mathbf{X}_{T,j} = \begin{bmatrix} X_{T,j} \\ Y_{T,j} \\ Z_{T,j} \end{bmatrix} = (\mathbf{R}_{b,j}^m \mathbf{R}_s^b \mathbf{R}_c^s)^{-1} \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} - \mathbf{T}_{c,j}^m, \quad (4)$$

式中: 外方位元素 $\mathbf{R}_{c,j}^m, \mathbf{T}_{c,j}^m$ 利用 t_j 时刻的 POS 数据计算得到。

则地面点 A 在待标定影像上的投影 p'_T 的坐标 \mathbf{a}'_T 可表示为

$$\mathbf{a}'_T = \begin{bmatrix} u'_T \\ v'_T \\ -f_T \end{bmatrix} = -f_T \frac{\mathbf{X}_{T,j}}{Z_{T,j}}, \quad (5)$$

式中: f_T 为参考相机的主距。

地面点 A 在待定标影像上的投影 p'_T 与 p_T 是同一个点, 视 p'_T 为像点坐标观测值, 组成 \mathbf{R}_c^s 的相机间视轴夹角 $(\omega, \varphi, \kappa)$ 为未知数, 将(5)式按泰勒级数展开, 可建立误差方程式, 求解相对定向参数。

由于相邻视场间重叠区域小, 提取出的同名点位于待定标影像的一侧边缘, 沿飞行方向呈狭窄条状分布, 而影像其余大部分区域不受控, 在输入存在较大误差的情况下, 如平台稳定性差导致影像畸变剧烈影响, 从而造成同名点匹配精度下降等情况, 容易导致解的不稳定, 尤其是偏航角偏离实际真值。虽然实现了相对定向并可获得较好的匹配精度, 但会导致视场外侧点的绝对定位精度下降。为解决该问题, 保证拼接后影像的几何定位精度, 在影像外侧加入少量控制点作为平差约束条件, 即在垂直于飞行方向上增加控制, 保证求解稳定性以及偏航角的求解准确性。

作为约束条件的控制点由(4)式和(5)式建立地面物方点与像方点之间的投影关系。

$$\begin{bmatrix} u_G \\ v_G \\ -f_T \end{bmatrix} = \lambda (\mathbf{R}_{b,k}^m \mathbf{R}_s^b \mathbf{R}_c^s)^{-1} \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} - \mathbf{T}_{c,k}^m, \quad (6)$$

式中: (u_G, v_G) 为控制点对应的、于 k 时刻获取的像方坐标; (X_G, Y_G, Z_G) 为控制点坐标; λ 为比例尺系数。

则可得到矩阵形式的误差方程式为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_H \\ \mathbf{V}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_H \\ \mathbf{A}_G \end{bmatrix} \mathbf{X} - \begin{bmatrix} \mathbf{L}_H \\ \mathbf{L}_G \end{bmatrix} \mathbf{P}, \quad (7)$$

式中: \mathbf{V}_H 和 \mathbf{V}_G 分别为待定标影像上同名点像点坐标以及控制点对应的像点坐标观测值改正数向量;

\mathbf{A}_H 和 \mathbf{A}_G 为相应的未知数系数矩阵; \mathbf{X} 为待解求未知数增量向量, 其初值为系统设计值; \mathbf{L}_H 和 \mathbf{L}_G 为像点坐标观测值残差向量; \mathbf{P} 为像点观测值的权矩阵。利用最小二乘法即可求解相机间相对方位元素。

3 仿真实验与分析

为验证本文所提检校方法模型的有效性, 分析控制点的数量与分布对影像拼接精度以及几何定位精度的影响, 进而对飞行实验设计给予指导, 本文基于仿真数据开展了相对定向实验, 通过仿真参数与解算结果的对比进行方法验证, 并利用解算得到的相对定向参数对子视场影像进行拼接实验, 进而分析拼接精度与几何定位精度。

3.1 仿真数据

子视场视准轴检校所需的输入数据包括: 成像系统的相机参数、平台 POS 数据以及 3 个子视场的影像数据。下面依次简述数据仿真方法。

1) 成像系统参数

成像系统参数参考研制中的航空推扫式外拼接成像系统设计参数(如表 1 所示), 总视场角设计为不低于 30° , 角分辨率为 0.11 mrad 。中间相机设计为垂直下视, 左右两个相机向内倾斜 9.4° , 相邻的两张影像有约 140 pixel 的重叠, 重叠区域占左右影像的 7% 。

考虑到各相机间的安装角度存在误差, 以中间相机为基准, 设计左、右相机相对于基准相机的安装参数如表 2 所示。

表 1 航空推扫式外拼接成像系统主要技术参数

Table 1 Main parameters of the airborne pushbroom combined hyperspectral system

Parameter	Left hyperspectral imager	Middle hyperspectral imager	Right hyperspectral imager
Field of view / ($^\circ$)	12.6	8	12.6
Number of samples	2000	1250	2000
Instantaneous field of view / mrad	0.11	0.11	0.11

表 2 相机间相对关系仿真参数

Table 2 Relative simulation parameters between cameras

Parameter	Offset / m			Relative orientation angles / ($^\circ$)		
	x	y	z	ω	φ	κ
Right imager	0.2	0	0	9.380	0.103	0.085
Left imager	0	-0.2	0	-9.407	0.059	0.032

2) POS 数据仿真

POS 数据使用实际飞行测试中获得的真实轨迹数据, 选用的飞行轨迹数据稳定性较差, 图 2 显示了其中 200 行数据的姿态角变化情况, 可以看出由

于使用了三轴稳定平台, 姿态角在长时间序列上表现出一致性, 但受高频振动的影响, roll 角和 pitch 角在短时间内波动明显。基于仿真使用的正射影像坐标信息, 将该真实轨迹数据平移至正射影像上方,

以覆盖仿真实验区域,并将飞行高度设为 10000 m。依据相机参数计算合适的速高比,按照积分时间内

插得到每一扫描行对应的位置 (B, L, H) 以及姿态 (roll, pitch, heading),形成仿真轨迹数据。

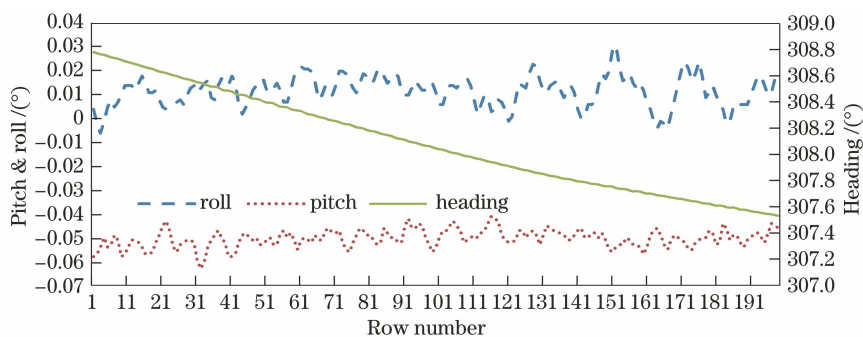


图 2 飞行轨迹数据姿态角

Fig. 2 Attitude of the simulate trajectory

考虑到同平台搭载 POS 系统的测量误差,在仿真轨迹数据中加入符合正态分布的随机误差,按照设计搭载的 POS 系统精度,将位置数据加入标准差 0.3 m 的误差,roll 和 pitch 角加入标准差 0.005° 的误差,heading 角加入标准差 0.008° 的误差,得到用于影像处理的 POS 数据。

3) 影像仿真

基于载荷严格几何成像模型,利用测区的数字

正射影像图 (DOM)、DEM 数据以及飞行轨迹数据即可实现影像的仿真。由于本文重点关注数据的几何特性,不同波段的几何处理方法是相同的,因此使用一个波段进行数据仿真以及实验分析。使用甘肃省宕昌市的高景一号图像 (全色,地面采样距离: 0.5 m) 作为正射影像,该区域的 ASTER DEM (网格间距: $1''$) 数据作为 DEM,如图 3 所示。

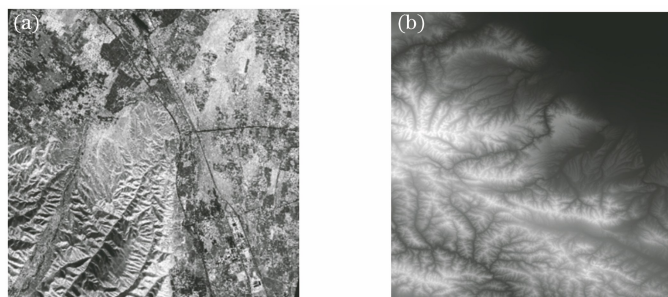


图 3 仿真使用的 DOM 与 DEM 数据。(a)高景一号全色图像;(b) DEM 数据

Fig. 3 DOM and DEM data used in simulation. (a) Gaojing-1 panchromatic image; (b) DEM data

对于每个扫描行,基于其对应的仿真轨迹数据,根据严格几何成像模型即(1)式计算每个像素的光线方向,与 DEM 的交点即为该像素对应的地面点,在 DOM 上内插该点位的灰度值作为仿真影像相应

像素的灰度值。逐相机、逐扫描行、逐像素进行上述运算,仿真得到 10240 行的三幅影像,并按照系统设计进行分幅得到 5 组 2048 行的影像。图 4 为仿真得到的一组左、中、右三个相机的影像,影像地面采

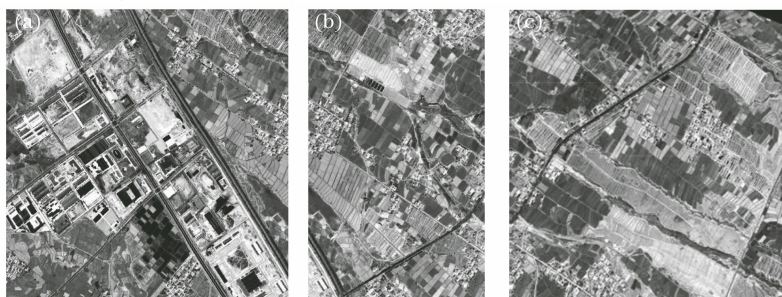


图 4 仿真影像。(a)左影像;(b)中影像;(c)右影像

Fig. 4 Simulation images. (a) Left image; (b) middle image; (c) right image

样间隔约为 1 m。图 5 为左-中影像、右-中影像局部重叠区域,可以明显看到由于航空平台姿态不稳定,

造成影像存在扭曲。由于同名点在不同影像上采集时刻不一致,其表现出的畸变大小与方向并不相同。

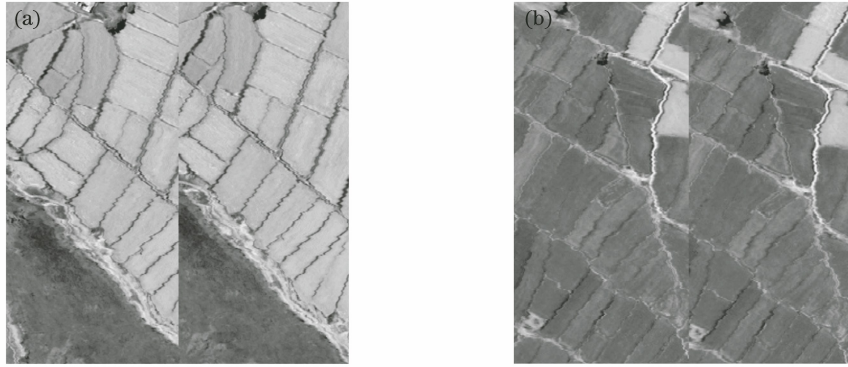


图 5 局部影像重叠区域。(a)左-中影像重叠区;(b)右-中影像重叠区

Fig. 5 Overlap area of partial images. (a) Overlap of left-middle image; (b) overlap of right-middle image

3.2 实验设计

利用本文描述的相对定向方法计算左右相机相对于基准相机的安装角参数,通过精度分析和对比实验对方法的有效性进行验证。为尽可能对实际飞行情况进行模拟,在仿真数据的基础上对 DEM、控制点等输入数据加入一定量的误差:目前全球可免费下载的 DEM 包括 SRTM、ASTER、AW3D 等数据,这三种 DEM 数据均有 30 m(1")格网大小的产品,标称高程精度优于 20 m,AW3D30 的标称高程精度更是达到了 5 m(1 σ)^[21-22],因此在相机相对定向以及拼接过程中,对原始 DEM 数据加入标准差为 20 m 的符合正态分布的误差。在左右倾斜影像距离视场边缘 200 pixel 处,随机选取 3 个点作为控制点,通过程序仿真计算其对应的物方坐标,对物方坐标加入中误差 0.1 m 的随机误差,对像方坐标加入中误差 0.3 pixel 的随机误差,以模拟控制点测量误差以及影像选点误差。

设计三组实验进行验证分析,具体设计如下。

3.2.1 相对定向实验

采用本文所述方法开展相对定向实验,其中影像间同名点匹配采用尺度不变特征变换(SIFT)算子,并利用随机采样一致(RANSAC)算法剔除误匹配点。将实验分为 4 种模式,分别为不加入控制点(mode-G0)和加入 1~3 个控制点(mode-G1, G2, G3)。在这四种情况下分别进行相对定向实验,并对结果进行分析。

3.2.2 拼接影像精度分析

为明确相对定向参数的有效性,利用计算结果对子视场影像进行拼接,对拼接影像的拼接精度以及几何定位精度进行定量分析。共开展 5 组

对比实验,除相对定向实验的四种模式外,同时与现有方法进行对比分析。各相机独立几何定标以建立相对定向关系的方法(后称为 Cal-6)沿用星载影像拼接中常用的物方拼接思想,实验步骤如下:在待标定影像上均匀选择 6 个点作为控制点,通过仿真计算各控制点的物方坐标。在 DEM、控制点数据中加入与相对定向实验同等误差。利用控制点对左、右影像分别进行几何定标,并基于此参数完成影像拼接。

分别从拼接误差和定位误差两个方面对拼接影像精度进行评价,精度评定方法如下。

1) 影像拼接精度评定方法

由于在影像拼接过程中会进行重叠区灰度加权平均,通过目视的方法难以定量评定拼接误差,因此利用灰度融合前几何校正后的图像重叠区同名点位置偏差来进行定量评价,评定方法如下:①基于相对定向参数或定标参数,对各子视场影像分别进行几何校正;②对于相邻的两幅几何校正后影像,基于 SIFT 算法在重叠区匹配同名点;③对于每对同名点 $(x, y)_A$ 和 $(x, y)_B$,根据对应的影像坐标参数分别计算其物方坐标 $(X, Y)_A$ 和 $(X, Y)_B$;④统计所有同名点 X、Y 方向上的点位中误差以及平面中误差。

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{RMSEX}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_A - X_B)^2}{n}} \\ R_{\text{RMSEY}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_A - Y_B)^2}{n}} \\ R_{\text{RMSEXY}} = \sqrt{R_{\text{RMSEX}}^2 + R_{\text{RMSEY}}^2} \end{array} \right. \quad (8)$$

2) 拼接影像几何定位精度评定方法

以仿真使用的原始卫星影像作为基准,对拼接后图像进行几何定位精度的评价,具体评定方法为:①基于相对定向参数或定标参数,对各子视场影像进行影像拼接处理;②对于几何校正后图像与仿真原始图像,基于 SIFT 算法匹配同名点;③对于每对同名点 $(x\ y)_A$ 和 $(x\ y)_B$,计算其物方坐标 $(X\ Y)_A$ 和 $(X\ Y)_B$;④利用(8)式统计所有 X、Y 方向上的点位中误差以及平面中误差。

3.2.3 控制点分布影响分析实验

考虑到控制点与重叠区的距离可能对相对定向

结果产生影响,为得到合理的控制点分布位置,将远离重叠区的半视场按照 100 pixel 的间隔选点,共选取 10 个控制点,分别进行相对定向以及影像拼接实验(从距影像边缘 100 pixel 到 1000 pixel,将 10 组实验称为 D1~D10),并对几何定位精度进行评价,分析控制点分布情况对拼接影像几何定位精度的影响。

3.3 实验结果与分析

3.3.1 相对定向结果分析

表 3 为对 4 种模式数据进行相对定向的结果,在各模式下计算出的安装角参数与设计值之间的误差如图 6 所示。

表 3 不同模式下的检校结果

Table 3 Calibration results of different modes

Mode	Number of GCPs	Left hyperspectral image			Right hyperspectral image		
		$\omega /(^{\circ})$	$\varphi /(^{\circ})$	$\kappa /(^{\circ})$	$\omega /(^{\circ})$	$\varphi /(^{\circ})$	$\kappa /(^{\circ})$
Design	—	9.380000	0.103000	0.085000	-9.407000	0.059000	0.032000
Mode-G0	0	9.378151	0.098901	0.052832	-9.400733	0.033653	0.268325
Mode-G1	1	9.375264	0.105162	0.102152	-9.402205	0.056876	0.054020
Mode-G2	2	9.376742	0.102024	0.076349	-9.402381	0.059746	0.025992
Mode-G3	3	9.375438	0.103195	0.082834	-9.402439	0.058893	0.034321

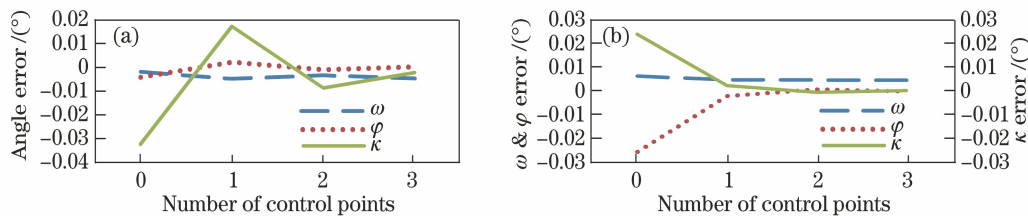


图 6 不同模式下检校结果准确度。(a)左-中影像检校结果;(b)右-中影像检校结果

Fig. 6 Accuracy of calibration results in different modes. (a) Left-middle image calibration result; (b) right-middle image calibration result

从表 3 和图 6 可以得到以下结论:1)无地面控制点参与的情况下,通过相邻影像间的约束关系,可检校出相机安置角偏差,但检校结果与真值存在一定偏差,尤其是 heading 角结果相差较大。这是由于同名点约束全部分布在影像一侧,当平台稳定性差且外部误差较大时,检校结果可靠性不能保证。2)增加控制点后,检校结果更接近于真值, ω 、 φ 角与真值的差值优于 0.005° , κ 角波动较大,在加入控制点后偏差在 0.02° 以内。

3.3.2 拼接影像精度分析

1) 影像拼接精度分析

基于相对定向参数或几何定标参数对子视场影像进行拼接,分别统计影像拼接精度以及拼接影像

的几何定位精度。

表 4 以左-中影像为例列出了拼接精度分析结果,右-中影像具有类似的规律,不再罗列。从结果可以看出,对于本文方法,无论是否使用控制点,拼接精度在 x 方向上均优于 1.5 pixel,在 y 方向上优于 1 pixel,平面精度在 1.7 pixel 左右。Cal-6 方法在使用了 6 个控制点的情况下,拼接精度为 x 方向 1.702 pixel, y 方向 1.123 pixel,平面精度约 2 pixel,略低于本文方法。由于 POS 系统测量误差的存在,几何校正不能完全消除由外方位元素误差带来的影像内部畸变,而同名点的成像时刻差异,导致其对应的姿态测量误差大小与方向不同,因此降低了拼接精度。

表 4 图像拼接精度(左-中影像)

Table 4 Image stitching accuracy (left-middle image)

Mode	Number of points	X /m			Y /m			Plane error /m
		Max error	Min error	RMSE	Max error	Min error	RMSE	
Mode-G0	46	1.829	-2.751	1.427	2.182	-1.187	0.861	1.667
Mode-G1	42	2.643	-2.572	1.454	1.375	-1.647	0.873	1.696
Mode-G2	41	2.502	-2.587	1.476	1.421	-1.225	0.861	1.709
Mode-G3	47	2.398	-2.413	1.374	1.495	-1.775	0.915	1.651
Cal-6	42	1.822	-3.789	1.702	2.040	-1.037	1.123	2.039

2) 拼接影像几何定位精度分析

对本文方法和几何定标方法生成的拼接影像进行几何定位精度评价,结果如表 5 所示。从结果可以看出,无地面控制点参与的情况下,由于相对定向结果与真值有偏差,造成最终拼接影像的几何绝对定位精度较差,尤其是影像边缘处误差最大超过 10 m。加入控制点后几何定位精度得到较好控制,1 个控制点的引入即可将平面误差从 4.5 m 降低到 2.8 m 以内。控制点数量的增加对几何定位精度影

响较小,加入 1~3 个控制点得到的拼接影像平面误差都在 2.7 m 左右。使用各相机独立几何定标的方法具有最好的几何定位精度,平面误差为 2.239 m。分析可知,在无控条件下,相对定向所使用的控制信息均集中在影像一侧,分布不均匀,容易出现解不稳定的问题,而在影像另一侧增加控制点后,相对定向结果更接近于真值,因此定位精度得到了提升。而几何定标方法中,处理使用的控制点分布更为均匀,因此几何定位精度最好。

表 5 拼接图像几何定位精度

Table 5 Stitched image geometric positioning accuracy

Mode	Number of points	X /m			Y /m			Plane error /m
		Max error	Min error	RMSE	Max error	Min error	RMSE	
Mode-G0	124	10.640	-1.850	3.980	0.706	-5.178	2.096	4.498
Mode-G1	120	2.721	-4.510	1.723	3.083	-4.242	2.128	2.738
Mode-G2	125	3.445	-3.468	1.353	3.581	-4.960	2.285	2.655
Mode-G3	130	2.665	-3.751	1.427	2.933	-4.753	2.313	2.718
Cal-6	137	2.695	-4.086	1.238	2.703	-4.731	1.866	2.239

综合分析相对定向结果以及拼接影像的精度,本文方法在 1 个控制点的约束下,即可实现相邻视场间相对安装角的解算,与各视场独立几何定标的方法相比,虽然几何定位精度略低,但对控制点的数量和分布要求有了大幅降低。然而在加入控制点的情况下,拼接精度和几何定位精度仍然超过了 2 pixel,究其原因,POS 测量精度和平台稳定性是限制相对定向精度的主要因素,本文研究针对的相机具有较高的空间分辨率,POS 测量误差可带来 1 pixel 的平面误差;同时,较差的平台稳定性会导致影像具有明显内部畸变,同名点采集时刻不一致意味着同名点在相邻影像上表现出不同的畸变大小和方向,这使得同名点匹配精度降低,进而影响了相对定向精度。另外 DEM 精度是拼接影像几何定位误差的主要误差源之一,对于本文实验系统来说,在视场边缘处,20 m 的高程误差可带来最大 5 m 的平面误差。因此为提高相对定向精度,确保最终拼接

影像的几何处理精度,在开展飞行实验时应配备高精度的 POS 系统以及高指标的三轴稳定平台,以保证位置姿态测量精度以及稳定性,同时在几何处理时使用高精度 DEM 进行正射纠正。

3.3.3 控制点分布影响分析实验

按照设计方案开展 10 组相对定向实验,考虑到控制点的约束主要体现在拼接影像的几何定位精度方法,因此利用这 10 组相对定向实验结果进行影像拼接,并对拼接影像几何定位精度进行评价,结果如表 6 所示,其平面误差的变化趋势如图 7 所示。

从结果可以看到,当控制点从待定向影像边缘移动到影像中间时,拼接图像的几何定位精度从 2.71 m 增加到了 2.88 m。总体变化趋势是随着控制点越接近基准相机,几何定位误差越大,但相对于总误差来说误差下降不到 0.1%。因此在实际实验中,对控制点的分布并无严格要求,在实际条件允许的情况下优选靠近视场边缘的点。

表 6 控制点分布对拼接图像几何定位精度的影响

Table 6 Influence of control point distribution on the geometric positioning accuracy of stitched image

Mode	Distance between image point and image edge /pixel	Number of points	RMSE-X /m	RMSE-Y /m	RMSE-plane /m
D1	100	116	1.668	2.139	2.712
D2	200	119	1.723	2.128	2.738
D3	300	116	1.686	2.163	2.743
D4	400	116	1.771	2.211	2.833
D5	500	122	1.734	2.271	2.857
D6	600	123	1.751	2.213	2.822
D7	700	129	1.721	2.242	2.827
D8	800	124	1.741	2.252	2.847
D9	900	119	1.778	2.262	2.877
D10	1000	121	1.759	2.222	2.834

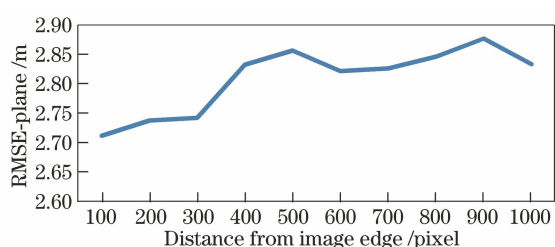


图 7 不同模式下检校结果准确度

Fig. 7 Accuracy of calibration results in different modes

4 结 论

本文从航空推扫式外拼接成像系统的成像特点出发,提出了一种子视场间相对定向方法,该方法利用子视场重叠区构建了外拼接相机间相对定向模型,基于相邻视场间同名点以及 DEM 数据,辅以单个控制点可实现相邻相机相对安装角的准确计算,为子视场拼接提供相对定向参数。为了验证所提出的方法,本文利用高分辨率卫星影像和同区域 DEM 数据以及真实飞行实验中的 POS 数据,仿真了实际飞行状态下的子视场影像,对本文方法进行了实验与精度分析,结果表明本文提出的相对定向方法可以在 1 个控制点的支持下恢复相邻相机之间的相对定向关系,拼接影像的拼接精度优于 2 pixel,几何定位精度优于 3 m。相较于各子视场分别几何定标进而实现拼接的方法,本文方法在保持了拼接精度和几何定位精度的情况下,大幅降低了对控制点数量及分布位置的要求,亦无需额外的检校航带支持,可有效降低飞行实验前期准备操作的复杂性,对于难以布设控制点的实验区域具有更好的适用性。

由于条件限制,本文是使用真实飞行实验 POS 数据制作仿真数据的方式来开展实验验证的,其具有可以获取真值的优点,更便于说明方法的有效性。

后续将进一步利用飞行实验的实测数据对本文方法进行验证,并深入开展各项误差源对相对定向以及拼接精度影响程度的定量分析。

参 考 文 献

- [1] Jia J X, Wang Y M, Chen J S, et al. Status and application of advanced airborne hyperspectral imaging technology: a review[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 104: 103115.
- [2] Qi H X, Yao B, Wang J Y, et al. The design of a wide-angle and wide spectral range pushbroom hyperspectral imager [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9263: 92630F.
- [3] Zhang D, Yuan L Y, Wang S W, et al. Wide swath and high resolution airborne hyperspectral imaging system and flight validation[J]. *Sensors*, 2019, 19 (7): 1667.
- [4] Hu F, Jin S Y. Study on the development of wide swath imaging technology about high-resolution optical remote sensing satellites [J]. *Geomatics World*, 2017, 24(5): 45-50.
胡芬, 金淑英. 高分辨率光学遥感卫星宽幅成像技术发展浅析[J]. *地理信息世界*, 2017, 24(5): 45-50.
- [5] Hu F. 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.
- [6] Zhang G, Liu B, Jiang W S. 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.
- [7] Tang X M, Hu F, Wang M, et al. Inner FoV

- stitching of spaceborne TDI CCD images based on sensor geometry and projection plane in object space [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(7): 6386-6406.
- [8] Pan J, Hu F, Wang M, et al. Inner FOV stitching of ZY-102C 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-102C 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.
- [9] Wang H, Mo F, Li Q J, et al. Inner FOV stitching of spaceborne multispectral camera based on virtual CCD line under back projection in object-space [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2019, 40(5): 118-125.
王怀, 莫凡, 李奇峻, 等. 物方反投影下的星载多光谱相机内视场虚拟线阵拼接 [J]. *航天返回与遥感*, 2019, 40(5): 118-125.
- [10] Jiang Y H, Xu K, Zhao R S, et al. Stitching images of dual-cameras onboard satellite [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 128: 274-286.
- [11] Cheng Y F, Jin S Y, Wang M, et al. An high accuracy image mosaicking approach of optical remote sensing satellite for multi-camera system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0828003.
程宇峰, 金淑英, 王密, 等. 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 [J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0828003.
- [12] Cheng Y F, Jin S Y, Wang M, et al. Image mosaicking approach for a double-camera system in the GaoFen2 optical remote sensing satellite based on the big virtual camera [J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1441.
- [13] Wang M, Tian Y, Cheng Y F. Development of on-orbit geometric calibration for high resolution optical remote sensing satellite [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1580-1588.
王密, 田原, 程宇峰. 高分辨率光学遥感卫星在轨几何定标现状与展望 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, 42(11): 1580-1588.
- [14] Li K, Zhang Y S, Meng W C, et al. Point-source-target-based method for space remote sensing geometric calibration and positioning accuracy improvement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1828003.
李凯, 张永生, 孟伟灿, 等. 基于点源靶标的航天遥感几何定标与定位精度提升方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1828003.
- [15] Yeh C K, Tsai V J D. Self-calibrated direct georeferencing of airborne pushbroom hyperspectral images [C] // 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 24-29, 2011, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2011: 2881-2883.
- [16] Wang M, Hu J, Zhou M, et al. Geometric correction of airborne linear array image based on bias matrix [J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, XL-1/W1: 369-372.
- [17] Zhang A W, Hu S X, Meng X G, et al. Toward high altitude airship ground-based boresight calibration of hyperspectral pushbroom imaging sensors [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(12): 17297-17311.
- [18] Habib A, Zhou T, Masjedi A, et al. Boresight calibration of GNSS/INS-assisted push-broom hyperspectral scanners on UAV platforms [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(5): 1734-1749.
- [19] Zhang L Y. Research and realization on registration technology of narrow overlapping imaging spectrometer data [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
张丽媛. 窄重叠成像光谱数据配准技术研究是实现 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [20] Liu J, Wang D H, Zhang Y S. Analysis of and transformation between HPR and OPK angles for the GPS/INS system [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(5): 5, 54-56.
刘军, 王冬红, 张永生. GPS/INS 系统 HPR 与 OPK 角元素的剖析与转换 [J]. *测绘科学*, 2006, 31(5): 5, 54-56.
- [21] Du X P, Guo H D, Fan X T, et al. Vertical accuracy assessment of SRTM and ASTER GDEM over typical regions of China using ICESat/GLAS [J]. *Earth Science*, 2013, 38(4): 887-897.
杜小平, 郭华东, 范湘涛, 等. 基于 ICESat/GLAS 数据的中国典型区域 SRTM 与 ASTER GDEM 高程精度评价 [J]. *地球科学*, 2013, 38(4): 887-897.
- [22] Takaku J, Tadono T, Tsutsui K, et al. Validation of 'AW3D' global DSM generated from ALOS PRISM [C] // ISPRS Annals of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Science, July 12-19, 2016, Prague. Czech Republic: ISPRS, 2016, III-4: 25-31.