

百种中国杰出学术期刊

遥感学报

Yaogan Xuebao

第 24 卷 第 6 期 2020 年 6 月

目 次

学者观点

生态系统遥感:内涵与挑战 吴炳方,曾源,闫娜娜,曾红伟,赵旦,张森 (609)

综述

2019 年中国陆表定量遥感发展综述 梁顺林,白瑞,陈晓娜,程洁,范闻捷,何涛,贾坤,江波,蒋玲梅,焦子锦,刘元波,倪文俭,邱凤,宋柳霖,孙林,唐伯惠,闻建光,吴桂平,谢东辉,姚云军,袁文平,张永光,张玉珍,张云腾,张晓通,赵天杰,赵祥 (618)

中国空间辐射测量基准技术 卢乃锰,丁雷,郑小兵,叶新,李传荣,吕达仁,张鹏,胡秀清,周成虎,尤政,房建成,龚建雅,蒋兴伟,李建军,马灵玲,徐娜 (672)

汶川地震前多圈层短一临遥感异常回顾及其时空关联性 何苗,吴立新,崔静,王威,齐源,毛文飞,苗则朗,陈必焰,申旭辉 (681)

测绘地物波谱本底数据库 钟守熠,肖青,闻建光,郑兴明,马明国,屈永华,郑柯,池天河,唐勇,游冬琴,郝大磊,程娟,贺敏,姜涛,晋锐,姚晓婧,赵理君 (701)

技术方法

联合卷积神经网络与集成学习的遥感影像场景分类 余东行,张保明,赵传,郭海涛,卢俊 (717)

面向类型特征的自适应阈值遥感影像变化检测 刘红超,张磊 (728)

国产机载大视场三线阵 CCD 相机几何标定 王涛,张艳,张永生,莫德林,于英 (739)

遥感应用

应用随机辐射传输模型反演云南松林分郁闭度 李骁尧,黄华国 (752)

风云三号卫星被动微波反演海洋上空云液态水含量 婁芳丽,商建,吴琼,谷松岩 (766)

滑坡蠕变与遥感影像上植被异常关系 郭忻怡,郭擎,冯钟葵 (776)

本期责任编辑:尤笛

《遥感学报》网络版:www.jors.cn

《遥感学报》微信公众号及官网



订阅号



官网

JOURNAL OF REMOTE SENSING (Chinese)

(Vol. 24 No.6 June, 2020)

CONTENTS

Scholar's View Point

Remote sensing for ecosystem: Definition and prospects
..... WU Bingfang, ZENG Yuan, YAN Nana, ZENG Hongwei, ZHAO Dan, ZHANG Miao (617)

Review

Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019
LIANG Shunlin, BAI Rui, CHEN Xiaona, CHENG Jie, FAN Wenjie, HE Tao, JIA Kun, JIANG Bo,
JIANG Lingmei, JIAO Ziti, LIU Yuanbo, NI Wenjian, QIU Feng, SONG Liulin, SUN Lin, TANG Bohui,
WEN Jianguang, WU Guiping, XIE Donghui, YAO Yunjun, YUAN Wenping, ZHANG Yongguang,
ZHANG Yuzhen, ZHANG Yunteng, ZHANG Xiaotong, ZHAO Tianjie, ZHAO Xiang (671)

Introduction of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing LU Naimeng,
DING Lei, ZHENG Xiaobing, YE Xin, LI Chuanrong, LYU Daren, ZHANG Peng, HU Xiuqing, ZHOU Chenghu,
YOU Zheng, FANG Jiancheng, GONG Jianya, JIANG Xingwei, LI Jianjun, MA Lingling, XU Na (680)

Remote sensing anomalies of multiple geospheres before the Wenchuan earthquake and its spatiotemporal correlations
..... HE Miao,
WU Lixin, CUI Jing, WANG Wei, QI Yuan, MAO Wenfei, MIAO Zelang, CHEN Biyan, SHEN Xuhui (700)

Design and realization of ground object background spectral library for surveying and mapping ... ZHONG Shouyi,
XIAO Qing, WEN Jianguang, ZHENG Xingming, MA Mingguo, QU Yonghua, ZHENG Ke, CHI Tianhe, TANG Yong,
YOU Dongqin, HAO Dalei, CHENG Juan, HE Min, JIANG Tao, JIN Rui, YAO Xiaojing, ZHAO Lijun (716)

Technology and Methodology

Scene classification of remote sensing image using ensemble convolutional neural network
..... YU Donghang, ZHANG Baoming, ZHAO Chuan, GUO Haitao, LU Jun (727)

Adaptive threshold change detection based on type feature for remote sensing image
..... LIU Hongchao, ZHANG Lei (738)

Geometric calibration of domestic airborne wide-field three-linear CCD camera
..... WANG Tao, ZHANG Yan, ZHANG Yongsheng, MO Delin, YU Ying (750)

Remote Sensing Applications

Retrieving canopy closure of Yunnan pine forests by using stochastic radiative transfer model
..... LI Xiaoyao, HUANG Huaguo (765)

Retrieval of cloud liquid water content over global oceans using FY-3C/3D microwave imager
..... DOU Fangli, SHANG Jian, WU Qiong, GU Songyan (775)

Relationship between landslide creep and vegetation anomalies in remote sensing images
..... GUO Xinyi, GUO Qing, FENG Zhongkui (786)

国产机载大视场三线阵 CCD 相机几何标定

王涛¹, 张艳², 张永生¹, 莫德林¹, 于英¹

1. 信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450052;

2. 信息工程大学 数据与目标工程学院, 郑州 450052

摘要: 发展和应用三线阵 CCD (Charge-coupled Device) 传感器是当前遥感测绘的一个重要方向, 本文针对国内首台自主研发的机载三线阵 CCD 相机 (以下简称 GFXJ), 开展了国产 GFXJ 相机几何标定技术研究。首先对比分析了 GFXJ 相机的成像特点和几何变形因素, 在此基础上建立了基于 CCD 指向角的分段自检校标定模型; 然后提出了循环两步法标定方案; 最后在中国 (嵩山) 卫星遥感定标场和黑龙江鹤岗地区获得了多组飞行实验数据, 采用循环两步法对 GFXJ 相机前、下及后视 CCD 每一像元指向角进行了准确标定, 并生成可靠的 CCD 像点坐标文件。实验表明, 本文提出的基于 CCD 指向角的分段自检校标定模型和循环两步法标定方案对于 GFXJ 相机具有良好的适用性和有效性, 标定后可大幅提高影像无控定位精度; 辅以少量控制点进行区域网平差, GFXJ 影像定位精度可满足 1:1000 地形图测图的空中三角测量精度要求。同时本文建立的标定模型和标定方案可为其它机载三线阵 CCD 相机的标定处理提供借鉴。

关键词: 遥感, 机载三线阵 CCD 相机, 分段自检校标定模型, 几何标定, 中国 (嵩山) 卫星遥感定标场, 循环两步法标定方案

引用格式: 王涛, 张艳, 张永生, 莫德林, 于英. 2020. 国产机载大视场三线阵 CCD 相机几何标定. 遥感学报, 24(6): 739-751

Wang T, Zhang Y, Zhang Y S, Mo D L and Yu Y. 2020. Geometric calibration of domestic airborne wide-field three-linear CCD camera. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(6): 739-751[DOI: 10.11834/jrs.20208277]

1 引言

三线阵 CCD 传感器在测绘生产效率和三维量测精度上具有明显优势, 在航空和航天遥感方面都得了广泛应用, 是遥感测绘的重要发展方向。在星载三线阵 CCD 传感器研究方面, 中国已达到国际先进水平, 具有代表性的有“天绘一号”和“资源三号”立体测绘卫星, 并先后建成了中国 (嵩山) 卫星遥感定标场和多场区构成的数字化几何检校场, 成功研发了在轨几何检校算法与软件, 解决了国产卫星在轨几何检校技术难题, 使国产卫星的几何定位精度达到了国际同类卫星先进水平。(王任享等, 2012, 2013; 王密等, 2017; 张艳等, 2015; Tang 等, 2015)。但目前国内关于机载三线阵 CCD 传感器的设计制造、定标定位等几何处理技术的研究还相对滞后。引进的 ADS

(ADS40、ADS80 和 ADS100) 系列相机仍占据国内大部分市场, 其影像数据的几何处理采用配套的 Leica 公司 Orima 软件, 按要求后续每隔两年相机需要到国外进行返厂标定 (Leica, 2012; Hinsken 等, 2002; Sandau 等, 2000), 实际操作难度很大。

针对以 ADS 相机为代表的机载线阵传感器的几何标定, 国内外多位学者进行了深入研究, 瑞士苏黎士联邦理工学院 (ETH) 的 Gruen 和 Zhan (2002)、Poli (2002) 等针对日本 TLS 三线阵相机进行了平差实验; 袁修孝等 (2006), 袁修孝 (2008) 提出了检校机载 POS 系统视准轴误差的方法; 涂辛茹等 (2011) 对机载三线阵传感器几何检校进行了研究, 提出了一种 ADS40 几何检校的方案, 采用 Orima 软件 Brown 相机误差模型进行自检校平差, 检校生成新相机文件, 同等条件下空

收稿日期: 2018-07-12; 预印本: 2018-10-10

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(编号:R/GFHK-2/D01); 十三五预研(编号:305090406, 30503040203, 30503040501)

第一作者简介: 王涛, 1975 年生, 男, 教授, 研究方向为航空航天遥感工程、遥感几何定标定位技术、遥感信息处理与应用等。E-mail: wangtaoyin@163.com

三解算精度优于原始相机文件,在有控制条件下 X、Y、Z 三轴方向的精度均可达到 1 个像元;王冬红(2011)对 ADS40 影像进行了自检校光束法平差实验,在三轴方向定位精度的提升幅度分别达到 40%、60% 和 70%,并得出了定向片内插是三线阵影像平差的优选模型、ETH 和 Brown 模型都能有效实现三线阵相机检校的结论;王涛等(2012a, 2012b)以及王涛(2012)对机载三线阵传感器几何标定及影像自检校平差技术进行了深入研究,针对 ADS40 相机设计了相机误差模型和用于标定的自检校光束法区域网平差模型,实现了相机的有效标定,标定后 X、Y、Z 三轴方向精度提升幅度均在 50% 以上。

以上研究成果为中国开展机载三线阵 CCD 相机的研制和几何处理工作积累了宝贵的经验。GFXJ 是在高分辨率对地观测系统重大专项支持下自行研制的首台机载大视场三线阵 CCD 相机。它采用三线阵推扫方式成像,在航摄过程中可同时从前视、下视、后视 3 个不同角度对地面目标进行推扫成像,提供 3 个视角的全色影像与 4 个波段的多光谱(R, G, B, NIR)影像。每条电荷耦合元件 CCD (Charge-Coupled Device) 线阵列达到了 32756 个像元,且为整条 CCD 而非多片拼接,是目前已知像元最多的单条线阵 CCD。与 ADS 系列相机相比, GFXJ 相机焦距长,视场大,镜头畸变、CCD 变形等误差因素对几何定位精度的影响更为显著。

本文在深入分析 GFXJ 相机几何特性的基础上,提出和构建分段自检校标定模型,设计相应的标定方案,最后利用中国(嵩山)卫星遥感定标场和黑龙江鹤岗地区两次飞行获得的数据开展标定试验,对模型和方法的适用性、有效性进行验证和分析。

2 基于 CCD 指向角的分段自检校标定模型

GFXJ 相机三线阵全色 CCD 像元大小为 5 μm ,相机焦距达到 130 mm。系统除传感器外,还包括 POS (GPS/IMU) 系统、控制中心操作系统及数据存储磁盘阵列、陀螺稳定平台等部件组成。惯性测量装置 IMU 模块与相机镜头刚性连接,固定安置在陀螺稳定平台上。表 1 是 ADS40 相机与 GFXJ

相机主要技术参数的对比。从表 1 中可以看出,与 ADS40 相比国产 GFXJ 相机有两个显著特点:焦距增大一倍,同等航高摄影时影像空间分辨率更高;CCD 阵列像元数量增加近 3 倍,地面覆盖视场范围更广。

表 1 GFXJ 和 ADS40 相机主要技术参数对比

Table 1 Main technical parameters of GFXJ camera and ADS40 camera

技术参数	相机名称	
	ADS40	GFXJ
相机焦距/mm	62.7	130
(左右)视场(FOV)	64°	64°
立体成像角度 (后视/前视/前、后视)	16°/26°/42°	27°/21°/48°
CCD 像元大小/ μm	6.5	5
CCD 阵列	全色 2×12000 像元 (交错 3.25 μm) 多光谱 12000 像元	全色 32756 像元; 多光谱 16378 像元
线阵列采样频率/Hz	200—800	540—1080
波段范围/nm	PAN(全色):465—680; 608—662; G:533—587; B:428—492; NIR(近红外):703—757	

在飞行拍摄前,相机成像参数(主点、主距和光学畸变等)都会经过实验室标定,但是在实际飞行中,由于成像环境的改变以及器件变形等因素的影响,相机成像参数将不可避免地发生变化,从而对影像定位带来系统误差影响。研究表明,降低立体测绘精度,引起影像几何变形的系统误差源主要有两部分:一部分是 GNSS/IMU 测量值中的观测误差,包括 GNSS 天线中心的偏心矢量和 IMU 视轴偏心角等系统误差和偶然误差,另一部分是相机镜头、CCD 等畸变误差(王冬红, 2011; 王涛等, 2012a, 2012b; 王涛, 2012)。特别对于 GFXJ 相机来说,由于 CCD 阵列长,像元数目多,发生变形和移位的概率和程度都可能增加。

GFXJ 相机的镜头光学畸变误差主要有径向畸变、偏心畸变和像平面畸变:其中由镜头形状引起的使像点沿径向产生的偏差称为径向畸变;偏心畸变主要是由镜头光学系统的光心与几何中心不一致造成的;像平面畸变可分为像平面不平引起的畸变和像平面内的平面畸变。CCD 变形和移位误差主要包括:像元尺寸的变化、CCD 在焦平面内的平移、CCD 在焦平面内的旋转。其中像元

尺寸的变化主要对成像比例尺造成影响，线阵 CCD 的整体平移将使得实验室标定的像主点偏离原位置，而 CCD 在焦平面内的旋转和弯曲、缩放等几何变形可对像点坐标产生影响。综合考虑以上因素，可以建立 GFXJ 相机的物理几何变形模型如下（王涛等，2012a；王涛，2012）

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta x_p - \frac{\Delta f}{f} \bar{x} + (k_1 r^2 + k_2 r^4) x + p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + \\ \quad 2p_2 \bar{x} \cdot \bar{y} + b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y} \\ \Delta y = \Delta y_p - \frac{\Delta f}{f} \bar{y} + (k_1 r^2 + k_2 r^4) y + 2p_1 \bar{x} \cdot \bar{y} + \\ \quad p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) + b_3 \bar{y} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $(\Delta x, \Delta y)$ 表示各种变形因素对像点坐标的综合影响， $\bar{x} = (x - x_p)$ ， $\bar{y} = (y - y_p)$ ， $r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$ ， (x_p, y_p) 为像主点坐标， $\Delta x_p, \Delta y_p$ 表示主点偏移， Δf 代表焦距变化， k_1, k_2 为径向畸变参数， p_1, p_2 为偏心畸变参数， b_1, b_2, b_3 为比例尺缩放、旋转和弯曲的综合影响参数。每条 CCD 设置 10 个附加参数，GFXJ 相机总共设置 30 个参数； $(\Delta x, \Delta y)$ 、 (x_p, y_p) 、 (\bar{x}, \bar{y}) 、 $(\Delta x_p, \Delta y_p)$ 、 Δf 、 f 和 r 以毫米为单位， k_1, k_2, p_1, p_2 和 b_1, b_2, b_3 为无量纲参数。

式 (1) 表示的物理几何变形模型是根据相机成像时存在的各种畸变的物理特性建立的数学模型，优势是对每一项几何变形误差来源都有清晰的解释和定义，缺点是参数过多可能导致过参数化，且研究表明参数间不可避免的存在相关性（杨韞澜等，2014）；相机参数与外方位元素间的强相关性；主点偏移和偏心畸变参数 p_1, p_2 间的强相关性；焦距和畸变参数 b_1 间的强相关性等。由此导致相机标定难以获得稳定可靠的标定值，前期针对 GFXJ 相机的实验研究也证实了这一点。因此本文借鉴航天线阵相机标定的研究成果（王密等，2017；Tan 等，2015；孟伟灿等，2015；杨博和王密，2013），不考虑各几何畸变具体的物理意义，采用一种数学意义上的经验模型综合描述各种几何畸变的影响，并将这种综合影响归算为每个 CCD 像元指向角的变化。

考虑相机主距与某些相机参数（例如 CCD 缩放）间具有很强的相关性，对主距和其他相机参数的联合平差，容易导致方程无解。所以首先采

用主距归一化的处理方式，建立描述像点 p 像空间坐标值 (x', y', z') 的指向角模型

$$\begin{cases} x' = \frac{x}{f} = \tan(\Psi_x) \\ y' = \frac{y}{f} = \tan(\Psi_y) \\ z' = -1 \end{cases} \quad (2)$$

式中， (x, y) 是像平面坐标系下的像点坐标其与焦距 f 的单位均为 mm。 (x', y', z') 是归一化后的像空间坐标，无量纲。像点 $p(x', y', z')$ 与地面点 $P(X, Y, Z)$ 满足共线条件模型。 Ψ_x 和 Ψ_y 即为 CCD 指向角，其中 Ψ_x 表示沿轨方向（飞行方向）的指向角， Ψ_y 表示垂轨方向（CCD 方向）的指向角，指向角单位为弧度。

星载线阵 CCD 视场角较小，焦距较长，CCD 平移旋转缩放、主距变化和低阶径向畸变等几何误差变形可采用低阶畸变几何畸变曲线描述，高阶畸变可以忽略不计。但 GFXJ 相机 CCD 探元数目多，视场大，几何变形因素更为复杂，为了准确地描述其几何变形，本文提出基于 CCD 指向角的分段自检校标定模型 (3)、(4)、(5)。模型 (3) 描述了 CCD 阵列上每一探元的指向角变化

$$\begin{cases} \tan(\Psi_x) = \tan(\Psi_{x_0}) + ax_0^i + ax_1^i (s - s_i) + \\ \quad ax_2^i (s - s_i)^2 + ax_3^i (s - s_i)^3 \\ \tan(\Psi_y) = \tan(\Psi_{y_0}) + bx_0^i + bx_1^i (s - s_i) + \\ \quad bx_2^i (s - s_i)^2 + bx_3^i (s - s_i)^3 \end{cases} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中， s 为 CCD 探元的列号， s_i 为第 i 分段 CCD 的起始列号，对于线阵 CCD 上探元 s 其像空间坐标为 $(\tan(\Psi_x), \tan(\Psi_y), -1)$ ，无量纲。其初值为实验室测量值 $(\tan(\Psi_{x_0}), \tan(\Psi_{y_0}), -1)$ ， Ψ_{x_0} 为沿轨方向指向角初值，也就是实验室标定的相机交会角， Ψ_{y_0} 为垂轨方向的指向角初值，由 CCD 探元尺寸和列号计算。各种变形因素的综合 $bx_0^i + bx_1^i (s - s_i) + bx_2^i (s - s_i)^2 + bx_3^i (s - s_i)^3$ 合影响为 $ax_0^i + ax_1^i (s - s_i) + ax_2^i (s - s_i)^2 + ax_3^i (s - s_i)^3$ 和， $ax_0^i, ax_1^i, ax_2^i, bx_0^i, bx_1^i, bx_2^i$ 为自检校标定模型中该分段的待标定参数，无量纲。对于 GFXJ 相机，前/下/后 CCD 的待标定参

数互不相同,各自独立。

在 CCD 分段边界处,相邻分段 i 和 $i+1$ 计算出的指向角应满足等值约束条件

$$\begin{cases} ax_0^i + ax_1^i (s-s_i) + ax_2^i (s-s_i)^2 + \\ ax_3^i (s-s_i)^3 = ax_0^{i+1} + ax_1^{i+1} (s-s_{i+1}) + \\ ax_2^{i+1} (s-s_{i+1})^2 + ax_3^{i+1} (s-s_{i+1})^3 \\ bx_0^i + bx_1^i (s-s_i) + bx_2^i (s-s_i)^2 + bx_3^i (s-s_i)^3 = \\ bx_0^{i+1} + bx_1^{i+1} (s-s_{i+1}) + bx_2^{i+1} (s-s_{i+1})^2 + \\ bx_3^{i+1} (s-s_{i+1})^3 \end{cases} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (4)$$

式中, $ax_0^i, ax_1^i, ax_2^i, ax_3^i, bx_0^i, bx_1^i, bx_2^i, bx_3^i$ 是 i 段 CCD 分段的待标定变形参数, $ax_0^{i+1}, ax_1^{i+1}, ax_2^{i+1}, ax_3^{i+1}, bx_0^{i+1}, bx_1^{i+1}, bx_2^{i+1}, bx_3^{i+1}$ 是 $i+1$ 段 CCD 分段的待标定参数。

此外,如果考虑到曲线光滑,还应附加一阶导数相等的条件,即

$$\begin{cases} ax_1^i + 2ax_2^i (s-s_i) + 3ax_3^i (s-s_i)^2 = ax_1^{i+1} + \\ 2ax_2^{i+1} (s-s_{i+1}) + 3ax_3^{i+1} (s-s_{i+1})^2 \\ bx_1^i + 2bx_2^i (s-s_i) + 3bx_3^i (s-s_i)^2 = bx_1^{i+1} + \\ 2bx_2^{i+1} (s-s_{i+1}) + 3bx_3^{i+1} (s-s_{i+1})^2 \end{cases} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (5)$$

3 GFXJ 相机的循环二步法几何标定

基于分段自检校标定模型式 (3) 一式 (5), 建立机载线阵 CCD 影像的严格几何成像模型

$$\begin{cases} \tan(\Psi_x) = -\frac{a_1(X - X_s^j) + b_1(Y - Y_s^j) + c_1(Z - Z_s^j)}{a_3(X - X_s^j) + b_3(Y - Y_s^j) + c_3(Z - Z_s^j)} \\ \tan(\Psi_y) = -\frac{a_2(X - X_s^j) + b_2(Y - Y_s^j) + c_2(Z - Z_s^j)}{a_3(X - X_s^j) + b_3(Y - Y_s^j) + c_3(Z - Z_s^j)} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $(\tan(\Psi_x), \tan(\Psi_y))$ 代表像点坐标量值, 无量纲; (X, Y, Z) 为地面点坐标 (单位为 m); (X_s^j, Y_s^j, Z_s^j) 为第 j 扫描行的外方位线元素 (单位为 m); $(a_i, b_i, c_i), i=1, 2, 3$ 为外方位角元素 (ϕ, ω, κ) 所构旋转矩阵的系数。机载线阵 CCD 影像

属于行中心投影影像,不同扫描线对应的摄影中心位置和姿态都不一样。空中三角测量解算时外方位元素个数大于观测值个数,理论上无法解算每一条扫描线的外方位元素,因此需要采用合适的数学模型模拟摄影中心位置和姿态。目前常用的模型有线性多项式模型、分段多项式模型和定向片模型(王冬红, 2011; 王涛等, 2012a; 刘军, 2007)。本文研究及试验表明定向片精度最高,而且最为稳定,因此采用定向片模型对 GFXJ 相机进行空中三角测量平差和相机标定。定向片的外方位元素模型为

$$\begin{cases} X_s^j = c_j X_s^k + (1 - c_j) X_s^{k+1} - \delta X_j \\ Y_s^j = c_j Y_s^k + (1 - c_j) Y_s^{k+1} - \delta Y_j \\ Z_s^j = c_j Z_s^k + (1 - c_j) Z_s^{k+1} - \delta Z_j \\ \omega^j = c_j \omega^k + (1 - c_j) \omega^{k+1} - \delta \omega_j \\ \phi^j = c_j \phi^k + (1 - c_j) \phi^{k+1} - \delta \phi_j \\ \kappa^j = c_j \kappa^k + (1 - c_j) \kappa^{k+1} - \delta \kappa_j \end{cases} \quad (7)$$

式中, $X_s^k, Y_s^j, \dots, \kappa^j$ 为第 k 片定向片的外方位元素, $X_s^{k+1}, Y_s^{k+1}, \dots, \kappa^{k+1}$ 为第 $k+1$ 片定向片的外方位元素, 外方位角元素需要事先转换为以弧度为单位, $c_j = \frac{t_{k+1} - t_j}{t_{k+1} - t_k}$, 是由第 k 片和第 $k+1$ 片定向片的成像时间计算得到的权系数, $\delta X_j, \delta Y_j, \delta Z_j, \delta \omega_j, \delta \phi_j, \delta \kappa_j$ 为改正项, 可利用 GNSS/IMU 观测值计算(刘军, 2007)。

将式 (7) 代入成像模型 (6), 得到

$$\begin{cases} \tan(\Psi_x) = -\frac{a_1(X - (c_j X_s^k + (1 - c_j) X_s^{k+1} - \delta X_j)) + b_1(Y - (c_j Y_{GPS}^k + (1 - c_j) Y_{GPS}^{k+1} - Y_{GPS}^j)) + c_1(Z - (c_j Z_s^k + (1 - c_j) Z_s^{k+1} - \delta Z_j))}{a_3(X - (c_j X_s^k + (1 - c_j) X_s^{k+1} - \delta X_j)) + b_3(Y - (c_j Y_{GPS}^k + (1 - c_j) Y_{GPS}^{k+1} - Y_{GPS}^j)) + c_3(Z - (c_j Z_s^k + (1 - c_j) Z_s^{k+1} - \delta Z_j))} \\ \tan(\Psi_y) = -\frac{a_2(X - (c_j X_s^k + (1 - c_j) X_s^{k+1} - \delta X_j)) + b_2(Y - (c_j Y_{GPS}^k + (1 - c_j) Y_{GPS}^{k+1} - Y_{GPS}^j)) + c_2(Z - (c_j Z_s^k + (1 - c_j) Z_s^{k+1} - \delta Z_j))}{a_3(X - (c_j X_s^k + (1 - c_j) X_s^{k+1} - \delta X_j)) + b_3(Y - (c_j Y_{GPS}^k + (1 - c_j) Y_{GPS}^{k+1} - Y_{GPS}^j)) + c_3(Z - (c_j Z_s^k + (1 - c_j) Z_s^{k+1} - \delta Z_j))} \end{cases} \quad (8)$$

把式 (8) 线性化, 得到方程

$$\begin{cases} v_x = c_j(a_{11}dX_s^k + a_{12}dY_s^k + \\ a_{13}dZ_s^k + a_{14}d\omega^k + a_{15}d\varphi^k + a_{16}d\kappa^k) + \\ (1 - c_j) \cdot (a_{11}dX_s^{k+1} + a_{12}dY_s^{k+1} + \\ a_{13}dZ_s^{k+1} + a_{14}d\omega^{k+1} + a_{15}d\varphi^{k+1} + a_{16}d\kappa^{k+1}) - \\ a_{11}dX - a_{12}dY - a_{13}dZ - l_x \\ v_y = c_j(a_{21}dX_s^k + a_{22}dY_s^k + a_{23}dZ_s^k + a_{24}d\omega^k + \\ a_{25}d\varphi^k + a_{26}d\kappa^k) + (1 - c_j) \cdot (a_{21}dX_s^{k+1} + \\ a_{22}dY_s^{k+1} + a_{23}dZ_s^{k+1} + a_{24}d\omega^{k+1} + a_{25}d\varphi^{k+1} + \\ a_{26}d\kappa^{k+1}) - a_{21}dX - a_{22}dY - a_{23}dZ - l_y \end{cases} \quad (9)$$

式中, l_x, l_y 为常数项, dX, dY, dZ 为控制点坐标的改正数, 对于高精度的控制点, 此项可不考虑。

组合方程式 (3)、(4)、(5)、(9), 提出适用于 GFXJ 相机标定的整体标定方程如下

$$\begin{cases} V_x = AX + BX_g + CX_s - L_x & P_x \\ V_s = & E_s X_s - L_s & P_s \\ V_1 = & A_1 X_s - L_1 & P_1 \\ V_2 = & A_2 X_s - L_2 & P_2 \\ V_g = & E_g X_g & -L_g & P_g \end{cases} \quad (10)$$

式中, X 为外方位元素改正数向量; X_g 为控制点坐标的改正数向量; X_s 为待标定相机参数 $ax_0^i, ax_1^i, ax_2^i, ax_3^i, bx_0^i, bx_1^i, bx_2^i, bx_3^i$ 构成的参数向量; V_s 为相机参数观测值残差向量, V_x 为像点坐标观测值残差向量, V_1, V_2 为等值约束条件和 1 阶连续约束条件下的观测值残差向量, V_g 为地面坐标观测值残差向量; $(A, B, C, A_1, A_2, E_s, E_g)$ 为相应的设计矩阵; L_x 为像点坐标的观测值矢量; L_g 为控制点坐标观测值矢量; L_s, L_1, L_2 为相应的常数项矢量; P_x 为像点坐标的权矩阵, P_s 为待标定参数的权矩阵, P_1 和 P_2 为约束条件的权矩阵, P_g 为控制点坐标的权矩阵。

模型式 (10) 考虑了相机外方位元素和前/下/后视 CCD 的变形因素, 比较全面的描述了 GFXJ 相机的各种变形误差。但在研究试验中发现, 直接利用模型式 (10) 对 GFXJ 相机一体化整体标定, 虽然标定后的定位精度较高, 但是不同实验数据获得的相机标定参数不够稳定。分析认为, 采用一体化整体标定, 外方位元素和待标定相机参数一起求解, 还是存在一些不可避免的相关性, 造成定位误差在标定过程中的随机配赋, 难以获得稳定可靠的相机待标定参数。因此本文提出将外方位元素改正数和相机变形参数进行分开独立标定, 迭代进行, 外方位元素平差按照模型式 (11) 进行, 相机变形参数按照模型式 (12) 标定。

$$\begin{cases} V_x = AX + BX_g - L_x & P_x \\ V_g = & E_g X_g - L_g & P_g \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} V_s = & E_s X_s - L_s & P_s \\ V_1 = & A_1 X_s - L_1 & P_1 \\ V_g = & A_2 X_s - L_g & P_2 \end{cases} \quad (12)$$

据此提出针对 GFXJ 相机的循环两步法标定方案如下:

(1) 对于 GFXJ 影像建立以每条扫描行为中心的严格成像模型, 将 GNSS/IMU 观测数据转换到 UTM 地图投影坐标系下 (也可以采用局部地面辅助坐标系或空间地心直角坐标系)。

(2) 对 GFXJ 影像数据实施基于 GPU 加速处理的多航线影像匹配, 提取大量连接点数据。

(3) 以模型式 (11) 为基础, 利用控制点数据和影像匹配获得的连接点数据, 构建多航线的区域网。采用定向片模型, 建立 GFXJ 影像的大规模平差区域网, 进行空中三角测量处理。以每条扫描行的 GNSS/IMU 观测值为初值, 获得定向片的外方位元素值和每条扫描行的外方位元素改正数 $(\Delta X_s, \Delta Y_s, \Delta Z_s, \Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa)$ 。

(4) 固定步骤 (3) 获得的外方位元素值不变, 以每个定向片为采样数据, 依据模型式 (12) 进行相机参数标定, 获得相机参数 $ax_0^i, ax_1^i, ax_2^i, bx_0^i, bx_1^i, bx_2^i (i = 1, 2, 3 \dots)$ 的标定值。

(5) 以分段 CCD 的相机参数标定值 $ax_0^i, ax_1^i, ax_2^i, bx_0^i, bx_1^i, bx_2^i$ 为基础, 利用分段自检校标定式 (3) 计算前/下/后视 CCD 阵列上每一探元的像点坐标 $(\tan(\Psi_x), \tan(\Psi_y))$, 反求探元指向角 (Ψ_x, Ψ_y) 并写入文件。

(6) 以探元指向角文件为基础, 重新计算控制点和连接点的像平面坐标, 设像点 p_0 的像素坐标为 (s, l) , 其单位为像元。用 S 表示 p_0 的整数列号, 即

$$\begin{cases} S = \text{int}(p_0(s)) \\ d = p_0(s) - S \end{cases} \quad (13)$$

式中, d 为像点 p_0 距离整数探元 S 的子像元距离。在探元指向角文件中, 如果第 S 个和第 $(S+1)$ 个 CCD 探元的探元指向角分别为 (Ψ_{x1}, Ψ_{y1}) 和 (Ψ_{x2}, Ψ_{y2}) , 则两个探元间, p_0 点的探元指向角 (Ψ_x, Ψ_y) 为

$$\begin{cases} \Psi_x = \Psi_{x1} + d(\Psi_{x2} - \Psi_{x1}) \\ \Psi_y = \Psi_{y1} + d(\Psi_{y2} - \Psi_{y1}) \end{cases} \quad (14)$$

再重新计算像坐标 $(\tan(\Psi_x), \tan(\Psi_y))$ ，利用更新后的像平面坐标，再次进行步骤(3)中的区域网平差。

(7) 利用区域网平差的结果，再次进行步骤(4)、(5)、(6)中的相机参数标定和像点坐标计算。迭代循环步骤(7)(8)，直至外方位元素的改正数 $(\Delta X_s, \Delta Y_s, \Delta Z_s, \Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa)$ 和相机标定参数 $ax_0^i, ax_1^i, ax_2^i, ax_3^i, bx_0^i, bx_1^i, bx_2^i, bx_3^i$ 的改正数趋于稳定，前后两次迭代改正数之差小于阈值，则迭代结束，跳出循环。

(8) 由前/下/后视CCD阵列上每一探元的指向角 (Ψ_x, Ψ_y) 生成像点坐标标定文件(CAM文件)。

4 实验数据

利用GFXJ相机分别在中国(嵩山)卫星遥感定标场和黑龙江鹤岗地区进行了两次标定校飞。2017年5月23日、25日在中国(嵩山)卫星遥感定标场区域组织了两次飞行，获取了两次组数据进行区域网平差和标定实验。中国(嵩山)卫星遥感定标场位于河南登封嵩山地区，是国家级遥感定标实验场(许妙忠等, 2010; 张永生, 2012)。该地区海拔高度在100—1500 m，主要地貌类别齐全，涵盖有平原、丘陵地、山地等。实验场包括航空定标实验场，摄影测量与遥感综合实验场和航天定标实验场3部分，其中航空定标实验场主要用于各种航空相机或传感器的检定，面积约8 km×8 km，控制点采用埋石方式分级布设了214个永久性高精度控制点(图2，图中黄色标签表示控制点)，平面精度优于2 mm，高程精度优于1 cm，也是本次实验的航摄区域。

图1所示为中国(嵩山)卫星遥感定标场覆盖区域、飞行实验区域和控制点分布图，两次实验飞行高度均为2000 m。其中红色框表示5月23日飞行获取的4条十字交叉航线，影像覆盖区域内分布108个控制点，其中50个控制点位于多条航线重叠范围内(简称数据A)，白色框表示5月25日飞行获取的两条往返航线数据，分布85个控制点，13个控制点位于多条航线重叠范围内(简称数据B)。控制点像点坐标采用人工量测，精度约0.3个像元。数据A 4条航线采用SIFT特征匹配算法，利用GPU加速计算和RANSAC匹配粗差点剔除策略，实施多航线间交互式分块影像匹配，共提取63088个特征连接点，根据前/下/后三视影像上同名像点

应交于地面同一点的理论依据，对63088个特征连接点再次进行粗差点剔除和筛选处理，最后保留14157个点进行区域网平差和标定处理。数据B两条航线经SIFT特征匹配后共提取21389个特征连接点，进行粗差点剔除和筛选处理，最后保留8802个点进行区域网平差和标定处理。

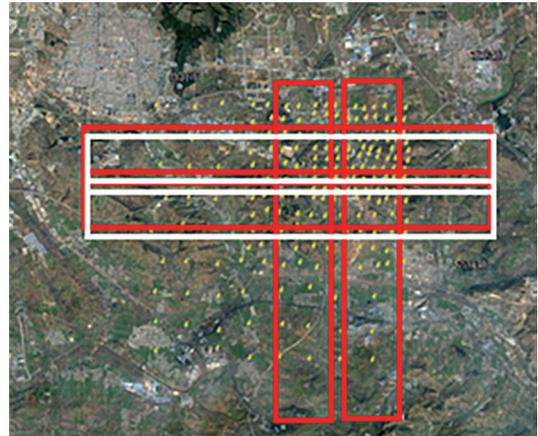


图1 中国(嵩山)卫星遥感定标场及飞行数据和控制点分布
Fig. 1 Songshan RS calibration testfield and GCP distribution



图2 控制点埋石
Fig. 2 Stationary solid GCP

2017年10月17日又在黑龙江鹤岗进行了标定校飞。如图3所示，黑色实线包围区域是鹤岗区划范围，红色#型半透明区域是2600 m航高的4条交叉航线覆盖区域，绿色实线标注的#型区域是1700 m高度的4条交叉规划航线覆盖区域。该地区主要地貌为平原城市区域，采用GPS野外量测的方式采集了200个控制点，控制点布设方案是在2600 m航高4条航线覆盖的大区域内等间隔均匀布设，实际选点受城区建筑等地物条件限制，控制点间距会有不同程度调整，但总体上保持了均匀性。本文选用2600 m高度的飞行数据(简称数据C)进行区域网平差和标定研究。也采用SIFT特征匹配

算法，保留 9211 个点进行区域网平差和标定处理。

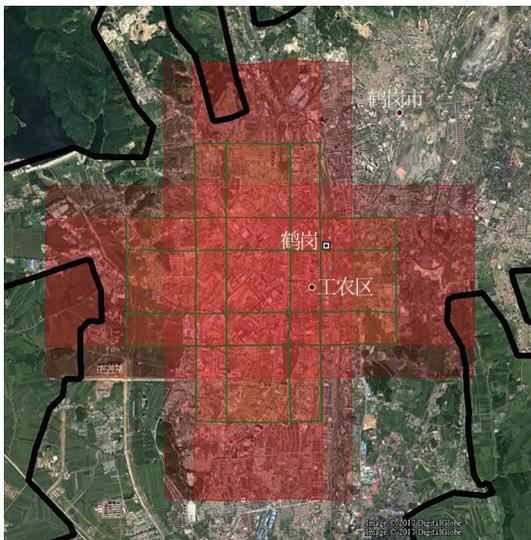


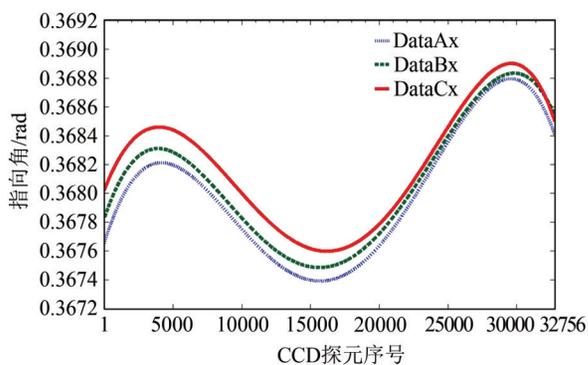
图3 鹤岗标定校飞实验区域
Fig. 3 Hegang testfield and flight design plan

5 实验结果与分析

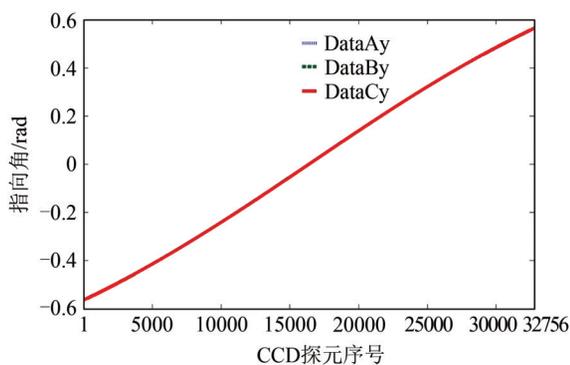
实验包括 4 部分内容：(1) 采用机载线阵 CCD 相机分段自检校标定模型和循环两步法标定方案，对 3 组飞行数据进行定标处理，获得 3 组前、下及后视 CCD 上每一探元的指向角标定值，并由此生成相加检校 CAM 文件；(2) 利用实验室初始检定参数对 3 组数据进行无控直接定位及精度评价；(3) 利用 CAM 文件再次实施无控直接定位，验证 CAM 文件的有效性；(4) 基于 CAM 文件，辅以少量控制点进行区域网平差，进一步检核 CAM 文件的精度和可靠性。

5.1 像点坐标文件 CAM 标定实验

利用 3 组实验数据得到的 3 组前、下、后视 CCD 探元的指向角标定值见图 4—图 6。



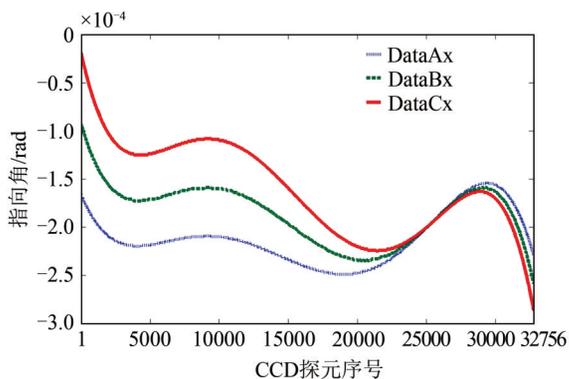
(a) 飞行方向的 CCD 探元指向角
(a) Tilt angles for each CCD element at the flight direction



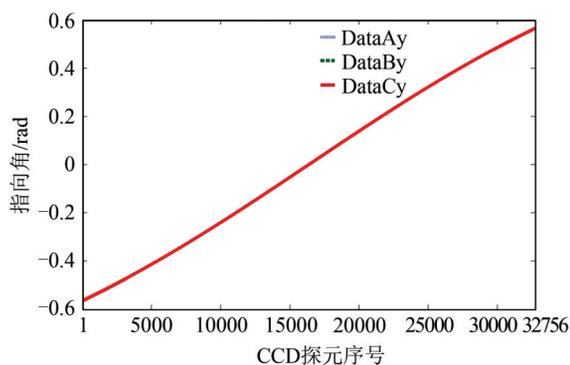
(b) CCD 方向的 CCD 探元指向角
(b) Tilt angles for each CCD element at the CCD direction

图 4 3 组实验数据标定得到的前视 CCD 上的每一探元指向角

Fig. 4 Tilt angle calibration values for each detector of forward CCD using three dataSets



(a) 飞行方向的 CCD 探元指向角
(a) Tilt angles for each CCD element at the flight direction



(b) CCD 方向的 CCD 探元指向角
(b) Tilt angles for each CCD element at the CCD direction

图 5 3 组实验数据标定得到的下视 CCD 上的每一探元指向角

Fig. 5 Tilt angle calibration values for each detector of nadir CCD using three datasets

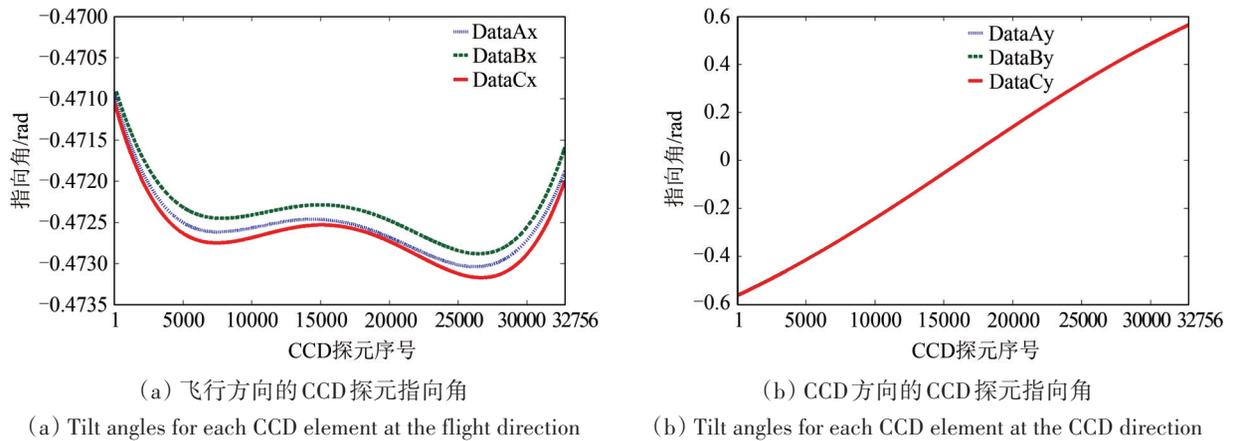


图6 3组实验数据标定得到的后视 CCD 上的每一探元指向角
Fig. 6 Tilt angle calibration values for each detector of backward CCD using three dataSets

从图4—图6中可以看出，得到的3组标定值中，在 CCD 方向上，前、下和后视的指向角差别极小，趋势高度一致；在飞行方向上，前视和后视 CCD 标定值曲线基本保持一致，差别很小，而

下视 CCD 的指向角标定值曲线在 CCD 左侧差别较为明显。以实验数据 B 为参考，统计其相对于实验数据 A 和 C 的标定值差异。统计结果见表 2，其中统计了沿飞行方向和 CCD 方向的 32756 个 CCD 探元的指向角差异大小，并将其转换到像元尺寸，以像元个数为衡量单位。

表 2 指向角标定值的统计分析

Table 2 Statistical analysis of tilt angle calibration values

标定对象	比较对象	飞行方向的 CCD 探元位置差异/像元				CCD 方向的 CCD 探元位置差异/像元			
		最大值	最小值	均值	均方根误差	最大值	最小值	均值	均方根误差
前视 CCD	实验数据 A	4.446	0.702	2.067	0.771	1.898	0	1.266	0.604
	实验数据 C	5.096	0	2.852	1.283	1.066	0	3.998	1.283
下视 CCD	实验数据 A	1.924	0	0.756	0.538	4.654	0.003	2.343	1.468
	实验数据 C	1.898	0	0.758	0.542	4.628	0.003	2.343	1.466
后视 CCD	实验数据 A	7.514	2.99	4.608	0.598	4.498	0	1.988	0.999
	实验数据 C	10.660	5.122	7.357	0.942	11.93	0	5.275	3.862

数据 B 和 A 相对比：沿飞行方向的 CCD 探元位置差异，前、下、后视 CCD 均值分别为 2.067、0.756 和 4.608 个像元，均方根误差分别为 0.771、0.538 和 0.598，均小于 1 个像元；CCD 方向的探元位置差异，前、下、后视 CCD 均值分别为 1.266、2.343 和 1.988 个像元，均方根误差分别为 0.604、1.468 和 0.999，小于或接近 1 个像元。表明 A、B 两组数据标定的 CCD 指向角值差异很小，非常稳定。数据 B 和 C 相对比：沿飞行方向的 CCD 探元位置差异，前、下、后视 CCD 均值分别为 2.852、0.758 和 7.357 个像元，CCD 均方根误差分别为 1.283、0.542 和 0.942，小于或接近 1 个像元；CCD 方向的探元位置差异，前、下、后视 CCD 均值分

别为 3.998、2.343 和 5.275 个像元，均方根误差分别为 1.283、1.466 和 3.862 个像元。可以看出，数据 B 和 C 的差异要明显大于数据 A 和 B 的差异，后视 CCD 尤为明显。分析原因有 4 方面：(1) 数据 A、B 获取时间、地点基本一致，而数据 C 与数据 A、B 获取时间间隔长达 5 个月，且数据获取区域不同，成像环境和条件完全不同。(2) 数据 C 的航高是 2600 m，降低了地面分辨率；(3) 数据 C 用于标定的 200 个控制点是飞行后进行刺点和野外量测的，因在城市区域，控制点点位选择受到很大限制，部分点位于房屋、花坛、水池角点等高程突变的地方，控制点采集精度低于数据 A 和 B；(4) 数据 C 的后视影像成像质量有下降，控制点刺

点精度受到影响。以上4个因素中，因素3、4的影响最为突出。

将数据A、B、C3组指向角标定值取均值，对前、下、后视CCD上每一探元，根据指向角计算其像坐标 $(\tan(\Psi_x), \tan(\Psi_y))$ ，得到标定后的CAM文件，并通过直接定位和平差实验，验证CAM文件的有效性、精度和可靠性。

5.2 基于实验室初始参数的直接定位

利用实验室标定的GFXJ相机交会角和CCD探元尺寸计算指向角初值，同时利用GNSS/IMU测量值，对实验数据A、B和C进行直接定位实验，实验结果统计如表3所示。从均值和中误差指标中可以看出GFXJ相机的定位精度较差，3组数据平面精度相当，约3—4 m，高程精度数据A、B精度约为6 m，而数据C精度仅为9 m。

表3 直接定位实验

Table 3 Direct positioning results

实验内容	X方位定位精度/m				Y方位定位精度/m				Z方位定位精度/m			
	最大值	最小值	均值	均方根误差	最大值	最小值	均值	均方根误差	最大值	最小值	均值	均方根误差
实验数据A	6.340	-4.739	1.402	3.897	5.073	-4.980	1.438	3.654	-2.803	-8.932	-6.930	6.487
实验数据B	4.625	-3.186	0.880	3.256	4.634	-4.020	0.369	3.344	-3.777	-7.806	-6.386	6.218
实验数据C	8.312	-6.113	2.611	4.855	7.724	-8.943	1.880	3.719	12.671	6.571	8.928	9.037

5.3 基于CAM文件的再次直接定位

采用CAM文件和GNSS/IMU测量值再次进行直接定位实验，得到实验结果如表4所示。

从表4中可以看出，采用CAM像点坐标文件进行直接定位，X和Y方向的平面定位精度略有提高，而高程精度3组数据的均方根误差分别为0.823 m、0.779 m和0.908 m，提高非常显著。这

说明镜头畸变、CCD旋转、缩放等几何变形因素主要影响GFXJ相机的高程定位精度，对平面定位精度也略有影响。同时证实采用本文提出的基于CCD指向角的分段自检校标定模型和循环两步法标定方案可以有效标定GFXJ相机的镜头和CCD等畸变误差。

表4 基于CAM像点坐标文件的直接定位实验

Table 4 Direct positioning results based on CAM pixel coordinates files

实验内容	X方位定位精度/m				Y方位定位精度/m				Z方位定位精度/m			
	最大值	最小值	均值	均方根误差	最大值	最小值	均值	均方根误差	最大值	最小值	均值	均方根误差
实验数据A	4.813	-4.414	0.722	3.543	4.363	-4.686	0.354	3.571	1.768	-0.798	0.560	0.823
实验数据B	4.181	-2.797	0.458	3.161	1.821	-2.197	-0.140	1.751	1.589	-1.599	0.454	0.779
实验数据C	6.501	-6.156	1.600	4.404	6.969	-6.231	1.138	3.552	3.259	-3.099	-0.200	0.908

5.4 基于CAM文件的光束法区域网平差

CAM像点坐标标定文件对GFXJ相机的内部固有误差进行了有效标定，但是GNSS/IMU测量值中还存在影响定位精度的系统误差和偶然误差，需要利用控制点进行区域网平差，对GNSS/IMU测量值中的观测误差进行消除，以提高定位精度。

首先以数据B（有两条航线）为研究对象，利用CAM文件，采用不同的控制点布设方案进行实验：

(1) 每条航线中央布设1个控制点，参与平差的控制点总数1+1；

(2) 每条航线两端布设1个控制点，参与平

差的控制点总数2+2；

(3) 每条航线首、中、末端各布设1个控制点，参与平差的控制点总数3+3；

(4) 每条航线两端布设2个控制点，参与平差的控制点总数4+4，每端的2个控制点尽量接近图像的顶边和底边；

(5) 每条航线两端布设2个控制点，中央布设1个控制点，参与平差的控制点总数5+5，每端的2个控制点尽量接近图像的顶边和底边，因为两条航线存在重叠区域，实际参与区域网平差的是9个控制点；

(6) 每条航线首、中、末端各布设2个控制点, 参与平差的控制点总数6+6, 每端的2个控制点尽量接近图像的顶边和底边, 实际参与区域网平差的是10个控制点;

(7) 每条航线两端布设3个控制点, 参与平差的控制点总数6+6, 每端的3个控制点尽量接近图像的顶边、底边和中央位置分布, 实际参与区域网平差的是10个控制点;

(8) 每条航线首、中、末端各布设3个控制点, 参与平差的控制点总数9+9, 每端的3个控制点尽量接近图像的顶边、底边和中央位置分布, 实际参与区域网平差的是15个控制点。

不同控制点布设方案的区域网平差实验结果见表5。实验数据B共有85个控制点, 除了参与平差的控制点, 剩余点作为检查点, 表5统计的是全部检查点的精度。

表5 实验数据B的基于CAM文件的区域网平差结果

Table 5 Block adjustment results for dataset B based on CAM files

方案	X方位定位精度/m				Y方位定位精度/m				Z方位定位精度/m			
	最大值	最小值	均值	均方根误差	最大值	最小值	均值	均方根误差	最大值	最小值	均值	均方根误差
①	0.077	-0.715	-0.043	0.107	0.887	-0.403	0.109	0.295	5.904	-11.415	-1.938	5.471
②	0.138	-0.668	0.016	0.099	0.294	-0.461	-0.067	0.156	2.167	-4.949	-0.648	2.031
③	0.129	-0.678	0.001	0.099	0.337	-0.304	-0.027	0.108	1.006	-3.024	-0.350	1.265
④	0.151	-0.659	0.008	0.093	0.382	-0.149	0.008	0.081	0.791	-0.701	0.030	0.227
⑤	0.161	-0.667	0.010	0.093	0.377	-0.158	0.004	0.080	0.812	-0.754	0.030	0.224
⑥	0.150	-0.674	0.005	0.092	0.378	-0.152	0.004	0.081	0.791	-0.698	0.022	0.229
⑦	0.155	-0.660	0.016	0.093	0.363	-0.160	-0.015	0.080	0.748	-0.740	0.005	0.231
⑧	0.143	-0.673	0.007	0.095	0.363	-0.162	-0.017	0.081	0.777	-0.674	0.032	0.223

从表5可以看出, 在CAM标定文件的基础上, 采用1个控制点就能显著提高平面定位精度, 但高程精度恶化, 结果不稳定; 随着控制点数目的增多高程精度不断提高, 平面定位精度进一步稳定; 方案④—⑧种, 平面和高程定位精度都有显著提高, 且结果趋于稳定。这说明采用“四角+中心”的控制点布设方案, 可以很好地保证区域网平差的精度, 采用更为密集的控制点布设方案区域网平差精度提高不显著。

对数据A、B和C采用控制点布设方案④进行区域网平差, 得到结果如表6所示。

表6的实验结果证实, 标定后的CAM像点坐

标文件有效消除了相机的固有内部变形误差。此时采用少量合理分布的控制点(如方案④), 进行光束法区域网平差, 就可有效消除GNSS/IMU测量值中的观测误差, 显著提高几何定位精度。数据A和B的覆盖区域为丘陵地、山地相间类型, 其中丘陵地约占60%—70%, 其余为山地。实验数据C的覆盖区域主要为平原。参考(表7)国家测绘局颁布的《数字航空摄影测量空中三角测量规范》(State Bureau of Surveying and Mapping, 2009), 采用CAM像点坐标标定文件, 辅以少量控制点进行区域网平差, 实验数据A、B、C均可满足1:1000地形图测图的空中三角测量精度要求。

表6 基于CAM像点坐标文件的区域网平差实验

Table 6 Block adjustment results for three datasets based on CAM pixel coordinates files

实验内容	X方位定位精度/m				Y方位定位精度/m				Z方位定位精度/m			
	最大值	最小值	均值	均方根误差	最大值	最小值	均值	均方根误差	最大值	最小值	均值	均方根误差
实验数据A	0.288	-0.689	0.018	0.116	0.207	-0.397	-0.019	0.091	0.524	-0.490	-0.022	0.192
实验数据B	0.150	-0.659	0.0078	0.093	0.381	-0.149	0.008	0.081	0.790	-0.701	0.030	0.227
实验数据C	0.589	-0.724	-0.015	0.252	0.597	-0.542	0.001	0.239	0.859	-0.792	0.147	0.269

表 7 数字航空摄影测量空中三角测量规范
Table 7 Specifications for aerotriangulation of digital
aerophotogrammetry

成图比 例尺	平面位置中误差				高程中误差				/m
	平地	丘陵地	山地	高山地	平地	丘陵地	山地	高山地	
1:1000	0.5	0.5	0.7	0.7	0.28 (0.15)	0.4	0.6	1.2	
1:2000	1.0	1.0	1.4	1.4	0.28 (0.15)	0.4	1.0	1.5	

6 结 论

本文针对自主研发的机载三线阵 CCD 相机 (GFXJ 相机) 几何标定技术进行了探索和研究。针对 GFXJ 的成像特点建立了标定模型, 设计了标定方案, 并通过实验验证标定模型和方案对于国产 GFXJ 相机是适用有效的, 通过标定获得的 CAM 像点坐标文件可以有效消除 GFXJ 相机的镜头、CCD 畸变等内部固有变形误差, 显著提高 GFXJ 相机的几何定位精度。CAM 文件可作为合格可靠的标定产品提供给后续用户使用, 同时本文提出的标定方法和研究成果对于其他国产航测相机的几何标定研究具有一定的参考价值。当然, CAM 标定文件的适用性、可靠性以及优化还需要在 GFXJ 相机的后续实际应用中作进一步试验验证。特别是考虑到此次实验中, 数据 C 和数据 A、B 的获取时间相隔 5 个月, 且城市区域控制点布设受限, 影像质量也不高, 客观上增大了标定指向角的差异, 实验结果也表明了这一点。如果标定数据源的质量和精度能得到进一步提高, 有望得到更加稳定可靠的 CAM 文件。下一步希望能够在更多不同地形类型的检校区域进行飞行实验, 开展更充分的标定研究工作。

参考文献 (References)

Gruen A and Zhang L. 2002. Sensor modeling for aerial mobile with Three-Line-Scanner (TLS) imagery//Integrated System for Spatial Data Production, Custodian and Decision Support. [s.l.]: [s.n.]

Hinsken L, Miller S, Tempelmann U, Uebbing R and Walker S. 2002. Triangulation of LH Systems' ADS40 imagery using ORIMA GPS/IMU//Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Graz: [s.n.]: 156-162

Leica. 2012. Leica ADS80 Documentation, Version 3.38-19. Document code 763 805,768490.([s.l.]: Leica)

Liu J. 2007. A Study on the Positioning Theory of Airborne Line CCD Imagery Supported by GPS/IMU. Zhengzhou: PLA Information Engineering University Doctor Thesis (刘军. 2007. GPS/IMU 辅助机载线阵 CCD 影像定位技术研究. 郑州: 信息工程大学)

Meng W C, Zhu S L, Cao W, Cao B C and Gao X. 2015. High accuracy on-orbit geometric calibration of linear push-broom cameras. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 40(10): 1392-1399, 1413 (孟伟灿, 朱述龙, 曹闻, 曹彬才, 高翔. 2015. 线阵推扫式相机高精度在轨几何标定. 武汉大学学报(信息科学版), 40(10): 1392-1399, 1413) [DOI: 10.13203/j.whugis20140534]

Poli D. 2002. General model for airborne and spaceborne linear array sensors. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34(B1): 177-182

Sandau R, Braunecker B, Driescher H, Eckardt A, Hilbert S, Hutton J, Kirchhofer W, Lithopoulos E, Reulke R and Wicki S. 2000. Design principles of the LH systems ADS40 airborne digital sensor// International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Amsterdam, Netherlands: [s.n.], 258-265

State Bureau of Surveying and Mapping. 2009. GB/T 23236-2009 Specifications for aerotriangulation of digital aerophotogrammetry. Beijing: Standards Press of China: 2(国家测绘局. 2009. GB/T 23236-2009 数字航空摄影测量空中三角测量规范. 北京: 中国标准出版社: 2)

Tang X M, Zhou P, Zhang G, Wang X, Jiang Y H, Guo L and Liu S H. 2015. Verification of ZY-3 satellite imagery geometric accuracy without ground control points. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12(10): 2100-2104 [DOI: 10.1109/LGRS.2015.2450251]

Tu X R, Xu M Z and Liu L. 2011. The geometric calibration of airborne three-line-scanner ADS40. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 40(1): 78-83 (涂辛茹, 许妙忠, 刘丽. 2011. 机载三线阵传感器 ADS40 的几何检校. 测绘学报, 40(1): 78-83)

Wang D H. 2011. A Study on the Mathematic Model and Algorithm of the Geometric Calibration of Airborne Digital Sensor. Zhengzhou: Information Engineering University (王冬红. 2011. 机载数字传感器几何标定的模型与算法研究. 郑州: 解放军信息工程大学)

Wang M, Yang B, Li D R, Gong J Y and Pi Y D. 2017. Technologies and applications of block adjustment without control for ZY-3 images covering China. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 42(4): 427-433 (王密, 杨博, 李德仁, 龚健雅, 皮英冬. 2017. 资源三号全国无控制整体区域网平差关键技术及应用. 武汉大学学报(信息科学版), 42(4): 427-433) [DOI: 10.13203/j.whugis20160534]

Wang R X, Hu X and Wang J R. 2013. Photogrammetry of mapping satellite-1 without ground control points. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 42(1): 1-5 (王任享, 胡莘, 王建荣. 2013. 天绘一号无地面控制点摄影测量. 测绘学报, 42(1): 1-5)

Wang R X, Hu X, Wang X Y and Yang J F. 2012. The construction and

- application of mapping satellite-1 engineering. *Journal of Remote Sensing*, 16(S1): 2-5 (王任享, 胡莘, 王新义, 杨俊峰. 2012. “天绘一号”卫星工程建设与应用. *遥感学报*, 16(S1): 2-5)
- Wang T. 2012. Study on Theories and Methods of Linear CCD Sensor Geometric Calibration Based on Field. Zhengzhou: Information Engineering University (王涛. 2012. 线阵 CCD 传感器实验场几何定标的理论与方法研究. 郑州: 解放军信息工程大学)
- Wang T, Zhang Y, Pan S L and Lin L X. 2012a. Airborne three-line-scanner CCD imagery self-calibration block adjustment. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 37(9): 1073-1077 (王涛, 张艳, 潘申林, 林丽霞. 2012a. 机载三线阵 CCD 影像自检校光束法区域网平差. *武汉大学学报(信息科学版)*, 37(9): 1073-1077) [DOI: 10.13203/j.whugis2012.09.009]
- Wang T, Zhang Y S, Zhang Y and Fan D Z. 2012b. Airborne linear CCD sensor geometric calibration based on self-calibration. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 41(3): 393-400 (王涛, 张永生, 张艳, 范大昭. 2012b. 基于自检校的机载线阵 CCD 传感器几何标定. *测绘学报*, 41(3): 393-400)
- Xu M Z, Yin S and Li Z T. 2010. Technology discussion for the construction of airborne geometric calibration test site. Aisa GIS 2010 International Conference. Taiwan, China (许妙忠, 尹粟, 李振涛. 2010. 航空几何定标场建设技术研究. 2010 年两岸四地 GIS 研讨会)
- Yang B and Wang M. 2013. On-orbit geometric calibration method of ZY-1 02C panchromatic camera. *Journal of Remote Sensing*, 17(5): 1175-1190 (杨博, 王密. 2013. 资源一号 02C 卫星全色相机在轨几何定标方法. *遥感学报*, 17(5): 1175-1190)
- Yang Y L, Han L and Hu H Y. 2014. Correlation analysis and improvement of brown self-calibration model. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (5): 37-40 (杨韞澜, 韩玲, 胡海彦. 2014. Brown 自检校模型相关性分析与改进. *测绘通报*, (5): 37-40) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2014.0153]
- Yuan X X. 2008. A new method compensating POS positioning and attitude measurement systematic error. *Progress in Natural Science*, 18(8): 925-934 (袁修孝. 2008. 一种补偿 POS 定位测姿系统误差的新方法. *自然科学进展*, 18(8): 925-934)
- Yuan X X, Yang F, Zhao Q and Ming Y. 2006. Bore-sight misalignment calibration of integrated DGPS/IMU system. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 31(12): 1039-1043 (袁修孝, 杨芬, 赵青, 明洋. 2006. 机载 POS 系统视准轴误差检校. *武汉大学学报(信息科学版)*, 31(12): 1039-1043) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-8860.2006.12.002]
- Zhang Y, Wang T, Feng W F, Yuan Z P and Wang S X. 2015. Self-calibration block adjustment for mapping satellite-1 three linear CCD image. *Journal of Remote Sensing*, 19(2): 219-227 (张艳, 王涛, 冯伍法, 元朝鹏, 王淑香. 2015. “天绘一号”卫星三线阵 CCD 影像自检校区域网平差. *遥感学报*, 19(2): 219-227) [DOI: 10.11834/jrs.20153334]
- Zhang Y S. 2012. Design and implementation of songshan test field for high resolution remote sensing and mapping. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 29(2): 79-82 (张永生. 高分辨率遥感测绘嵩山实验场的设计与实现——兼论航空航天遥感定位精度与可靠性的基地化验证方法. *测绘科学技术学报*, 29(2): 79-82) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6338.2012.02.001]

Geometric calibration of domestic airborne wide-field three-linear CCD camera

WANG Tao¹, ZHANG Yan², ZHANG Yongsheng¹, MO Delin¹, YU Ying¹

1. Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China;
2. Data and Object Engineering Institute, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China

Abstract: The development and application of three-line array CCD (Charge-coupled Device) sensor is an important direction in remote sensing, surveying, and mapping. The objective of this study is to investigate the geometric calibration technology of the first Chinese self-developed airborne three-line array CCD camera (hereinafter referred to as GFXJ).

In this study, a series of innovative research works is conducted on the geometric calibration technology of the domestic GFXJ camera. First, a comparative analysis is made on the imaging characteristics and geometric deformation factors of the GFXJ camera. Upon this camera, a piece-wise self-calibration model based on CCD tilt angle is established. The piece-wise self-calibration model absorbs the influence of various geometric distortion factors by using a segmented mathematical model to avoid over-parameterization and strong inter-correlation. At the CCD segment boundary, the model satisfies the equivalent and the smoothing constraints.

Then, an iterative two-step calibration scheme is proposed to achieve stable and reliable calibration values. The aerial triangulation of exterior orientation elements and the calibration of additional self-calibrating parameters are performed independently and iteratively. The iterative two-step calibration process is implemented until the exterior orientation elements and additional calibration parameters reach stability and the changes between the two iterations are less than the threshold.

Multiple sets of flight experimental data were obtained from the China Songshan remote sensing comprehensive field and Hegang area

of Heilongjiang Province. The proposed iterative two-step calibration scheme was applied to set accurately the tilt angle calibration of each CCD detector in the forward, nadir, and backward CCD arrays. Reliable CCD image pixel coordinate files were generated for forward, nadir, and backward arrays independently.

Experiment results showed that after calibration, uncontrolled image positioning precision can be greatly improved. Supported by several control points for bundle block adjustment, the image positioning accuracy of GFXJ camera can meet the 1:1000 scale topographic mapping requirements on aerial triangulation.

From experimental results, we draw the following conclusions. First, the proposed piece-wise self-calibration model based on CCD viewing angle and the iterative two-step calibration scheme are suitable and efficient for the GFXJ camera. The geometric distortion factors, such as lens distortion, CCD rotation, and scaling, affect the accuracy of the height and positioning of the GFXJ camera and planar positioning, respectively. The piece-wise self-calibration calibration model based on tilt angles and the iterative two-step calibration scheme proposed in this study can effectively calibrate the inherent lens and CCD distortion errors of the GFXJ camera. Second, the GCPs layout scheme of “four corners” can ensure the aerial triangulation accuracy of GFXJ, but denser GCPs layout scheme had little contribution to accuracy improvement. Third, the calibrated CCD image pixel coordinate files can serve as a qualified and reliable calibration product for subsequent users. At the same time, the calibration method and research results proposed in this study can serve as reference for the geometric calibration research of other airborne three-linear array CCD cameras.

Key words: remote sensing, airborne three-line array CCD camera, piece-wise self-calibration model, geometric calibration, China Songshan remote sensing comprehensive field, iterative two-step calibration scheme

Supported by National Major Projects of High Resolution Earth Observation System (No. R/GFHK-2/D01); Thirteenth Five-year Pre-research Program (No. 305090406, 30503040203, 30503040501)