

文章编号 1004-924X(2019)04-0984-06

基于 LMCCD 影像的相机参数在轨标定

王建荣^{1,2*}, 王任享^{1,2}, 胡 莘^{1,2}

- (1. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054;
2. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054)

摘要: 相机参数在轨标定是无地面控制点条件下提高定位精度的关键环节, 利用立体影像进行空中三角测量光束法平差, 是实现相机参数在轨标定的有效途径, 但要保证所建立的航线模型无因姿态变化率而造成的系统变形。本文针对“天绘一号”卫星有效载荷的特点, 采用基于 LMCCD 影像的 EFP 光束法平差, 按反解空中三角测量原理进行三线阵相机的重组, 实现对相机参数在轨标定。利用 LMCCD 影像进行相机参数在轨标定后, 天绘一号卫星无地面控制点条件下定位精度上下视差减小至 0.6 pixel。定位精度从 9 m 提高至 7.4 m, 其中高程精度从 4.7 m 提高至 2.7 m, 试验结果表明, 所提方法实现了国内相机在轨标定参数。

关键词: 卫星摄影测量; 在轨标定; LMCCD 相机; 光束法平差

中图分类号: 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20192704.0984

On-orbit calibration of camera parameters based on line-matrix charge-coupled device imagery

WANG Jian-rong^{1,2*}, WANG Ren-xiang^{1,2}, HU Xin^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China;
 2. Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China)
- * Corresponding author, E-mail: jianrongwang@sina.com

Abstract: On-orbit calibration of camera parameters is a key step in the process of enhancing positioning accuracy without the need of ground control points. Triangulation-based bundle adjustment is an efficient method for calibrating the geometric parameters of a camera by incorporating stereo imagery. However, it is necessary that the established strip model should not cause system deformation owing to the rate of attitude variation. In this study, characteristics of the payloads present in the TH-1 satellite were considered, and EFP bundle adjustment based on Line-Matrix Charge-Coupled Device (LMCCD) imagery was applied. Three linear array cameras were restructured by adopting inverse solutions of the aerial triangulation principle, and on-orbit calibration of camera parameters for the TH-1 satellite was thereby realized. The upper and lower parallax of the positioning accuracy is reduced to 0.6 pixels, and the positioning accuracy is increased from 9 m to 7.4 m. The elevation accuracy is increased from 4.7 m to 2.7 m. Obtained results indicate that without incorporating ground control points, the positioning accuracy of the TH-1 satellite imaging system can be significantly enhanced through on-orbit calibration of camera parameters by employing LMCCD imagery.

收稿日期: 2018-07-14; 修订日期: 2018-09-29.

基金项目: 国家 973 计划资助项目 (No. 613317)

Key words: satellite photogrammetry; on-orbit calibration; Line-Matrix Charge-Coupled Device (LMCCD) camera; bundle adjustment

1 引言

在卫星摄影测量中,航天测绘相机是获取原始影像信息的关键设备,其相机参数(相机内方位元素和星地相机主光轴间夹角)的标定精度直接影响摄影测量成果的定位精度。由于在发射和在轨运行过程中,受振动、温度等因素影响,与实验室标定结果相比,航天相机参数都会发生一定变化^[1-2]。在有地面控制点的卫星摄影测量中,相机参数变化影响的摄影测量误差大部分可以被应用地面控制点处理时消除,但无地面控制点条件下的卫星摄影测量,相机参数变化必须采用在轨几何标定方法加以改正。如IKONOS卫星经多次在轨标定后,无控定位精度达到平面12 m,高程10 m^[3];SPOT5卫星在轨标定后其无控定位精度单片平面达到50 m,立体像对高程达到15 m^[4];P5卫星影像经过相机标定后,无控定位精度从250 m提高到100 m^[5]。ALOS卫星经在轨标定后,无控定位精度达到平面8 m,高程10 m^[6];我国资源三号卫星经过在轨几何标定后,使无控定位精度从1 500 m提高至15 m,其中高程精度为10.2 m^[7]。这些卫星大都根据传感器自身的结构特点及卫星运行状况,采用内标定和外标定相结合、基于附加参数的自检校等相关理论和模型,对卫星平台和传感器的主要系统误差进行消除,提高卫星影像的定位精度和应用效能。

上述标定模型和方法主要针对单个传感器,将单个传感器的系统误差予以消除。但对于立体测绘相机(如双线阵或三线阵)而言,立体相机之间的交会角是影响高程精度的重要因素。相机参数在轨标定若仅从单个相机出发,忽视立体相机的整体性,将会影响后期的定位精度,尤其是高程方向。

利用立体影像进行空中三角测量光束法平差,是实现相机参数在轨标定的有效途径。德国MOMS工程采用光束法平差方法实现对相机参数进行标定,其要求影像长度大于4条基线(约1 000 km)^[8],试验场覆盖包括奥地利等国的范围,但无地面控制点摄影测量最终未取得预期目标。利用光束法平差方法进行相机参数标定的前

提是所建立的航线模型无明显的系统变形,利用定向片和等效框幅相片(Equivalent Frame Photo, EFP)光束法平差时,航线模型的变形无法消除^[9-12]。因此,王任享提出LMCCD(Line-Matrix Charge-Coupled Device)相机的设计思想^[13],将4个小面阵影像坐标作为连接条件,参与光束法平差,解决航线模型的系统变形。该思路的提出,不但解决了无地面控制点条件下的高精度定位,也为相机参数标定提供了可靠的途径^[14]。

本文针对天绘一号卫星有效载荷特点,以三线阵立体影像为基础,以小面阵影像为框架,采用等效框幅式影像构网的思想,建立了LMCCD影像EFP光束法平差技术,按反解空中三角测量原理进行三线阵相机的重组,实现对摄影测量参数的高精度在轨标定。同时,在标定过程中提出:基于两条短基线的航线利用LMCCD影像进行光束法平差计算相机参数,再利用影像三线交会方式,计算地面控制点的坐标系统常差,然后将该系统常差代入迭代计算中,重新修正相机标定参数,直至地面控制点坐标无系统常差。

2 相机内方位元素重组及定义

卫星在轨飞行中,由于受温度变化等因素影响,相机的内方位元素值较实验室标定值都有一定变化。为了能够利用EFP光束法平差的数学模型,需要对变化了的三线阵相机内方位元素进行重新定义。通常相机内方位元素为 (f, x_0, y_0) ,其中 f 为相机焦距, (x_0, y_0) 为主点坐标,但对于三线阵相机而言,其内方位元素可转化为 $(f, \alpha, y_{\text{ccd}})$,其中 α 为前视相机(或后视相机)与正视相机的夹角, y_{ccd} 为主点影像纵坐标^[2]。因此,标定参数包括3个相机内方位元素以及星地相机3个角元素转换参数的附加改正值(本文简称星地相机夹角改正数),共12个参数。由于规定正视相机 $\alpha_0=0$,标定参数实际包含11个独立待解参数。

3 LMCCD相机

LMCCD相机是由三线阵相机和4个小面阵

相机构成,三线阵相机由前视、正视及后视相机组成,前视与正视、后视与正视光轴间夹角为 25° ,基高比为 1,可以实现较高的高程精度。在正视相机焦平面上,CCD 线阵两侧对称配置 2 个面阵相机,如图 1 所示。其中 dx 为面阵相机中心至正视线阵之间的距离, dy 为面阵相机中心至正视线阵上端之间的距离。在 LMCCD 相机摄影期间,三线阵 CCD 相机逐行进行推扫摄影,但 4 个小面阵相机不需一直开机工作,每隔一定时间进行摄影(天绘一号卫星中时间间隔 3.2 s)。其获取的影像如图 2 所示。

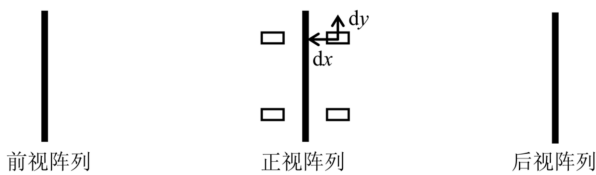


图 1 LMCCD 相机的关系图

Fig. 1 Relationship of LMCCD camera

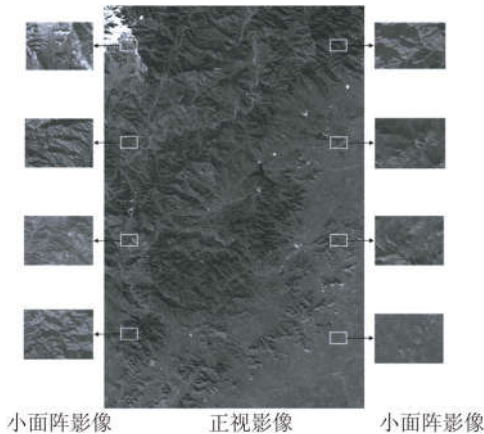


图 2 天绘一号 LMCCD 影像

Fig. 2 LMCCD image of TH-1

$$\mathbf{X}_j = (\Delta X_{s_i}, \Delta Y_{s_i}, \Delta Z_{s_i}, \Delta \varphi_i, \Delta \omega_i, \Delta \kappa_i, \Delta fl, \Delta fv, \Delta fr, \Delta xl, \Delta xv, \Delta xr, \Delta yl, \Delta yv, \Delta yr, \Delta \varphi_c, \Delta \omega_c, \Delta \kappa_c)^T, \quad (2)$$

其中: $\Delta X_{s_i}, \Delta Y_{s_i}, \Delta Z_{s_i}, \Delta \varphi_i, \Delta \omega_i, \Delta \kappa_i$ 为外方位元素改正值; $\Delta fl, \Delta fv, \Delta fr, \Delta xl, \Delta xv, \Delta xr, \Delta yl, \Delta yv, \Delta yr$ 为前、正及后视相机内方位元素改正值; $\Delta \varphi_c, \Delta \omega_c, \Delta \kappa_c$ 为星地相机夹角改正值。

4.2 正视相机内方位元素虚拟改正数方程

根据三线阵 CCD 相机的定义,公式(1)中待解参数为 12 个,但在相机参数重组中,以正视相机为基准,即 $\alpha_v = 0, x_v = 0$ 。因此,应增加 α_v 的虚拟改正数方程,并赋以较大的权值。其改正数方程为:

$$v_{\alpha_v} = \delta_{\alpha_v}, \quad (3)$$

其中 v_{α_v} 为 α_v 的余差。

无论是定向片法光束法平差,还是 EFP 光束法平差,其构建的航线模型中存在因姿态变化率造成的系统误差,其根本的原因是相邻定向时刻(或 EFP 时刻)间缺乏固定的联接。基于小面阵影像的 EFP 光束法平差,在相邻 EFP 时刻影像间的连接点像坐标,可以由该摄影时刻的真框幅坐标代替(由小面阵影像量测),使得相邻 EFP 时刻有固定联接,解决了平差航线的系统变形。

4 相机参数标定的数学模型

天绘一号相机参数标定是基于 LMCCD 影像的 EFP 光束法平差理论,其数学模型采用后方交会与前方交会交替迭代的方式^[1,15],本文重点对将相机参数作为未知参数的后方交会模型进行分析。

4.1 后方交会数学模型

在两条短基线范围内,根据 EFP 时刻建立一系列等效框幅相片,将相机参数作为未知参数求解的后方交会模型,其第 i 片、第 j 个像点的改正数方程为:

$$\begin{bmatrix} v_{x_{ij}} \\ v_{y_{ij}} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{ij} X_i - \begin{bmatrix} l_{x_{ij}} \\ l_{y_{ij}} \end{bmatrix}, \quad i=0, \dots, n-1; j=0, \dots, m-1, \quad (1)$$

其中: $v_{x_{ij}}, v_{y_{ij}}$ 为像点坐标余差; \mathbf{A}_{ij} 为系数矩阵; n 为航线中 EFP 的像片数; m 为参加光束法平差的像点数; $l_{x_{ij}} = x_{ij} - \hat{x}_{ij}, l_{y_{ij}} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}; \hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}$ 为外方位元素初始观测值或迭代逼近值代入共线方程计算值。

X_j 为外方位元素及内方位元素等参数的改正数:

5 在轨标定试验分析

将相机参数作为未知数参与 LMCCD 影像空中三角测量,小面阵影像可以控制由于卫星姿态变化率造成的航线模型系统变形,整条航线绝对定向只需 7 个未知数,所以在轨标定的光束法平差共有 18 个未知参数(11 个相机几何参数和 7 个绝对定向参数)。原理上有 6 个适当分布的地面控制点便得可行解,但从标定结果可靠性考虑,利用少量控制点进行解算,很难获得高精度的标

定结果。因此,天绘一号卫星相机参数标定采用 60 个地面控制点参与解算。

5.1 在轨标定试验场

根据天绘一号卫星飞行轨道及气象等条件,选定我国东北某地区作为在轨标定试验场,试验场长度 600 km,宽度 100 km。天绘一号卫星采用数字化的方式建立地面试验场;即利用试验场的航空影像,进行外业控制测量,利用控制点数据对试验场全部影像进行空中三角测量平差,保证试验场内精度的一致性。在进行相机参数标定过程中,卫星影像上对应的地面点坐标,通过与试验场航空影像进行匹配后,利用空中三角测量加密后获得。天绘一号卫星地面试验场,通过利用

GPS 外业获取点位的坐标,与内业空中三角测量获得的坐标比较,其精度满足 1 : 10 000 比例尺地形图规范要求。

5.2 在轨标定前后定位精度分析

天绘一号卫星发射后,对东北试验场进行了多次摄影,成功获取数条满足相机参数在轨标定要求的航线。利用 LMCCD 影像 EFP 光束法平差方法对相机参数进行标定计算。分别采用实验室标定参数^[16](在轨标定前)进行直接前方交会,和利用在轨标定参数进行 EFP 多功能光束法平差^[17],进行无地面控制点条件下定位精度的计算统计,定位精度统计如表 1 所示。

表 1 在轨标定前后无地面控制点定位精度误差统计

Tab. 1 Statistics of position errors without ground control points before and after the on-orbit calibration

检测场名	在轨标定前			在轨标定后				检查点数量				
	直接前交			直接前交					光束法平差			
	μ_z/m	μ_P/m	μ_{XYZ}/m	μ_z/m	μ_P/m	μ_{XYZ}/m	p_y/pixel		μ_z/m	μ_P/m	μ_{XYZ}/m	p_y/pixel
2015.10.30(国外地区)	32.2	190.5	193.2	2.4	7.5	7.9	2.2	1.9	6.7	7.0	0.5	7
2015.11.08(国外地区)	33.7	188.4	191.4	4.6	10.0	11.0	1.7	2.5	6.5	7.0	0.7	24
2015.11.12(国外地区)	36.9	189.2	192.8	4.1	6.6	7.8	1.9	2.4	5.7	6.2	0.6	8
2015.12.18(国外地区)	34.3	182.9	186.1	8.1	7.2	10.8	2.3	4.3	7.8	8.9	0.5	30
2016.02.14(国内地区)	36.2	192.7	196.1	4.4	7.0	8.3	3.6	2.6	7.5	7.9	0.6	5
5 个区所有检查点统计	34.7	188.7	191.9	4.7	7.7	9.0	2.3	2.7	6.9	7.4	0.6	

注:表 1 中 μ_z 为大地高误差; μ_P 为平面坐标均方根误差^[18]; μ_{XYZ} 为三轴坐标综合均方根误差, p_y 为上下视差。直接前交指前视和后视影像直接前方交会,光束法平差指 EFP 多功能光束法平差。

从表 1 可以看出:

利用实验室标定参数进行直接前方交会时,其定位精度约在 192 m 左右,且在平面和高程方向存在明显的系统误差,主要由星地相机夹角变化值和内方位元素变化所引起;利用在轨标定参数后,进行直接前方交会,定位精度在 9 m 左右,主要受外方位元素的高频误差和像点量测误差影响。同时,存在 2.3 pixel 的上下视差,影响后期立体测图;经过 EFP 多功能光束法平差后,定位精度从 9 m 提高至 7.4 m,其中高程精度从 4.7 m 提高至 2.7 m,上下视差减小至 0.6 pixel。通过 EFP 多功能光束法平差,可以使外方位元素误差对平差结果(特别是高程误差)缩小 0.5~0.6 因子;2015

年 12 月 18 日摄影数据平差后,高程精度为 4.3 m,主要由摄影时姿态稳定度变化较大引起。从误差统计区间分析,对于高程精度 3 m 中误差而言,其最大误差应为 4.9 m,4.3 m 在最大误差范围内,即使该条定位精度不佳,仍应参与最终的误差统计。

6 结 论

“天绘一号”卫星主要用于无地面控制点条件下 1 : 50 000 比例尺地形图的测制,相机参数在轨标定是实现其工程目标的关键环节。基于 LMCCD 影像光束法平差方法,可以在摄影测量

坐标系内,以严格的框幅数学关系完成 3 个线阵 CCD 相机联合成等效框幅相机的在轨标定,将相机参数变化了的相机重组为符合摄影测量性能的相机,实现了国内相机在轨标定参数,其标定结果适用于全球,无需在国外建立标定场。由于单次

标定结果受在轨飞行时间、纬度、测姿系统低频误差及偏流角余差改正等因素影响,需定期开展在轨标定工作。必须指出的是,为实现全球定位精度的一致性,卫星影像后期数据处理中应有效解决测姿系统的低频误差问题^[19]。

参考文献:

- [1] 王任享. 三线阵 CCD 影像卫星摄影测量原理[M]. 北京:测绘出版社,2016.
WANG R X. *Satellite Photogrammetric Principle for Three-line array CCD Imagery*[M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 2016. (in Chinese)
- [2] 王建荣,杨俊峰,胡莘,等. 空间后方交会在航天相机检定中的应用[J]. 测绘学院学报,2002,19(2): 119-121.
WANG J R, YANG J F, HU SH, *et al.*. The application of three-dimensional intersection for calibration the spatial camera [J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2002, 19(2): 119-121. (in Chinese)
- [3] JACKE GRODECKI and JAMES LUTES. Ikonos geometric calibrations [C]. *Presented at ASPRS 2005, Baltimore, Maryland*, 2005.
- [4] BRETON, E. Pre-flight and in-flight geometric calibration of SPOT5 HRG and HRS images [C]. *ISPRS Comm. I, Denver, CO*, 2002.
- [5] RADHADEVI P. V. In-flight geometric calibration of fore and aft cameras of CARTOSAT-1 [C]. *Proceedings of the Euro-Calibration Orient. Workshop Inst. Geomatics, Castelldefeis, Spain*, 2008.
- [6] GRUEN A, KOCAMAN S, WOLFF K. Calibration and validation of early ALOS/PRISM images [J]. *The Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 46(1): 24-38.
- [7] 李德仁,王密. “资源三号”卫星在轨几何定标及精度评估[J]. 航天返回与遥感,2012,33(3): 1-5.
LI D R, WANG M. On-orbit geometric calibration and accuracy assessment of ZY-3 [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(3): 1-5. (in Chinese)
- [8] W. KORNUS M. LEHNER F. BLECHINGER E. PATZ, Geometric in-flight calibration of the stereoscopic CCD-Linescanner MOMS-2P [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 55(1): 59-71.
- [9] HOFMANN, O. The Stereo-Push-Broom scanner system DPS and its accuracy [J]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1986:21-28.
- [10] 王任享. 卫星三线阵 CCD 影像光束法平差研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2003,28(4): 379-385.
WANG R X. Bundle adjustment of satellite borne Three-line array CCD image [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(4): 379-385. (in Chinese)
- [11] EBNER H, KORNUS W, OHLHOF T. A simulation study on point determination using MOMS-02/D2 imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1991, 57:1315-1320.
- [12] 张永军,郑茂腾,等. “天绘一号”卫星三线阵影像条带式区域网平差[J]. 遥感学报,2012, Vol. 16: 84-89.
ZHANG Y J, ZHENG M T, WANG X Y, *et al.*. Strip-based bundle adjustment of mapping satellite-1 Three-line Array imagery [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 16: 84-89. (in Chinese)
- [13] 王任享,胡莘,杨俊峰,等. 卫星摄影测量 LMCCD 摄影机的建议[J]. 测绘学报,2004,33(2): 116-120.
WANG R X, HU SH, YANG J F, *et al.*. Proposal LMCCD camera for satellite photogrammetry [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(2): 116-120. (in Chinese)
- [14] 王任享,王建荣,胡莘. LMCCD 相机影像摄影测量首次实践[J]. 测绘学报,2014,43(3): 221-225.
WANG R X, WANG J R, HU X. Photogrammetry practice of LMCCD camera for the first time [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(3): 221-225. (in Chinese)
- [15] 王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京:测绘出版社,1990.
WANG ZH ZH. *Principle of Photogrammetry* [M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 1990. (in Chinese)
- [16] 刘全国,李杰,郝志航. 三线阵 CCD 相机亚像元

- 精度几何标定方法研究 [J]. 光电工程, 2004, 31(1): 36-39.
- LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on a geometric calibration method for Three-linear-array CCD camera with sub-pixel accuracy [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(1): 36-39. (in Chinese)
- [17] 王建荣, 王任享. 天绘一号卫星无地面控制点 EFP 多功能光束法平差 [J]. 遥感学报, 2013, 16: 112-115.
- WANG J R, WANG R X. EFP multi-functional bundle adjustment of mapping satellite-1 without ground control points [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 16: 112-115. (in Chinese)
- [18] 杨元喜. 卫星导航的不确定性、不确定度与精度若干注记 [J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 646-650.
- YANG Y X. Some notes on uncertainty, uncertainty measure and accuracy in satellite navigation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 646-650. (in Chinese)
- [19] 王任享, 王建荣, 胡莘. 卫星摄影姿态测定系统低频误差补偿 [J]. 测绘学报, 2016, 45(2): 127-130.
- WANG R X, WANG J R, HU SH. Low-frequency errors compensation of attitude determination system in satellite photogrammetry [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(2): 127-130. (in Chinese)

作者简介:



王建荣(1975—),男,甘肃嘉峪关人,副研究员,博士,2014年于长安大学获得博士学位,主要从事卫星摄影测量理论和工程实践的研究。E-mail: jianrongwang@sina.com