

DOI:10.13203/j.whugis20170318



文章编号:1671-8860(2017)11-1580-09

高分辨率光学遥感卫星在轨几何定标现状与展望

王 密^{1,2} 田 原¹ 程宇峰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 地球空间信息协同创新中心,湖北 武汉,430079

摘 要:光学遥感卫星影像在轨几何定标是确保影像几何质量的必要环节。首先介绍了光学卫星在轨几何定标方法的研究现状;然后,对于当前主流的基于地面几何检校场的在轨几何定标方法,结合光学卫星地面分辨率不断提高的发展趋势,阐述了其受限于对参考影像的依赖而存在的问题;最后,论述了无需地面定标场的在轨自主几何定标的发展趋势,并提出了多种基于多角度交叉约束成像的在轨自主几何定标方法构想。

关键词:光学遥感卫星;在轨几何定标;几何检校场;自主几何定标

中图法分类号:P236

文献标志码:A

近二十年来,高分辨率遥感卫星得到了全面发展与广泛应用^[1],基于天基空间信息网络的构建,逐步向智能化的对地观测脑发展^[2]。在智能对地观测网络提供空间信息服务的各环节中,高精度的地理定位精度是其发挥应用效能和价值的基础,而光学遥感卫星成像系统几何参数的精确标定是其中必不可少的关键环节。

由于卫星发射和运行过程中空间热学及力学环境等因素的影响,光学遥感卫星成像系统的实验室检校参数存在较大的误差而无法适用。在轨几何定标,是指利用光学卫星在轨获取的影像数据,通过摄影测量方法对成像系统在轨运行时的内外方位元素状态进行精确标定的技术,为影像几何处理提供精确的几何成像参数,即成为了决定光学卫星影像定位精度至关重要的因素。纵观国际上先进的光学卫星,例如美国的地球眼(GeoEye)、法国的普莱亚(Pleiades)等,在轨运行后均立即开展了系统的在轨几何定标工作,并且在整个运行生命期内也会定期进行在轨几何定标以对星上载荷的状态进行跟踪分析,旨在消除卫星平台外部系统误差(如相机安装角在卫星发射过程中受空间力学环境影响相对于实验室检校值的形变、空间复杂热环境下引起的长周期性变形误差)及相机内部系统误差(主点、主距检校误差

及物镜光学畸变、电荷耦合元件 CCD(charge-coupled device, CCD)畸变),从而保证影像产品的几何质量^[3-9]。

1 光学遥感卫星在轨几何定标研究现状

当前,针对光学遥感卫星在轨几何定标,国内外研究者所采用的方法大多需要基于地面定标场的高精度参考数据,利用光学卫星在轨获取的定标场影像,通过影像匹配获取的密集控制点信息作为约束条件,基于单像空间后方交会方法精确确定各项定标参数。

为实现高精度几何标定,国外知名的高分辨率卫星如地球观测系统(systeme probatoire d'observation de la terre, SPOT)、伊科诺斯(IKONOS)、GeoEye、WorldView、对地观测卫星(advanced land observing satellite, ALOS)等都布设了各自的野外试验场进行定期或不定期的在轨几何标定。例如,法国 SPOT 卫星在全球建设了 21 个几何检校场,积累了四十余年在轨检校经验^[10];美国高分辨率商业遥感卫星系统 IKONOS,建设分布于凤凰城、圣地亚哥、西德克萨斯和澳大利亚等地的地面检校场用于测绘精度检

收稿日期:2017-10-10

项目资助:国家自然科学基金(91438203,91638301);国家重点研发计划(2016YFB0501402)。

第一作者:王密,博士,教授,主要从事高分辨率卫星遥感影像高精度智能地面和在轨处理与实时服务的理论、方法及系统研究。wangmi@whu.edu.cn

通讯作者:田原,博士生。ytian_0228@foxmail.com

校^[11],如图 1 所示;美国 GeoEye-1 卫星利用分布于全球的 24 个检校场进行了精度检校与评估^[12],如图 2 所示。



图 1 IKONOS 卫星地面检校场^[11]

Fig. 1 Test Site for IKONOS

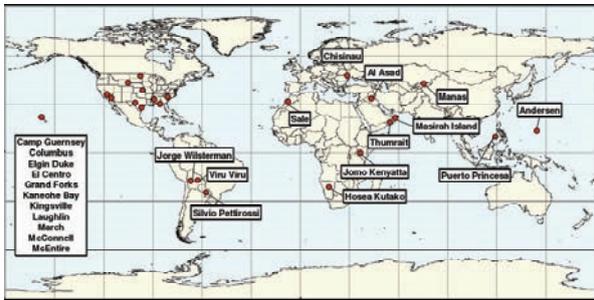


图 2 GeoEye-1 卫星地面检校场^[12]

Fig. 2 Test Site for GeoEye-1

利用法国 MANOSQUE 定标场 50 cm 分辨率的高精度参考数据,文献[13]分别对 SPOT5 HRG 相机和 HRS 相机进行了在轨几何定标,在沿轨和垂轨方向分别利用一个 5 次多项式定标补偿后,相机内部畸变误差可控制在 0.1 个像素内。利用丹佛定标场高精度控制数据,文献[14~15]对 IKONOS 卫星相机焦平面中每个像元的指向角以及相机与星敏之间的夹角均进行了在轨定标,利用定标后每个像元在相机坐标系下的指向角、相机与星敏感器之间的夹角以及星敏感器测定的姿态角可实现每个像元光线在空间中的精确定向,使单景影像直接定位的平面和高程精度分别达到了 4.4 m 和 2.7 m。文献[16~17]利用地面定标场 4 000 余个密集控制点,通过线性回归方法对 ALOS Prism 前、下、后三视相机中的各片 CCD 均进行了严格内定标,定标后相邻 CCD 片间拼接达到子像素级精度,稀少控制条件下三视立体像对的平面和高程精度均达到了 2 m 左右^[18~20]。文献[21]利用位于美国德克萨斯州覆盖范围约 50 km×50 km 的 Lubbock 地面定标场参考数据与 OrbView3 影像通过影像匹配自动获得约 3 800 余个高精度控制点,对星上相机内方位元素进行了标定,使影像内部畸变从初始 30 个像素提高到标定后优于 0.4 个像素。在 Pleiades 卫星发射初期未获取定标场影像数据的情况下,文

献[22]利用一定数量的高精度地面控制点,对 Pleiades 卫星进行了初步的几何定标试验,结果表明,随着控制点数量的不断增多,影像内部畸变不断改善,但受限于控制点数量仅采用简化定标模型,定标精度有限。文献[23]也利用地面定标场参考数据对 GeoEye-1 卫星传感器进行了在轨几何定标,定标后影像内部几何畸变得得到显著改善。此外,对于 IRS-P6、KOMPSAT-2 等卫星,文献[24]利用地面定标场对其进行了精确的在轨几何定标。

近年来,随着资源三号等国产高分辨率光学卫星的发射,中国也建设了嵩山定标场、安阳定标场等一系列光学卫星几何定标场^[25]。中国嵩山卫星遥感定标场地处中国中部河南省,覆盖面积约 100 km×80 km,由固定地面靶标场和均匀分布在河南省的数百个高精度控制点组成,并提供全区 1:2 000 比例尺、0.2 m 分辨率的数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM)和 1 m 分辨率的数字高程模型(digital elevation model, DEM)参考数据,如图(3)所示。

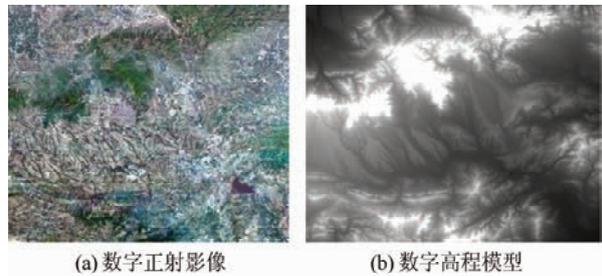


图 3 嵩山定标场参考数据

Fig. 3 Reference Data of Songshan Calibration Site

安阳定标场也位于中国河南省境内,覆盖面积 90 km×30 km,提供了全区 1:1 000 比例尺、0.1 m 分辨率的 DOM 和 0.5 m 分辨率的 DEM 参考数据,如图(4)所示。

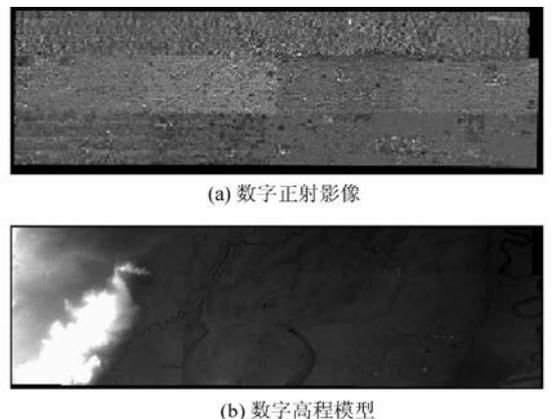


图 4 安阳定标场参考数据

Fig. 4 Reference Data of Anyang Calibration Site

基于国内定标场建设的大力实施,中国学者也对光学卫星几何定标进行了广泛深入的研究与实践。文献[26~27]利用面积为 600 km×100 km 的东北数字地面定标场,采用等效框幅像片光束法空中三角测量方法,对天绘一号卫星前视、正视和后视相机的主距、主点位置、相机交会角和星地相机夹角等参数进行整体定标,定标后其影像无地面控制平面和高程定位精度分别达到了 10.3 m 和 5.7 m。文献[28]结合天绘一号卫星相机设计特点合理简化相机畸变模型,利用嵩山定标场参考数据,基于探元指向角多项式模型对天绘一号卫星相机进行了在轨几何定标,定标精度优于 0.2 个像素,相机内部 8 片 CCD 之间的相对几何精度得到显著提升^[29]。对于中国首颗民用三线阵立体测绘卫星——资源三号卫星,文献[30~38]分别利用定标场参考数据对其进行了在轨几何定标,定标结果表明资源三号卫星三线阵相机仅存在主距变化、CCD 排列旋转等引起的线性误差,为其无畸变相机设计提供有力证据,定标后生成的影像传感器校正产品,其内部畸变均控制在子像素内,多光谱影像各波段间几何配准精度也优于 0.25 个像素^[39-40]。针对相机偏视场设计、误差参数高度相关的问题,文献[41~42]提出了一种基于探元指向角模型的内外分步定标方法,并利用嵩山几何定标场的高精度参考数据对资源一号 02C 和资源三号卫星分别进行了严格的在轨几何定标实验,取得了良好的效果。

总结当前研究成果,已形成完整的光学遥感

$$\begin{bmatrix} \tan(\psi_x(s)) \\ \tan(\psi_y(s)) \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{cam}} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{body}} \mathbf{R}_{\text{wgs}}^{\text{J2000}} \begin{bmatrix} X_g - X_{\text{gps}} \\ Y_g - Y_{\text{gps}} \\ Z_g - Z_{\text{gps}} \end{bmatrix}_{\text{wgs}} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}_{\text{body}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, (X_g, Y_g, Z_g) 为像点的物方坐标; $(X_{\text{gps}}, Y_{\text{gps}}, Z_{\text{gps}})$ 为 GPS 天线相位中心在 WGS84 下的坐标位置; $[B_x \ B_y \ B_z]^T$ 为 GPS 天线相位中心的偏心矢量; $\mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{cam}}$ 、 $\mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{body}}$ 和 $\mathbf{R}_{\text{wgs}}^{\text{J2000}}$ 分别为相机坐标系到卫星本体坐标系的转换矩阵、卫星本体坐标系到 J2000 坐标系的转换矩阵和 J2000 坐标系与 WGS84 坐标系的转换矩阵; λ 为比例因子。

基于严密的定标模型及地面几何检校场参考数据,通过将定标场区域的卫星成像影像与参考 DOM 进行密集匹配,获取沿轨方向分布较窄、垂轨方向均匀分布的大量控制点信息解算定标参数,以实现相机内部 CCD 各探元处几何畸变的最优拟合,控制点密集匹配布设方案如图 6 所示,

卫星基于地面检校场的在轨几何定标的模型、方法、流程。对于几何定标模型,现通常采用探元指向角模型描述相机内部结构,如图 5 所示,以消除相机严格物理模型的过度参数化及参数强相关问题,并采用一组多项式对相机线阵 CCD 上各探元在相机坐标系下的指向角进行拟合,描述其物理畸变,作为光学卫星相机的内定标模型,如式(1)所示。

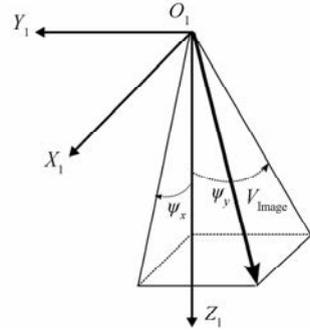


图 5 CCD 探元指向角
Fig. 5 Directional Angle Model

$$V_{\text{Image}} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ f \end{bmatrix}^T = [\tan(\psi_x) \ \tan(\psi_y) \ 1]^T$$

$$\psi_x(s) = ax_0 + ax_1 \times s + \dots + ax_n \times s^n$$

$$\psi_y(s) = ay_0 + ay_1 \times s + \dots + ay_n \times s^n \quad (1)$$

式中, x, y 为相机坐标系下焦平面上的坐标; f 为主距; s 为探元号; ax_n, ay_n 分别为标定模型参数。

同时,采用一个旋转矩阵补偿卫星外方位元素误差,构成光学遥感卫星在轨几何定标基本模型,如式(2)所示。

形成基于自然地物点密集匹配的在轨几何定标技术路线。

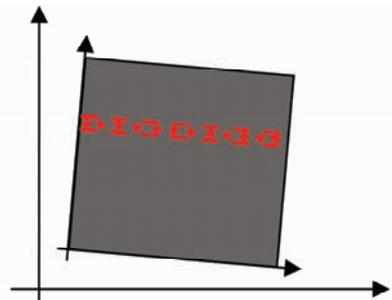


图 6 控制点密集匹配布设方案
Fig. 6 Distribution of GCPs

卫星在轨运行周期内,除了发射入轨成像状

态稳定后尽快进行几何定标,还需利用地面检校场建立周期性的影像几何质量评价与成像系统参数检校机制,修正成像系统参数在空间环境下的长周期漂移误差,确保卫星运行全生命周期内影像产品的几何精度。

2 传统基于几何定标场的在轨几何定标技术所面临的问题

针对光学卫星影像,基于地面定标场的几何定标方法经过多年研究已发展成熟。对于外方位元素的标定,通常只需利用少量控制点即可,而对于内方位元素的标定则需要利用密集匹配获取的大量控制点信息作为约束条件。然而,这种方法存在以下不足。

1)精度受限。基于几何定标场的定标方法,定标场参考数据自身的几何分辨率及精度通常应高于定标精度一个数量级。为了保证正射纠正、影像拼接以及配准融合等处理精度满足子像素要求,内定标精度通常要求优于 0.3 个像素。以 2015 年 6 月中国发射的敏捷光学卫星高分 9 号为例,其全色影像分辨率为 0.5 m,内定标精度则要求优于 0.15 m,这给地面定标场参考数据的精度及分辨率都提出了极高的要求,并且这个要求随着影像几何分辨率的不断提高也日益提高。此外,地物、季节的变化以及成像方式的差异使得光学卫星影像与定标场参考数据之间影像匹配的难度较大,匹配结果的质量不高,进一步限制了定标结果的精度。

2)成本过高。由于光学卫星影像幅宽通常达到数十千米,定标场建设成本往往高达数百万甚至上千万元。此外,由于地物发生较大变化,还需定期花费大量人力、物力对定标场参考数据进行更新与维护^[43]。

3)时效性差。由于地面定标场数量及分布有限,加上天气、卫星回归周期等客观条件的限制,卫星在轨运行后往往需要经过较长时间才能获得有效的定标场影像数据,导致定标参数获取不及时,更新周期较长,时效性较差,无法满足应急需求。

由此可见,随着光学卫星影像几何分辨率以及定标处理时效性需求的不断提高,现有基于地面定标场的几何定标方法会凸显精度不足、成本过高以及时效性较差的弊端,已无法满足当前光学卫星影像高精度处理与实时应用的需求。因此,如何在无需定标场的条件下,高精度、低成本、

快速获取光学卫星影像内定标参数成为当前面临的一项重要研究问题。

3 在轨几何定标向自主几何定标方向发展

近年来,无需定标场的自主几何定标方法研究已逐渐受到国内外学者的重视。

针对多光谱相机,文献[44]提出了一种基于物方定位一致性的卫星多光谱影像相对定标及自动配准方法,该方法在无需定标场条件下,仅利用各谱段影像之间的同名像点信息,基于同名光线空间相交几何约束关系,对各谱段成像器件之间的相对几何畸变进行了标定与补偿。利用该方法可在光学卫星在轨运行初期尚未获取定标场影像数据的情况下,实现多光谱影像高精度几何配准,以满足应急任务需求,然而该方法仅能对各谱段成像器件之间的相对几何畸变进行标定,无法对绝对几何畸变进行精确标定。

在远景摄影测量以及计算机视觉领域中,无需检校场的传感器自检校的相关理论及方法已研究较长时间,文献[45~46]从理论上证明了利用多角度影像直接检测畸变误差的可行性,文献[47~49]提出采用平面结构的多视影像进行自检校的方法,但由于卫星遥感影像的线阵推扫成像方式与计算机视觉中的面阵成像方式不同,且卫星成像条件受限,该自检校方法难以适用于光学卫星影像。

对于光学卫星影像可采用自检校区域网平差方法,将影像内畸变标定模型参数作为附加参数引入到区域网平差中,求解平差参数的同时实现附加定标参数的求解^[50-51]。文献[52~53]采用定向片模型对 SPOT-5 及天绘一号卫星影像进行了自检校区域网平差,文献[54]对资源三号三线阵影像进行了自检校平差^[54],文献[55]对嫦娥 2 号月球立体影像进行了自检校平差,文献[56]引入不同畸变模型对中巴资源 02B 卫星的长条带影像进行了自检校区域网平差对比实验,均有效提升了平差精度及影像的几何精度。但是,自检校区域网平差方法需要大量具有较大重叠度的影像作为基础,有效数据收集周期较长,并且在连接点匹配、平差解算过程中耗费比较大的计算量,内定标参数作为附加参数的求解结果也会受到一定影响。

当前,光学遥感卫星不断向多角度成像、小型敏捷等方向发展,具有较强的机动成像能力,可通

过侧摆、俯仰、偏航角灵活调整对地成像,实现同轨立体、垂轨主动摆扫、同轨多条带拼接等成像模式。利用敏捷卫星同轨快速获取的多角度成像,可构建相机视场中不同像元在影像上同名点的连接约束关系,为实现无定标场条件下相机内方位元素的精确标定提供了新的模式。法国 Pleiades 卫星利用在同一轨道对同一地区通过沿轨推扫和垂轨摆扫两次成像获取的偏航角相差接近 90° 的“交叉影像”,检测影像内部畸变误差及姿态高频振动,但对于模型及解算细节并未详述^[22,57];在此基础上,文献[58]采用多项式模型对相机内部畸变进行描述,并引入数字表面模型(digital surface model, DSM)作为高程约束解决像对小角度交会下的强相关性参数解算问题,理论上实现“交叉影像”自校核结果优于 0.1 个像素,但并未考虑姿轨等观测误差对于定标解算的影响。可见,基于敏捷卫星成像的在轨自主几何定标方法无需大量数据积累、时效性高、适用于未来高分辨率敏捷光学卫星,但目前其方法较为单一,理论及模型仍需进一步研究完善。

4 在轨自主几何定标技术展望

与现有基于定标场的几何定标方法相比,利用光学遥感卫星的机动成像能力在轨获取多景“交叉影像”,基于同名光线空间相交的几何关系实现成像参数的精确标定,不仅具有低成本、定标时效性高等优势,并且其定标结果的精度取决于同名像点的匹配精度,而与定标场参考数据无关。在机动多角度成像条件下,定标影像数据一般是在短时间周期内获取的同源影像,其同名像点的匹配精度一般情况下可达到 0.2 个像素以内,不会因影像几何分辨率的提高而降低,这一点对于亚米级甚至 0.1 m 等未来更高分辨率的光学卫星影像具有尤为重要的意义。

由此可见,光学遥感卫星在轨几何定标技术将向少量控制点、自主几何内定标的方向发展,重点在于基于多角度交叉成像的在轨自主几何内定标技术。其本质与区域网平差类似,在少量或者无控制点的情况下通过影像连接点的不符值来求取参数,关键在于构建不同成像条件及不同探元交叉成像连接关系下的定标方法。对此,本文提出多种交叉自主几何内定标方法构想。

1) 同轨大角度交叉成像自主定标。不同于传统被动推扫成像模式,基于敏捷成像卫星平台在垂轨方向主动摆扫成像的能力,获取与推扫条带

影像成大角度“交叉”的影像条带,则在同一轨道内通过姿态机动,先后获取对同一区域成像的沿轨推扫和与轨道呈一定角度的摆扫影像,可构成相机视场内全部探元的交叉连接条件,如图 7 所示。

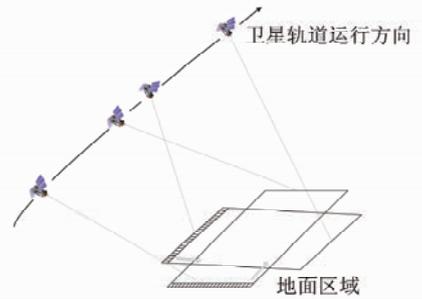


图 7 交叉成像自主几何定标

Fig. 7 Self-Calibration Based on Cross-Imaging

2) 同轨平行推扫成像自主定标。通过同轨不同侧摆角度推扫成像时多视影像间的垂轨向重叠度,构成探元交叉连接关系的基础,获取满足垂轨向重叠度在 $55\% \sim 60\%$ 的两景影像,实现相机视场内不同像元的交叉约束关系,如图 8 所示。

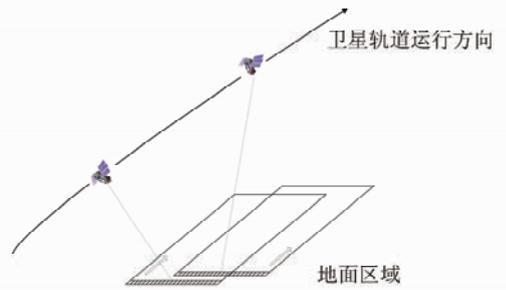


图 8 同轨平行推扫成像自主几何定标

Fig. 8 Self-Calibration Based on Parallel Push Broom Imaging of the Same Track with Large Overlay

3) 异轨平行推扫成像自主定标。通过相邻轨道对同一区域成像时异轨影像间的垂轨向重叠度,构成探元交叉连接关系,与同轨平行交叉成像自主定标类似,如图 9 所示。

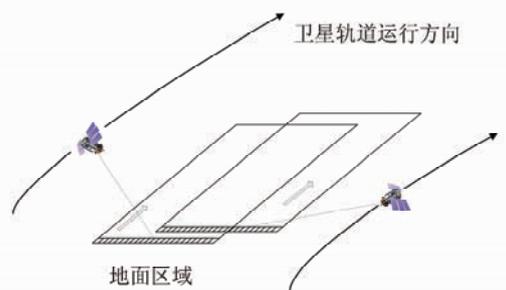


图 9 异轨平行推扫成像自主定标

Fig. 9 Self-Calibration Based on Parallel Push Broom Imaging with Different Tracks with Large Overlay

除了利用对地多角度成像实现光学卫星相机内方位元素的自主几何定标外,未来随着卫星平台机动成像能力的进一步提升,使光学遥感卫星的对地观测相机具有“对天成像”能力,通过星点提取、星图匹配等技术在相机对天成像影像上获取恒星星点作为控制信息实现成像系统几何参数的标定^[59-60],可作为在无需地面检校场条件下实现卫星在轨几何定标的另一种方式。该方法以恒星星点代替地面控制信息,不仅可以标定相机内部畸变,也可以进行外方位元素补偿参数的解算,实现光学遥感卫星在轨几何定标的完全自主化。

5 结 语

本文介绍了光学卫星在轨几何定标方法的研究现状,并针对当前在轨几何定标技术的瓶颈问题,阐述了其未来发展趋势。作为确保光学遥感卫星数据质量的关键环节,基于地面几何定标场的在轨几何定标技术已发展成熟;然而随着光学卫星地面分辨率、几何精度指标、定标时效性需求的不断提高,传统基于定标场的方法受参考影像的约束,具有不可避免的局限性。伴随光学遥感卫星平台日益灵活机动的成像能力,基于多角度成像、探元交叉约束的在轨几何自主定标方法避免了对于参考影像的依赖,成为在轨几何定标的发展趋势,为未来亚米级甚至 0.1 m 级更高分辨率光学卫星实现高精度定位奠定了基础,并对未来遥感卫星平台的成像能力设计提出了需求及参考。

参 考 文 献

- [1] Li Deren. Development Prospect of Photogrammetry and Remote Sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(12):1 211-1 215(李德仁. 摄影测量与遥感学的发展展望[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(12):1 211-1 215)
- [2] Li Deren, Wang Mi, Shen Xin. From Earth Observation Satellite to Earth Observation Brain[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2):143-149(李德仁, 王密, 沈欣. 从对地观测卫星到对地观测脑[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(2):143-149)
- [3] Dial G. IKONOS Satellite Mapping Accuracy[J]. *Ecotoxicology*, 2000(1): 371-378
- [4] Fraser C S, Hanley H B, Yamakawa T. High Precision Geopositioning from Ikonos Satellite Imagery [C]. ACSM-ASPRS, Washington D C, 2002
- [5] Fraser C, Baltsavias E P, Gruen A. Processing of IKONOS Imagery for Sub-meter 3D Positioning and Building Extraction[J]. *International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2005, 56(3):177-194
- [6] Baltsavias E, Zhang L, Eisenbeiss H. DSM Generation and Interior Orientation of IKONOS Images Using a Testfield in Switzerland[J]. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2006(1): 41-54
- [7] Bouillon A, Bernard M, Gigord P. SPOT5 HRS Geometric Performances: Using Block Adjustment as a Key Issue to Improve Quality of DEM Generation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2006, 60:134-146
- [8] Zhang Li, Zhang Jixian, Chen Xiangyang. Block-Adjustment with SPOT-5 Imagery and Sparse GCPs Based on RFM[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(4):24-32(张力, 张继贤, 陈向阳. 基于有理多项式模型 RFM 的稀少控制 SPOT-5 卫星影像区域网平差[J]. 测绘学报, 2009, 38(4):24-32)
- [9] Lei Rong. Study on Theory and Algorithm of the In-flight Geometric Calibration of Spaceborne Linear Array Sensor[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011(雷蓉. 星载线阵传感器在轨几何定标的理论与算法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2011)
- [10] Breton E, Bouillon A, Gachet R. Pre-flight and In-flight Geometric Calibration of SPOT5 HRG and HRG Images [C]. ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference, Denver, 2002
- [11] Dial G, Jacek G. IKONOS Stereo Accuracy Without Ground Control[C]. ASPRS 2003 Conference, Anchorage, Alaska, 2003
- [12] Bresnahan P. Geolocation Accuracy Re-evaluation of GeoEye-1 and QuickBird-2 [C]. JACIE Workshop, New York, 2012
- [13] Gachet R. SPOT5 In-flight Commission: Inner Orientation of HRG and HRS Instruments[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2004, 35(B1):535-539
- [14] Grodecki J, Dial G. IKONOS Geometric Accuracy Validation [C]. ISPRS Commission I, Mid-Term Symposium, New York, 2002, 34
- [15] Grodecki J. IKONOS Geometric Calibrations [C]. The ASPRS 2005 Annual Conference, Baltimore, 2005
- [16] Takeo T, Masanobu S, Hiroshi M. Calibration of

- PRISM and AVNIR-2 Onboard ALOS-Daichi[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2009, 47: 4 042-4 050
- [17] Junichi T, Takeo T. PRISM On-orbit Geometric Calibration and DSM Performance [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2009, 47: 4 060-4 073
- [18] Gruen A, Kocaman S, Wolff K. Calibration and Validation of Early ALOS/PRISM Images [J]. *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 46:24-38
- [19] Kocaman S, Gruen A. Orientation and Self-Calibration of ALOS PRISM Imagery[J]. *Photogramm. Rec.*, 2008, 23:323-340
- [20] Radhadevi P V, Mueller R. In-flight Geometric Calibration and Orientation of ALOS/PRISM Imagery with a Generic Sensor Model [J]. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 2011, 77:531-538
- [21] Mulawa D. On-orbit Geometric Calibration of the Orbview-3 High Resolution Imaging Satellite [J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2004, 35:1-6
- [22] Delussy F, Greslou D, Dechoz C. Pleiades HR in Flight Geometrical Calibration: Location and Mapping of the Focal Plane [J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, 39(B1):519-523
- [23] Mattia C, Gabriele C, Laura D. GeoEye-1: Analysis of Radiometric and Geometric Capability [J]. *Lecture Notes of the Institute for Compute Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 2010, 43(7):354-369
- [24] Radhadevi P V, Solanki S S. In-flight Geometric Calibration of Different Cameras of IRS-P6 Using a Physical Sensor Model [J]. *Photogramm. Rec.*, 2008, 23:69-89
- [25] Zhang Yongsheng. Design and Implenmentation of Songshan Test Field for High Resolution Remote Sensing and Mapping [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2012, 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[J]. *测绘科学技术学报*, 2012, 29(2):79-82)
- [26] Wang Jianrong, Wang Renxiang. EFP Multi-functional Bundle Adjustment of Mapping Satellite-1 without Ground Control Points [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(S):112-115(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*, 2012, 16(增刊): 112-115)
- [27] Li Jing, Wang Rong, Zhu Leiming. In-flight Geometric Calibration for Mapping Satellite-1 Surveying and Mapping Camera [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16:35-39(李晶, 王蓉, 朱雷鸣, 等. “天绘一号”卫星测绘相机在轨几何定标[J]. *遥感学报*, 2012, 16(增刊):35-39)
- [28] Meng Weican, Zhu Shulong. High Accuracy On-orbit Geometric Calibration of Linea Push-broom Cameras [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(10):1 392-1 399(孟伟灿, 朱述龙. 线阵推扫式相机高精度在轨几何定标[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(10):1 392-1 399)
- [29] Meng Weican, Zhu Shulong. Establishment and Optimization of Rigorous Geometric Model of Push-Broom Camera Using TDI CCD Arranged in an Alternating Pattern [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(12):1 340-1 350(孟伟灿, 朱述龙. TDI CCD 交错拼接推扫相机严格几何模型构建与优化[J]. *测绘学报*, 2015, 44(12): 1 340-1 350)
- [30] 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)
- [31] Cao Jinshan, Yuan Xiuxiao, Gong Jianya. 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):1 039-1 045(曹金山, 袁修孝, 龚健雅. 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):1 039-1 045)
- [32] Li Deren, Wang Mi. On-orbit Geometric Calibration and Accuracy Assessment of ZY-3 [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2012, 33(3):1-6(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):1-6)
- [33] Wang Tao. Study on Theories and Methods of Linear CCD Sensor Geometric Calibration Based on Field [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2012(王涛. 线阵 CCD 传感器实验场几何定标的理论与方法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2012)
- [34] Chen Yifu, Liu Lu, Zhang Chunling. Research on the On-orbit Geometric Calibration for ZY-3 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5):557-560(谌一夫, 刘璐, 张春

- 玲. ZY-3 卫星在轨几何标定方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(5): 557-560
- [35] Chen Y F, Xie Z. Calibration and Validation of ZY-3 Optical Sensors[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(8): 4 616-4 626
- [36] Zhang G, Jiang Y H. In-orbit Geometric Calibration and Validation of ZY-3 Linear Array Sensors[J]. *The Photogrammetric Record*, 2014, 29(145): 68-88
- [37] Cao J S, Yuan X X. In-orbit Geometric Calibration and Validation of ZY-3 Three-Line Cameras Based on CCD-Detector Look Angles[J]. *The Photogrammetric Record*, 2015, 30(150): 211-226
- [38] 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 and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 224-234
- [39] Jiang Y H, Zhang G. Geometric Calibration and Accuracy Assessment of Ziyuan-3 Multispectral Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4 161-4 172
- [40] Pan Hongbo, Zhang Guo, Tang Xinming. The Geometric Model of Sensor Corrected Products for ZY-3 Satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(4): 516-522(潘红播, 张过, 唐新明, 等. 资源三号测绘卫星传感器校正产品几何模型[J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 516-522)
- [41] Yang B, Wang M. On-orbit Geometric Calibration Method of ZY-1 02C Panchromatic Camera [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(5): 1 175-1 190
- [42] Wang M, Yang B. On-orbit Geometric Calibration Model and its Applications for High-Resolution Optical Satellite Imagery [J]. *Remote Sens.*, 2014, 6(5): 4 391-4 408
- [43] Delevit J M, Greslou D, Amberg V. Attitude Assessment Using Pleiades-HR Capabilities[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, 39(B1): 525-530
- [44] Wang Mi, Yang Bo, Jin Shuying. A Registration Method Based on Object-Space Positioning Consistency for Satellite Multi-spectral Image [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7): 765-769(王密, 杨博, 金淑英. 一种利用物方定位一致性的多光谱卫星影像自动精确配准方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(7): 765-769)
- [45] Faugeras O D, Luong Q T, Maybank S J. Camera Self-Calibration: Theory and Experiments [C]. *Computer Vision-ECCV*, Italy, 1992
- [46] Maybank S, Streilein A. A Theory of Self-Calibration of a Moving Camera[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1992, 8(2): 123-151
- [47] Malis E, Cipolla R. Multi-view Constraints Between Collineations: Application to Self-Calibration from Unknown Planar Structures [C]. *Computer Vision-ECCV*, Dublin, Ireland, 2000
- [48] Malis E, Cipolla R. Self-Calibration of Zooming Cameras Observing an Unknown Planar Structure [C]. *International Conference on Pattern Recognition*, Quebec, Canada, 2002
- [49] Malis E, Cipolla R. Camera Self-calibration from Unknown Planar Structures Enforcing the Multiview Constraints between Collineations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(9): 1 268-1 272
- [50] Fraser C S. Digital Camera Self-calibration[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1997, 52(4): 149-159
- [51] Habib A F, Morgan M, Lee Y R. Bundle Adjustment with Self-Calibration using Straight Lines[J]. *Photogrammetric Record*, 2002, 17(100): 635-650
- [52] Jia Bo, Jiang Ting, Zhang Rui. Self-calibration Bundle Adjustment of SPOT-5 Remote-Sensing Imagery based on Orientation Image Model [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(9): 3-10(贾博, 姜挺, 张锐. 基于定向片模型的 SPOT-5 遥感影像自检校光束法平差[J]. 测绘科学, 2014, 39(9): 3-10)
- [53] Liu Jianhui, Jiang Ting, Jiang Gangwu. Orientation Image Model on Self-calibration Bundle Adjustment for Mapping Satellite-1 Three-Line Imagery [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015, 32(4): 390-394(刘建辉, 姜挺, 江刚武. 定向片用于天绘一号卫星三线阵影像自检校光束法平差[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(4): 390-394)
- [54] Wang Tao, Zhang Yan, Zhang Yongsheng, et al. Self-calibration Block Adjustment for ZY-3 Triple Linear CCD Imagery [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2014, 31(1): 44-52(王涛, 张艳, 张永生, 等. 资源三号卫星三线阵 CCD 影像自检校光束法平差[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(1): 44-52)
- [55] Di K C, Liu Y L, Liu B. A Self-calibration Bundle Adjustment Method for Photogrammetric Processing of Chang'E-2 Stereo Lunar Imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(9): 5 432-5 442
- [56] Zheng M T, Zhang Y J, Zhu J F. Self-calibration

- Adjustment of CBERS-02B Long-Strip Imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(7): 3 847-3 854
- [57] Greslou D, Delussy F, Delvit J. PLEIADES-HR Innovative Techniques for Geometric Image Quality Commissioning[C]. The 22nd ISPRS Congress International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Melbourne, 2012
- [58] Pi Y D, Yang B, Wang M. On-Orbit Geometric Calibration Using a Cross-Image Pair for the Linear Sensor Aboard the Agile Optical Satellite[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(7):1 176-1 180
- [59] Wang M, Cheng Y F, Yang B. On-orbit Calibration Approach for Star Cameras based on the Iteration Method with Variable Weights[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(21):6 425-6 432
- [60] Yang B, Su H, Wang M. On-orbit Calibration Approach for Optical Navigation Camera in Deep Space Exploration[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5 536

Development of On-orbit Geometric Calibration for High Resolution Optical Remote Sensing Satellite

WANG Mi^{1,2} TIAN Yuan¹ CHENG Yufeng¹

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

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

Abstract: On-orbit geometric calibration of remote sensing satellites is essential to the geometric quality of its imagery. This paper reviews the current status and progress in optical satellite on-orbit geometric calibration technology, based on ground calibration site and space resection theory. The construction status of calibration sites and calibration results of SPOT, IKONOS, GeoEye, ZY-3 and other mainstream high-resolution optical satellites are summarized. problems existing in current calibration methods caused by dependence on reference images of a calibration site are analyzed considering improvements in the resolution of optical satellite imagery and timeliness requirements of on-orbit calibration, For the demand of camera calibration without the constraint of ground test site, the existing work in the field of computer vision and block adjustment are discussed. The merits and faults of each self-calibration method are compared, and a self-calibration method for optical satellites based on multiple-angle imaging is introduced, and several self-calibration modes are proposed.

Key words: optical remote sensing satellite; on-orbit geometric calibration; calibration site; self-calibration

First author: WANG Mi, PhD, professor, specializes in precise processing and real-time service of high resolution remote sensing satellite imagery. E-mail: wangmi@whu.edu.cn

Corresponding author: TIAN Yuan, PhD candidate. E-mail: ytian_0228@foxmail.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 91438203, 91638301; The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0501402