

引文格式:张祖勋,段延松,陶鹏杰.从控制点到控制片[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(11):1715-1723.DOI:10.13203/j.whugis20230373



Citation:ZHANG Zuxun,DUAN Yansong,TAO Pengjie.From Ground Control Point to Digital Control Photo[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2023,48(11):1715-1723.DOI:10.13203/j.whugis20230373

从控制点到控制片

张祖勋¹ 段延松^{1,2} 陶鹏杰^{1,2}

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

2 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

摘要:基于数字正射影像和数字高程模型等地理编码数据的“云控制”模式在中小比例尺影像的应用日趋成熟,但其本质仍是从物方获取控制点,数据产品中的误差导致其难以应用于大比例尺测图场景。基于已知精确几何定位参数和空三加密点的原始影像构建约束是理论更优的云控制模式。提出将这种由像方出发的云控制模式发展为一种标准化的测绘产品,即控制片,以期在更好地保障定位精度的前提下,降低重访航测任务中的重复劳动和算力消耗;介绍了控制片在大幅面航空相机检校、无人机影像和卫星影像几何定位方面的应用;并对推动构建控制片应用体系提出了若干建议。

关键词:云控制;控制点;控制片

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2023-10-08

DOI:10.13203/j.whugis20230373

文章编号:1671-8860(2023)11-1715-09

From Ground Control Point to Digital Control Photo

ZHANG Zuxun¹ DUAN Yansong^{1,2} TAO Pengjie^{1,2}

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

Abstract: The “cloud control” paradigm, grounded on geocoded data such as digital orthophoto map (DOM) and digital elevation model (DEM), is gradually maturing for applications in medium and small-scale mapping. However, its essence of obtaining control points from the object space inherently carries errors within the DOM and DEM products, subsequently hindering its applicability in large-scale mapping scenarios. Constructing constraints based on original images with known accurate orientation parameters and adjusted object space tie points represents a theoretically superior cloud control paradigm. This paper proposes developing this image-based cloud control paradigm into a standardized survey and mapping product, termed digital control photo (DCP), aiming to better ensure positioning accuracy while reducing redundant labor and computational power consumption in revisit aerial survey tasks. This paper also introduces the application of DCP in calibration of large-format aerial cameras, geometric positioning of unmanned aerial vehicle images and satellite images, and suggests several recommendations for promoting the establishment of a DCP application system.

Key words: cloud control; ground control point; digital control photo

获取可靠的地面控制点是保障摄影测量几何定位精度的必要步骤,也是长期制约摄影测量数据生产自动化水平、导致引入较高人工和时间成本的关键环节。因此,实现稀少控制甚至无地面控制的影像高精度定位一直是摄影测量学的

经典问题。为减少对地面控制点的依赖,笔者曾提出“云控制”摄影测量方法^[1-2],充分利用数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)、数字高程模型(digital elevation model, DEM)、数字线划地图(digital line graphic, DLG)等已有带地理编码

基金项目:国家自然科学基金(41971420, 41801390);国家重点研发计划(2018YFD1100405, 2019YFC1509604)。

第一作者:张祖勋,教授,中国工程院院士,长期从事摄影测量与遥感的教学和研究工作。zhangzx@cae.cn

通讯作者:陶鹏杰,博士,副教授。pjtao@whu.edu.cn

的数据替代外业控制点进行影像几何定位。发展至今,基于DOM和DEM的云控制模式已经较为成熟,许多学者提出利用DOM和DEM建立的数字化几何定标场,已广泛应用于我国天绘一号、资源三号、高分七号、高分十四号等卫星传感器在轨几何定标^[3-9];同时,对于区域网影像,亦可利用DOM和DEM作为控制实现精确几何定位^[10-13]。

然而,上述云控制模式本质仍是从物方获取控制点,理论上受DOM纠正误差和DEM高程精度的影响,也因此更多用于中小比例尺影像的几何定位。对于大比例尺(1:500至1:5 000)测图场景下影像几何定位,采用理论更优的“云控制”模式,即以定向参数已知的原始影像作为约束,可更好地保障定位精度。这种几何控制思路在本世纪初已有学者提出,并成功应用于航空影像定位^[14-15]和OrbView、WorldView卫星影像的内方位定标^[16-17],但由于应用条件相对较高(控制源影像需存有空中三角测量平差中间结果),并未得到规模化推广。

随着我国测绘遥感卫星进入亚米级“高分时代”以及无人机测绘的多用途平民化发展,大比例尺摄影测量影像数据的重访能力和监测频次都迈入新阶段。这种情况下,延用地面控制点进行影像几何定位的传统做法至少存在以下问题:①地面控制点分布的稀疏性使得其抵抗时间变化和匹配误差的能力更弱;②对于已进行过摄影测量生产的测区,重复量测地面控制点将形成人力浪费;③对同一测区影像多次进行特征点提取,完整重复空三加密流程将造成算力浪费。由此可见,历史影像的几何定位参数和空三加密过程数据是重要的几何控制资源,有极高的重复利用价值。鉴于此,本文提出将这种像方出发的云控制模式发展为一种标准化的测绘产品,即将标准测绘成果地面控制点进一步发展为控制片,作为后期影像处理的几何控制数据。笔者认为,构建和推广控制片的应用体系,对于避免生产过程中的无谓重复劳动和降低数据生产消耗算力具有重要意义,也是促进航测行业由高体量增长到高质量发展的重要一环。

1 控制片简介及其特性

控制片是指经过空中三角测量处理后,具有精确几何定位参数的影像及其空三加密点信息构成的、可作为摄影测量控制信息的影像数据。

简单而言,控制片是带有几何定位参数和密集控制点的影像。当然,为了保证控制片的绝对定位精度,在生成控制片的空中三角测量中需要使用稀疏的地面控制点,而产生的空三加密点都可作为新影像几何定位的控制点,从这个角度讲,控制片的实质是对地面控制点的加密,利用稀疏地面控制点生成密集数字控制点。

控制片的组成如图1所示。几何定位参数和空三加密点信息作为控制片的元数据,可以保存至影像文件之中,也可保存为独立的文件。其中,几何定位参数的形态与影像类型相关。对于航空框幅式影像,几何定位参数为内、外方位元素;对于卫星影像,则一般为有理多项式系数(rational polynomial coefficients, RPC)。控制片中的空三加密点即为新影像几何定位的控制点,根据其影像坐标,可将它们匹配至新影像之中,以此完成控制点的自动“转刺”。

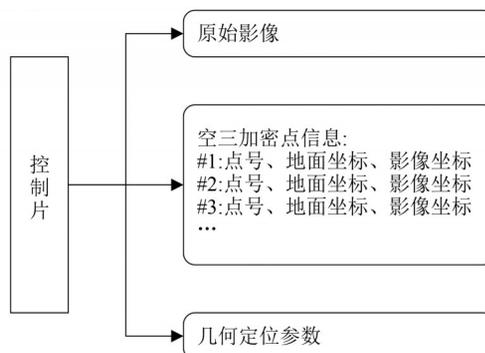


图1 控制片的组成

Fig. 1 Composition of the Digital Control Photo

控制片的控制信息即空三加密点,具有以下特性:

1)密集。现阶段的空中三角测量软件皆通过影像匹配算法自动匹配连接点,每张影像一般均匀分布几百至几万个点,具有比较密集的控制信息;此外,也可根据需要调节影像匹配时特征点提取的间距,从而控制加密点的密度。

2)可靠。空三加密点的地面坐标是通过区域网平差解算得出,相当于多张影像的同名像点前方交会而得,像点观测中的粗差也在区域网平差中有效剔除,它们是最原始的成果,相对于DOM和DEM产品,避免了处理过程中的精度损失,故精度非常可靠。

3)便捷。在采集方面,相对于地面控制点而言,控制片的采集较为容易。在当前大数据时代,也很容易利用航天航空影像制作大区域、无缝覆盖的控制片;在使用方面,将控制片元数据化管理后,控制点可自动“转刺”,使用非常便捷。

2 控制片的应用

控制片是一种新型几何控制信息,在航空与卫星传感器检校与影像几何定位方面有着巨大的应用潜力,以下结合具体应用案例进行阐述。

2.1 大幅面航空相机检校

量测型航空相机的传统几何定标方法依赖布设密集地面控制点的高精度地面检校场^[18-21],人工量测的工作量较大。因此,探索利用控制片替代地面检校场进行航空相机检校具有较大的理论价值。本节介绍基于控制片的大幅面航空

相机 AFC-900 内方位定标方法。

2.1.1 相机介绍

AFC-900 航摄影仪由北京空间机电研究所研制,是目前世界上幅面最大的面阵航空摄影系统。如图 2 所示,AFC-900 的大面阵相机由 4 台光心邻近、共焦平面的全色镜头拼接组成(另有 4 台多光谱镜头)^[22]。相机焦平面上安置了 20 个子面阵,每个子面阵大小为 $7\,920 \times 6\,004$ 像素(像素大小为 $4.6\ \mu\text{m}$),相邻子面阵沿水平方向和垂直分别重叠 400 像素和 300 像素,子面阵拼接后影像幅面为 $30\,480 \times 28\,820$ 像素(约 9 亿像素),视场角为 68° 。



(a) AFC-900 航摄影仪相机外观

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16
17	18	19	20

(b) 焦平面上子面阵排列(相同颜色对应同一个镜头成像的子面阵)

图 2 AFC-900 航摄影仪相机镜头和子面阵配置

Fig. 2 The Lens and Sub-array Configuration of the AFC-900 Aerial Camera

AFC-900 相机拍摄的原始子面阵影像需要严密拼接为整幅影像提供给用户使用,因此需要对相机的镜头和各个子面阵的排列位置进行精确的几何定标,该过程也称为相机的内定标。

2.1.2 定标处理

AFC-900 相机的内方位参数包括两部分:每个镜头的焦距 f 与物镜畸变参数 k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 和每个子面阵的像点位置 x_0, y_0 , 由此可知,内方位参数共 64 个。为了稳定地检校这些参数,采用航空影像控制片作为控制数据。

检校区域位于黑龙江省肇东市,覆盖面积约 $10\ \text{km}^2$,选定中国测绘科学研究院刘先林院士团队研制的 SWDC-4 相机获取的影像制作控制片。

具体定标处理流程如下:

1) 数据采集。分别利用 SWDC-4 相机(相机已完成内定标)和 AFC-900 对检校区进行航空摄影,获取了 163 张分辨率约 3 cm 的 SWDC-4 影像(幅面为 $16\,000 \times 22\,000$ 像素)和 48 幅(每幅含 20 张子面阵影像)分辨率约为 8 cm 的 AFC-900 影像。同时,外业测制了 32 个地面控制点,用于

SWDC-4 影像的空中三角测量。SWDC-4 影像与地面控制点分布如图 3(a)所示。

2) 控制片制作。利用采集的地面控制点对 163 张 SWDC-4 影像进行有控条件的空中三角测量,其中 20 个点用作平差控制,其余 12 个用作精度检查。自动匹配了 39 万个连接点,其分布如图 3(b)所示,平均每张影像有 2 392 个连接点。区域网平差后,控制点物方残差为平面 10.1 cm,高程 7.6 cm;检查点物方残差为平面 10 cm,高程 14.4 cm。利用平差后具有精确内外方位元素的 163 张 SWDC-4 影像和 39 万个空三加密点,制作了 163 张控制片。

3) 基于控制片的 AFC-900 影像空中三角测量。对于 48 幅影像,根据其地面范围自动查询相对应的控制片,通过自动影像匹配将控制片的加密点“转刺”到 AFC-900 子面阵影像中,将其作为控制点使用;同时,AFC-900 影像之间也匹配了大量连接点。图 4 为检校区 AFC-900 影像的分布和其中 1 张子面阵影像从控制片上匹配的 2 783 个控制点,由图 4 可以看出,匹配的控制点非常密集,且有大量点位于建筑物顶部。由

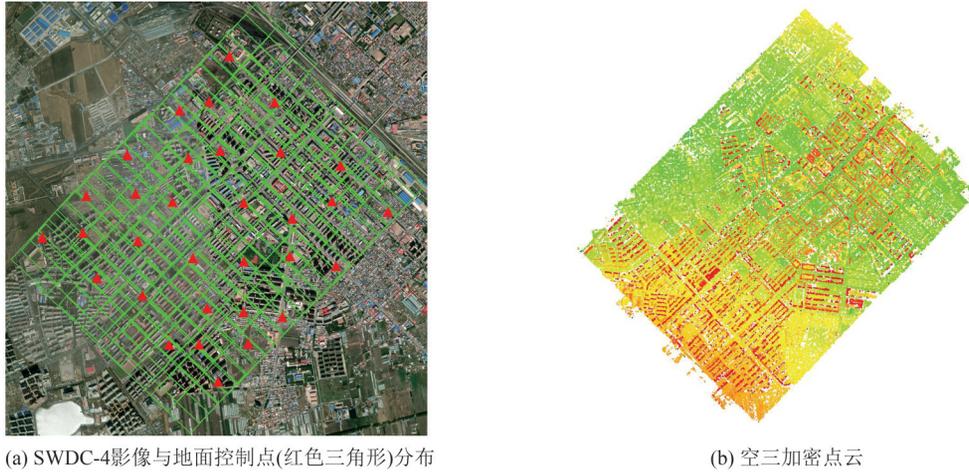


图3 检校区SWDC-4数据及其空三加密点云

Fig. 3 Footprints of SWDC-4 Images and Ground Control Points and the Derived Photogrammetric Point Cloud

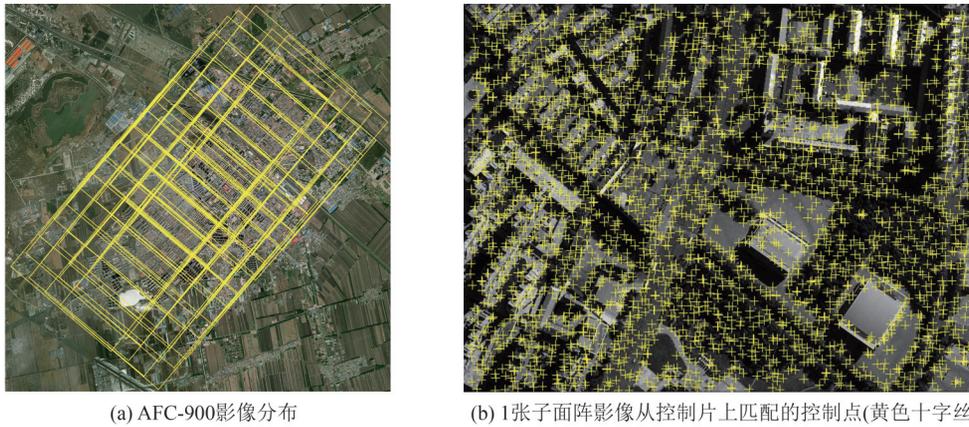


图4 检校区AFC-900数据及局部影像从控制片匹配的控制点分布

Fig. 4 Footprints of AFC-900 Images and Matched Control Points from Digital Control Photos on One Sub-array Image

此,在AFC-900影像POS(position and orientation system)信息辅助下,构建自检校区域网平差方程,同时解算64个相机内参数和所有影像的外方位元素。

利用上述计算得到的相机参数,对AFC-900

子面阵影像进行虚拟拼接,从而得到整幅影像。图5为一幅AFC-900影像的子面阵影像及其拼接生产的整幅影像。由图5可以看出,拼接生成的影像即可用于后续的摄影测量生产。

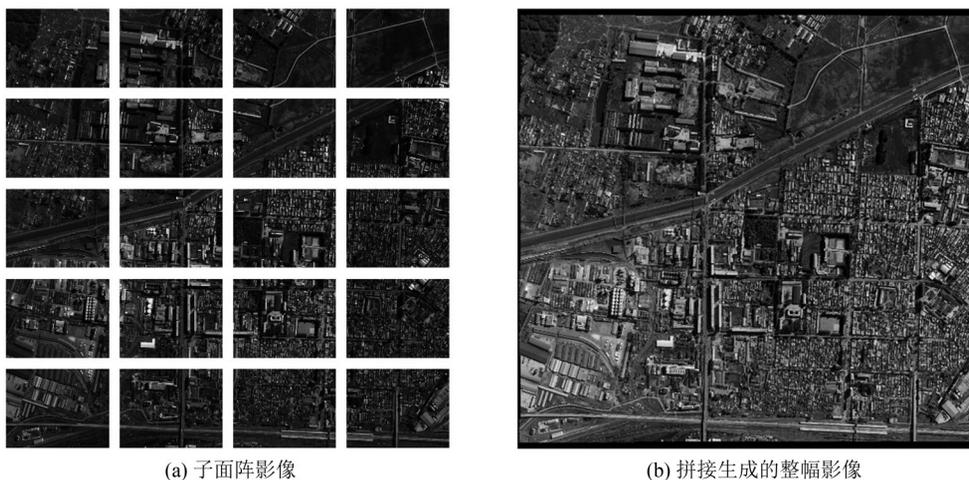


图5 AFC-900子面阵影像和拼接结果

Fig. 5 The Sub-array Images and the Corresponding Stitched Image of AFC-900

2.1.3 精度检验

选定汉中测区进行精度检验,利用定标后相机参数生成该测区的 AFC-900 拼接影像,并进行空中三角测量和精度评定,从而检验相机检校的有效性。

该测区共 157 幅 AFC-900 影像,影像分辨率约 5 cm,覆盖面积约为 180 km²,共采集 35 个地面控制点,其中 24 个用作控制点,其余 11 个用作检查点。影像与控制点分布如图 6 所示。

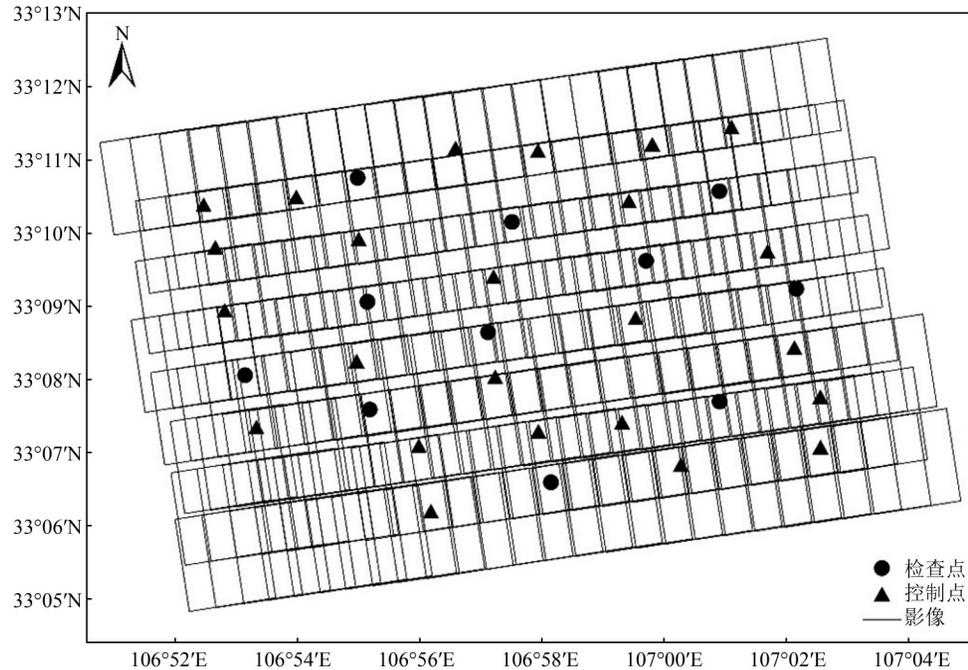


图 6 汉中精度检验测区 AFC-900 影像和控制点分布图

Fig. 6 Distribution of AFC-900 Images and Ground Control Points of Hanzhong Area

利用 Inpho 软件对其进行空中三角测量处理,区域网平差后检查点物方残差如表 1 所示,从表中可看出,检查点平面与高程中误差分别为 4.3 cm 与 7.7 cm,满足 1:500 比例尺空中三角测量精度要求,证明了基于控制片的内方位定标的有效性。

表 1 汉中测区影像区域网平差后检查点残差/cm
Tab. 1 Residuals of Check Points After Bundle Adjustment of AFC-900 Images in Hanzhong Area/cm

点号	检查点物方残差		
	ΔX	ΔY	ΔZ
AFC1-2	-2.5	3.1	12.5
AFC2-2	-0.1	-4.1	2.0
AFC2-4	0.6	2.7	-2.7
AFC3-2	2.2	1.1	11.3
AFC3-4	2.6	-1.4	2.4
AFC4-2	-0.1	0.9	-11.1
AFC5-3	-8.3	-1.6	-5.4
AFC5-4	4.1	5.8	-2.7
AFC6-1	1.7	0.4	3.2
AFC6-3	1.9	-3.0	-0.4
AFC7-4	1.9	-1.3	13.4
中误差	4.3		7.7

2.2 无人机影像几何定位

利用无人机影像进行长江航道摄影测量从而服务于航道监测与维护,长期依赖地面控制点。由于航道建筑物时常发生变化,因此每次利用无人机摄影后都需测量地面控制点,外业工作量大。利用控制片可有效解决该问题,对于第一次摄影的数据,按常规方法测量地面控制点进行空中三角测量,形成控制片。以后每次摄影的数据进行空中三角测量时,均以控制片取代地面控制点,并形成周期性测绘产品,开展航道监测。

测区位于武汉段长江航道岸边某处,在 2020 年和 2021 年利用无人机对其进行了两次摄影,分别获取了 620 张和 344 张影像,影像分辨率均约为 3 cm,外业测量了 6 个地面控制点用于第一期影像空中三角测量,影像与控制点分布如图 7 所示。

处理 2021 年摄影的第二期影像时,自动从 2020 年影像形成的控制片中匹配数字控制点(分布如图 8 所示),进行区域网平差,并与无控制条件下 POS 辅助的区域网平差进行精度对比,结果如表 2 所示。

从表 2 可看出,仅 POS 辅助时,影像定位为平面 1.239 m,高程 10.253 m;加入控制片

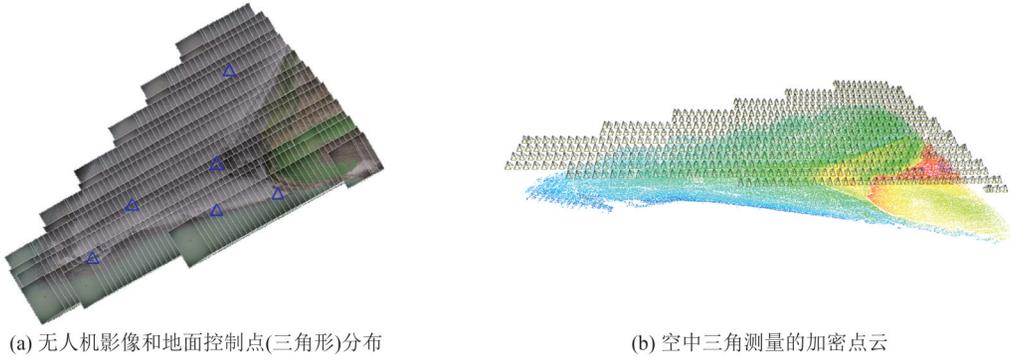


图7 2020年第一期无人机影像数据情况

Fig. 7 Unmanned Aerial Vehicle(UAV)Image Data in 2020

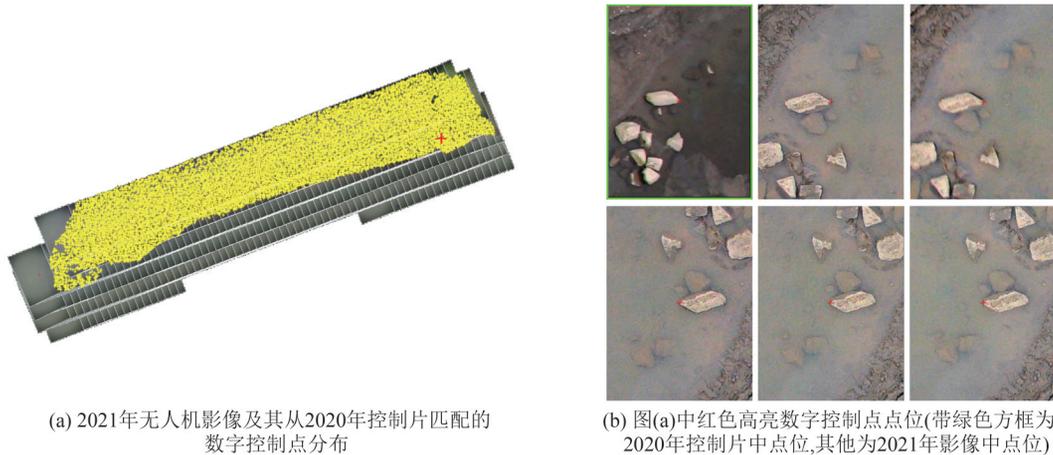


图8 2021年第二期无人机影像及其从控制片匹配的控制点

Fig. 8 Digital Control Points on the UAV Images in 2021 Matched from the Digital Control Photos

表2 POS与控制片辅助的区域网平差精度对比

Tab. 2 Accuracy Comparison of Bundle Adjustment with POS and Digital Control Photos

点号	POS辅助平差/m			POS+控制片辅助平差/m		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
1301	-1.019	-0.081	10.241	0.036	0.018	0.023
1302	-0.131	1.097	10.199	-0.016	0.045	0.079
1303	0.993	0.202	10.359	0.005	0.011	-0.044
1304	-0.042	0.173	10.373	-0.044	0.034	-0.020
1305	0.891	-0.919	10.311	-0.053	-0.015	-0.037
1306	-0.034	2.061	10.029	0.015	0.015	-0.066
中误差/m	1.239		10.253	0.042		0.050

后,影像定位精度大大提升,平面和高程精度分别为0.042 m和0.050 m,满足1:500空中三角测量精度要求。

2.3 卫星影像几何定位

控制片不仅可用于航空影像,也可以用于卫星影像,下面以山东测区为例阐述控制片在卫星影像几何定位上的可行性及其与地面控制点、DOM+DEM约束几何定位的比较。

2.3.1 试验数据

试验区域为山东省,地理范围为34°22.9'N~

38°24.01'N,114°47.5'E~122°42.3'E,东西跨度约721.03 km,南北跨度约437.28 km,覆盖面积约15.58万km²,地形以山地、丘陵为主。试验数据包括:

1)卫星影像。包含104景天绘一号三线阵立体影像和138景资源三号立体影像,具体见表3。

2)地面控制点。外业测量了679个地面控制点用于控制片制作和精度评定,控制点平面和高程精度均优于0.1 m。控制点与资源三号卫星影像的分布如图9所示。

表 3 山东省测区天绘一号与资源三号卫星影像情况

Tab. 3 Situation of the TH-1 and ZY-3 Satellite Images in Shandong Test Area

序号	卫星型号	立体景数	影像数量/张	影像分辨率/m
1	天绘一号	104	312	5
2	资源三号 01 星	10	20	前后视:3.5
3	资源三号 02 星	128	384	前后视:2.5,下视:2.1

3) 公众 DOM 和 DEM。分别为 2 m 分辨率公众 DOM 和 30 m 分辨率 SRTM_GL1 数据,用于比较基于 DOM+DEM 与控制片辅助几何定位的精度。

2.3.2 试验方案

首先,利用分辨率较高的资源三号制作控制片。将 679 个地面控制点之中的 320 个作为定向控制点,其余作为检查点,对 138 景资源三号卫星影像进行空中三角测量,影像间的连接点通过匹配自动获得。经区域网平差后,检查点平面与高程中误差分别为 2.91 m 与 1.95 m。由于下视影像地物几何变形小,且分辨率较高,利用每立体景的下视影像(若没有下视则使用前视)及其 RPC 参数和空三加密点制作控制片。全测区空三加密点共 1 071 908 个,平均每景影像 7 767 个加密点。

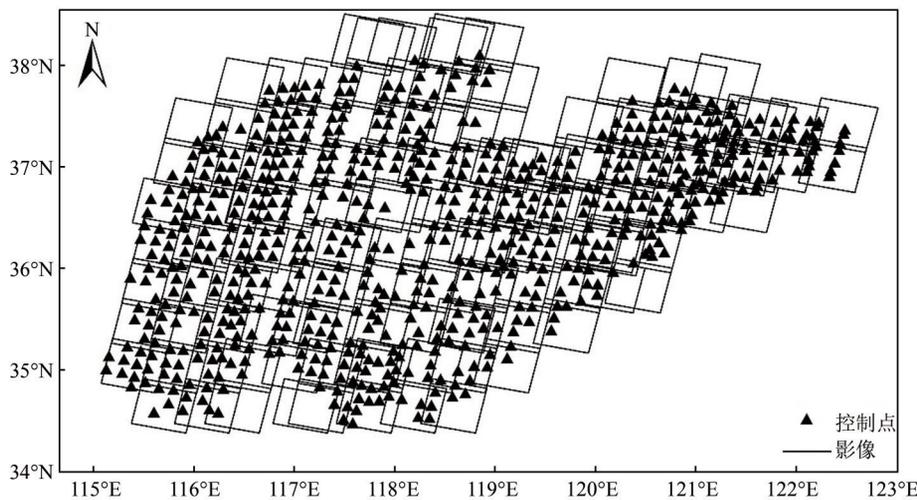


图 9 山东省测区资源三号卫星影像与地面控制点分布

Fig. 9 Footprints of the ZY-3 Satellite Images and Ground Control Points of Shandong Test Area

然后,试验不同控制条件下天绘一号卫星立体影像区域网平差的几何定位精度。分别进行无控、地面控制点、DOM+DEM、控制片辅助条件下的天绘一号卫星影像空中三角测量,使用检查点评定绝对几何定位精度,并进行比较分析。

2.3.3 结果与分析

不同控制条件下,104 景天绘一号立体卫星影像的绝对几何定位精度如表 4 所示。

试验结论如下:

1) 在无控条件下,天绘一号卫星影像存在明显的系统性误差,平面与高程中误差分别为 7.53 m 和 5.20 m。

2) 当使用控制资料后,影像几何定位精度明显提升。即便使用精度最差的公众 DOM 和 DEM 作为控制,天绘一号卫星影像的几何定位精度也提升至平面 4.94 m、高程 3.24 m。

3) 使用控制片进行天绘一号卫星影像几何定位可以达到与使用地面控制点的同等精度,且系统误差基本得到消除。

表 4 不同控制条件下天绘一号卫星影像几何定位精度

Tab. 4 Absolute Geometrical Positioning Accuracies of TH-1 Satellite Images Under Different Control Conditions

控制资料	检查点	中误差/m				平均误差/m		
		ΔX	ΔY	ΔXY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
无控	679	5.93	4.65	7.53	5.20	-3.35	0.17	-3.73
地面控制点(339个)	340	2.56	2.60	3.65	2.17	-0.39	0.07	0.07
DOM/DEM	679	3.18	3.77	4.94	3.24	0.54	-1.98	-2.14
资源三号控制片	679	2.82	2.76	3.94	2.31	-0.11	-0.27	0.08

3 结语与展望

控制片是云控制理论由物方推广至像方、由中小比例尺发展至大比例尺应用的自然产物。它一方面能够提供配套原始影像的高精度几何定位参数与空三加密点,展现出比DOM、DEM、DLG等摄影测量产品更强的几何精度控制能力;另一方面为用户提供了密集、可靠和便于获取的控制点,可显著降低重访航测任务中的人力和算力投入。

考虑到作为一种新型的测绘产品,控制片具有十分重要的重复利用价值,笔者建议从如下几个方面推动构建控制片应用体系:(1)制定控制片作为一种测绘成果的内容规范,引导建立可交换的控制片数据格式;(2)利用覆盖全球的国产立体卫星影像建立多级控制片,形成全球影像基准,如利用天绘一号、资源三号卫星影像建设2~5 m级别控制片,利用高分七号、高分十四号建立亚米级控制片,作为多源卫星影像快速定位的控制数据;(3)利用航空影像建设地区级影像控制片,作为地区级影像基准,为后续亚米级卫星影像或航空影像几何定位提供数字化控制信息;(4)为控制片的更新迭代制定相关作业标准。

参 考 文 献

- [1] Zhang Zuxun, Zhang Jianqing, Zhang Li. Opportunities and Challenges for Development of Digital Photogrammetry [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, 25(1): 7-11. (张祖勋, 张剑清, 张力. 数字摄影测量发展的机遇与挑战[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(1): 7-11.)
- [2] Zhang Zuxun, Tao Pengjie. An Overview on "Cloud Control" Photogrammetry in Big Data Era [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1238-1248. (张祖勋, 陶鹏杰. 谈大数据时代的“云控制”摄影测量[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1238-1248.)
- [3] Tao P J, Lu L P, Zhang Y, et al. On-Orbit Geometric Calibration of the Panchromatic/Multispectral Camera of the ZY-1 02C Satellite Based on Public Geographic Data [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2014, 80(6): 505-517.
- [4] Xin Guodong, An Wen, Huang Lingyong. Construction and Application of TH-1 Satellite Geometric Calibration Field [J]. *Journal of Geomatics*, 2018, 43(6): 52-54. (辛国栋, 安文, 黄令勇. 天绘一号卫星几何定标场建设与应用[J]. 测绘地理信息, 2018, 43(6): 52-54.)
- [5] Zhang Y J, Zheng M T, Xiong J X, et al. 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.
- [6] Yang B, Pi Y D, Li X, et al. Integrated Geometric Self-calibration of Stereo Cameras Onboard the Zi-Yuan-3 Satellite [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 162: 173-183.
- [7] Zhang Yongjun, Wang Mengxin, Wan Yi, et al. Compensation Model of GF-7 Panchromatic and Multispectral Image Registration Error [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1029-1038. (张永军, 王梦欣, 万一, 等. 高分七号卫星影像融合中的全色-多光谱配准误差补偿模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1029-1038.)
- [8] Zhang Y, Wang T, Zheng T J, et al. On-orbit Geometric Calibration and Performance Validation of the GaoFen-14 Stereo Mapping Satellite [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(17): 4256.
- [9] Lu Xueliang, Wang Jianrong, Yang Xiuce, et al. High-Precision On-Orbit Geometric Calibration of the GF-14 Satellite Dual-Line-Array Cameras [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(1): 15-21. (卢学良, 王建荣, 杨秀策, 等. 高分十四号卫星双线阵相机高精度在轨几何标定[J]. 测绘学报, 2023, 52(1): 15-21.)
- [10] Cao H, Tao P J, Li H H, et al. Bundle Adjustment of Satellite Images Based on an Equivalent Geometric Sensor Model with Digital Elevation Model [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 156: 169-183.
- [11] Sun Yushan, Zhang Li, Xu Biao, et al. Method and GCP-Independent Block Adjustment for ZY-3 Satellite Images [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(2): 205-214. (孙钰珊, 张力, 许彪, 等. 资源三号卫星影像无控制区域网平差[J]. 遥感学报, 2019, 23(2): 205-214.)
- [12] Zhao X B, Zhou Q, Dong J K, et al. Digital Elevation Model-Assisted Aerial Triangulation Method on an Unmanned Aerial Vehicle Sweeping Camera System [J]. *The Photogrammetric Record*, 2022, 37: 208-227.
- [13] Wang Mi, Yang Bo, Li Deren, et al. Technologies and Applications of Block Adjustment Without Control for ZY-3 Images Covering China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,

- 2017, 42(4): 427-433. (王密, 杨博, 李德仁, 等. 资源三号全国无控制整体区域网平差关键技术及应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(4): 427-433.)
- [14] Armin G, Simon B. Aerial Mobile Mapping - Georeferencing Without GPS/IMU[C]//The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Cairo, Egypt, 2001.
- [15] Yuan X X, Xie C, Wang S G. Image Orientation by Combined Bundle Adjustment with Fixed Imageries [J]. *International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, 35(B2): 34-38.
- [16] Mulawa D. Preparations for the On-Orbit Geometric Calibration of the OrbView 3 and 4 Satellites[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(Part B1): 209-213.
- [17] Chris C. DigitalGlobe Geometric Calibration[C]// ASPRS 2019 Annual Conference, Denver, CO, USA, 2019.
- [18] Mueller C, Neumann K. Leica DMC III Calibration and Geometric Sensor Accuracy [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, 40: 1-9.
- [19] Cramer M. The ADS40 Vaihingen/Enz Geometric Performance Test [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(6): 363-374.
- [20] Wang T, Zhang Y, Zhang Y S, et al. Geometric Calibration for the Aerial Line Scanning Camera GFXJ[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2019, 85(9): 643-658.
- [21] Tachibana K, Gruber M, Shimamura H. Geometric Accuracy Investigation of Vexcel UltracamD[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37(B1): 611-615.
- [22] Zhou Q, Duan Y S, Liu X, et al. AFC-900 Large-Format Aerial Frame Camera: Design Principles and Photogrammetric Processing[C]// The 12th International Conference on Information Optics and Photonics, Xi'an, China, 2021.