引文格式:袁修孝,袁巍,袁修柳.国产大视场面阵航摄相机大比例尺航测成图几何精度验证[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(8):1646-1656.DOI:10.13203/j.whugis20260021

Citation: YUAN Xiuxiao, YUAN Wei, YUAN Xiuliu.Geometric Accuracy Verification of Domestic Large-Format Area Array Aerial Camera for Large-Scale Digital Aerial Photogrammetric Mapping[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(8):1646-1656.DOI:10.13203/j.whugis20260021

国产大视场面阵航摄相机大比例尺航测成图几何精度验证

袁修孝[1] 袁 巍[2] 袁修柳[1]

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

2 东北大学国际灾害科学研究所,日本 仙台,9808572

摘 要:以中国AFC-900超大面阵航测相机为研究对象,利用自行研发的全自动数字摄影测量系统Imagination为平台,定量检验了其在各类地形、各种大比例尺航测成图中的几何精度。首先将AFC-900安装在中国运-12飞机上,对某北方平原典型城市地区获取了0.04 m地面采样距离(ground sampling distance,GSD)的航摄影像,然后对相机自带POS AV610系统观测到的GPS数据采用精密单点定位技术求取WGS84系下的GPS摄站坐标,并实施GNSS辅助空中三角测量(aerial triangulation,AT),接着采用基于光流场的航摄影像密集匹配方法全自动生成数字表面模型(digital surface model,DSM),并直接由密集匹配三维点云全自动生成数字正射影像图(digital orthophoto map,DOM),在无人工干预下依据检查点客观评价AT、DSM和DOM的几何精度,最后利用AT结果在商用数字摄影测量工作站上人工测绘数字线划图(digital line graphic,DLG),交由专业测绘产品质检机构对DSM、DOM和DLG野外实地检测,全方位评定了AFC-900相机大比例尺航测成图的几何精度。经室内外精度检测表明,利用AFC-900相机获取航摄影像的摄影测量加密达到实地上平面和高程中误差分别为±0.088 m和±0.096 m的高精度水平,均优于2.5 GSD;成图平面和高程精度分别达到±0.214 m和±0.187 m。实验揭示了AFC-900大视场面阵航摄相机可以满足中国现行平地区域1:500地形图数字航空摄影测量测图规范的精度要求,在高效率、高精度大比例尺航测成图方面极具潜力。这将为其在测绘、国土、城市规划、实景三维中国建设等领域的规模化应用提供技术依据。

关键词:大视场面阵航测相机;大比例尺航测成图;空中三角测量;数字表面模型;数字正射影像图;几何精度

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-01-15

DOI:10.13203/j.whugis20260021 **文章编号**:1671-8860(2026)08-1646-11

Geometric Accuracy Verification of Domestic Large-Format Area Array Aerial Camera for Large-Scale Digital Aerial Photogrammetric Mapping

YUAN Xiuxiao[1] *YUAN Wei*[2] *YUAN Xiuliu*[1]

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

2 International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, Sendai 9808572, Japan

Abstract: **Objectives**: With the rapid development of domestically manufactured aerial cameras in China, systematic verification of their geometric accuracy in digital aerial photogrammetric mapping has become essential for promoting their widespread applications. This study focuses on the domestic AFC-900 ultra-large-format aerial camera, systematically verifying its geometric accuracy in large-scale digital aerial photogrammetric mapping across various terrains by using the self-developed fully automatic digital photogrammetric system Imagination. **Methods**: Aerial images with a 0.04 m ground sample distance (GSD) were ac-

基金项目:国家高层次人才特殊支持计划专项(610400090);国家高分专项(民用部分)(50-H31D01-0508-13/15);日本学术振兴会基金项目(23K13419);日本文部科学省青年研究人员战略性职业发展计划-东北地区跨学科融合全球研究人才培养计划(TI-FRIS)(J260000343)。

第一作者:袁修孝,博士,教授,主要从事航空航天摄影测量高精度对地目标定位理论与方法的研究和教学工作。yuanxx@whu.edu.cn

通信作者:袁巍,博士,副教授。wei.yuan@tohoku.ac.jp

quired over a typical urban flat terrain in northern China using a Yun-12 aircraft. The GPS data observed by the onboard POS AV610 system were processed via precise point positioning (PPP) to determine exposure station coordinates in the WGS84 reference frame, followed by GPS-supported aerial triangulation (AT). A digital surface model (DSM) was then automatically generated using an optical-flow-field-based dense image matching method, and a digital orthophoto map (DOM) was directly produced from the derived dense 3D point clouds without manual intervention. The geometric accuracies of the AT, DSM and DOM were objectively assessed using ground check points under fully automatic conditions. In addition, a digital line graphic (DLG) was manually compiled from the AT results on a commercial digital photogrammetric workstation, and the accuracies of the DSM, DOM and DLG products were further evaluated through field inspection by a professional surveying and mapping quality inspection agency. **Results:** The results show that the GPS-supported bundle block adjustment based on AFC-900 images achieved root mean square errors of ±0.088 m in planimetry and ±0.096 m in elevation, both better than 2.5 GSD. The final mapping products reached planimetric and vertical accuracies of ±0.214 m and ±0.187 m, respectively. **Conclusions:** These results demonstrate that AFC-900 satisfies the accuracy requirements of China's current specifications for 1∶500 topographic mapping in flat terrain areas and has strong potential for efficient and high-precision large-scale digital photogrammetry. The study provides an important technical basis for its broader application in surveying and mapping, land management, urban planning, and real-scene 3D city modeling in China.

Key words: ultra-large-format area array camera; large-scale digital aerial photogrammetric mapping; aerial triangulation; digital surface model; digital orthophoto map; geometric accuracy

航空摄影测量作为对地观测与地理信息获取的核心技术手段,其成果的精度与可靠性直接受制于航摄传感器的性能。航空摄影相机,特别是大面阵数字航摄相机,是获取高精度、甚高分辨率影像的关键装备。其几何精度包括内方位元素的稳定性、光学畸变特性以及在整个成像链中空间位置与物方坐标映射关系的严密性,是决定后续摄影测量加密、数字表面模型(digital surface model,DSM)、数字正射影像图(digital orthophoto map,DOM)及数字线划图(digital line graphic,DLG)等测绘产品精度的基石[1]。近年来,随着中国高端测绘装备自主研发能力的不断提升,一系列高性能航摄相机相继问世。其中,中国最大幅面航摄相机AFC-900的成功研制[2],标志着中国在高性能航摄传感器领域取得了重要突破。该型相机以超大幅面、高成像质量、立体测绘为突出特点,其获取的影像需满足大范围、高精度、高效率的基础测绘、实景三维中国建设、重大工程监测等国家战略需求。

当前,国际上面阵数字航摄相机技术已相对成熟,尤以奥地利Vexcel公司的UltraCam系列(如UltraCam Eagle Mark)和美国Z/I Imaging公司的DMC系列(如DMC III)为代表的高端设备,凭借其经过长期验证的优异几何稳定性、高辐射分辨率以及成熟的配套处理软件,占据了全球高端测绘市场的主导地位[3]。这些相机通常采用多镜头拼接技术实现大幅面成像[4],并通过精密的实验室标定与严格的在航检校(如基于地标场的几何检校[5])来保证高几何精度,其标称定位精度通常可达2~3地面采样距离(ground sampling distance,GSD),在理想条件下甚至更高[6]。与之相比,中国AFC-900相机作为目前世界上最大幅面的面阵航摄相机,采用了创新的单镜头、20个7 920×6 004像素小幅面CCD(charge coupled device)同步曝光技术、拼接成30 480×28 820像素全色超大幅面成像体系与精密光学设计,理论上避免了多镜头拼接引入的色差、配准误差等复杂问题,在系统集成度和理论上的一致性方面具备潜在优势。但这也对其光学设计、机械结构稳定性、传感器平整度、温度适应性以及曝光同步性等提出了更严峻的挑战。张祖勋等[7]针对其局部复杂非均匀畸变难以全局精确建模问题,提出了基于残差场分块、子块独立多项式拟合的分块多项式畸变模型,并配套云控制检校方法,较好地消除了影像畸变差。因此,对AFC-900的几何性能及精度进行全面评估,不仅是对其技术水平的客观衡量,也是明确其适用场景与优势领域的关键。

就专业航空摄影相机的几何精度验证而言,这是一项复杂的系统工程,需要遵循从实验室可

控环境到野外场地实际飞行条件的递进原则。最佳实践检验方法通常涵盖:

1)实验室几何标定:在温控实验室内,利用多光管自准直仪或者高精度三维检校场进行相机标定。前者采用多筒准直光管法[8],后者则通过多角度、多摄站拍摄检校场获取大量影像,采用光束法区域网平差方法,旨在整体求解相机的内方位元素(主点、主距)和光学畸变参数(径向畸变、偏心畸变、面内畸变等)[9],是建立相机初始几何处理模型的基础。

2)静态地面测试:在室外或大型实验场内,对固定地物进行多基线、多角度摄影,评估相机在更接近实际使用环境(光照、温度变化)下的短期稳定性与重复成像一致性[10]。

3)动态飞行验证:这是最综合、最贴近实际应用的验证环节。通过设计包含多种地形特征、布设有高精度地面控制点的专业检校场,执行规范的航空摄影。利用获取的影像进行空中三角测量,通过检查点残差统计分析,综合评价相机在真实飞行状态(包含振动、温度变化、气压变化等因素)下的总体几何精度,有效揭示相机系统误差和环境因素的综合影响[11]。

4)在航标校与自检校:结合全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)和惯性测量单元(inertial measurement unit,IMU)提供的高精度外方位元素,在区域网平差中引入附加参数模型进行自检校光束法平差[12],可以有效补偿在实验室难以完全模拟的飞行动态误差,是提升和验证相机最终定位精度的先进手段[13]。

中国AFC-900航摄相机在研制过程中,综合运用上述方法对初样机和试样机开展了几何精度验证,已全方位、多层次揭示了相机的几何性能。本文旨在通过对试样机在平地区域航测成图全过程的精度评估,检验AFC-900常规航摄影像可否满足中国1∶500比例尺地形图测绘的精度要求。这里航测成图是指利用AFC-900相机按照《GB/T 27919—2011 IMU/GPS辅助航空摄影技术规范》获取完整覆盖且具有一定重叠度的测区航摄影像[14],通过相机自配的POS AV610系统获取的GPS数据采用精密单点定位技术解求GPS摄站坐标[15-16],在自行研发的全自动数字摄影测量系统Imagination上进行GNSS辅助空中三角测量(aerial triangulation,AT),求解影像定向参数和加密点三维地面坐标[17]。以此为基础,利用基于光流场的影像密集匹配方法全自动生成DSM[18]和DOM[19],在VirtuoZo数字摄影测量工作站上人工采集DLG[20],依据地面检查点由Imagination自动评定AT、DSM和DOM精度,同时由专门测绘产品质检机构对DSM、DOM和DLG进行抽样野外检测,定量评估AFC-900相机的几何精度,以探讨其性能水平、潜在优势与可能的局限性,期望能为该型相机的科学应用与后续国产高端航摄装备的研制提供理论依据和实践参考。

1 精度验证流程

为了系统验证AFC-900相机的几何精度,本文主要对其在大比例尺航测成图过程中的像点坐标自动量测、GPS辅助光束法区域网平差、DSM生成和DOM制作等4项精度进行全方位评定。为了避免人工操作引起的人为误差,本文提出了一系列全自动验证方法,文献[16-19]详细阐述了其基本原理,并在Visual Studio Community 2015 C++环境下以组件-AMS(automatic image point measurement system)、-BBA(bundle block adjustment)、-DEM(digital elevation model)和-DOM予以程序实现,且一并集成在Imagination系统中。由于4个模块均具有精度评定功能,本文实验便按照图1所示的流程由Imagination自动完成室内精度验证。

2 实验设计

2018年12月,以嵩山航空检校场[21]为试飞区,对AFC-900初样机按照1∶500比例尺航测成图要求进行了几何精度验证,初步确认了相机设计方案的可行性,同时也暴露了相机的一些问题,据此进行深入理论分析和处理,并优化设计方案后推出了试样机。

2020年5月,在黑龙江省西南部的肇东地区对试样机进行了大比例尺航测成图精度验证。实验区离哈尔滨市53 km,属于典型的中国北方平原地形区域,包括有城市、乡村、道路、农田、树林等,地势非常平坦,地物涉及高楼林立的城区和建筑物稀少的城郊结合部。共完成了3个架次的校飞:按照1∶1 000比例尺航测成图要求对全区航摄了1个架次,GSD为0.08 m;按照1∶500比例尺航测成图要求对城区和郊区分开航摄了2个架次,GSD均为0.04 m,且城区为南北向飞行,郊区为东西向飞行。因平地1∶500地形图航测精度

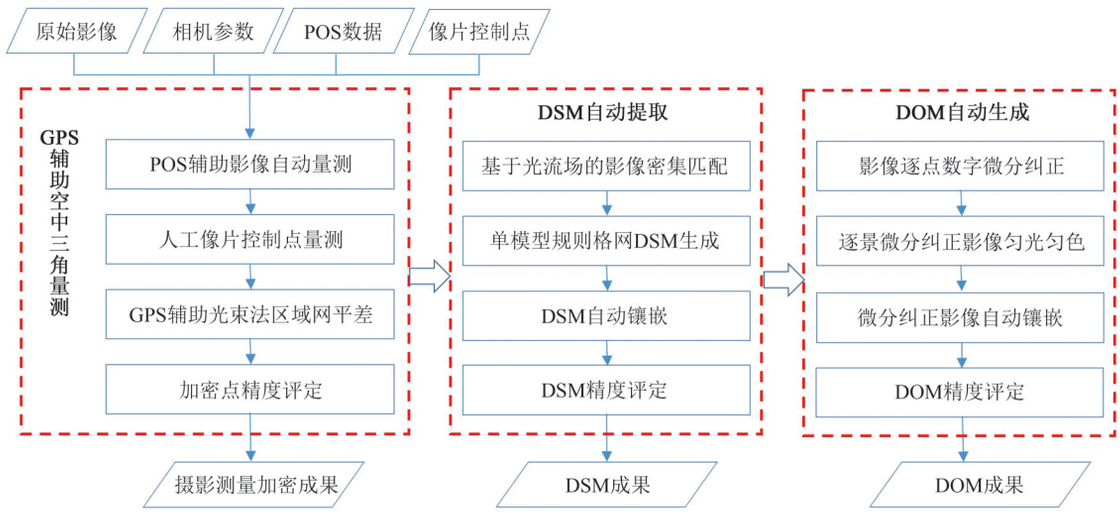


图 1　AFC-900 相机大比例尺航测成图精度验证框架

Fig. 1　Accuracy Verification Framework for Large-Scale Aerial Photogrammetric Mapping Using AFC-900 Camera

要求最高,本文选用后两个架次的航摄影像进行了实验验证,主要技术参数列于表 1,影像覆盖及像片控制点的分布示意图见图 2。

表 1　实验航摄影像主要技术参数

Table 1　Key Technical Parameters of the Experiment Images

项目	实验区 1	实验区 2
航空摄影时间	2020-05-27	2020-05-28
航空运载平台	中国运-12	
像片主距/mm	142.416 9	
像元大小/μm	4.6	
GSD/cm	4.0	
航向重叠度/%	80	
旁向重叠度/%	60	
测图航线数/条	8	9
构架航线数/条	2	2
覆盖影像数/幅	286	418
像片控制点数/个	27	25
实验区面积/km^2	46	67
最大地形起伏/m	46	52
地形类别	城区	城郊结合部

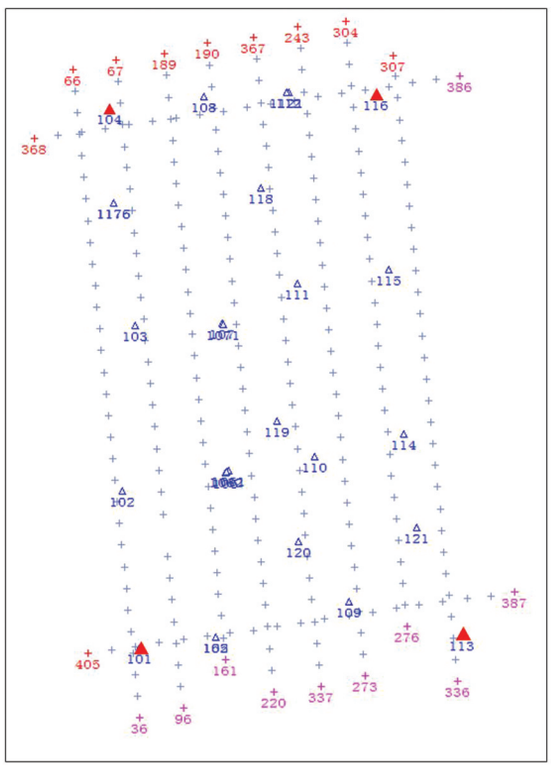
为了进行 AFC-900 相机 1∶500 比例尺成图精度的评定和坐标基准的转换,在两个实验区内按照《GB/T 45632—2025:数字航空摄影测量控制测量规范》要求施测了部分明显地物点(如房角、田埂、道路交叉口、斑马线等)作为像片控制点[22]。由专业测绘公司采用静态 GPS 网实时动态定位方法测量,平面采用 2000 国家大地坐标系,整体精度优于±0.03 m;高程采用 1985 国家高程基准,整体精度优于±0.05 m。

3　Imagination 系统自动评定精度

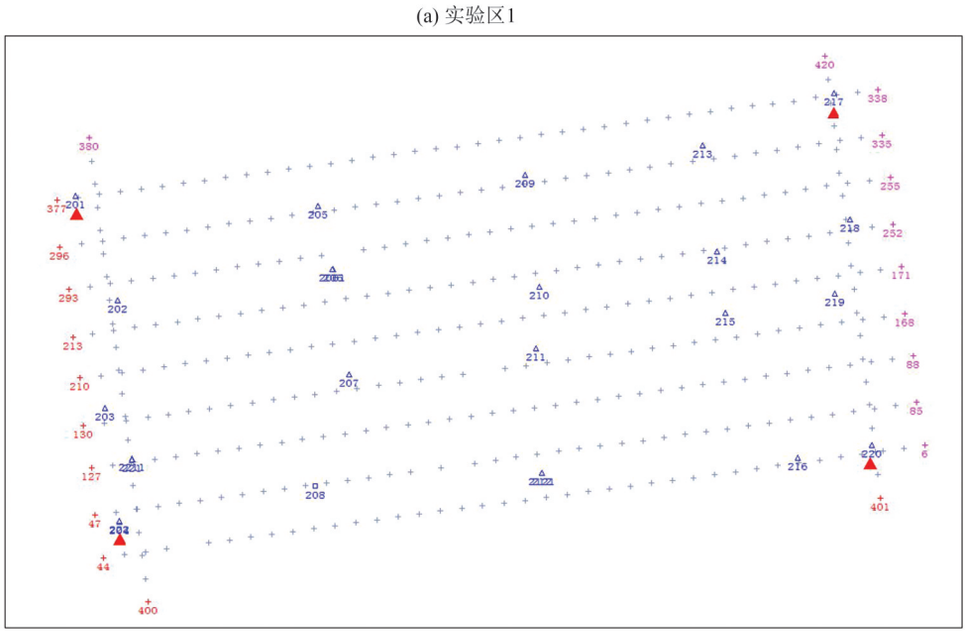
3.1　影像量测精度

利用 Imagination-AMS 影像量测子系统对两个实验区的所有航摄影像进行全自动量测,提取了像片连接点,按照均匀分布选点原则,实验区 1 和实验区 2 的单个模型定向点数平均分别达到 91 个和 115 个,总体满足立体像对相对定向的要求。但是,两个实验区中均有少数模型因落在农田、灌木区,定向点数少于 15 个,且相邻模型间的像片连接点不足 3 个,需手工添加模型间的公共连接点。对量测得到的像片连接点进行带模型连接条件的连续法相对定向[23],利用 Imagination-AMS 自带的选权迭代法粗差检测功能[24]自动剔除影像误匹配点后,经统计各模型的上下视差中误差得到两实验区所有影像相对定向的精度变化曲线,如图 3 所示。

从图 3 可以清楚地看到,在两个实验区中,模型点上下视差中误差的均值约为±3.5 μm,即±0.75 像素,部分模型的相对定向精度略低于±0.75 像素。仔细分析图 3 中的红色曲线不难发现,航线内单个模型的像点上下视差残差并不存在误差系统性累积趋势,随机性较强,航线边缘也没有表现出系统性的尺度拉伸,航线间旁向重叠区的影像边缘畸变也没有被明显放大。由于采用了 POS 辅助影像匹配算法[25]自动识别同名像点,其影像判读误差可以忽略不计,因此,该数值可以作为影像几何精度的一个测度[26]。由此可见,AFC-900 航摄影像的几何精度达到了子像素级水平,是相当高的。但与当前最先进的数字航摄相机相比,影像拼接算法还有改进的



(a) 实验区1



(b) 实验区2

+像片投影中心点 △平高检查点 ▲平高控制点

图2 实验区影像及地面控制点的分布

Fig. 2 Spatial Distribution of Aerial Images and Ground Control Points in the Test Area

空间。

3.2 GPS辅助光束法区域网平差精度

选取实验区四角4个平高像片控制点(图2中的▲点)作为定向点,利用Imagination-BBA联合平差子系统进行带构架航线的GPS辅助光束法区域网平差。计算时,对像点坐标引入带44个附加参数的Gruen模型[5]自检校并消除像片连接点间的畸变误差,对GPS摄站坐标单航线引入线性漂移补偿模型[17]并辅以四角地面控制点来补偿GPS定位误差。经自检校光束法区域网平差后,获得两个实验区中像点坐标观测值的单位权中误差分别为±2.3 μm和±2.4 μm,均优于±0.5像素,进一步说明了AFC-900相机的几何精度是很好的。利用其余的像片控制点作为检查点(图2中的△点),其平面和高程不符值按照实验区逐点列于表2和表3。

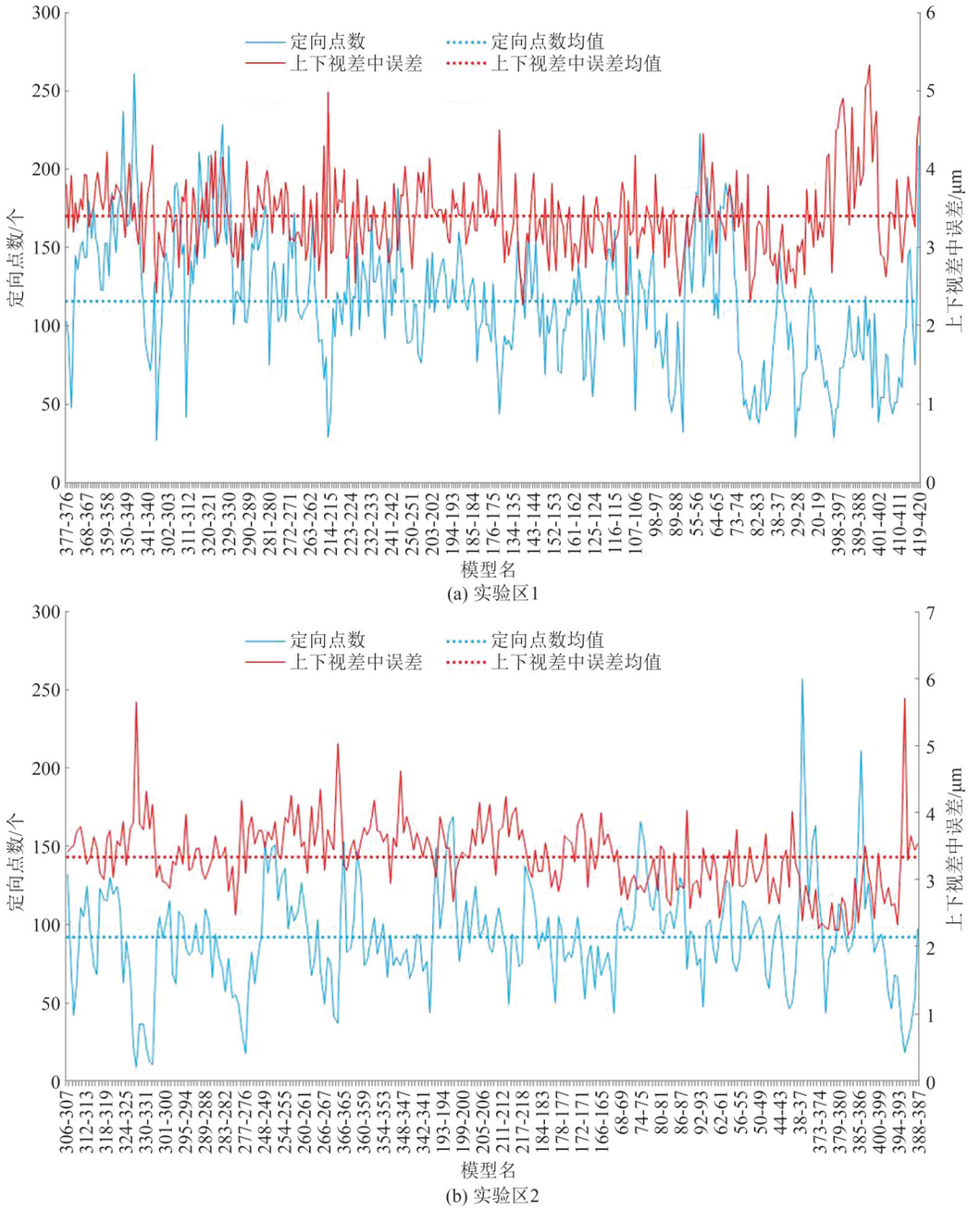


图 3　单模型相对定向精度变化曲线

Fig. 3　Variation Curves of Single-Model Relative Orientation Accuracy

根据《GB/T 23236—2024 数字航空摄影测量空中三角测量规范》规定,平地 1∶500 比例尺航空摄影测量加密检查点坐标不符值的平面与高程限差分别为 0.175 m 和 0.15 m[27],从表 2 和表 3 所列的 40 个平高检查点来看,除实验区 1 中 114 点的平面、120 点的高程略为越界外,其余检查点的平面和高程不符值均在限差范围之内,而且两个实验区的加密点精度几乎一致,总体加密精度平面达到±0.088 m、高程达到±0.096 m,均优于 2.5 GSD。这一结果与当前最先进的面阵数字航摄相机影像加密精度处于同级水平,表明 AFC-900 相机用于 1∶500 比例尺航测成图时的摄影测量加密精度是完全满足中国现行规范精度要求的。

3.3　DSM 精度

以 AT 的像片连接点作为种子点,对两实验区的航摄影像利用 Imagination-DEM 生成子系统进行了单个立体像对的基于光流场的逐像素影像密集匹配[28],对三维离散密集点云采用三角网约束的 B 样条插值法自动生成 0.5 m 格网的模型 DSM[18],经镶嵌后得到全区 DSM。图 4 示意了由实验区 1 的高楼区立体像对 0081-0080 所生成的 0.5 m 格网 DSM。

表2 实验区1检查点的坐标不符值

Table 2 Coordinate Discrepancies of Ground Check Points in Test 1

序号	检查点	X/m	Y/m	平面/m	高程/m
1	102	−0.095	−0.005	0.095	0.008
2	103	−0.005	−0.120	0.121	0.146
3	152	−0.025	−0.047	0.053	0.096
4	106	−0.002	−0.114	0.114	0.124
5	161	0.002	−0.025	0.025	0.108
6	162	0.019	−0.061	0.064	0.073
7	107	−0.028	0.021	0.035	−0.017
8	171	−0.035	−0.053	0.064	0.017
9	108	0.015	0.035	0.038	−0.011
10	109	−0.067	−0.069	0.097	−0.062
11	110	0.003	−0.052	0.052	−0.088
12	111	−0.021	−0.006	0.022	0.100
13	112	−0.035	−0.050	0.061	−0.014
14	1121	−0.119	−0.093	0.151	−0.037
15	113	−0.011	0.036	0.038	−0.095
16	114	0.223	−0.032	0.220	−0.099
17	115	0.028	−0.059	0.066	0.107
18	1175	−0.107	−0.098	0.145	0.035
19	1176	−0.134	−0.107	0.172	−0.014
20	118	−0.037	−0.035	0.051	−0.119
21	119	−0.004	0.011	0.012	−0.131
22	120	−0.092	−0.084	0.124	−0.215
最小不符值/m		0.002	−0.005	0.012	0.008
最大不符值/m		0.223	−0.120	0.225	−0.215
不符值中误差/m		0.059	0.066	0.088	0.084

根据《CH/T 9022—2014 基础地理信息数字成果1∶500 1∶1 000 1∶2 000 1∶5 000 1∶10 000数字表面模型》的规定,对于平地1∶500比例尺DSM高程中误差应优于±0.25 m[29],高程中误差的两倍为其最大误差。利用8 269个和18 689个加密点作为检查点,由Imagination-DEM按最邻近像元法分别对实验区1和实验区2的0.5 m格网DSM进行高程精度评估,统计出高程中误差分别为±0.212 m和±0.216 m。这一实验结果表明,AFC-900相机用于1∶500比例尺航测成图时的DSM精度是可满足中国现行规范精度要求的。

3.4 DOM精度

依据AT获得的影像外方位元素,由影像密集匹配自动提取的密集三维点云,利用Imagination-DOM制作子系统直接生成逐点数字微分纠正影像[19],镶嵌后得到DOM。图5展示了高楼林立的城区的0081影像的数字微分纠正影像,其与原始影像具有相同的像元大小。由Imagination-DOM自动定位检查点并辅之以人工精测的策略,在DOM中直接读取检查点的坐标偏差后,分别统计两实验区的DOM平面坐标误差及其位置中误差,分别见表4和表5。

表3 实验区2检查点的坐标不符值

Table 3 Coordinate Discrepancies of Ground Check Points in Test 2

序号	检查点	X/m	Y/m	平面/m	高程/m
1	202	−0.035	−0.077	0.084	−0.010
2	203	−0.024	−0.110	0.112	0.117
3	204	0.103	0.030	0.107	0.136
4	205	−0.040	−0.031	0.050	−0.125
5	206	−0.075	0.016	0.077	−0.111
6	207	0.020	−0.030	0.036	−0.023
7	208	0.056	0.054	0.077	−0.103
8	209	−0.067	0.095	0.116	−0.063
9	210	−0.056	−0.006	0.057	−0.049
10	211	0.061	0.037	0.071	−0.124
11	2121	0.080	0.029	0.085	0.135
12	213	−0.109	0.051	0.120	0.042
13	214	0.087	−0.042	0.097	−0.049
14	215	0.090	0.042	0.099	−0.131
15	216	0.010	0.012	0.016	−0.024
16	218	−0.064	0.007	0.065	−0.121
17	219	0.008	0.042	0.043	−0.104
18	221	−0.004	−0.108	0.108	0.094
最小不符值/m		−0.004	−0.006	0.016	−0.010
最大不符值/m		−0.109	−0.110	0.120	0.136
不符值中误差/m		0.064	0.055	0.084	0.096

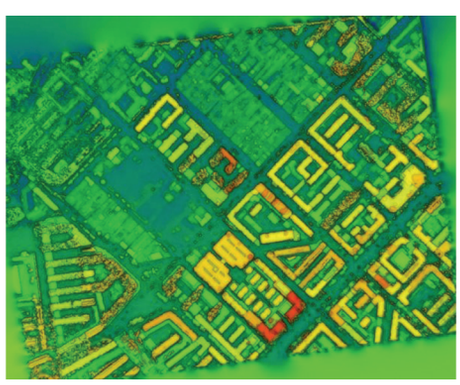


图4 由实验区1立体像对0081-0080所自动生成的0.5 m格网DSM

Fig. 4 The 0.5 m Grid DSM Automatically Generated from Stereo Pair 0081-0080 in Test 1

根据《CH/T 9008.3—2010 基础地理信息数字成果1∶500、1∶1 000、1∶2 000数字正射影像图》的规定,两实验区均为平地,DOM明显地物点相对于邻近平面控制点的平面位置中误差不应大于图上±0.6 mm,即实地上的±0.3 m[30],中误差

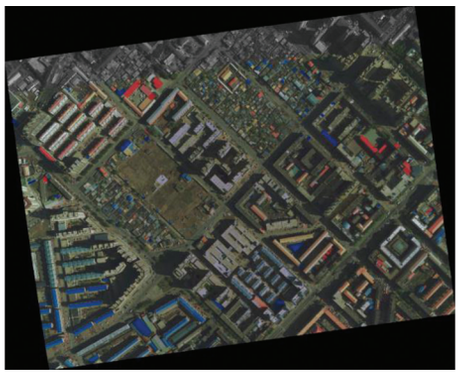


图 5　像元大小为 4 cm 的 0081 片逐点数字微分纠正影像

Fig. 5　Point-by-Point Digitally Differential Rectified Image of Frame 0081, with a Pixel Size of 4 cm

表 4　实验区 1 的 4 cm DOM 精度

Table 4　Accuracy of the 4 cm GSD DOM in Test 1

序号	检查点	X 误差/m	Y 误差/m	平面误差/m
1	101	0.079	0.006	0.079
2	102	0.060	0.072	0.094
3	103	−0.008	−0.091	0.091
4	104	0.000	0.000	0.000
5	1052	0.038	−0.004	0.038
6	106	−0.037	−0.052	0.064
7	1061	0.000	0.000	0.000
8	1062	0.000	0.000	0.000
9	107	−0.004	−0.069	0.069
10	1071	0.000	0.000	0.000
11	108	0.077	−0.081	0.112
12	109	0.090	−0.024	0.093
13	110	0.000	0.000	0.000
14	111	0.000	0.000	0.000
15	112	−0.022	−0.004	0.022
16	1121	0.061	−0.113	0.128
17	113	0.000	0.000	0.000
18	114	0.014	−0.206	0.206
19	115	0.018	−0.042	0.045
20	116	0.000	0.000	0.000
21	1175	0.000	0.000	0.000
22	1176	0.000	0.000	0.000
23	118	0.073	−0.008	0.073
24	119	0.041	−0.008	0.042
25	120	0.062	0.012	0.063
26	121	−0.073	−0.046	0.086
最小误差/m		0.000	0.000	0.000
最大误差/m		0.090	−0.206	0.206
总体精度/m		0.043	0.059	0.073

的两倍为其最大误差。两实验区分别有 223 幅和 347 幅数字微分纠正影像、26 个和 22 个平面检查点。从表 4 和表 5 可以看出,检查点最大位置误差为 0.253 m,平面位置中误差分别为±0.073 m 和±0.130 m,完全满足 DOM 的精度要求。这一实验结果表明,AFC-900 相机用于 1∶500 比例尺航测成图时的 DOM 精度是完全可以满足中国现行规范精度要求的。

表 5　实验区 2 的 4 cm DOM 精度

Table 5　Accuracy of the 4 cm GSD DOM in Test 2

序号	检查点	X 误差/m	Y 误差/m	平面误差/m
1	201	−0.122	−0.056	0.134
2	202	0.111	−0.044	0.119
3	203	0.122	−0.071	0.142
4	204	−0.196	0.019	0.197
5	205	−0.006	0.118	0.118
6	206	−0.031	−0.100	0.105
7	207	−0.053	−0.116	0.128
8	208	0.032	−0.175	0.178
9	209	−0.094	−0.039	0.102
10	210	−0.011	−0.057	0.058
11	211	0.006	−0.135	0.135
12	2121	−0.013	−0.253	0.253
13	213	−0.073	0.042	0.084
14	214	0.005	−0.073	0.073
15	215	−0.020	−0.106	0.108
16	216	0.000	0.000	0.000
17	217	−0.093	−0.037	0.100
18	218	−0.049	−0.029	0.057
19	219	−0.178	−0.033	0.181
20	220	−0.125	−0.014	0.126
21	221	0.000	0.000	0.000
22	222	−0.006	0.159	0.159
最小误差/m		0.000	0.000	0.000
最大误差/m		−0.196	−0.253	0.253
总体精度/m		0.085	0.098	0.130

4　测绘产品野外检测精度

在利用 Imagination 进行 AT、DSM 生成和 DOM 制作并室内自动检测其精度的同时,还委托具有乙级航空摄影测量资质的专业测绘公司,依据§3.2 的摄影测量加密结果,选用相邻两条测图航线中航向 60% 重叠、旁向 30% 重叠的 4 个立体像对重叠区进行了地形测图,以便检查模型间的地物接边。在实验区 1 挑选了高楼林立的 0082-0081、0081-0080、0174-0175 和 0175-0176 4 个立体像对(见图 6),在实验区 2 同样选择了仅有少量建筑物的 0188-0187、0187-0186、0151-0152 和 0152-0153 4 个立体像对。在实际生产用 VirtuoZo 数字摄影测量工作站上对选定的 8 个像对恢复可量测立体模型,并生产了 1∶500 比例尺

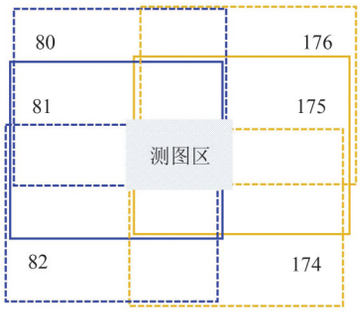


图6 DLG测绘区域示意图

Fig. 6 DLG Survey Area Diagram

DSM、DOM和DLG[31]。最后按照1∶500地形图标准分幅,在两实验区中各抽取一幅DSM、DOM和DLG交由国家授权测绘产品质量检测机构,对其进行野外独立实地检测,图7展示了其中一组被抽检的未经图幅整饰的城区地形图。经野外实测,得到DSM高程精度分别为±0.223 m和±0.246 m,DOM平面精度分别为±0.064 m和±0.033 m,DLG平面和高程精度分别为±0.214 m、±0.153 m和±0.187 m、±0.111 m。

从实地检测精度来看,本文方法自动生成的DSM、DOM与商业软件生产的DSM、DOM,两者精度没有实质性差异。根据《CH/T 9008.1—2010基础地理信息数字成果1∶500、1∶1 000、1∶2 000数字线划图》要求,两实验区均为平地,DLG明显地物点相对于邻近地面控制点的平面位置中误差不应大于实地上的±0.3 m、高程中误差应不大于±0.20 m[32]。综合分析实地检测结果可以得出,AFC-900相机用于1∶500比例尺航测成图时的DSM、DOM和DLG的测绘产品精度是满足规范精度要求的。



(a) DSM (b) DOM (c) DLG

图7 用于野外检测的一个1∶500标准图幅的测绘产品

Fig. 7 A 1∶500 Standard Map Sheet Surveying and Mapping Product for Field Inspection

5 结语与建议

本文系统验证了中国最大幅面航摄相机AFC-900的航测成图几何精度,通过所拍摄的覆盖有高楼林立的城区和少量低矮建筑物的城郊结合部的北方平原地形区域影像,采用四角地面控制的GNSS辅助光束法区域网平差的室内自动检测精度,在平面和高程均达到优于2.5 GSD的水平,与当前最先进的面阵数字航摄相机航摄影像的加密处于同级精度水平。在测绘包括DSM、DOM和DLG的1∶500比例尺地形图过程中,经对各工序的质量检验,无论是基于地面检查点的室内精度评定,还是测绘产品的野外实地检测,结果都表明,依照中国现行的数字航空摄影测量地形测图规范,利用AFC-900相机获取的超大幅面影像进行大比例尺航测成图是完全可行的,且能满足平坦地区地形图测绘的几何精度要求,展现了AFC-900相机优良的几何稳定性和高精度潜力。

因篇幅所限,本文仅详细阐述了平地区域1∶500比例尺航测成图精度验证工作。其实,AFC-900相机从初样机到试样机的技术校飞过程中,共获取了5个试飞区的航摄影像,GSD有4 cm、5 cm、8 cm和20 cm,覆盖的地形包括平地、丘陵地、山地和高山地,地物涉及城市区域和乡村等,测图比例尺涵盖1∶500、1∶1 000和1∶2 000。从Imagination系统所完成的摄影测量加密、DSM自动生成和DOM制作以及室内自动检测的精度来看,AFC-900相机所拍摄的航摄影像是可以满足多种地形、各种大比例尺地形测图的精度要求的,这就证明其单镜头超大幅面设计在几何一致性方面的理论优势。不过,与当前国际主流的多镜头拼接式高端航测相机相比,其在影像拼接算法、影像质量控制、相机系统的热控设计或温漂补偿模型方面还有待进一步优化,特别是在大比例尺地形测图、实景三维建模等高标准测绘生产中,更大规模的应用实验研究还有待深入。未来

工作应集中于长期、多环境下的相机稳定性监测,探索与国产高性能POS系统的深度耦合优化,从而在完全自主的航空遥感系统中实现并持续提升其最优性能。

参 考 文 献

[1] CRAMER M. The DGPF-Test on Digital Airborne Camera Evaluation Overview and Test Design[J]. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2010, 2010(2): 73-82.

[2] 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.

[3] JACOBSEN K. Performance of Large-Format Digital Cameras[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, XL-3/W1: 59-65.

[4] 李健, 刘先林, 万幼川, 等. SWDC-4数码航空相机虚拟影像生成[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(5): 450-453.
LI Jian, LIU Xianlin, WAN Youchuan, et al. Generation of SWDC-4 Aerial Digital Camera Virtual Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wunan University*, 2008, 33(5): 450-453.

[5] 李德仁, 袁修孝. 时空大数据误差处理与可靠性理论[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2026.
LI Deren, YUAN Xiuxiao. Error Processing and Reliability Theory for Spatiotemporal Big Data [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2026.

[6] HONKAVAARA E, MARKELIN L, ILVES R, et al. The Performance of Digital Photogrammetric Cameras: From Photogrammetric Test Fields [J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, 40(1):257-262.

[7] 张祖勋, 赵新博, 段延松. 机载拼接式大面阵相机的分块多项式畸变模型[J]. 测绘学报, 2025, 54(1): 52-63.
ZHANG Zuxun, ZHAO Xinbo, DUAN Yansong. A Block-Wise Polynomial Distortion Model for Airborne Composite Large-Format Camera[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2025, 54(1): 52-63.

[8] 胡海彦, 杨韫澜, 牛向华, 等. 基于多准直器测角仪的航测相机实验室物镜畸变检校方法[J]. 测绘科学与工程, 2021(2): 22-29.
HU Haiyan, YANG Yunlan, NIU Xianghua, et al. A Calibration Method for Aerial Camera Laboratory Distortion Based on the Multi-collimator Goniometer [J]. *Geomatics Science and Engineering*, 2021(2): 22-29.

[9] 吴军, 徐刚, 董增来, 等. 引入灭点约束的TSAI两步法相机标定改进研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(1): 17-21.
WU Jun, XU Gang, DONG Zenglai, et al. An Improved TSAI's Two-Stage Camera Calibration Approach Using Vanish Point Constrain[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(1): 17-21.

[10] 王跃, 刘海英, 陈晓宇, 等. 基于三线靶标的航空相机地面分辨率质量评价[J]. 光电技术应用, 2024, 39(5): 34-38.
WANG Yue, LIU Haiying, CHEN Xiaoyu, et al. Quality Evaluation of Ground Resolution of Aerial Camera Based on Three Line Target[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2024, 39(5): 34-38.

[11] REMONDINO F, BARAZZETTI L, NEX F, et al. UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling — Current Status and Future Perspectives[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, XXXVIII-1/C22: 25-31.

[12] YUAN X X. Quality Assessment for GPS-Supported Bundle Block Adjustment Based on Aerial Digital Frame Imagery[J]. *The Photogrammetric Record*, 2009, 24(126): 139-156.

[13] YUAN X X. GPS-Supported Determination of Interior Orientation Elements of Aerial Camera [J]. *International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing*, 1996, 31(B1):213-217.

[14] GB/T 27919—2011 IMU/GPS辅助航空摄影技术规范[S].
GB/T 27919—2011 Specifications for IMU/GPS Supported Aerial Photography [S].

[15] 赵庆志, 张登雄, 姚宜斌, 等. 顾及对流层各向异性的实时PPP解算方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026, 51(3): 591-603.
ZHAO Qingzhi, ZHANG Dengxiong, YAO Yibin, et al. Real-Time PPP Solution Method Considering Tropospheric Anisotropy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(3): 591-603.

[16] SHI J B, YUAN X X, CAI Y, et al. GPS Real-Time Precise Point Positioning for Aerial Triangulation[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 405-414.

[17] YUAN X X, FU J H, SUN H X, et al. The Application of GPS Precise Point Positioning Technology in Aerial Triangulation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(6): 541-550.

[18] YUAN W, YUAN X X, XU S, et al. Dense Image-Matching via Optical Flow Field Estimation and Fast-Guided Filter Refinement[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2410.

[19] YUAN W, YUAN X X, CAI Y, et al. Fully Automatic DOM Generation Method Based on Optical Flow Field Dense Image Matching[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2023, 26(2): 242-256.

[20] 王爽, 李炯, 王剑. 基于Virtuo-Zo和Geoway的DLG数据制作与质量控制研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(1): 218-220.
WANG Shuang, LI Jiong, WANG Jian. Study on the Production Technology and Quality Control of DLG Data Based on VirtuoZo and Geoway[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2017, 40(1): 218-220.

[21] 袁修孝, 蔡杨, 史俊波, 等. 北斗辅助无人机航摄影像的空中三角测量[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1573-1579.
YUAN Xiuxiao, CAI Yang, SHI Junbo, et al. BeiDou-Supported Aerotriangulation for UAV Aerial Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1573-1579.

[22] GB/T 45632—2025 数字航空摄影测量 控制测量规范[S].
GB/T 45632—2025 Digital Aerophotogrammetry-Control Survey Specifications[S].

[23] 李德仁,郑肇葆. 解析摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1992.
LI Deren, ZHENG Zhaobao. Analytical Photogrammetry[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1992.

[24] 李德仁. 利用选择权迭代法进行粗差定位[J]. 武汉测绘学院学报, 1984, 9(1): 46-68.
LI Deren. Gross Error Location by Means of the Iteration Method with Variable Weights[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1984, 9(1): 46-68.

[25] MING Y, YUAN X X. An Effective Methodology of Using GPS/IMU Data for Automatic Point Transformation in Aerial Triangulation[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37(B1): 117-122.

[26] 袁修孝. 高精度摄影测量加密精度的若干探讨[J]. 测绘学报, 1991, 20(3): 232-238.
YUAN Xiuxiao. Some Investigations on the Accuracy of High Precision Photogrammetric Densification[J]. *Acta Geodaetica et Cartographic Sinica*, 1991, 20(3): 232-238.

[27] GB/T 23236—2024 数字航空摄影测量 空中三角测量规范[S].
GB/T 23236—2024 Digital Aerial Photogrammetry-Specifications for Aerotriangulation[S].

[28] 袁巍. 基于光流场的密集影像匹配理论与实践[D]. 武汉:武汉大学, 2020.
YUAN Wei. Dense Image Matching and Its Application Based on Optical Flow Field[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.

[29] CH/T 9022—2014 基础地理信息数字成果1:500 1:1 000 1:2 000 1:5 000 1:10 000数字表面模型[S].
CH/T 9022—2014 Digital Products of Fundamental Graphic Information 1:500 1:1 000 1:2 000 1:5 000 1:10 000 Digital Surface Models[S].

[30] CH/T 9008.3—2010 基础地理信息数字成果1:500、1:1 000、1:2 000数字正射影像图[S].
CH/T 9008.3—2010 Digital Products of Fundamental Graphic Information 1:500 1:1 000 1:2 000 Digital Orthophoto Maps[S].

[31] GB/T 15967—2024 1:500 1:1 000 1:2 000地形图数字航空摄影测量测图规范[S].
GB/T 15967—2024 Specifications for Digital Aerial Photogrammetric Mapping of 1:500 1:1 000 1:2 000 Topographic Maps[S].

[32] CH/T 9008.1—2010 基础地理信息数字成果1:500、1:1 000、1:2 000数字线划图[S].
CH/T 9008.1—2010 Digital Products of Fundamental Graphic Information 1:500 1:1 000 1:2 000 Digital Line Graphs[S].