

doi: 10.6046/gtzyyg.2020133
引用格式: 陈洁,蔡君,李京,等. 倾斜航空摄影技术及在地质调查中的应用研究——以三峡库区巫峡地区为例[J]. 国土资源遥感,2021,33(1):167–173. (Chen J, Cai J, Li J, et al. Oblique aerial photography technology and its application to geological survey: A case study of Wuxia section in the Three Gorges reservoir [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(1): 167–173.)

倾斜航空摄影技术及在地质调查中的应用研究

——以三峡库区巫峡地区为例

陈洁^{1,2}, 蔡君³, 李京¹, 贺鹏¹
(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 中国科学院空天信息
研究院, 北京 100094; 3. 北京市测绘设计研究院 100038)

摘要: 三峡库区巫峡段是滑坡和危岩崩塌的易发与多发地段, 严重危及长江航道安全。倾斜航空摄影技术能精细刻画观测物的侧面纹理信息, 为地质灾害隐患早期识别提供基础数据。文章在阐述和分析倾斜航空摄影技术的基础上, 联合获取的倾斜航空影像、机载定位定姿系统 (position and orientation system, POS) 数据和地面控制点进行了三维模型制作, 以地质、地貌、水文等因子建立地质灾害危险性评价模型, 通过室内解译和野外调查基本查明了工作区内新发地质灾害发育情况及分布规律, 摸清了各区域内控制地质灾害发生的主要因素, 掌握了区内地质灾害易发性特征及灾害隐患情况。
关键词: 倾斜航空摄影; 三峡库区; 滑坡; 危岩体
中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001–070X(2021)01–0167–07

0 引言

三峡大坝的兴建和大量移民的搬迁, 对三峡库区的地质环境造成了一定程度的改变^[1–2], 使得原本就具有地形差异明显、地势切割强烈特点的库区地质构造变得更为复杂, 是滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害的多发区, 亦是地质灾害监测、解译、成因研究的热点区域^[3]。库区巫峡段蓄水后先后发生了望峡崩塌、龚家坊滑坡、红岩子滑坡等地质灾害, 为进一步查明可能危及航道安全的库岸地质灾害隐患和全面评估以往地质灾害综合治理效果, 亟须开展水库两岸一级斜坡地带的高精度航空遥感摄影测量, 为三峡库区地质灾害隐患早期识别提供更为精准的基础地理信息数据^[4–5]。

长江两岸山体素以险峻闻名, 切割强、高差大, 常规的航空和航天遥感技术多是以中心投影为主的垂直摄影, 难以观测到地物的侧面信息, 即使在影像边缘有少许的侧面纹理, 也会产生较大的变形, 无法使用。另外, 三峡地区地处暴雨频繁的亚热带气候区, 给野外实地地质调查带来了困难、增加了安全隐患。近年来出现的倾斜航空摄影技术可从一个垂

直、多个倾斜角度获取地物数字影像, 同时采集顶部和侧面纹理信息, 配合惯导系统获取高精度的位置和姿态信息, 通过后期数据处理将所有的影像纳入到统一的坐标系统中, 生成三维实景模型^[6–7], 较好地克服了常规航空遥感技术和地面地质调查的各种技术缺陷, 为精细化的航空遥感地质调查提供一种新的技术方法和工作方案。

1 倾斜航空摄影技术

1.1 技术概况

倾斜航空摄影技术最早应用于边境监测的军事方面, 随着计算机技术、机载定位定姿系统 (position and orientation system, POS) 技术的发展和普及, 现已成为国际遥感测绘领域的研究和应用热点。它是在同一飞行平台上搭载多台具有固定相对关系的传感器, 从垂直和倾斜角度同时采集影像, 从而更为完整准确地获取地面物体信息。垂直拍摄的影像与倾斜拍摄的影像联合惯导系统获取高精度的位置和姿态信息, 通过专业的影像匹配与三维建模软件将所有的影像纳入到统一的坐标系统中, 经过在线分发, 用户可在线从多个角度对数据进行浏览和量测。

1993 年美国的 Pictometry 公司开创性地采用 1 个垂直相机和 4 个倾斜非量测相机构成的马耳他十字型结构,奠定了倾斜摄影系统的研发基础。之后,国际上相继涌现出了多款倾斜航空遥感设备,具有代表性的有德国 IGI 公司的 Penta – DigiCam 系统、Leica 公司的 RCD30^[8]、以色列 A3^[9]、微软公司旗下 UCO。2010 年初,天下图公司从美国引进了 Pictometry 倾斜摄影测量系统,标志着我国倾斜摄影测量技术的研究拉开了序幕。同年 10 月,刘先林院士团队成功研发了第一款国产倾斜相机 SWDC – 5,并成功实施了长春市倾斜摄影项目^[10],后续出现的国产倾斜航空摄影仪器有上海航遥的 AMC5150、中测新

图的 TOPDC – 5。目前最常见的是 1 + 4 传感器设备,即 1 个垂直传感器 + 4 个倾斜传感器。随着技术的发展,出现了搭载更多倾斜镜头的倾斜摄影设备。市场主流的倾斜航空摄影设备技术参数对比如表 1 所列。在完成倾斜航空影像采集后,需进行影像数据后处理,是指对倾斜摄影设备拍摄的航空影像进行解算和预处理,构建反映真实场景的三维数据模型。现有的自动化建模软件包括 Pictometry 系统、Street Factory、Agisoft Metashape、Pix4D mapper、Context Capture、Photomesh 等,国产软件包括中科北纬的 Mirage3D、天际航的 DP – Smart、五维科技的 Wit3D 等。

表 1 主要倾斜航空摄影设备技术参数
Tab. 1 Technical parameters of main oblique aerial photography equipments

设备名称	焦距/mm(垂直/倾斜)	像元尺寸/ μm	影像尺寸垂直/倾斜	镜头组合类型	生产商
Penta – DigiCam	50/80	3.76	6 716 × 8 964	1 + 4	IGI
AOS	47	6.8	7 228 × 5 428	1 + 2	Trimble
RCD30	50/50	5.2	10 320 × 7 752	1 + 2 或 1 + 4	Leica
A3	300	7.4	4 864 × 3 232	单镜头摆扫	VisionMap
UCO	51(全色)、25.5(多光谱)/80	6.0(全色)、5.2(多光谱)/5.2	11 674 × 7 514(全色)、6 735 × 4 335(多光谱)/13 450 × 4 520(拼接后)	4 + 6	Microsoft Vexcel
AMC5150	80/110	4.6	11 608 × 8 708	1 + 4	上海航遥
SWDC – 5	50/80; 80/100	6	8 956 × 6 708/8 176 × 6 132	1 + 4	四维远见
TOPDC – 5H	47/80	5.2	10 320 × 7 752	1 + 4	中测新图

1.2 关键技术

1.2.1 多视角影像的联合平差

传统的航空摄影测量方法是建立在基于垂直影像的共线方程等经典理论上的,而倾斜摄影则含有大量的与地面成一定角度的倾斜影像数据,因此,在对多视角影像进行联合平差时,要依据影像间的几何和重叠关系,利用 POS 系统提供的 6 个外方位元素,采取由粗到精的迭代法匹配策略进行影像匹配和自由网平差,完成影像的精密纠正,得到较好的同名点匹配结果。通过连接点、控制点、外方位元素建立多视角影像区域网平差的误差方程,以其联合解算的结果评价平差结果的精度。

1.2.2 多视角影像的匹配

倾斜航空摄影的多视角影像具有覆盖范围广、分辨率高、重叠度大等特点,但同时也存在几何变形严重、地物特征相似、各角度影像相互遮挡、数据量大且冗余多等问题,常规的灰度匹配算法已很难满足要求。为提高多视角影像的立体匹配精度与效率,国内外学者进行了深入研究,目前已取得很大进展。例如 Zhang 等^[11]提出几何约束法、纪松等^[12]

提出最小二乘法、戴晨光等^[13]提出自适应窗口策略、Furukawa 等^[14]提出基于面片法等,最终达到了多视角影像的可靠、高效的密集匹配效果。

1.2.3 数字表面模型生产

数字表面模型(digital surface model, DSM)是指含有地表自然和人工目标(建筑物、树木等)高度信息的地面高程模型。DSM 能较全面地表达地形地物起伏特征,是现代基础空间数据的重要组成部分,也是倾斜航空摄影多视角影像密集匹配的主要成果。但由于对地观测的视角不同,加之地面起伏,倾斜影像之间的比例尺、地面分辨率差异较大,基于倾斜影像的 DSM 生产存在异于常规方式的新难点。解决思路可将空中三角测量计算出的 6 个外方位元素赋予与之相对应的影像单元,再进行像素级特征匹配和精细化密集匹配,在数据量较大时引入并行算法以获取高密度的 DSM 初始成果,根据应用需求设置阈值进行滤波处理,最后将各个匹配单元进行镶嵌和融合,形成最终的 DSM 成果。

1.2.4 真正射影像纠正

真正射影像(true digital ortho map, TDOM)是

在已有的 DSM 数据基础上,采取数字微分技术纠正原始影像的几何变形,TDOM 是对整个分区进行影像重采样,采样后影像的质量主要取决于 DSM 质量的好坏。只有高质量的 DSM 能够生成高质量的 TDOM^[15]。基于倾斜航空摄影的 TDOM 纠正的难点在于,涉及海量物方和像方的多角度地物与影像的匹配问题,具有典型的数据密集和计算密集特点。在完成该步骤时,可于物方和像方同时进行,即以已有的 DSM 成果为本底,根据几何特征向量提取地形和地物的语义信息,并同步对多视影像进行分割、聚类、边缘提取等操作提取像方语义信息,依据联合平差和密集匹配的结果寻找物方和像方的同名点,继而完成了顾及几何辐射特性的联合纠正^[16],在对结果进行整体匀光匀色处理后得到多视影像的真正射成果。

1.3 技术优势

1)更加真实地还原地物地貌。倾斜影像能让用户从多个角度观测地物,实景三维成果包含地物的侧面纹理,更加真实地反映地物的实际情况,极大地弥补了基于正射影像应用的不足。基于倾斜摄影而提出的数字孪生概念,生动地诠释了三维模型对观测对象的刻画程度。

2)可进行全方位的定性定理分析。通过倾斜航空摄影生成的 DSM,TDOM 和三维模型等成果,在应用软件平台的支持下,均可直接进行包括高度、长度、面积、角度、坡度、土方量等的量测,扩展了倾斜摄影技术的应用领域。

3)易于网络发布和成果共享。倾斜航空摄影的成果数据格式多样,可根据用户需求进行定义,满足云端存储和计算的各种接口要求,具有较好的拓展性和二次开发潜力。

1.4 发展方向

倾斜航空摄影经过近 30 a 的发展,基本解决了在硬件设备的研发、软件平台的开发和行业领域的应用等方面出现的各种技术难点,实现了数据采集与影像成果的自动化。下一阶段,关注重点在于倾斜仪器的小型化,倾斜航空摄影技术与多光谱、高光谱、激光雷达等多种的传感器的结合,集成多源数据解决三维建模缺失或失真、影像匹配不理想等技术难点。

2 技术流程

倾斜摄影技术流程如图 1 所示。

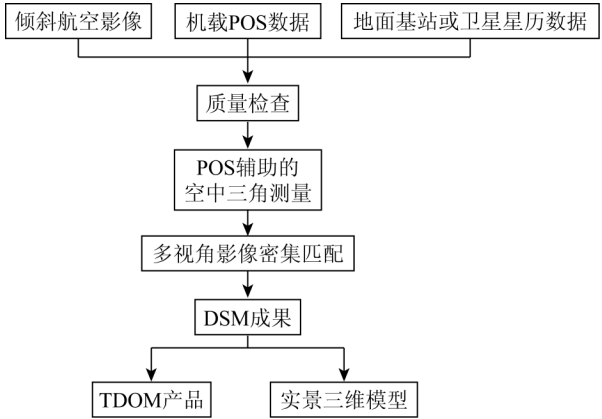


图 1 倾斜航空摄影技术流程
Fig. 1 Technical flow of oblique aerial photography

1)倾斜数据的采集。首先通过机载的多角度光学传感器按照既定的飞行计划,以航向与旁向均为 60% 重叠度对应的曝光点坐标自动进行拍摄,获取地物多个方位的影像和纹理信息供用户多角度浏览。采集的的数据除影像外,通常还包括定位装置获取的曝光瞬间的 3 个线元素 x,y,z 及姿态系统记录相机曝光瞬间的 3 个角元素 φ,ω,κ 。根据后期成图精度和应用的需求,可能还需要收集地面基站数据和卫星星历数据。

2)数据预处理。机载及地面数据获取完成后,首先要对采集的所有数据进行包括飞行质量、影像质量和数据质量的初步检查,对不符合要求的进行补飞,直到所有的数据质量满足相应的规范要求;其次对每张影像进行处理使之色彩均衡、反差适中,能真实反映地物的细节;再者,进行机载 POS 数据处理,并将符合精度的外方位元素作为加权值赋予每张倾斜影像,使得它们具有三维空间中的位置和姿态;再联合地面控制点经过空中三角测量,之后倾斜影像上的每个像素就具有了规定坐标框架下的位置信息。

3)倾斜模型生产。根据成果的不同可分为单体化和非单体化的模型数据生产。单体化模型数据生产,是直接利用现有的三维线框模型,通过纹理映射得到三维模型,这种工艺生产的模型数据可以进行单独地物的删除、修改及替换,适用于地物变化频繁的区域。非单体化模型数据生产通常采用全自动化的生产方式,经过多视角影像的几何纠正、联合平差等环节后可生成高密度点云,以点云构建不规则三角网生成具有纹理信息的三维模型,模型生产周期短、成本低,同时具有测绘级精度。

3 应用情况

3.1 工作区地质背景

本次地质调查的目的是利用倾斜航空摄影技术

手段获取地质灾害重点区高精度航空遥感数据和地形参数,开展三峡库区库岸崩塌、滑坡、地面塌陷等地质环境问题的航空遥感综合调查,掌握区内消落带的地形变化程度,发现重点区段地质灾害隐患和地质环境破坏情况,服务区内地质灾害监测、防治和地质环境保护工作。倾斜航空摄影的工作区巫峡地区位于大巴山弧形构造、川东褶皱带及川鄂湘黔隆褶带三大构造体系结合部,长江横贯东西,大宁河、抱龙河等 7 条支流,呈南北向强烈下切,地貌上呈深谷和中低山相间形态,地形起伏大,坡度陡,谷底海拔多在 300 m 以内,岸坡顶部高程多为 1 000 m 以上^[17]。区内出露多为沉积岩,另有第四系零星分布,次级褶皱及断裂构造十分发育,地表崎岖、峡谷幽深,地质构造背景复杂。根据以往的资料显示,区内受岩性、构造、水文及人类工程活动等因素的影响,滑坡、危岩、泥石流、塌陷等地质灾害极为发育,具有点多面广、种类众多的特点。

3.2 软硬件设备

本次倾斜航空摄影的软硬件设备如表 2 所示。



(a) 城市实景三维模型



(b) 滑坡体实景三维模型

图 2 倾斜航空摄影实景三维模型成果

Fig. 2 3D model of oblique aerial photography

物影像。经机载 POS 数据预处理,结果显示曝光点完整、飞行轨迹正确、位置和姿态差分精度符合对应比例尺的指标。联合地面 63 个控制点,通过机载 POS 辅助的方式进行了倾斜航空摄影的空中三角测量,其结果与 30 个精度验证点进行对比并计算中误差,结果显示精度符合 1:2 000 比例尺高山地精度指标。

3.4 地质灾害调查

以项目获取的高精度倾斜航空遥感数据为主要数据源,以高分辨率卫星遥感数据为辅助数据源,以中国地质调查局航遥中心在 2003 年、2009 年完成的两期三峡库区地质灾害遥感综合调查成果为本底数据,建立地质灾害遥感解译标志,开展三峡库区巫峡段崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害解译,量测、估算各灾害单体的特征属性;提取古(老)滑坡、地裂缝、

表 2 本项目选用的软硬件设备一览表

Tab. 2 The software and hardware list of this project

硬件设施	型号	软件平台	名称
飞行平台	PC6 型 单发飞机	航线设计	FANS
倾斜航摄影仪	AMC5100	影像处理	Capture One
稳定座驾	GSM4000	POS 数据处理	POSPac MMS
POS 系统	APPLANIX AP20	三维建模	Context Capture
飞控系统	FANS	质量检查	煤航 AQAS

3.3 成果精度

倾斜航空摄影实景三维模型成果如图 2 所示。通过 9 个架次、40 余 h 的倾斜航空摄影作业飞行,共获取倾斜航空影像 34 715 张,覆盖面积 120 km²,影像地面分辨率最高为 0.06 m,最低为 0.19 m,在实施过程中严格按照有关的规范标准^[18-21]执行。飞行质量方面,航线弯曲度均小于 0.87%,垂直影像倾斜角小于 6°,航向重叠和旁向重叠最大 84%、最小 78%,旋偏角均控制在 5°以内,同架次航高保持在 50 m 内。影像质量方面,层次丰富、反差适中、色调柔和,能辨认出与地面分辨率相适应的细小地

拉裂槽、前缘鼓丘及植被、水系等与地质灾害相关的微地貌特征;开展了基于 DEM 的地表水文分析的一级斜坡单元内地质灾害遥感调查,分析地质灾害发育特征及空间分布规律;基于前人研究成果,选取斜坡坡度、斜坡坡向、地层岩性、地质构造、岸坡类型、水系作用及人类工程活动等作为评价因子,利用信息量模型分析方法(贝叶斯概率模型)为理论基础,以斜坡单元为评价单元,建立地质灾害易发性评价模型,对区内斜坡单元进行地质灾害易发性评价^[22]。按照上述研究思路,经过室内分析、野外验证,形成如下成果:

1)在内发育地质灾害 308 处、危岩体 158 处,危岩带 14 条,陡崖发育区 11 段,水下地形强变形段 9 段,人类工程活动隐患点 4 处。查明了三峡库区巫峡段地质灾害隐患空间分布特征。

2)对段内主要环境地质问题、典型危岩形成模式、地质灾害隐患易发区域形成了新的认识及划分,为三峡库区巫峡段灾害隐患防治工作提供了可靠数据。消落带基岩劣化、高陡峡谷崩塌、顺向临空危岩、地质灾害隐患、河口泥沙淤积、人类工程破坏等 6 类问题为三峡库区巫峡段内主要地质环境问题,塔柱型、板型、碎裂岩型、空腔型、断裂型、溶蚀型、侵蚀剥蚀型及复合型为段内 8 种典型危岩形成模式。

3)本次地质灾害隐患调查结果显示,区内地质

灾害隐患分布特征受地质环境条件控制明显,且各类地质灾害隐患具有显著的聚集现象,在区内龚家坊至独龙段、石柱子至建坪村段、横石溪至望霞村段等 11 段隐患集中分布,沿线长度达 43.5 km,地质灾害易发性等级整体偏高,中、高易发区以“哑铃型”格局分布,两者面积占比相近,分别为 36.94%和 41.25%,低易发区仅为 21.81%,对当地居民生命财产及往来船只安全构成较大威胁。部分重点地质灾害隐患分布示意图如图 3。

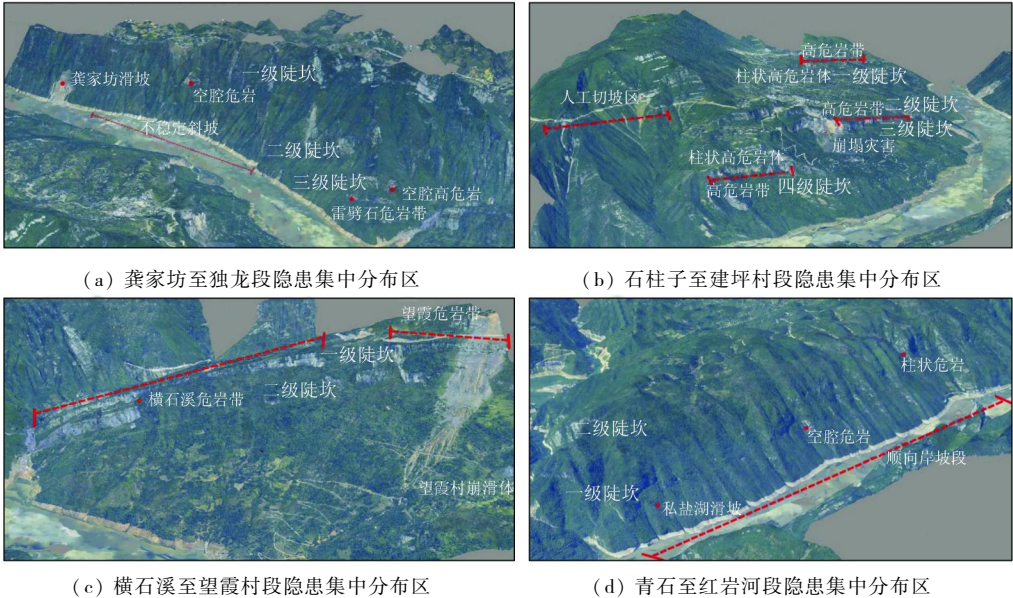


图 3 基于倾斜航空摄影实景三维模型的地质灾害调查与评价示例

Fig.3 Geological hazard investigation and evaluation example based on oblique aerial photography real scene 3D models

4 结论与建议

针对三峡库区地质灾害航空遥感调查应用需求,采用机载 POS 辅助的倾斜航空摄影技术获取了三峡库区巫峡段含有侧面纹理信息的高分辨率航空影像及符合三维建模精度指标的外方位元素,结合地面控制点进行三维建模生产,具有高清、多视角、可量测的功能和特点。同时收集了该地区以往工作成果和卫星影像资料,基于滑坡、崩塌、泥石流、塌陷等地质灾害形成的基本原理,开展了库区消落带地形变化分区,分析了重点区及人类工程活动集中分布区地质灾害的空间特征、影响因素和风险程度,为库区地质灾害防治和地质环境管护提供了高精度地理信息基础数据和规划决策技术支撑,丰富了航空遥感地质调查手段,为三峡库区等重大工程地区的地质调查提供了新的工作思路,验证了倾斜航空摄影技术在地质调查领域的应用潜力。

由于倾斜航空摄影涉及的技术环节众多,在实

际的行业的应用过程中,三维模型成果由于数据量极大、瓦片碎片化的原因存在海量数据传输和加载缓慢的问题,硬件资源和时间成本消耗严重;模型生产软件封闭性高、模型生产过程基本都是自动完成,成果往往具有水体表面不平整、树木悬空等问题,和人工建模存在明显差距;由于模型的生产工艺其产品大多是非单体化的,这样的产品只能浏览而无法实现属性编辑、专题图制作等操作。未来可通过数据库建设、数据接口标准化、地理信息管理系统平台的二次开发来更好地展示三维模型的视觉效果,更加深入地挖掘三维模型成果的数据价值。

参考文献 (References) :

[1] 李益陈. 库水作用下三峡库区涪陵段滑坡稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
Li Y C. Stability of landslide under the effect of reservoir water in the area of Fuling of the Three Gorges reservoir area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.

[2] 任 松, 姜德义, 蒋再文, 等. 三峡库区地质灾害监测技术及展望[J]. 中国安全科学学报, 2006(1): 140 - 144, 4.
Ren S, Jiang D Y, Jiang Z W, et al. Monitoring technology of geological disaster in Three Gorges reservoir area and its prospect[J].

- China Safety Science Journal, 2006(1): 140 – 144, 4.
- [3] 何 潇, 王建力, 陈洪凯, 等. 长江巫峡河谷地质灾害主要特征与演化研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(10): 130 – 136.
- He X, Wang J L, Chen H K, et al. Characteristics of geomorphic hazards in Wu Gorge bank slope and the mechanism for their development[J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2014, 36(10): 130 – 136.
- [4] 陈 洁, 高子弘, 王珊珊, 等. 三峡库区航空遥感地质调查技术发展综述[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 1 – 10. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2020. 02. 01.
- Chen J, Gao Z H, Wang S S, et al. A review on the development of aerial remote sensing geological survey technology in the Three Gorges reservoir area[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(2): 1 – 10. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2020. 02. 01.
- [5] 金鼎坚, 王建超, 吴 芳, 等. 航空遥感技术及其在地质调查中的应用[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(4): 1 – 10. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2019. 04. 01.
- Jin D J, Wang J C, Wu F, et al. Aerial remote sensing technology and its applications in geological survey[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(4): 1 – 10. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2019. 04. 01.
- [6] 李鸿祥. 三维城市规划辅助决策支持系统的设计与实现[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
- Li H X. Design and implementation of three – dimensional urban plan assisted decision – making system[D]. Xiamen: Xiamen University, 2013.
- [7] 周 杰. 倾斜摄影测量在实景三维建模中的关键技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- Zhou J. Research on key technologies of oblique photogrammetry in 3D real scene modeling[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [8] 张 峰, 桑夺坤. 徕卡 RCD30 倾斜相机在城市实景三维模型制作中的方法研究及其应用[J]. 测绘通报, 2017(2): 153 – 157.
- Zhang F, Sang D K. Research and application of Leica RCD30 Oblique camera in 3D real city scene modeling[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(2): 153 – 157.
- [9] 仇 明, 王 冬. A3 数字航摄系统在航空摄影中的应用[J]. 城市勘测, 2017(4): 97 – 101.
- Zhang M, Wang D. Application of A3 digital aerial photography system in aerial photography[J]. Urban Geotechnical Investigation and Surveying, 2017(4): 97 – 101.
- [10] 刘 旭. 基于 UAV 倾斜摄影测量和 SWMM 的城市暴雨积水模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- Liu X. Research on urban rainstorm waterlogging simulation based on UAV tilt photogrammetry and SWMM[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [11] Zhang L, Gruen A. Multi – image matching for DSM generation from IKONOS imagery[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2006, 60(3): 195 – 211.
- [12] 纪 松, 范大昭, 张永生, 等. 基于 AMMG 三线阵影像多视匹配模型的 DSM 自动提取[J]. 测绘科学, 2009, 34(2): 139 – 141.
- Ji S, Fan D Z, Zhang Y S, et al. Automatic DSM generation from three – line – array digital images based on AMMG multiple – image matching model[J]. Science of Surveying & Mapping, 2009, 34(2): 139 – 141.
- [13] 戴晨光, 贾新梅, 史新元, 等. 三线阵影像多视匹配 AMMG 优化模型[J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(5): 376 – 9.
- Dai C G, Jia X M, Shi X Y, et al. Multiple – view matching AMMG optimization model for three – line – array images[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2008, 25(5): 376 – 9.
- [14] Furukawa Y, Ponce J. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 32(8): 1362 – 76.
- [15] 芦彦霖. 倾斜摄影测量实景三维模型构建及精度分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- Lu Y L. Real – time 3D Model construction and precision analysis based on oblique photogrammetry[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [16] 刘 强. 倾斜摄影测量在城市规划中的应用探索[J]. 山西建筑, 2017, 43(22): 203 – 205.
- Liu Q. Application exploration of oblique photogrammetry in city planning[J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(22): 203 – 205.
- [17] 吕朋一. 三峡库区大宁河流域生态承载力研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- Lyu P Y. Study on ecological carrying capacity of Daning River Basin in Three Gorges reservoir area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 24236—2009 数字航空摄影测量空中三角测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 24236—2009 specifications for aerotriangulation of digital aerophotogrammetry[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2009.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 27920. 1—2011 数字航空摄影规范第 1 部分: 框幅式数字航空摄影[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 27920. 1—2011 specifications for digital aerophotogrammetry – part 1: frame digital aerial photography[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2011.
- [20] 毕 凯, 赵俊霞, 丁晓波, 等. 倾斜航空摄影技术设计与成果质量检验[J]. 测绘通报, 2017(4): 71 – 76.
- Bi K, Zhao J X, Ding X B, et al. Technical design and product quality inspection of oblique aerial photography[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(4): 71 – 76.
- [21] 陈 洁, 杨达昌, 杜 磊, 等. 框幅式数字航空摄影飞行质量检查方法[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(4): 91 – 96. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2014. 04. 15.
- Chen J, Yang D C, Du L, et al. Method for inspection of frame digital aerial photographic quality[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(4): 91 – 96. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2014. 04. 15.
- [22] 林 健, 王珊珊. 三峡库区航空遥感地质调查成果报告[R]. 中

国自然资源航空物探遥感中心,2018.
Lin J,Wang S S. Report on aerial remote sensing geological survey

in Three Gorges reservoir area[R]. China Aero Geophysical Survey
& Remote Sensing Center for Natural Resources,2018.

Oblique aerial photography technology and its application to geological survey:
A case study of Wuxia section in the Three Gorges reservoir

CHEN Jie^{1,2}, CAI Jun³, LI Jing¹, HE Peng¹

(1. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources,Beijing 100083, China;
2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094,
China; 3. Beijing Institute of Surveying and Mapping, Beijing 100038, China)

Abstract: The Wuxia section of the Three Gorges reservoir area is an area where landslides and dangerous rock collapses easily and frequently occur , which seriously endangers the safety of the Yangtze River channel . The oblique aerial photography technology can accurately describe the side texture information of the observed objects and provide basic data for the early identification of hidden dangers of geological hazards . In this paper , based on the elaboration and analysis of oblique aerial photography technology , the authors constructed three – dimensional models based on the acquired oblique aerial images , airborne position and orientation system (POS) data and ground control points , and established a geological hazard risk assessment model based on factors such as geology , geomorphology and hydrology . The development and distribution of new geological disasters in the work area were clarified, the main factors controlling the occurrence of geological disasters in each area were figured out , and the geological disasters susceptibility characteristics and hidden dangers in the area were grasped , thus the application potential of oblique aerial photography technology in geological survey was demonstrated .

Keywords: oblique aerial photography ; Three Gorges reservoir area ; landslide ; dangerous rock mass
(责任编辑: 张 仙)