

大坝安全巡检无人机最优图像采集工况试验研究

魏海东, 徐世媚, 黄耀英, 方卫华, 黄译萱

Experimental investigation of the optimal image acquisition conditions for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) used in dam safety inspections

WEI Haidong, XU Shimei, HUANG Yaoying, FANG Weihua, HUANG Yixuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20230412001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于四旋翼无人机的桥梁裂缝检测系统设计

Design of quadrotor-based bridge crack detection system

水利水电工程学报. 2018(1): 102 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.015>

大坝安全监测系统评价体系

Technical framework for dam safety monitoring system evaluation

水利水电工程学报. 2019(4): 63 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.009>

我国水库大坝安全监测现状深度剖析与对策研究

Detailed analysis and countermeasure research on the present situation of reservoir dam safety monitoring in China

水利水电工程学报. 2021(6): 97 <https://doi.org/10.12170/20210301001>

基于Unity3D的水库大坝巡视检查培训系统

Reservoir dam patrol inspection training system based on Unity3D

水利水电工程学报. 2021(6): 111 <https://doi.org/10.12170/20201117003>

滑坡涌浪作用下系泊船舶安全试验研究

Model experimental studies of safety of moored ship under landslide surge action

水利水电工程学报. 2017(1): 80 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.011>

考虑坝体-地基接触效应的特高心墙堆石坝结构安全性研究

Study on safety of a high earth-core rockfill dam considering contact effect between dam and foundation

水利水电工程学报. 2019(6): 107 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.012>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20230412001

魏海东, 徐世媚, 黄耀英, 等. 大坝安全巡检无人机最优图像采集工况试验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2024(3): 158-165. (WEI Haidong, XU Shimei, HUANG Yaoying, et al. Experimental investigation of the optimal image acquisition conditions for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) used in dam safety inspections[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(3): 158-165. (in Chinese))

大坝安全巡检无人机最优图像采集工况试验研究

魏海东¹, 徐世媚², 黄耀英¹, 方卫华³, 黄译萱⁴

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 广东粤电南水发电有限责任公司, 广东 韶关 512600; 3. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012; 4. 中南财经政法大学 统计与数学学院, 湖北 武汉 430073)

摘要: 为提高大坝安全巡检无人机图像采集的有效性, 针对拍摄距离、风速和光照条件三项重要影响因素, 基于大疆 Phantom 4 Pro 无人机开展试验, 分别结合图像自适应阈值二值化、无人机位移及深度学习方法对图像的信息提取效果进行评估, 从而研究无人机大坝巡检最优的图形采集工况。研究表明, 在拍摄距离为 3 m、单向风速为 2.5~4.0 m/s 范围内、晴天背阳的光照条件下, 无人机悬停能力较好, 不会与被拍摄物体表面发生碰撞, 且采集的图像质量最佳。优化了无人机图像采集方案, 为基于无人机巡视大坝工作提供参考依据。未来可以进一步应用自动化巡检系统、传感器技术和智能飞行控制算法, 实现无人机在大坝安全巡检中的全面应用。

关键词: 大坝安全巡检; 无人机; 拍摄间距; 风速; 光照

中图分类号: TV698.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)03-0158-08

随着无人机技术的发展, 基于无人机技术进行大坝安全监测的巡视检查受到越来越多的关注。与传统的人工巡检相比, 无人机能够覆盖大坝上下游面和高陡边坡等测量人员难以到达的部位, 不仅能够提高监测效率和准确性, 还能降低危险性。因此, 无人机在大坝监测中的应用已成为一种趋势^[1-2]。

无人机作为一种新兴的技术手段, 近年来已广泛应用于各领域。在环境监测方面, 董月群等^[3-4]利用无人机光谱成像技术监测水体污染, 可快速获取城市河道的水质分布情况。在输电线巡视检查方面, 张毅等^[5-6]研发了无人机多传感器电力线路安全巡检系统, 以满足电力线路应急处置和安全巡检的高效、自动化处理需求。在大坝巡视检查方面, 无人机应用主要有两种方式: 通过拍摄照片、视频等, 对大坝的运行状况进行检查和分析; 通过携带传感器, 实时监测大坝的各项参数, 如温度、湿度、压力等。已有许多学者开展了相关研究, 如王琳琳等^[7]采用无人机图像拼接技术进行大坝结构的损伤检测, 以观察坝面损伤情况; 陈荣敏等^[8]通过无人机结合计算机视觉算法对采集的坝面图像分析, 实现了裂纹像素分割检测; 朱征等^[9-10]利用无人机航空摄影技术, 完成了白格堰塞区三维数字模型的重建和尾矿库溃坝的数值模拟; 周仁练等^[11-12]利用无人机组式红外-可见双光成像技术, 成功识别了土石堤坝坡面的渗漏和管涌; 赵薛强等^[13-14]研究了无人机自动巡检技术体系, 以增强水利工程建设和运营期间的监控。然而, 这些研究主要集中于路径规划优化和巡检系统开发, 对诸如拍摄距离、现场风速和光照强度等影响因素的文献报道较少。为此, 本文拟开展无人机飞行试验, 以探讨在大坝巡视检查中拍摄距离、环境风速和光照条件对图像采集的影响, 为基于无人机巡视大坝工作提供参考依据。

收稿日期: 2023-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52239009, 52179135)

作者简介: 魏海东(2000—), 男, 湖北十堰人, 硕士研究生, 主要从事水工程安全监控方面的研究。

E-mail: 1642330983@qq.com 通信作者: 黄耀英(E-mail: huangyaoying@sohu.com)

1 图像采集影响因素及试验方案设计

无人机图像采集的影响因素主要包括无人机拍摄距离(以下简称“摄距”)、风速和光照条件, 由于这三者之间的耦合不是很强, 这里仅分别讨论单一要素对图像采集的影响。由于各种无人机的镜头焦距等因素不同, 所适用的最佳摄距也不同, 为此以大疆 Phantom 4 Pro 无人机为例, 其镜头焦距为 8.8 mm, 像元大小为 2.4 μm 。该无人机及其搭载的相机参数见表 1。

表 1 无人机和相机主要参数
Tab. 1 Main parameters of UAV and cameras

无人机		相机	
参数	数值	参数	数值
外形尺寸	0.289 5 m×0.289 5 m×0.196 0 m	传感器	1英寸CMOS
最大飞行高度	500 m	有效像素	2 000万
最大可承受风速	10 m/s	焦距	8.8 mm
最大飞行时间	30 min	光圈	f/2.8-f/11
工作环境温度	0~40 $^{\circ}\text{C}$	照片尺寸	5 472 px×3 078 px
悬停精度	垂直: ±0.1 m(视觉定位正常); ±0.5 m(GPS定位正常) 水平: ±0.3 m(视觉定位正常); ±1.5 m(GPS定位正常)	快门	8~1/8 000 s

1.1 摄距优选试验方案设计

无人机的摄距和镜头焦距是影响图像清晰度的关键参数。当焦距一定时, 摄距越近, 像素精度越高, 成像也就越清晰。然而, 当单张图像分辨率相等时, 像素精度越高, 则视场越小, 同时采集效率也会更低^[15]。此外, 巡检距离过近存在无人机碰撞隐患, 而过远则会导致图像不清晰。参考相关文献^[16], 无人机通常在 3~5 m 范围内采集裂缝图像。

针对本文研究的无人机型号, 即大疆 Phantom 4 Pro 款, 鉴于该款无人机测距精度为 0.5 m, 为了探究不同摄距对图像清晰度的影响, 本试验在无人机上安装了激光测距仪, 并通过测距仪屏幕实时获得测量距离, 并打印有不同宽度横线的模拟裂缝靶标, 如图 1 所示。

控制摄距为 3、4、5 m, 探究在这 3 种摄距下所拍摄不同宽度的模拟裂缝情况及视场大小, 优选适合采集混凝土坝面的摄距。具体试验步骤如下:

步骤 1: 将激光测距仪固定在无人机上, 保证其与相机镜头相齐平。使用三脚架模式, 起飞无人机至靶标位于画面中心, 调整云台角度至 0 $^{\circ}$ 。

步骤 2: 控制无人机水平飞行至摄距为 3、4、5 m, 分别拍摄 3~5 张照片。

步骤 3: 分别计算各拍摄距离的视场大小, 对比各摄距所拍摄的裂缝靶标图片中裂缝清晰度。

步骤 4: 计算各摄距下每个像素所代表的真实长度, 并通过灰度化、二值化处理转为黑白图像。

图像处理步骤如下:

步骤 1: 图像灰度化。RGB 图像的灰度化有分量法、最大值法、平均值法和加权平均值法, 采用加权平均值法对 3 种颜色分量进行处理, 进而实现 RGB 彩色图像的灰度化。

步骤 2: 图像二值化。本文采用自适应阈值法, 其原理是为每一个像素点单独计算阈值, 适合处理光照

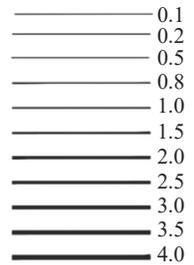


图 1 模拟裂缝靶标(单位: mm)
Fig. 1 Simulated fracture target (unit: mm)

不均的图像,在 OpenCV 中调用 threshold 函数即可实现。

步骤 3: 裂缝宽度计算。使用 PS 标尺工具标记模拟裂缝宽度的像素数目,从而得到模拟裂缝宽度的计算值及其误差,通过对比优选最佳摄距。

1.2 风速影响试验方案设计

通过查阅宜昌历史气象资料得知日常风力为 1~3 级,风速为 0.3~5.4 m/s,少数情况下会超过 10 m/s。考虑到正向风速为最不利工况,为此本文重点考虑无人机正对坝面的单向风速。采用风扇来模拟单向不同风速环境,探究在不同风速下无人机位移曲线及拍摄图像情况。

前后放置两个电风扇,通过调整前后风扇不同档位来制造不同的风速环境,如图 2 所示。探究在后方不同风速下,处于悬停状态的无人机前进位移曲线。具体试验步骤如下:

步骤 1: 使用风速仪测量风扇不同档位下距离 0.5 m 处的实际风速。

步骤 2: 将激光测距仪固定在无人机上,保证其与相机镜头齐平。

步骤 3: 使用三脚架模式,起飞无人机至风扇高度,调整云台角度至 0°,调整至墙面裂缝靶标距离为 3 m。

步骤 4: 开启激光测距仪的连续测距功能,将风扇置于无人机后方 1 m 处,使用风扇不同档位进行试验,测量数据并记录。

通过多次测试,最终选定如下 4 种风速条件:①前 3 档+后 3 档(其中,“前”表示位于前方的白色风扇,“后”表示位于后方的黑色风扇,下同),风速为 4.0 m/s;②前 2 档+后 3 档,风速为 3.5 m/s;③前 1 档+后 2 档,风速为 3.0 m/s;④后 2 档,风速为 2.5 m/s。

1.3 光照影响试验方案设计

拟比较晴天向阳面、背阳面、阴天和夜间光照 4 种状况下的图片质量,成型混凝土板并随机制造表面裂缝开展光照影响试验,为采集图像时选取合适的光照条件提供依据^[17-22]。分别将混凝土板放置在上述 4 种状况下并拍摄包含裂缝的图像,同时采用光度计测量对应环境下的光度。步骤如下:

步骤 1: 使用光度计测量 4 种不同光照环境下的光度。

步骤 2: 无人机固定拍摄 4 种环境下的混凝土板,经相同的裁剪步骤后,每种环境下获得相同数量的裂缝图像集。

步骤 3: 采用 Yolov5 网络模型对 4 种光照条件下采集到的图像进行训练,分析训练结果的精确率曲线和计算损失曲线,判断光照对图像采集的影响。其中精确率是评价分类模型性能的一种指标,表示正确分类的样本数量与总样本数量之比。计算损失是用于衡量模型预测结果与实际结果差异的指标,通过最小化损失函数,可以优化模型参数,提高其准确性和泛化能力。

2 试验结果与讨论

2.1 摄距优选试验结果分析

巡视检查人员采用量尺测量裂缝宽度和长度等信息,普通量尺的精度通常为 1 mm。因此,通过控制无人机摄距拍摄模拟裂缝靶标,以图像测量精度优于 1 mm、能尽量看清细微裂缝,同时视场越大越好为标准,优选出最合适的巡检距离^[11]。计算得到各摄距下每个像素所代表的真实长度,并计算其视场大小,结果对比见表 2。从表 2 可以看出,摄距为 3、4 m 时



图 2 电风扇模拟不同风速环境

Fig. 2 The electric fan replicates various wind speed environments

表 2 各摄距单位像素及视场大小对比

Tab. 2 The comparison of unit pixel and field size of each range

摄距/m	单位像素大小/mm	视场长/m	视场宽/m
3	0.82	4.48	2.52
4	1.09	5.97	3.36
5	1.36	7.46	4.20

图像测量精度均近似 1 mm。

利用 Python 和 OpenCV 软件进行图像二值化处理, 采用加权平均法进行灰度化, 自适应阈值法进行图像二值化, 所拍摄模拟裂缝的原图及二值化图像对比见图 3。

从图 3 可见, 在 3 种摄距下, 宽度为 0.5 mm 及以上的模拟裂缝在原图及二值化图中均能连续完整显示, 宽度为 0.1 和 0.2 mm 的模拟裂缝在二值化图像中显示为不连续线段。摄距为 3 m 时, 在原图中能看清 0.1 和 0.2 mm 宽度的模拟裂缝。对于 3 m 摄距下模拟裂缝拍摄图像, 使用 PS 标尺工具标记模拟裂缝宽度的像素数目, 从而得到测量最大和最小宽度, 如表 3 所示。

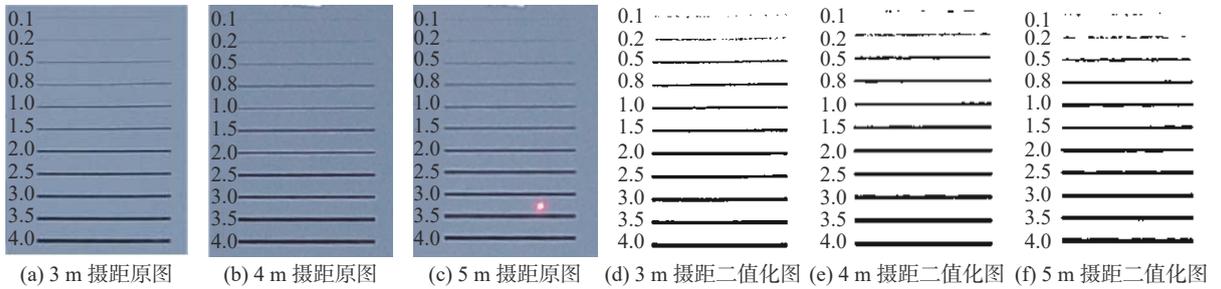


图 3 3 种摄距下原图和二值化模拟裂缝图像对比

Fig. 3 The comparison of original images and binary simulated crack images under three shooting distances

表 3 图像测量实际宽度对比

Tab. 3 Image measurement actual width comparison

模拟裂缝宽度/mm	测量最大宽度/mm	测量最小宽度/mm	模拟裂缝宽度/mm	测量最大宽度/mm	测量最小宽度/mm
0.5	2.45	1.64	2.5	3.27	2.45
0.8	3.27	1.64	3.0	4.09	1.64
1.0	3.27	1.64	3.5	4.09	2.45
1.5	3.27	2.45	4.0	4.91	2.45
2.0	3.27	1.64			

从表 3 可见, 对于 2 mm 以下的裂缝, 测量结果均偏大较多, 原因是进行图像二值化时, 将超过宽度范围的灰色像素点转化为黑色。

综上所述, 在摄距为 3 m 时, 图像质量较高, 单位像素大小为 0.82 mm, 能满足巡视检查预期 1 mm 精度的要求。

2.2 风速影响试验结果分析

在选定的 2.5~4.0 m/s 的 4 种风速条件下, 开启激光测距仪的连续测距功能, 将无人机置于风扇前方 1 m 处, 进行无人机位移曲线试验。根据测距仪的测量数据绘制无人机位移曲线见图 4, 其中, 位移正值代表前进, 负值代表后退。

从图 4 可见, 受单向风的影响, 无人机自身稳定性出现了明显波动, 试验前期有明显的前进趋势, 其中, 模拟风速为 4.0 m/s 时, 无人机在 6 s 时最大前进距离达到了 0.168 m, 但受自身四旋翼风场及悬停定位

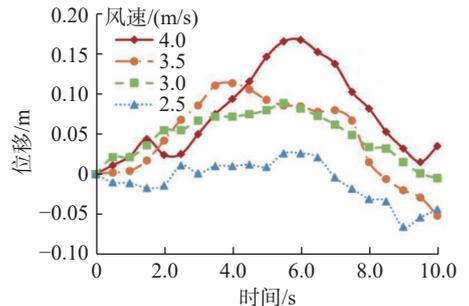


图 4 不同风速条件下无人机位移曲线

Fig. 4 Displacement curves of UAV under different wind speed conditions

的影响,又会缓慢后退,呈现前后摇摆最终趋于稳定的现象。由于无人机与墙面裂缝靶标距离为3 m,且无人机受单向风影响后能快速调整至稳定状态,因此2.5~4.0 m/s单向风速对无人机拍摄的稳定性影响较小,不会与物体表面发生碰撞,可通过手动控制摄距的方式精准测量。

2.3 光照影响试验结果分析

使用光度计得到4种不同环境下的光度值:阴天光度为 2.5×10^3 Lux,晴天向阳面和背阳面的光度分别为 4.5×10^4 和 5.5×10^3 Lux,夜间微弱光照环境下光度为0。图5展示了不同环境下采集的裂缝图像,以进行对比分析。

固定拍摄,经相同的裁剪步骤后,每种环境下各获得236张裂缝图像,共944张,按照9:1划分训练集和验证集。基于Python3.7和开源深度学习框架Pytorch,采用Yolov5网络模型进行训练,设置网络的分类类别classes为1,设置训练批量大小为16张,初始学习率为0.0001,初始权重文件为统一的Yolov5s.pth文件,最大迭代次数为200次,训练结果如图6所示。

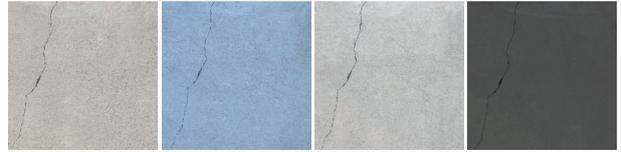


图5 4种环境下采集裂缝图像对比

Fig. 5 The comparison of crack images collected in four settings

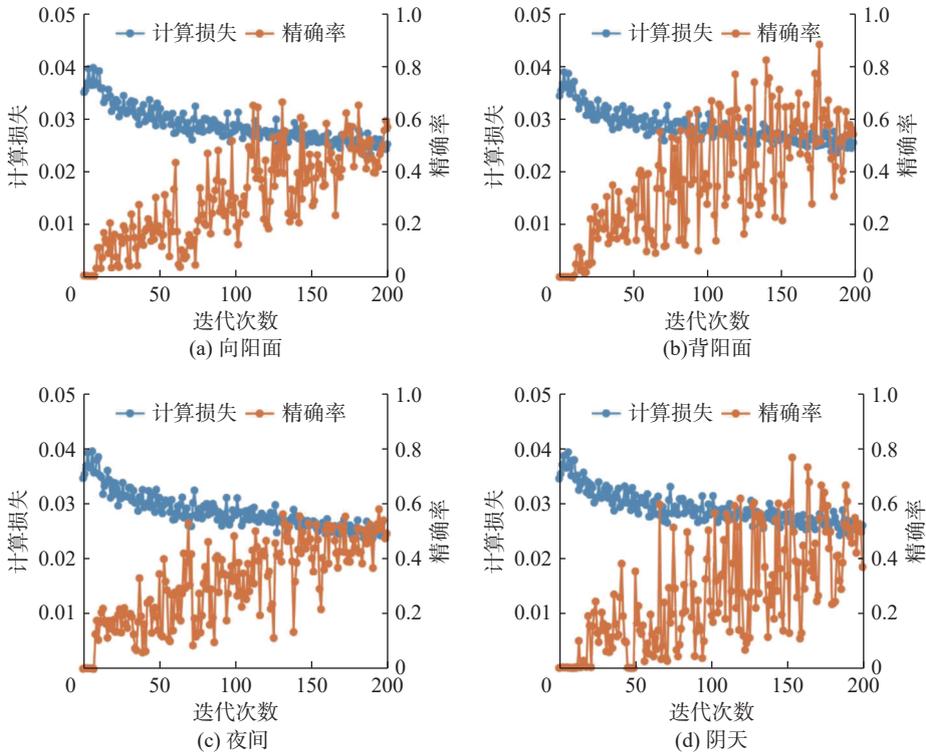


图6 不同光度情况下训练结果

Fig. 6 Training results under different luminosity settings

由图6可见,随着训练迭代次数的增加,计算损失逐渐降低至平稳,精确率则逐渐升高至平稳。在此次训练中,采用小样本裂缝数据集,总体精确率处于中等水平,而损失值差别较小。从精确率看,背阳面的光照条件优于阴天,阴天又优于向阳面,夜间光照条件下精确率较差。分析原因为:向阳面光度最强,受强光照射图片易曝光,部分细微裂缝在强光下表现不明显;而背阳面和阴天避免了混凝土表面缺陷产生的阴影等干扰,充足的光照条件有助于提高检测的精确度;在夜间光照下,裂缝与背景差距小,所以精确率较差。

总体而言,光照的改善会提高图像质量,从而优化检测模型的训练结果,但是在光照很强时,尤其是夏

季中午、下午阳光下,会出现曝光、阴影等干扰。所以,在后续采集缺陷数据集时应选取光照均匀的环境,如有阴影遮挡的晴天或者无强光照射的阴天,在夜间或室内(如廊道)采集缺陷时,应保证适当的光照,利于图像采集,以提高检测模型的准确率。

3 结 语

基于大疆 Phantom 4 Pro 款无人机设计了一种简单易操作、适合实际工程应用的无人机巡视检查前飞行试验,以探索无人机在大坝巡视检查中最适宜的拍摄距离、最佳飞行风速和采集图像时的最佳光照条件。通过研究得到如下结论:3 m 的摄距可以满足预期 1 mm 精度的巡视检查要求;在摄距为 3 m、单向风速在 2.5~4.0 m/s 范围内,无人机悬停能力较好,不会与被拍摄物体表面发生碰撞。但在实际应用中,仍需进行手动控制以便精确测量;在采集图像数据集时,应选择光照均匀的环境。对于有阴影遮挡的晴天或者没有强光照射的阴天,或者在夜间或室内(如廊道)采集缺陷时,应保证适当的光照。

参 考 文 献:

- [1] 汪大全. 无人值守无人机在大坝边坡智能巡视检查中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2022(7): 131-134. (WANG Daquan. Application of unmanned aerial vehicles in intelligent inspection of dam slopes[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2022(7): 131-134. (in Chinese))
- [2] 顾诚. 无人机技术综述及其在水利行业的应用[J]. 江苏科技信息, 2019, 36(34): 39-41 (GU Cheng. Summary of the technology of unmanned aerial vehicles and the application in the water conservancy industry[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2019, 36(34): 39-41. (in Chinese))
- [3] 董月群, 冒建华, 梁丹, 等. 城市河道无人机高光谱水质监测与应用[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(增刊 1): 289-296 (DONG Yuequn, MAO Jianhua, LIANG Dan, et al. Water quality monitoring and application in urban river based on hyperspectral of unmanned aerial vehicle[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(Suppl1): 289-296. (in Chinese))
- [4] 张冬晓, 陈亚洲, 程二威, 等. 适用于无人机数据链电磁干扰自适应的环境监测系统[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2106-2113. (ZHANG Dongxiao, CHEN Yazhou, CHENG Erwei, et al. Environmental monitoring system suitable for electromagnetic interference adaptation of UAV's datalink[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2106-2113. (in Chinese))
- [5] 张毅, 刘天立, 刘越, 等. 深度学习在输电线路无人机巡检中识别防振锤缺陷的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(10): 1065-1071. (ZHANG Yi, LIU Tianli, LIU Yue, et al. Application of deep learning in vibration damper defect identification to UAV inspection of transmission line[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(10): 1065-1071. (in Chinese))
- [6] 李建峰, 段宇涵, 王仓继, 等. 无人机在输电线路巡检中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 62-65, 70. (LI Jianfeng, DUAN Yuhan, WANG Cangji, et al. Application of the unmanned aerial vehicle in the transmission line inspection[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2017, 33(8): 62-65, 70. (in Chinese))
- [7] 王琳琳, 李俊杰, 康飞, 等. 基于无人机图像拼接技术的大坝健康监测方法[J]. 人民长江, 2021, 52(12): 236-240. (WANG Linlin, LI Junjie, KANG Fei, et al. Dam health monitoring method based on image mosaic technology of unmanned aerial vehicle[J]. Yangtze River, 2021, 52(12): 236-240. (in Chinese))
- [8] 陈荣敏, 王皓冉, 汪双, 等. 基于无人机的坝面裂纹缺陷智能检测方法[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 7-12. (CHEN Rongmin, WANG Haoran, WANG Shuang, et al. Intelligent detection method of crack defects on dam surface based on UAV[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 7-12. (in Chinese))
- [9] 朱征, 包腾飞, 郑东健, 等. 基于无人机倾斜摄影的白格堰塞区三维重建[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(5): 81-88. (ZHU Zheng, BAO Tengfei, ZHENG Dongjian, et al. 3D reconstruction of Baige landslide area based on UAV oblique

- photographs[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(5): 81-88. (in Chinese))
- [10] 林小莉, 刘英, 张清凌, 等. 基于无人机航空摄影的尾矿库溃坝数值模拟[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(5): 71-81. (LIN Xiaoli, LIU Ying, ZHANG Qingling, et al. UAV aerial photography-based numerical simulation on failure of tailings reservoir dam[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(5): 71-81. (in Chinese))
- [11] 周仁练, 马佳佳, 苏怀智. 基于无人机载红外-可见双光成像的土石堤坝渗漏巡查方法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(3): 154-161. (ZHOU Renlian, MA Jiajia, SU Huaizhi. Leakage inspection method of earth-rock embankment based on UAV with infrared and visible dual-light imaging[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(3): 154-161. (in Chinese))
- [12] 周仁练, 苏怀智, 刘明凯, 等. 基于被动红外热成像的土石堤坝渗漏探测试验研究[J]. *水利学报*, 2022, 53(1): 54-67. (ZHOU Renlian, SU Huaizhi, LIU Mingkai, et al. Experimental study on leakage detection of earth rockfill dams using passive infrared thermography[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(1): 54-67. (in Chinese))
- [13] 赵薛强, 凌峻. 无人机自动巡检智慧监控系统研究与应用[J]. *人民长江*, 2022, 53(6): 235-241. (ZHAO Xueqiang, LING Jun. Development and application of intelligent monitoring system with UAV automatic inspection[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(6): 235-241. (in Chinese))
- [14] 赵薛强. 一种无人机图像识别技术体系研究与应用[J]. *中国农村水利水电*, 2022(5): 195-200. (ZHAO Xueqiang. The study and application of a UAV image recognition technology system[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(5): 195-200. (in Chinese))
- [15] 时梦楠, 崔博, 王佳俊, 等. 复杂施工条件下无人碾压机群协同全覆盖路径规划研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(12): 1544-1557. (SHI Mengnan, CUI Bo, WANG Jiajun, et al. Research on cooperative complete coverage path planning for unmanned roller group under complex construction conditions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(12): 1544-1557. (in Chinese))
- [16] 王小刚, 赵薛强, 王建成. 贴近摄影测量在水利工程监测中的应用[J]. *人民长江*, 2021, 52(增刊1): 130-133. (WANG Xiaogang, ZHAO Xueqiang, WANG Jiancheng. Application of close photogrammetry in water conservancy engineering monitoring[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(Suppl1): 130-133. (in Chinese))
- [17] 徐昊, 彭雪村, 卢志芳. 基于四旋翼无人机的桥梁裂缝检测系统设计[J]. *水利水运工程学报*, 2018(1): 102-110. (XU Hao, PENG Xuecun, LU Zhifang. Design of quadrotor-based bridge crack detection system[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(1): 102-110. (in Chinese))
- [18] 赵克华, 郑朝晖, 李金宵, 等. 基于无人机正射影像的河道水域动态监测模型的研究: 以浙江省宁波市鄞州区为例[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(10): 77-83. (ZHAO Kehua, ZHENG Zhaohui, LI Jinxiao, et al. Orthophoto image of unmanned aerial vehicle-based study on dynamic monitoring model of river water area: a case study of Yinzhou District of Ningbo City in Zhejiang Province[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(10): 77-83. (in Chinese))
- [19] 李欣庆, 袁秀忠, 魏星. 无人机倾斜摄影测量在河道凌情监测中的应用[J]. *人民黄河*, 2020, 42(增刊1): 159-161. (LI Xinqing, YUAN Xiuzhong, WEI Xing. The application of drone tilt photogrammetry in river ice monitoring[J]. *Yellow River*, 2020, 42(Suppl1): 159-161. (in Chinese))
- [20] 张际泽, 刘礼. 无人机摄影测量在工程建设中的应用[J]. *四川水力发电*, 2020, 39(4): 69-73. (ZHANG Jize, LIU Li. Application of UAV photogrammetry in engineering construction[J]. *Sichuan Water Power*, 2020, 39(4): 69-73. (in Chinese))
- [21] 梅智. 基于无人机图像的混凝土坝表观裂缝监测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020. (MEI Zhi. Study on monitoring of apparent cracks in concrete dams based on UAV images[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [22] 邓雅心, 骆旭佳, 李红林, 等. 基于无人机倾斜摄影测量技术的水电站坝面裂缝检测研究[J]. *科技创新与应用*, 2021(5): 158-161, 166. (DENG Yaxin, LUO Xujia, LI Honglin, et al. Research on crack detection of dam surface of hydropower station based on UAV tilt photogrammetry technology[J]. *Technology Innovation and Application*, 2021(5): 158-161, 166. (in Chinese))

Experimental investigation of the optimal image acquisition conditions for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) used in dam safety inspections

WEI Haidong¹, XU Shimei², HUANG Yaoying¹, FANG Weihua³, HUANG Yixuan⁴

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Guangdong Yuedian Group Corp Nanshui Hydropower Station, Shaoguan 512600, China; 3. Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservancy Automation, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, Jiangsu, China; 4. School of Statistics and Mathematics, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China)

Abstract: In order to enhance the effectiveness of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) image acquisition for dam safety inspections, this study focuses on three crucial factors: shooting distance, wind speed, and illumination conditions. Using the DJI Phantom 4 Pro UAV as the experimental platform, a series of UAV experiments were conducted under varying shooting distances, wind speeds, and illumination conditions. The image information extraction effectiveness was evaluated through a combination of image adaptive binarization, UAV displacement analysis, and deep learning techniques. The objective was to determine the optimal conditions for acquiring high-quality images during UAV-based dam inspections. The results indicate that the UAV demonstrates excellent hovering capabilities and avoids collision with the target surface under specific conditions, including a shooting distance of 3 meters, a unidirectional wind speed ranging from 2.5 to 4.0 m/s, and favorable sunny backlit conditions. This study optimizes the image acquisition scheme for UAV inspections and provides valuable insights for dam safety inspections utilizing UAV technology. Furthermore, future advancements in automatic inspection systems, sensor technology, and intelligent flight control algorithms can further enhance the comprehensive application of UAVs in dam safety inspections.

Key words: dam safety inspection; UAV; shooting spacing; wind speed; lighting