

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.S1.012

基于无人机巡检的配电网全景管理应用研究

黄文诚

(广东科诺勘测工程有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]对于配电网日益发展及信息化需求,利用无人机代替人工进行电力设备状态巡视,提升配电网资产管理自动化程度。[方法]基于 IOS 及 DJI SDK 开发多旋翼无人机巡视飞行控制 APP,根据指定航飞规划线路自动采集全景原始数据,拼接处理后的全景影像上传至服务器,采用 DFS 分布式存储管理全景数据;基于 Three.js 构建流畅平滑的三维全景场景,实现场景漫游、热点标注、双屏对比等功能。[结果]飞行控制 APP 端针对配网巡检特点开发了全景采集、精细化巡检、快速测绘等模块,解决传统巡检作业和载人直升机在电力巡检存在的诸多难点,满足电网日常巡检、故障巡检、应急抢险的需要;搭建了配电网全景管理系统,利用服务器集群管理无人机采集巡视全景数据,实现分布式存储及调取,将电网资产与巡视全景数据一体化整合管理。[结论]提高配电网巡视影像采集作业效率,规范业务人员数据采集作业流程,管理及应用海量全景影像数据,有效提升配电网巡视信息自动化水平。

关键词: 配电网巡检; WebGL; 全景管理; 分布式存储

中图分类号: TM7; TM755

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)02-0058-06

Research on Application of Panoramic Management in Distribution Network Based on UAV Inspection

HUANG Wencheng

(Guangdong Kenuo Surveying Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] Considering the increasing development of distribution network and the demand of informationization, we use UAV instead of manual means to perform power equipment inspection and improve the automation level of distribution network asset management. [Method] Based on IOS and DJI SDK, this paper developed multi-rotor UAV patrol flight control app, automatically collected panoramic raw data according to preset flight route. Then uploaded processed panoramic image server and used DFS distributed storage to manage images. Based on Three.js, builded smooth three-dimensional panoramic scene and achieved functions like scene roaming, hotspot labeling, double-screen contrast and other functions. [Result] The UAV control App has developed panoramic acquisition, fine inspection, rapid mapping and other modules according to the characteristics of distribution network inspection. It solved difficulties in the traditional inspection and manned helicopters in power inspection and met the needs of power grid daily inspection, fault inspection and emergency rescue. Built a distribution network panoramic management system and stored UAV inspection panoramic data in server cluster. Then intergrated and manage the gid assets and inspection panoramic data. [Conclusion] This paper improves the efficiency of patrol image acquisition of distribution network, standardizes the data acquisition process, manages and applies massive image data and then effectively improves the automation level of information of distribution network.

Key words: distribution network inspection; WebGL; panoramic management; DFS

配电网是能源产业链和国家综合运输体系的重

要环节,长期以来配电网一直利用传统的人工电力巡视方式进行作业,但在实际作业过程中,传统方式始终受到外界自然和设备条件等因素的局限。直升机巡视输电线路技术已在诸多电网公司开始得到应用,尽管直升机巡视技术相对成熟,但其航飞限

收稿日期: 2019-01-07 修回日期: 2019-03-06

基金项目: 广东省科技发展专项资金项目“面向电网巡检的高精度多旋翼航测无人机关键技术研发及应用”(2017B010117008)

制和巡检成本高等问题不符合配电网日常作业的需求。近些年的无人机技术快速发展，无人机自身的高灵活性、快响应、低成本及实时性等特点更加贴近配电网日常巡视的需求。

本文基于 DJI SDK 开发包研发的自动控制多旋翼无人机 APP，操控无人机对配电网线路巡视并采集指定视角的全景影像数据。使用全景制作软件将采集的影像进行拼接合成操作，合成后的全景影像通过发布使用 Web 端浏览，用户可自由交互操作实现 360°环视查看周围环境^[1]。

本文以无人机巡检全景管理在肇庆供电局配电网线路应用为例，阐述其实现机制、原理及技术路线，针对配电网特点分析并设计其管理组织方式。

1 无人机影像采集

1.1 配网无人机电力巡检

配电网分布随着经济增长愈加复杂，运维管理难度大，目前电网线路依旧主要采用人工巡检的方式，对于现代电网的快速发展及安全运行已不能满足日常运维需求。传统的运检模式存在以下主要问题：(1)巡检劳动强度大、工作条件艰苦及巡检效率低下；(2)信息获取方式传统、来源单一；(3)设备状态感知仍以停电检修、离线实验为主；(4)在线监测、带电检修、机器人、无人机等先进手段的数据利用率不高。

电网智能巡检无人机系统是基于智能装备的立体巡检体系重要组成部分，有效解决传统人工巡线工作量大、效率低、风险高，载人直升飞机巡检成本高、飞行审批程序复杂、作业环境受限等问题^[2-3]。为适应满足电网日常巡检、故障巡视、应急抢险的迫切需求，解决从人工向智能的方向转变，无人机电网巡检将成为电网巡检提供一种安全、高效、全面、全面的巡检模式，将是当下最专业、最有效的解决方案^[4-5]。

1.2 智能无人机巡检 APP

基于 IOS 移动操作系统和大疆 DJI SDK 自主研发，针对电力巡检特点深度定制自动化智能控制软件系统。具有 KML、Excel 文件导入、灵活的航飞参数设置、自动航线规划、一键式起降、自动化作业、智能安全检查、实时图传等通用功能。

针对配电网线路巡检采集多种数据采集需求，

提供多种智能业务化作业模式，主要包括的模块有：(1)全景采集模块：用于对立体 360°的全景影像的航拍采集；(2)精细化巡检模块：用于对杆塔每个可能存在缺陷隐患的部位进行影像搜集，为后期的智能分类提供数据支持；(3)通道/树障巡检模块：用于对线路的通道走廊进行全自动化巡视，后期结合影像可以实现树障分析，为避免由树障问题引起的安全隐患提供可靠依据和保障；(4)快速测绘：用于台区及片状区域的正射影像和倾斜摄影数据的采集，可以广泛应用于电力行业中的规划、基建、维护、监控等各个过程；(5)坐标管理，用于线路杆塔等坐标的定时更新，便于电力设备基础数据的日常维护。

1.3 全景影像采集模块

利用航飞线路规划或线路导入功能预先制定全景采集路线，执行一键起飞操作，无人机将垂直起飞上升至起飞点航高 2/3 时，自动调整云台方向为任务预设的云台角度，飞机抵达起始航点后执行全景影像采集操作。

全景采集功能提供无人机在杆塔上空采集全景影像，支持无人机多个航飞点连续拍摄采集连续真实场景，并提供自动和手动两种采集模式。全景采集模块界面如图 1 所示。



图 1 飞控 APP 全景采集界面

Fig. 1 UAV APP interface of panorami images acquisition

自动 360°全景采集模式下，首先需在软件设置自定义航高，自动巡视过程中为保证安全航高设置必须大于杆塔高度。设置参数后再次确认航飞范围和航飞参数，确认执行全景自动采集任务。无人到达预定都航点位置开始拍摄，首先拍摄

一张正射影像，为保证影像拼接质量，我们设定在同一航点环绕相机间隔 36° 旋转拍摄，云台角度分别于 30° 、 60° 、 90° 对每个角度拍摄三张影像，拍摄完毕后前往下一航点拍摄，直至线路中所有航点均拍摄完毕。全景采集模块流程图及界面如图 2 所示。

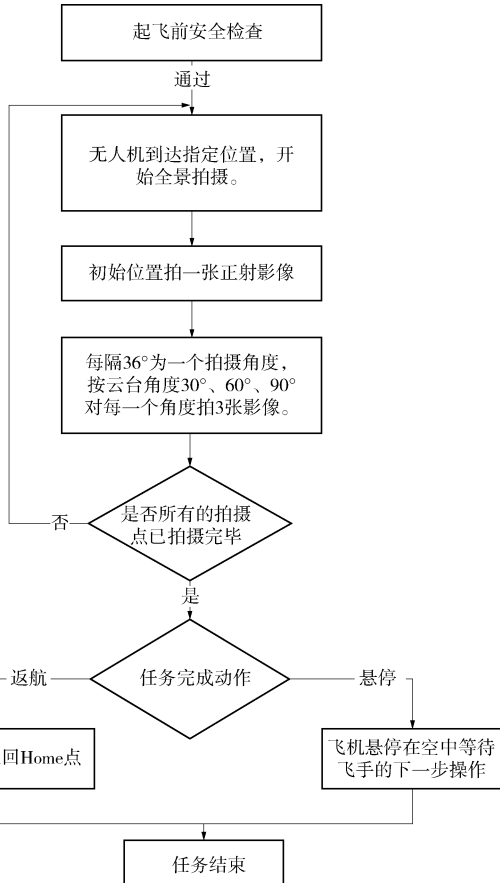


图 2 无人机影像采集流程图

Fig. 2 Workflow of uav panorami images acquisition

1.4 精细化巡检模块

无人机精细化巡检指的是对杆塔、塔基、导线、地线、接地装置、绝缘子及附属设置采集高分辨率影像(可见光、红外)进行缺陷隐患分析的巡视手段^[6]，采用可变焦相机和红外、紫外设备在空中悬停近距离拍摄。精细化巡检模块界面如图 3 所示。

数据采集完后，需要对数据进行整理分析，目前基本是依靠人工判读分析缺陷隐患信息，并最终形成报告。不同塔形对拍摄位置有不同要求，以单回直线塔为例，采用飞控 APP 执行精细化巡检流程如图 4 所示。



图 3 飞控 APP 精细化巡检界面

Fig. 3 UAV APP interface of fine inspection

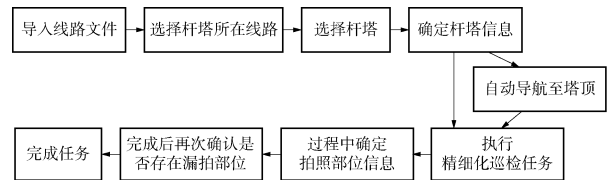


图 4 单回直线塔精细化巡检流程图

Fig. 4 Workflow of single circuit line straight tangent tower fine inspection

2 基于 WebGL 全景可视化

2.1 三维全景球构建

三维全景球基于针对 WebGL 进行封装优化的开源框架 Three.js 进行开发^[7-8]。在构建三维全景球时，首先需要明确 Three.js 封装 WebGL 底层图形操作接口，Three.js 构建的三维场景中采用的是右手坐标系，其中 X 轴正方向朝右，Y 轴正方向朝上，Z 轴正方向由屏幕从里向外，坐标系在后续三维场景构建及交互操作中极为重要。

构建三维全景球主要步骤为：(1)初始化场景；(2)初始化渲染器，采用 CanvasRenderer 作为渲染器；(3)初始化相机与光源；(4)构建三维全景球，创建 SphereGeometry 圆球体，球体面数采用横向纵向分割段数为 20，保证效率同时不影响显示效果，球体法线朝向内部，最终用户可在原点中心位置以环视形式查看真实的全景影像。

2.2 全景交互实现

通过上述方法可构建三维全景球场景，接着需为用户提供三维交互操作用于场景漫游。我们定义三维球以球体中心为原点 O，沿 XOZ 轴构成的平

面作为赤道面，过 Y 轴与球体相交的闭环圆为经线，平行于赤道圈与球体相交都闭环圈为纬线，以 Z 轴负方向为 0° 经线。

在构建三维全景球基础上，我们需解算全景球上的经纬度坐标与三维点坐标之间的转换关系。设三维球上的点 P 经纬度坐标为 (lon, lat) ，右手坐标系三维坐标 (x_0, y_0, z_0) ，由几何关系可得经纬度转换为三维坐标方程式(1)为：

$$\begin{aligned} x_0 &= radius \times \sin(90^\circ - lat) \times \cos(lon) \\ y_0 &= radius \times \cos(90^\circ - lat) \\ z_0 &= radius \times \sin(90^\circ - lat) \times \sin(lon) \end{aligned} \quad (1)$$

其转换关系如图 5 所示：

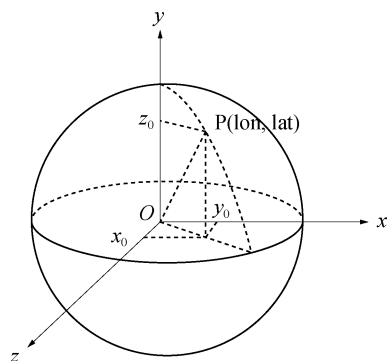


图 5 坐标转换示意图

Fig. 5 Diagram of coordinate transformation

2.2.1 场景更新机制

三维场景动画效果需要实时刷新并不断绘制画布 Canvas 的属性值，进而达到平滑流畅的动画效果。若使用设置定时器控制刷新频率将存在丢帧和堵塞的可能性，影响程序运行性能并且将占用更多 CPU 资源。

大多数显示器的刷新频率为 60 Hz，相当于每秒钟重绘 60 次，即平滑的动画效果的最佳循环间隔为 $1000 \text{ ms}/60$ ，约为 16.7 ms。本文将充分利用显示器的刷新机制，保持与系统刷新频率同步并进行页面重绘，一旦页面不处于浏览器当前标签时便自动停止刷新。此机制能有效避免间隔过渡绘制造成的额外开销，同时避免间隔过长影响动画平滑效果，节省系统资源，提高场景显示效果。

2.2.2 拖拽交互

拖拽操作首先通过记录鼠标左键点击时的屏幕坐标 $client X$ 、 $client Y$ 以及当前经纬度坐标 $oriLon$ 、

$oriLat$ ，启动用户交互触发器，鼠标拖动时记录移动时的屏幕坐标 $cur X$ 、 $cur Y$ ；接着本文将灵敏度 $sensitivity$ 设置为 0.05，灵敏度根据实际操作体验感进行调整；最后将经纬度坐标转换为三维坐标，从而确定相机对焦位置。转换公式为式(2)：

$$\begin{aligned} lon &= (curX - clientX) \times sensitivity + oriLon \\ lat &= (curY - clientY) \times sensitivity + oriLat \end{aligned} \quad (2)$$

2.2.3 缩放交互

缩放操作通过读取鼠标滚轮变化值 $delta$ ，灵敏度设置与拖拽操作一致为 0.05，进而调整视相机的视场角 fov ，将视场角范围固定在 $10^\circ \sim 75^\circ$ 之间以保证效果。转换公式为式(3)：

$$fov = delta \times sensitivity + oriLon \quad (3)$$

2.3 双屏联动实现

本文目标采集的数据为不同时期的无人机巡视全景影像，多时期影像双屏对比辅助配网业务人员观察杆塔线路周围环境不同时期的变化情况，有利于业务人员根据地物变化情况辅助决策。

双屏对比实现路线如下：(1)双屏显示：页面设置左右容器分别为 $leftRegion$ 与 $rightRegion$ ，两侧使用上节所使用的方法分别显示不同时期全景影像；(2)双屏联动：启双屏对比模式后，启用联动触发器，获取交互操作所在容器，以发生交互操作所在容器的场景变化为主；(3)固定维度方向：取消联动后为避免错位现象，交互操作仅限经度方向变化异步，纬度方向仍保持同步。双屏对比效果图如图 6 所示。



图 6 双屏对比效果图

Fig. 6 Rendering of dual screen contrast

3 配网全景影像管理

系统整体采用 B/S 架构，后台采用 MVC 框架进行应用开发，采用独立的图片服务器集群实现图

片资源的分布式存储与 Web 请求, 前端三维全景展示采用 Three.js 作为 WebGL 框架实现全景展示。

3.1 技术路线

系统主要技术路线为: 外业数据采集人员通过 IOS 飞控端指定航飞线路或手动控制, 采集 31 张全景原始影像; 数据处理人员将采集来的影像经过第三方全景拼接软件处理, 依据预先约定的规则命名拼接后的全景影像, 由全景管理系统上传全景影像模块推送至服务器; 全景影像到达服务器端, 后端采用 DFS(分布式存储)对全景影像存储与读取操作; 分析与管理人员通过前端全景管理系统进行台账信息管理、全景影像管理、走廊影像管理分析等操作。其主要技术路线如图 7 所示。

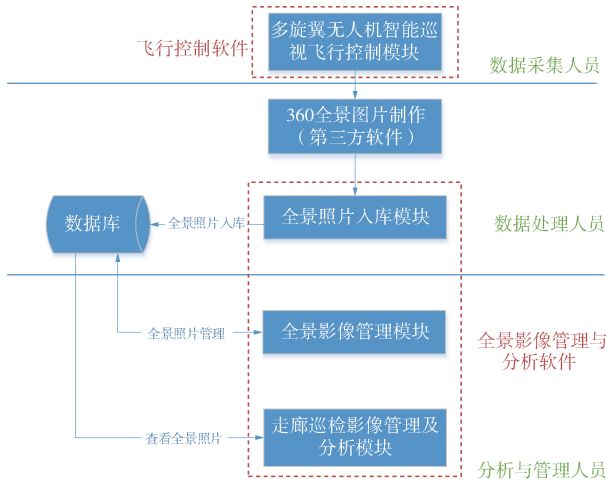


图 7 技术路线图

Fig. 7 Diagram of technical route

3.2 系统架构

配网全景管理系统架构划分为数据库层、应用支撑层、业务逻辑层、用户表现层四层^[9]。

系统服务器采用分布式服务器实现负载均衡, 减少单一服务器上的运载压力, 减轻维护的工作量与工作周期^[10]。系统文件存储采用分布式文件存储来实现系统的存储稳定性, 启用多个组别的存储服务器, 减轻存储文件的压力, 同一组别也同时配备相同的备用服务器, 即便其中一台发生问题, 另外一台也可以马上运行, 维持系统的稳定。其系统架构如图 8 所示。

3.3 全景影像管理模块

用户登陆模块: 使用账号密码登陆系统后进入全景管理页面, 获取用户基本信息, 包括用户姓名、角色、所属班组等。

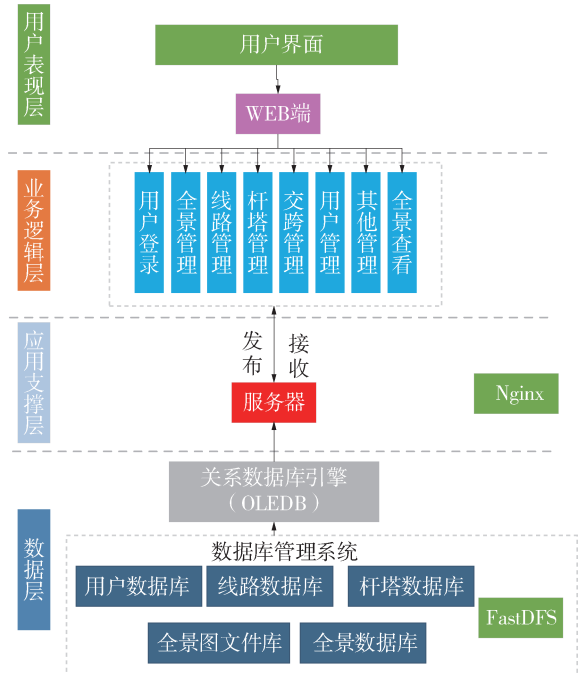


图 8 系统架构图

Fig. 8 Diagram of system architecture

全景管理模块: 上传符合命名规则的拼接后全景影像, 可对全景影像进行管理操作; 选中查看全景影像并可进行热点标注交互操作, 可开启多时期双屏对比分析。

线路管理模块: 实现对配网线路进行新增、批量导入、编辑、删除等管理操作, 可按运行班组、电压等级、线路名称等检索线路。

杆塔管理模块: 实现对配网杆塔进行新增、批量导入、编辑、删除等管理操作。

用户管理模块: 支持新建、批量导入、编辑、删除等操作; 可添加用户角色并配置权限或删除角色, 设置不同角色可操作的功能模块。

全景管理系统界面如图 9 所示。

4 结论

本文利用灵活高效的无人机对配电网线路巡视采集全景数据, 快速建立真实纹理的巡视全景三维场景, 提升三维场景处理效率及海量数据浏览效率。全自动无人机采集 APP 有效提高采集作业效率, 规范采集作业流程, 降低作业人员技术门槛, 现已采集肇庆配电网约 90 条线路杆塔全景数据, 其作业效率能够满足配电网数据采集需求。分布式存储以及采用 WebGL 技术, 明显提升全景影像访



图 9 全景管理系统界面图
Fig. 9 Interface of panorama management system

问速度以及渲染显示效果，合成全景影像(数据 10 M 左右)显示速度能保证于 1 s 以内，各大主流浏览器均可无插件直接访问。

现全景管理暂未将线路杆塔的空间位置信息纳入考虑范围内，增加空间位置信息的全景影像更有利于减少三维场景中漫游的迷失感，可与二维或三维 GIS 平台进行多源数据集成应用，提供更加直观、易于分析的辅助决策功能；服务器中已分布式存储大量多时期原始全景影像数据，因此在此基础上可利用图像识别技术，分析图像中存在的潜在危险地物，在全景场景中标记提示用户，用户亦可在场景中标记地物反馈至服务器，作为新增数据集提升识别准确率。

参考文献：

[1] 焦东来, 张海涛, 顾燕. 基于 WebGIS 的全景照片管理与展示方法研究 [J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(10): 30-32+70.
 [2] 刘正坤, 陈伦清, 王昊. 无人机辅助电网巡检作业的应用现状与思考 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(2): 115-119.
 [3] 罗映昀, 米立, 王原. 无人机在输电线路巡检中的应用 [J]. 通信电源技术, 2018, 35(12): 98-99+101.
 [4] 邹庆, 任宇鑫. 无人机配网架空线路精细化巡检平台搭建 [J]. 电工技术, 2018, 12(23): 92-93+95.

[5] 张亮, 杨善婷. 基于无人机的输电线路巡检技术研究 [J]. 山西建筑, 2018, 44(34): 202-203.
 [6] 杨喆, 邓超怡. 无人机在特高压输电线路巡检中的应用研究 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊 1): 135-138.
 [7] 宋大明, 轩元, 朱宇锋, 等. WebGL 在房屋安全信息管理系统中的应用 [J]. 现代测绘, 2017, 40(2): 42-45.
 [8] 任宏康, 祝若鑫, 李风光, 等. 基于 Three.js 的真实三维地形可视化设计与实现 [J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(10): 51-54.
 [9] 张云飞. 一种基于全景的输电线路可视化运维管理技术 [J]. 电气技术, 2018, 19(1): 61-63+67.
 [10] 屠要峰, 杨洪章, 韩银俊, 等. 基于分布式块存储系统的服务质量研究与优化 [J]. 电信科学, 2018, 34(4): 118-128.

作者简介：



HUANG W C

黄文诚(通信作者)
 1992-，男，福建福州人，广东科诺勘测工程有限公司系统研发工程师，硕士，主要从事地理信息系统软件开发工作 (e-mail) huangwencheng@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)