

DOI: 10.7667/PSPC171241

基于双目视觉监控的输电线路立体空间建模

黄俊杰^{1,2}, 杨健晟³, 刘晓波³, 胡丹晖^{1,2}, 方圆^{1,2}

(1. 国网湖北省电力公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 国家电网公司高压电气设备现场实验技术重点实验室, 湖北 武汉 430077; 3. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为了解决输电线路监控中单目视觉缺少深度信息和双目视觉实时性低的问题, 提出了一种基于双目视觉检测的优化方案。方案把传统双目视觉检测流程中监控阶段大量的计算量前移至准备阶段, 建立输电线路立体空间模型。对该方法进行了详细说明, 并利用 Matlab 对所提方法的可行性与有效性进行了实验验证。实验通过对导线坐标点三维重建、空间函数拟合和平面保护区计算, 建立了立体空间监控数据库。最后利用数据库检索对检测物进行入侵判断, 结果识别出被测物所在空间位置属于在监控区域内。因此, 所提方法可有效对输电线路空间进行建模与检测。

关键词: 输电线路; 双目视觉; 三维重建; 数据库建模

Stereo space modeling of transmission line based on binocular vision monitoring

HUANG Junjie^{1,2}, YANG Jiansheng³, LIU Xiaobo³, HU Danhui^{1,2}, FANG Yuan^{1,2}

(1. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China; 2. Key Laboratory of High-voltage Field-Test Technique of State Grid, Wuhan 430077, China; 3. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to solve the problems of lacking depth information of single vision and low real-time of binocular vision in transmission line monitoring, this paper proposes an optimized scheme based on binocular vision measurement. This scheme moves the massive calculation in traditional binocular vision measurement process from monitoring stage to preparation and builds a stereo space model of transmission line. The details of the method are described, its feasibility and validity are examined by experiment via Matlab. A stereo space monitoring database is built in the experiment after wire coordinates 3D reconstruction, space function fitting, and protected area calculation. At last, the invasion of a measured object is estimated by database retrieval. The result shows that the space location of the measured object is belong to the monitoring area. Therefore, the proposed method is effective in transmission line space modeling and measurement.

This work is supported by Key Scientific Research Program of State Grid Hubei Electric Power Company (No. 52153216001C).

Key words: transmission lines; binocular vision; 3D reconstruction; database modeling

0 引言

电力是国家的重要基础产业, 电力供应的安全是保障我国稳定发展的前提。架空输电线路作为电能的传输装置是电力系统的重要组成部分, 输电线路会受到外力破坏而造成线路故障, 引起电力系统不稳定, 因此确保输电线路的安全十分重要^[1-4]。在国家电网系统中, 架空输电线路一般处于偏远且复

杂的环境中, 这使运维人员检测输电线路困难^[5]。随着社会经济的发展, 输电线路快速增长, 运维人员的维护工作任务也随之增加。传统的运维手段主要是采用人工蹲守、群众护线和通道砍伐等方式, 然而这些处理方法耗费人力物力巨大, 但运维效果并不理想。目前也有在杆塔上安装雷达、摄像头等设备对输电线路通道进行监控, 人工通过识别监控中故障的方式来提高运维效率, 这种利用传感器远程监控对输电线路进行安全维护的方法是线路运维的一个主要发展方向^[6], 也是智能电厂必不可少的组成部分^[7]。但主观的人为因素会对检测结果造成

基金项目: 国网湖北省电力公司重点科研项目资助 (52153216001C)

影响, 而电力系统中人为因素可靠性方面的研究仍处于初步阶段^[8], 所以过多人为参与的检测方式不仅效率低, 还具有高度主观性与不确定性。

随着计算机图像处理技术的发展, 基于计算机自动识别的机器视觉技术在电力系统检测中得到了广泛的应用^[9-13]。其中文献^[10]就曾利用视频监控对导线覆冰、舞动、弧垂变化和超高树木等进行识别与分析, 他们肯定了这种方法在识别物体入侵应用的作用, 但同时也指出了这种方法会因雨滴或灰尘而引起误判^[10]。原因是在传统的单目机器视觉技术中, 光信息被采集为二维图像时会损失场景中的深度信息, 因此无法准确判断物体距离, 使得机器视觉的检测结果会受到相机拍摄位置和角度的影响, 从而容易造成监控系统误判。所以获得架空输电线路通道中检测物的深度信息, 可有效减少误报漏报的几率。

常见的获取场景深度信息的方法有两种, Kinect 方法和双目视觉法。其中 Kinect 方法是主动向检测物投射红外光, 然后采集检测物反射的红外散斑图像, 最后根据图像中不同散斑计算物体的深度信息。这种方法的优点是设备轻便、计算速度快, 但由于需要接收反射光信息, 一般只能获取一定范围内(1.2~4 m)的深度信息^[14-15]。因此, Kinect 方法并不适合监控输电线路通道这种大型场景。另一种方法是采用两个摄像机的双目视觉法, 这种方法需要两个相机对同一场景/物体进行拍摄, 通过匹配两个相机成像中的特征点, 最后计算出场景的深度信息, 这种方法的优点在于不受监控距离的限制。但是利用双目视觉技术对检测物进行三维重建需要匹配不同相机中图像的特征点, 匹配过程复杂, 运算量大, 实时性不高, 其运算速度主要取决于处理器的性能和被测场景的复杂程度^[16]。

本文将基于双目视觉检测, 对输电线路监控过程进行优化, 通过建立输电线路通道立体空间点的三维坐标数据库, 采用数据库检索的方式快速对物体入侵进行判断。该方法不仅可以解决平面监控因缺少深度信息误报的问题, 并且通过建立空间点三维坐标数据库可以有效提高检测速度。本文将基于双目视觉原理出发对传统检测流程进行优化, 并对监控的立体空间点数据库建模过程进行详细介绍。

1 双目视觉原理

1.1 双目视觉深度计算原理

双目视觉是传统二维数字摄影的延伸, 目的是从二维图像组中获得深度信息。为了计算深度信息, 需要两台相机对同一被测物体进行拍摄, 得到

具有视差的二维图像组对。图 1 所示为简单的双目视觉成像几何光学原理图, 图中右侧蝴蝶为三维世界坐标系中的被测物, 左侧蝴蝶为通过双目相机拍摄到的具有少许视差的图像组对。其中水平平行的两根虚线分别为两相机的光轴线; b 为基线, 是两光轴线间的距离; c_1 与 c_2 分别表示两个相机的光心, c'_1 与 c'_2 分别为两个相机拍摄图像的像心; f 是相机的焦距。

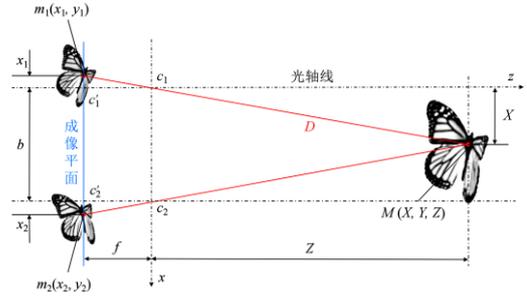


图 1 双目视觉成像几何光学原理图

Fig. 1 Schematic diagram of geometrical optics for binocular vision imaging

图中右侧蝴蝶上特征点 M 的世界坐标为 (X, Y, Z) , 该点在两个相机成像上对应的投影分别为 $m_1(x_1, y_1)$ 和 $m_2(x_2, y_2)$ 。假设物与像在同一平面上, 即 $Y=y_1=y_2$ 。根据相似三角形定理, 从图 1 中可以得到式(1)和式(2)。

$$x_1 = -X \frac{f}{Z} \quad (1)$$

$$x_2 = (b - X) \frac{f}{Z} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可以求得深度信息为

$$Z = \frac{bf}{x_1 - x_2} \quad (3)$$

式中, $(x_1 - x_2)$ 为视差, 可以通过匹配两张图像中的对应特征点获得。在双目视觉系统中, 当 b 与 f 确定时, 深度 Z 与视差成反比。

1.2 双目视觉内外参数

双目视觉的深度信息可以通过相似三角形原理获得。其中相机坐标系与世界坐标系的关系, 以及两个相机间的几何关系需要通过双目视觉系统的内外参数进行数学描述。因此, 三维世界坐标系中的一点与其在相机坐标系中的对应点可用含有内外参数的数学公式表示为

$$m = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & \mu \\ 0 & \beta & \nu \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R, t] M \quad (4)$$

式中: α 、 β 、 γ 、 μ 、 ν 为双目视觉系统的内参

数, 分别表示 x 轴上的比例因子、 y 轴上的比例因子、图像坐标与世界坐标的斜交因子、光轴光心在图像坐标 x 轴上的位置、光轴光心在图像坐标 y 轴上的位置; R 和 t 为双目视觉系统的外参数, 用来描述旋转和平移的因子。

双目系统在计算深度信息前, 需要对系统的内外参数进行标定。常见的标定方法有传统标定法、自标定法以及张氏标定法等^[17-20]。

2 双目视觉监控方案优化

传统的双目视觉监控可分为两个阶段: 第一阶段为准备阶段, 需要对双目视觉系统的内外参数进行标定, 得到相机坐标与世界坐标的转换关系, 以及双目视觉系统中两相机间的对应关系; 第二阶段为监控阶段, 通过特征点识别, 在两相机的成像中匹配识别的特征点, 再对匹配后的特征点进行三维重建。最后计算特征点与导线间的距离, 根据两点间的距离判断异物是否进入了输电线路通道的安全区域内。通常在监控阶段中需要分别对导线和检测物的特征点进行识别、匹配与三维重建, 再根据重建后两点的三维坐标计算两点间的距离。但由于匹配过程复杂, 计算量大, 往往实时性不高。

针对这个问题, 本文设计了一种基于三维坐标点数据库的立体空间模型, 目的是把监控阶段中大量复杂冗长的计算量前移至准备阶段。该方案通过对监控区域的所有空间点进行三维重建, 从而建立监控空间区域的三维坐标数据库。最终在实时监控阶段, 仅需要对检测物的特征点进行三维重建, 然后检索数据库对比检测物三维坐标与数据库空间点。若重建的三维坐标数值在数据库范围内, 则检测物闯入了监控区域, 反之则未进入。利用这种检索的方法代替复杂的匹配与重建, 便可以快速判断检测物是否进入输电线路的监控范围。本文方案的具体流程如图 2 所示。

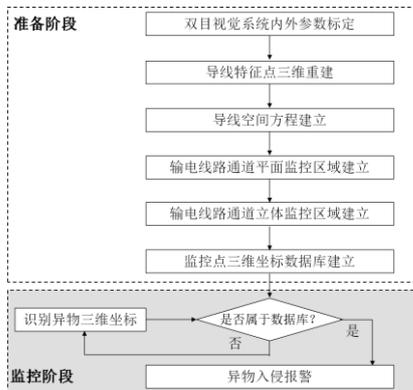


图 2 双目视觉监控流程图

Fig. 2 Flow diagram of binocular vision monitoring

- 1) 准备阶段:
 - 步骤 1 对双目视觉系统内外参数进行标定;
 - 步骤 2 识别与匹配导线的特征点;
 - 步骤 3 对导线特征点进行三维重建;
 - 步骤 4 利用重建后特征点的三维坐标建立导线的空间方程;
 - 步骤 5 确定平面监控区域范围;
 - 步骤 6 通过输电线路空间方程和平面监控区域范围, 建立输电线路的立体监控区域模型, 即监控坐标数据库。

2) 监控阶段:

- 步骤 1 对检测物特征点进行三维重建;
- 步骤 2 对比特征点三维坐标与数据库坐标;
- 步骤 3 根据对比结果判断检测物是否入侵。

3 立体空间建模

在本文优化的双目视觉空间检测的方案中, 通过对立体监控区域建模, 得到空间点三维坐标的数据库是本方案的核心。建立输电线路立体空间模型的流程如图 3 所示, 采用“点-线-面-体”的顺序逐步完善模型的方式进行建模。

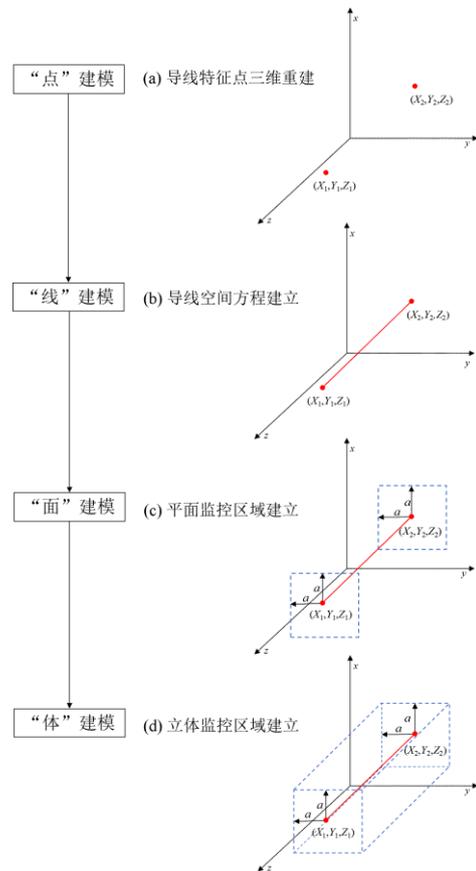


图 3 立体空间建模流程图

Fig. 3 Flow diagram of stereo space modelling

3.1 导线特征点三维重建

建立立体空间模型的第一步是对输电线路的特征点进行三维重建。首先对双目成像进行图像处理, 分割导线区域并提取骨架作为导线中心线。以导线中心线与双目极线交点为特征点进行匹配。利用双目视觉系统已标定的内外参数, 对匹配后的特征点进行三维重建, 求得导线特征点的三维坐标 (X, Y, Z) 。

3.2 导线空间方程建模

通过 3.1 节中的方法, 对导线上多个特征点进行三维重建, 根据重建后多个特征点的三维坐标拟合导线空间方程。

3.3 平面监控区域建模

架空输电线路保护区是指导线边线向外侧水平延伸并垂直于地面所形成的两平行面内的区域。在设计方案中, 首先以 3.2 节中求得的输电线路空间方程为基准, 以输电线路空间方程中一点的三维坐标为该点所在平面监控区域的几何中心。因此, 若输电线路空间方程在某一监控平面上的交点为 (X_1, Y_1, Z_1) , 则该平面监控区域的中心点为 (X_1, Y_1) 。以输电线路一定距离范围 δ 为监控区域边缘建立平面监控区域模型, 得到平面监控区域模型在 x 与 y 轴上的取值数集为

$$U(X, \delta) = \{x \mid |x - X| < \delta\} \quad (5)$$

$$U(Y, \delta) = \{y \mid |y - Y| < \delta\} \quad (6)$$

式中, δ 的取值范围根据《电力设施保护条例》规定, 在一般地区, 1~10 kV 导线的边线延伸距离为 5 m, 35~110 kV 为 10 m, 154~330 kV 为 15 m, 500 kV 为 20 m。而在厂矿、城镇、集镇、村庄等人口密集地区, 架空电力线路保护区为导线边线在最大计算风偏后的水平距离和风偏后距建筑物的水平安全距离之和所形成的两平行线内的区域。各级电压导线边线在计算最大风偏情况下, 距建筑物的水平安全距离为 1 kV 以下为 1 m, 1~10 kV 为 1.5 m, 35 kV 为 3 m, 66~110 kV 为 4 m, 154~220 kV 为 5 m, 330 kV 为 6 m, 500 kV 为 8.5 m。由上述可知, 平面监控区域的取值范围 δ 需要根据输电线路电压值和风偏影响而确定。

3.4 立体监控区域建模

立体监控区域模型是输电线路通道中立体空间范围内所有需要检测的空间点三维坐标的集合。模型建立通过 3.2 节中求得的输电线路空间方程计算立体监控模型中深度值 Z 的值域, 然后以 3.3 节中求得的对应该平面监控区域获得 X 与 Y 的坐标取值范围, 最后以 X, Y, Z 取值范围组合的所有三维坐标点集合建立立体监控区域模型, 即立体空间模型。该

模型的最终形式是由需要检测的空间点的三维坐标构成的数据库。

4 实验结果与分析

4.1 实验环境与装置

验证实验按 300 m 输电线路 1:100 的比例设计, 实验环境与装置如图 4 所示。利用左右两边的三角架模拟输电线路铁塔(相距约 3 m), 两端悬挂导线模拟输电导线。双目系统由两台工业相机, 配以 6 mm 定焦镜头, 安装在三角架 1 的云台上。图像以曝光时长 30 ms, 增益 1.25 进行采集, 自然光环境拍摄, 无辅助光源。



图 4 实验设置

Fig. 4 Experimental setup

4.2 双目系统标定

实验首先利用双目系统对标定板进行拍摄, 采集 14 张标定板的成像图片对。图像数据通过 Matlab 软件自带标定程序 stereo Camera Calibrator 进行标定, 获得双目系统的内外参数。标定后对采集的 14 组标定板进行了三维重建, 如图 5 所示。双目系统重建后的三维坐标系以左相机的光心为原点, 水平轴为 x -轴, 向右为正; 垂直轴为 y -轴, 向下为正; z -轴为深度轴, 以相机正对方向为正。

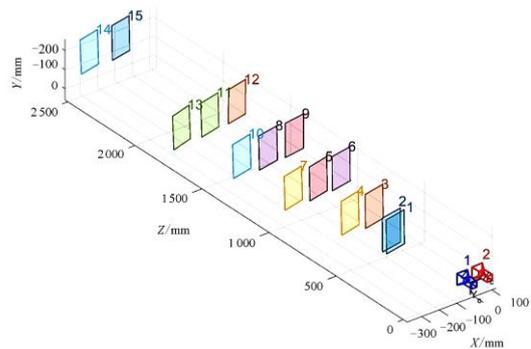


图 5 标定板三维重建

Fig. 5 3D reconstruction of calibration board

4.3 特征点三维重建

利用标定的双目系统参数对左右视图进行畸变校正与极线修正, 使采集后的左右视图的匹配点处于同一水平面。如图 6 所示, 修正后左右视图中匹配点(导线上的圆点表示)处于同一水平极线(白色水

平直线表示)上。导线上圆点为导线中心线与极线的交点,以导线中心线与极线的交点作为左右视图中导线的匹配点。

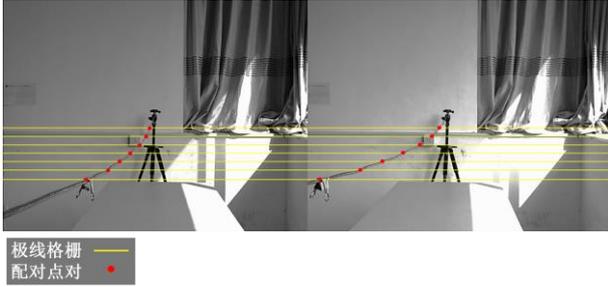


图 6 修正后左右视图通过极线格栅匹配导线点

Fig. 6 Wire points mapping via epipolar grid on the images

根据导线匹配点重建的三维坐标在三维空间中显示如图 7,重建导线坐标点以空心圆表示。重建后的 Z 坐标的范围约为 300~3 000 mm,与实验中两个三脚架间的距离相似,靠近三脚架 1 的一端有近 300 mm 的导线由于无法被两个相机同时拍摄到,因此未能重建。

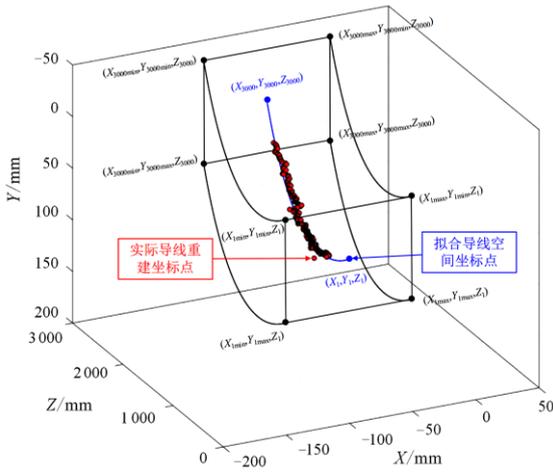


图 7 三维重建匹配点、空间导线与立体空间模型

Fig. 7 3D reconstruction of corresponding points, space wire and stereo space model

4.4 导线空间函数拟合

根据图中重建的实际导线三维坐标点,分别对坐标 X-Z, Y-Z 关系进行非线性拟合,得到

$$X = 0.000\ 000\ 5Z^2 + 0.016\ 3Z - 103.17 \quad (7)$$

$$Y = -0.000\ 02Z^2 + 0.053\ 7Z + 40.733 \quad (8)$$

拟合导线空间函数在三维空间中显示如图 7 所示。由图 7 中可以看出拟合导线(靠近红心圆点的蓝色实线)基本符合实际导线重建坐标的空间趋势,说明以非线性拟合函数近似作为导线的空间方程可行。

4.5 监控平面区域与监控数据库建模

按 1:100 比例模拟 1 kV 输电线路平面监控区域 5 m 的安全标准,实验中安全检测距离设置为 50 mm。根据 3.3 节中说明,拟合导线空间函数上的点为各深度所在平面监控区域中心点,以 Z 取值代入式(10)、式(11)中求得平面中心点坐标。

本实验中,导线距离为 3 000 mm,则以 0~3 000 mm 为 Z 取值范围,以 1 mm 为最小采样单元代入式(10)、式(11)求得拟合导线上 3 000 个坐标点,建立 3 000 个平面监控范围。Z 值最小采样单元可根据实际需要调整,最小采样单元越小,数据库越精确,但数据库越复杂。确定各平面中心点坐标(X, Y)后,以 $\delta = 50$ mm 代入式(7)、式(8)求得监控平面 X 与 Y 的取值范围。最后以深度 Z 取值,和各深度平面 X、Y 取值范围建立三维坐标点数据库,即输电线路立体空间模型,如表 1 所示。以数据库建立的立体监控区域在三维空间中显示如图 7 所示。

表 1 导线空间点三维坐标与平面监控区域范围

Table 1 3D coordinates of space points on wire and its monitored plane area

| | | | | | | | mm |
|-------|-------|---------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 序号 | Z | X | Y | X _{min} | X _{max} | Y _{min} | Y _{max} |
| 1 | 1 | -103.15 | 40.78 | -153.15 | -53.15 | -9.22 | 90.78 |
| 2 | 2 | -103.13 | 40.84 | -153.13 | -53.13 | -9.16 | 90.84 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 297 | 297 | -98.28 | 54.91 | -148.28 | -48.28 | 4.91 | 104.91 |
| 298 | 298 | -98.27 | 54.96 | -148.27 | -48.27 | 4.96 | 104.96 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 2 999 | 2 999 | -49.78 | 21.89 | -99.78 | 0.21 | -28.11 | 71.89 |
| 3 000 | 3 000 | -49.77 | 21.83 | -99.77 | 0.23 | -28.17 | 71.83 |

4.6 异物入侵判定

为了检验所建立的立体空间数据库,以图 6 中导线上的夹子作为检测物进行空间位置三维重建与入侵判定。以夹子最低点为其特征点进行匹配与三维重建,重建后三维坐标为(X_m, Y_m, Z_m)=(-107.31, 81.49, 297.34),对比数据库得

$$Z_{297} \leq Z_m \leq Z_{298} \quad (9)$$

$$X_{297\min} \leq X_m \leq X_{298\max} \quad (10)$$

$$Y_{297\min} \leq Y_m \leq Y_{298\max} \quad (11)$$

由式(12)一式(14)确定特征点三维坐标在建立的数据库内,因此导线上的夹子入侵了导线的安全范围。

5 总结

针对传统单目视觉检测因缺少深度信息容易

造成误报与双目视觉系统在监控阶段因匹配特征点耗时的问题, 本文设计了一种以数据库检索替代实时匹配、三维重建, 判定异物入侵的方法。通过“点-线-面-体-距离”的递进方式建立监控区域三维坐标点的数据库, 把检测中复杂且冗长三维重建及空间测距的计算转换为直接检索数据库的方式, 可极大地提高检测速度, 增加实时性。通过对异物特征点进行匹配与三维重建, 以重建后的三维坐标与数据库进行比对, 便可快速判断异物是否进入警报区域。通过实验检验了该方案的可行性与有效性。

建立的数据库精度与拟合空间导线上深度的最小采样单元取值有关, 取值越小, 数据库越精确。数据库精度也受到实际导线重建坐标点拟合的空间函数影响, 拟合导线的精度决定了数据库中监控范围的准确性。因此, 该方案中空间导线拟合方法还需进一步优化。拟合导线空间函数的深度最小采样单元、数据库精度、检测速度之间的相对关系还需进一步研究与分析。

参考文献

- [1] 胡毅, 刘凯, 吴田, 等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3491-3499.
HU Yi, LIU Kai, WU Tian, et al. Analysis of influential factors on operation safety of transmission line and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3491-3499.
- [2] BAI Feifei, LIU Yong, SUN Kai, et al. A measurement-based approach for power system instability early warning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 17-25. DOI: 10.1186/s41601-016-0014-0.
- [3] 汪溢, 黄曙, 马凯. 继电保护在线校核技术研究[J]. 热力发电, 2016, 45(8): 87-93.
WANG Yi, HUANG Shu, MA Kai. Rely protection online verifying technology[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(8): 87-93.
- [4] 王逊峰, 林韬, 张义莲, 等. 基于输电线路设备问题的分析与研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(11): 11-14.
WANG Xunfeng, LIN Tao, ZHANG Yilian, et al. Analysis and research of transmission line equipment failures[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(11): 11-14.
- [5] 陈海涵. 供电企业检修运维班组工作量评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 157-164.
CHEN Haihan. Research on team workload assessment of overhaul and maintenance operation of power supply enterprise[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 157-164.
- [6] 章红军, 杨忠, 黄宵宁, 等. 远程无线视频监控系统的设计与实现[J]. 应用科技, 2010, 37(8): 31-34, 39.
ZHANG Hongjun, YANG Zhong, HUANG Xiaoning, et al. Design and implementation of remote wireless video monitoring system[J]. Applied Science and Technology, 2010, 37(8): 31-34, 39.
- [7] 高海东, 王春利, 颜渝坪. 绿色智能发电厂概念探讨[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 7-9.
GAO Haidong, WANG Chunli, YAN Yuping. Discussions on the concept of green intelligent power plant[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 7-9.
- [8] 文东山, 暴英凯, 章禹, 等. 电力系统操作人因可靠性分析及其数据库系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 35-42.
WEN Dongshan, BAO Yingkai, ZHANG Yu, et al. Analysis of human reliability in power system operation and research on its database system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 35-42.
- [9] 杨永辉, 刘昌平, 黄磊. 图像和视频分析在电力设备监控系统中的应用[J]. 计算机应用, 2010, 30(1): 281-284, 301.
YANG Yonghui, LIU Changping, HUANG Lei. Application of image and video analysis in monitor system of power equipment[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(1): 281-284, 301.
- [10] 刘高, 曾懿辉. 嵌入式视频和图像识别技术在架空输电线路智能监控中的应用研究[J]. 计算机系统应用, 2013, 22(11): 58-61.
LIU Gao, ZENG Yihui. Embedded video and technology of image recognition in the intelligent monitoring of overhead transmission lines[J]. Computer System Applications, 2013, 22(11): 58-61.
- [11] 林颖, 郭志红, 陈玉峰. 基于卷积递归网络的电流互感器红外故障图像诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 87-94.
LIN Ying, GUO Zhihong, CHEN Yufeng. Convolutional-recursive network based current transformer infrared fault image diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 87-94.
- [12] 陈天恒, 杨晓静, 王伟力, 等. 基于蚁群算法的变电站视频监控联动方案优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 134-139.
CHEN Tianheng, YANG Xiaojing, WANG Weili, et al. Optimization design of substation video monitoring system based on ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 134-139.

- [13] 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 Yuhuan, WANG Cangji, et al. Application of the unmanned aerial vehicle in the transmission line inspection[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8): 62-65, 70.
- [14] 万燕, 周增刚, 李晓园. 基于双目视觉的车辆检测和车速测定[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(8): 275-278.
WAN Yan, ZHOU Zenggang, LI Xiaoyuan. Vehicle detection and speed determination based on binocular vision[J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(8): 275-278.
- [15] 杨磊, 蔡纪源, 任衍允, 等. 一种基于深度信息障碍物检测方法[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(8): 43-47.
YANG Lei, CAI Jiyuan, REN Yanyun, et al. A method of obstacle based on depth information[J]. Computer Technology and Development, 2015, 25(8): 43-47.
- [16] 王腾, 卜乐平, 黄忠义. 一种深度图像障碍物检测新方法[J]. 测绘科学, 2017, 42(6): 104-111.
WANG Teng, BU Leping, HUANG Zhongyi. A new method for obstacle detection based on Kinect depth image[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(6): 104-111.
- [17] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [18] WANG Qi, FU Li, LIU Zhenzhong. Review on camera calibration[C] // Chinese Control and Decision Conference, 2010: 3354-3358.
- [19] 王靖韬, 侯振杰. 传统相机标定方式的自动标定方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(35): 205-208.
WANG Jingtao, HOU Zhenjie. Camera self-calibration method based on traditional calibration method[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(35): 205-208.
- [20] 冯亮, 谢劲松, 李根, 等. 摄像机标定的原理与方法综述[J]. 机械工程师, 2016(1): 18-20.
FENG Liang, XIE Jinsong, LI Gen, et al. Review of camera calibration principles and methods[J]. Mechanical Engineering, 2016(1): 18-20.

收稿日期: 2017-08-17; 修回日期: 2017-11-17

作者简介:

黄俊杰(1976—), 男, 博士, 高工, 研究方向为输电线路防灾技术, 电网状态监测系统、运检管控分析系统建设与应用研究等工作; E-mail: 153758781@qq.com

杨健晟(1987—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为机器视觉检测技术、燃烧诊断技术。E-mail: 287359682@qq.com

(编辑 周金梅)