

三维激光点云数据映射下的变电站 可视化自动巡检技术

邱凯义,刘洁[†],马洪波,李净雅,方梦然

(国网信息通信产业集团有限公司北京分公司,北京 100052)

摘 要:考虑到变电站运行环境具有一定的复杂性,可视化巡检可以避免变电站在运行中出现故障,为了提高变电站巡检效率,提出了一种三维激光点云数据映射下的变电站可视化自动巡检技术。根据变电站三维激光扫描仪的数据采集原理,计算变电站到激光发射点的距离,利用三维激光的发射光束,采集变电站各个区域的点云数据,得到变电站整个场景的激光点云数据。将三维激光点云映射的平方根作为映射函数,映射变电站的三维激光点云数据。基于巡检机器人的位姿变化向量,构建巡检机器人的运动模型,根据机器人的位姿信息,得到巡检机器人的位置,通过位置更新,构建巡检地图计算函数,实现变电站的可视化巡检。实验结果表明,本文技术适用于点云缺失较低的场景,并将变电站设备的巡检范围提高到45m以上,提高了巡检效率。

关键词:三维激光;自动巡检;可视化;变电站;点云数据映射;数据采集

中图分类号:TP242

文献标识码:A

Visualization Automatic Inspection Technology of Substation Based on 3D Laser Point Cloud Data Mapping

QIU Kaiyi, LIU Jie[†], MA Hongbo, LI Jingya, FANG Mengran

(Beijing Branch, State Grid Information & Telecommunication Group, Beijing 100052, China)

Abstract: Considering the complexity of substation operation environment, visual inspection can avoid faults in substation operation. In order to improve the efficiency of substation inspection, a visual automatic inspection technology of substation based on 3D laser point cloud data mapping is proposed. According to the data acquisition principle of the three-dimensional laser scanner in the substation, the distance from the substation to the laser emission point is calculated, and the point cloud data of each area of the substation are collected by using the emitted beam of the three-dimensional laser, so as to obtain the laser point cloud data of the whole scene of the substation. Taking the square root of 3D laser point cloud mapping as the mapping function, the 3D laser point cloud data of substation is mapped. Based on the posture change vector of the inspection robot, the motion model of the inspection robot is constructed, and the position of the inspection robot is obtained according to the posture information of the robot. By updating the position, the calculation function of the inspection map is constructed to realize the visual inspection of the substation. The experimental results show that the technology in this paper is suitable for scenes with low point cloud loss, and the inspection range of substation equipment is increased to more than 45m, which improves the inspection efficiency.

Key words: three-dimensional laser; automatic inspection; visualization; substation; point cloud data mapping; data acquisition

伴随着工业 4.0 和大数据时代的快速发展,国家电网开始走向信息化和智能化,自动化的新型电网已经成为目前的主要发展目标^[1]。自动化的新型电网可以实现变电站的可视化和仿真化,便于人们进行更精细化的操作,这对电网的状态监控和后期的运营管理都有着非常大的帮助。变电站是电力系统的核心,它不但具有对电网进行分配供电的功能,还可以对电压高低进行控制^[2]。因此,如果它出现了问题,那么将对电网带来巨大的经济损失以及社会影响,因此,保持变电站的稳定运行是十分有必要的^[3]。传统巡检方法不但具有较大的工作强度和较低的工作效率,在极端气候条件下,也不能对变电站的设施进行巡视检查,难以适应不断提升的电力品质的需要。在此背景下,随着电力系统的发展,变电站智能巡检机器人随之诞生,并逐步替代耗时耗力的人工巡检。

路浩等^[4]以图论理论为基础,构建了变电站周围的电网环境模型,并在此基础上研究了巡检机器人在网络上对目标点进行温度测量时摄像机的姿态控制,提出了一种以最少耗时为优化目标的移动路径优化方法。通过蚁群迭代算法,利用新的蚁群搜索路径优化与聚类相结合的巡检站址选择方法,并通过仿真实验证明了该方法的实用性和鲁棒性,该方法可以大范围应用于变电站巡检中。刘胜等^[5]针对变电站巡检机器人在运行过程中所存在的问题,将蚁群模拟退火方法引入变电站巡检机器人中,并对其进行了优化,使其具有更好的全局寻优性能。在该方法中,通过设置不均衡的初值分布和加入信息素的动力学变化;在此基础上,利用网格方法对其进行了建模。

基于此,本文在三维激光点云数据映射下,提出了一种变电站可视化自动巡检技术,从而保证变电站的安全运行。

1 变电站可视化自动巡检技术设计

1.1 采集变电站三维激光点云数据

利用三维激光扫描技术制定变电站点云数据的扫描方案,再利用该方案采集变电站的点云数据。点云数据主要包括变电站的位置和表面信息,位置主要是依靠传感器获取的^[6],表面信息是通过摄像机采集的。变电站三维激光扫描仪的数据采集示意图如图 1 所示。

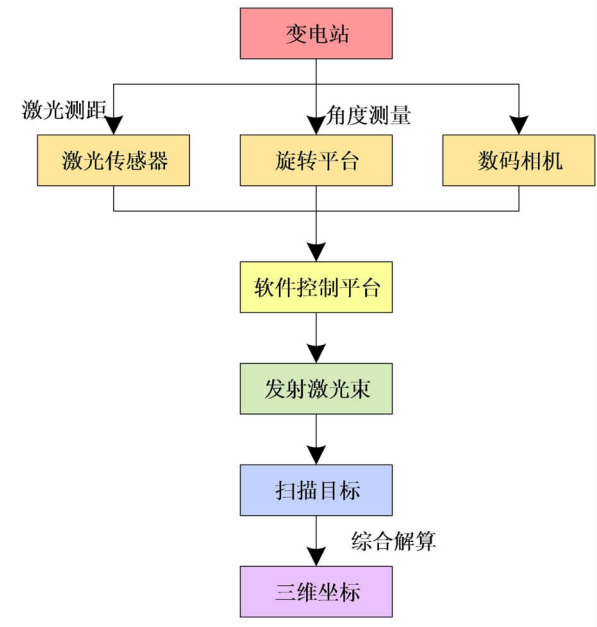


图 1 三维激光扫描仪的数据采集示意图

三维激光测距主要利用光传播的折射和反射^[7],通过计算激光点到变电站表面的折射距离和时间,来计算变电站到发射点的距离,距离 D 的公式如下:

$$D = \frac{1}{4} b^* \Delta h \tag{1}$$

其中, b^* 表示激光点的折射速度, Δh 表示激光信号到变电站的往返时间。

角度的测量是利用扫描仪以激光点的旋转平台为中心点,根据扫描仪的垂直角度 θ 和旋转角度 ϑ 获取的^[8]。根据距离和角度,如图 2 所示,计算出变电站三维激光点的坐标 (A_x, B_y, C_z) , 公式如下:

$$\begin{cases} A_x = D \cos^{-1} \theta \sin^{-1} \vartheta \\ B_y = D \cos \theta \sin \vartheta \\ C_z = D \sin \vartheta \end{cases} \tag{2}$$

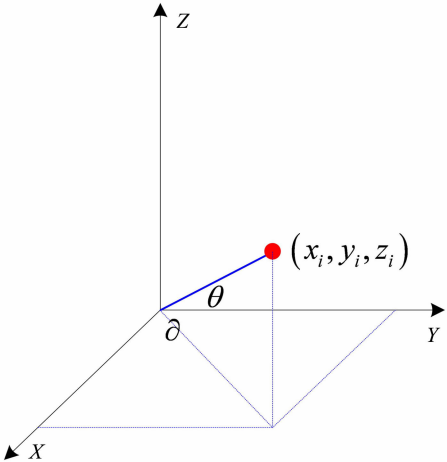


图 2 测点定位示意图

根据上面得到的测点定位原理制定扫描方案,根据三维激光的发射光束,采集变电站各个区域的点云数据,得到变电站整个场景的激光点云数据。扫描方案如图 3 所示。

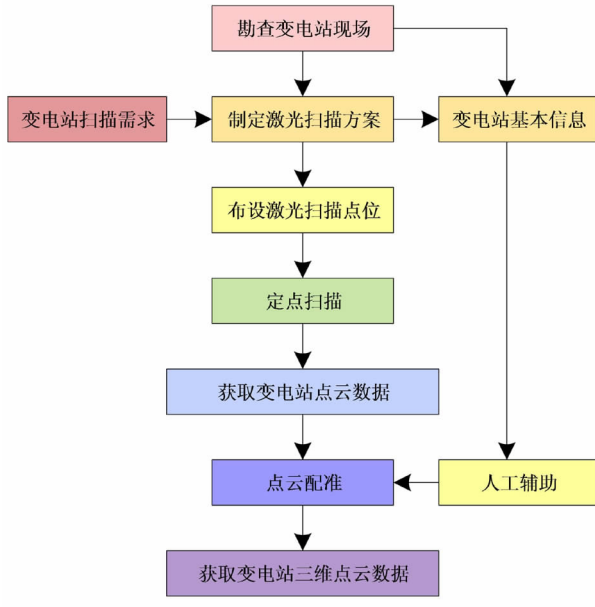


图 3 三维激光点云数据扫描方案

利用上面的扫描方案完成变电站三维激光点云数据的采集。

1.2 映射三维激光点云数据

在三维激光点云数据采集的过程中,不同视角的点云数据映射问题一直是研究的核心,为了解决传统算法准确率不高等问题,使用改进的 DE-GWO 算法,使后续的映射更加优化,同时提升了映射的精度。三维激光点云数据映射步骤如下:

Step 1: 设定三维激光点云 P 和需要映射的激光点 Q 数值,通过权重和阈值进行特征的提取。

Step 2: 使用二叉树检索方法^[9]对特征中的噪声进行去除。

Step 3: 对于 DE-GWO 算法进行初始化处理^[10],并且将 PQ 矩阵中的 5 个旋转角和 4 个平行角进行编码^[11],将三维激光点云映射的平方根作为映射函数,得到适应度函数为:

$$F(P, Q) = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^n [k_i - (Pj_i + Q)]} \quad (3)$$

其中, k_i 为三维激光点中的初始点, j_i 为映射后的三维激光点云数据。

Step 4: 对上述数据进行迭代处理,并把每次的迭代结果进行适用度匹配。如果能达到映射要求的精度结果,则停止迭代。如果不能得到点云集的初始数据,则继续进行迭代处理^[12]。

Step 5: 通过对迭代结果进行优化,使三维激

光点云数据的映射结果更为精准,如果误差小于给定的阈值,则得到的是映射的结果;否则需要重复上述操作。

根据以上步骤,对变电站的三维激光点云数据进行映射,为可视化巡检提供了三维场景支撑。

1.3 变电站可视化巡检的实现

为了实现变电站可视化巡检,采用 SLAM 构建变电站可视化巡检的路径规划地图。SLAM 算法主要用来实现巡检机器人的定位和可视化^[13]。SLAM 在变电站可视化巡检过程中主要工作如下:巡检机器人利用自身携带的传感器和摄像机,对周围的环境进行可视化信息采集,并通过变电站的巡检设备,对采集到的信息进行分析,实现变电站可视化地图的构建^[14],用来帮助巡检机器人的定位,最终达到变电站可视化巡检的目的。

为了获取变电站巡检机器人在时间 t 内的可视化数据信息,需要巡检机器人进行位姿模型的构建。变电站可视化巡检机器人的位姿变化向量为 Z_t ,如下式所示:

$$Z_t = Z_{t-1} + \Delta Z + \omega_t \quad (4)$$

式中, Z_{t-1} 表示 $t-1$ 时间段内巡检机器人的位姿信息, ΔZ 为位姿特征向量, ω_t 表示的巡检机器人的噪声干扰。

巡检机器人在时刻 t 的位置坐标为 (p_t, q_t) ,如果要获取可视化巡检机器人的具体位置,需要通过编码器来完成。

在完成巡检机器人的位姿数据采集后,构建变电站巡检机器人的运动路径模型^[15]。为了获取巡检机器人某个时间段内的路径信息,需要对巡检机器人的运动模型进行构建,定义如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \\ \Delta \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \sin \theta \cdot \Delta t \\ k \cos \theta \cdot \Delta t \\ k \Delta \beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, Δp 和 Δq 表示巡检机器人在时间 Δt 内的横向和纵向位移坐标, k 表示增量式时间 Δt 内的巡检速度, $\Delta \beta$ 表示巡检机器人在时间 Δt 内的巡检角度,速度 k 和角度 $\Delta \beta$ 的变化需要依靠编码器解析,该编码器安装于巡检机器人右轮。

根据变电站可视化巡检机器人的运动模型,获取机器人的位姿信息,得到巡检机器人的位置公式:

$$\delta = \frac{\zeta L^* \cdot \Delta \beta}{W_i + S^{\delta}} \quad (6)$$

式中, ζ 表示巡检机器人的位移路线, L^* 表示巡检机器人的巡检长度, W_i 为第 i 个坐标下的巡检机器人位姿信息, δ 为 t 时刻的巡检机器人速度, S^{δ} 为机器人的自身参数。

以式(6)的位置信息为基础,对其进行更新,即:

$$\delta = \frac{L^*}{k(M_t, \varphi_1) + g(t)^v}$$

(7)

式中, $k(M_t, \varphi_1)$ 和 $g(t)^v$ 表示在 t 时刻可视化巡检机器人受到噪声和滤波信号影响后的变量,其中 φ_1 表示巡检机器人的移动角度。

在可视化巡检定位方程式的基础上,构建巡检地图计算函数,对变电站进行巡检:

$$\vartheta_t = \frac{1}{W_i + s^*} - \frac{\delta}{(W_i + s^*)^2}$$

(8)

式中, s^* 表示巡检机器人的移动距离。

综上所述,通过构建巡检地图计算函数,实现变电站的可视化巡检。

2 实验分析

2.1 实验参数

为了验证本文技术在变电站可视化巡检中的效果和质量,在 Windows 7 操作系统下,选择 16 GB 内存、i8-3250m 型号 CPU 的计算机, MATLAB 图像处理软件进行实验。表 1 统计了变电站设备的尺寸。

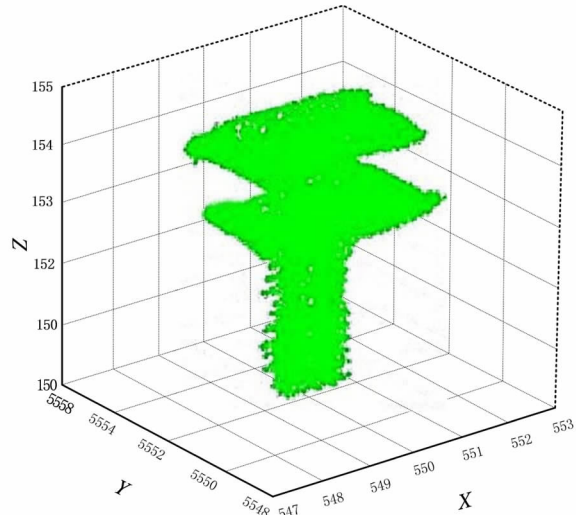
表 1 变电站设备的尺寸

设备类型	长/m	宽/m	高/m
500 kV 断路器	1.375	5.156	6.832
500 kV 电流互感器	1.317	1.284	6.273
500 kV 隔离开关	1.496	12.256	7.285
500 kV 接地开关	1.585	4.283	5.674
500 kV 避雷器	1.809	2.281	6.395
500 kV 电压互感器	0.996	1.134	6.706
500 kV 陷波器	2.204	2.315	6.284

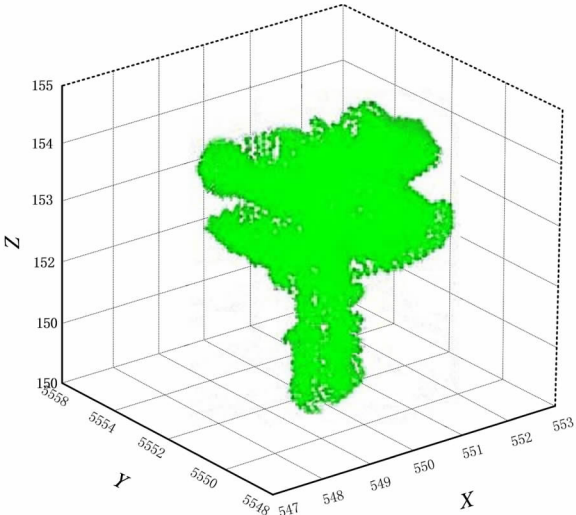
在表 1 的参数下,为了避免三维激光点云数据在映射过程中出现缺失,测试了点云缺失对变电站设备巡检的影响。

2.2 点云缺失对变电站可视化巡检结果的影响

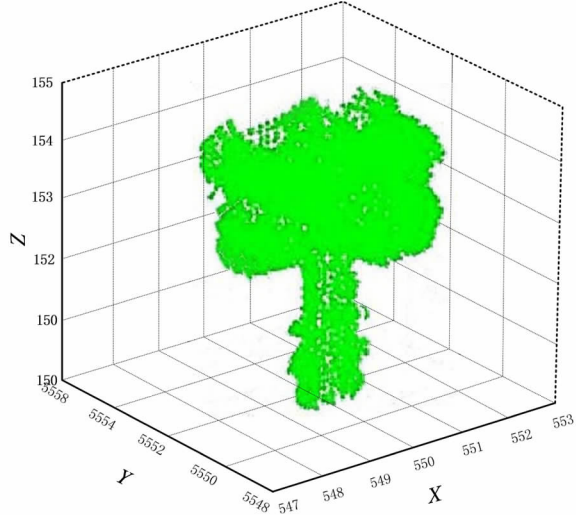
考虑到变电站所有设备获取的三维激光点云数据都是理想点云数据,但是在映射过程中会出现一部分点云数据缺失的情况,通过分析缺失的点云数据,验证本文技术的性能。本文以 500 kV 断路器为例,随机将一部分点云数据丢失,丢失程度分别设置为 10%、20% 和 30%。当点云数据的缺失程度不同时,利用本文技术对 500 kV 断路器进行巡检,得到如图 4 所示的三维图。



(a)点云数据缺失 10%



(b)点云数据缺失 20%



(c)点云数据缺失 30%

图 4 点云缺失的三维图

由图 4 的结果可知,采用本文技术对变电站设备点云数据进行缺失实验的过程中,如果点云数据的缺失程度较大,则会导致变电站可视化巡检效果变差,当点云数据的缺失程度为 30% 时,无法完成变电站的巡检任务。因此可以说明,本文技术在变电站巡检中可以应用于点云数据缺失比较低的场合。

2.3 对比分析

为了验证文中技术在变电站可视化巡检中的优越性,引入基于路网和测量约束的巡检技术和基于 ACO-SA 算法的巡检技术作对比,对表 1 中的变电站设备进行巡检,测试了各个变电站设备的巡检范围,结果如图 5 所示。

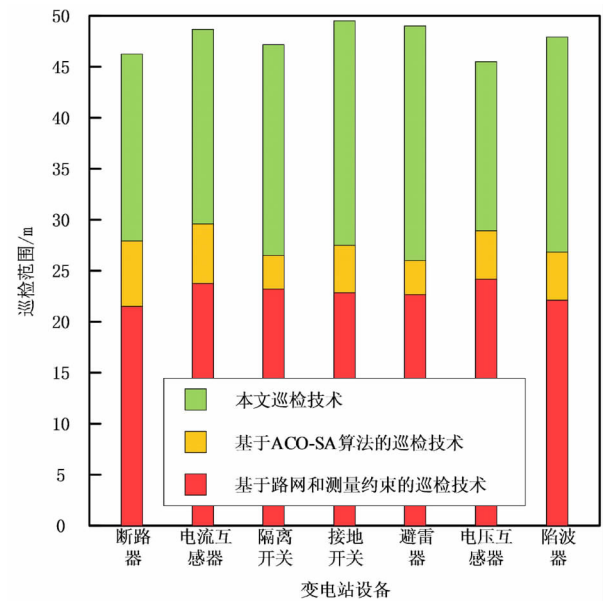


图 5 变电站设备的巡检范围

从图 5 中可以看出,采用基于路网和测量约束的巡检技术时,变电站设备巡检的范围比较小,在 20~25 m 之间,说明在路网和测量的约束下,变电站设备的巡检范围会受到一定影响,使巡检效率变低。采用基于 ACO-SA 算法的巡检技术时,由于利用蚁群算法改进了模拟退火算法,使变电站巡检范围有所增大,但是该技术容易在改进过程中出现局部最优化的问题,导致巡检范围低于 30 m。采用本文技术时,先采集了变电站设备的三维激光点云数据,通过点云数据的映射,规划变电站巡检的路径,将变电站设备的巡检范围提高到 45 m 以上,大大提高了变电站巡检的效率。

3 结 论

在三维激光点云数据映射下,提出了一种变电

站可视化自动巡检技术。通过实验测试发现,该巡检技术适用于点云数据缺失较低的场景,通过扩大变电站设备巡检范围,提高了巡检的效率。由于本文巡检技术只适用于点云缺失较低的场景,在点云数据缺失程度较高的情况下无法完成巡检任务,在今后的研究中,希望可以针对三维激光点云数据的缺失情况进行改进,研究一种适用于点云数据缺失程度较高的巡检技术。

参考文献

[1] 李游,龙伟迪,魏绍东. 基于微型红外双光机载装置的变电站无人机巡检系统研究[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2020,42(5):118—126.

[2] 董翔宇,季坤,朱俊,等. 对特高压变电站巡检机器人路径规划改进蚁群算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(18):154—160.

[3] 董诗绘,牛彩雯,戴琨. 基于深度强化学习的变电站巡检机器人自动化控制方法研究[J]. 高压电器, 2021, 57(2):172—177.

[4] 路浩,陈洋,吴怀宇,等. 受路网和测量约束的变电站巡检机器人路径规划[J]. 中国机械工程, 2021, 32(16):1972—1982.

[5] 刘胜,张豪,晏齐忠,等. 基于 ACO-SA 算法的变电站巡检机器人路径规划[J]. 南方电网技术, 2022, 16(9):75—82.

[6] 陈浩敏,姚森敬,席禹,等. 基于数据驱动的变电站巡检机器人自抗扰控制[J]. 信息与控制, 2021,50(4):385—394.

[7] 王秀丽,周鹏,侯静楠,等. 面向变电站机器人巡检路径规划中的算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(14):245—250.

[8] 李荣,栾贻青,王海鹏,等. 全向四驱变电站巡检机器人运动控制系统设计[J]. 机床与液压, 2020, 48(8):112—116.

[9] 赵小勇,陈钦柱,郑鸿彦,等. 基于道路场景理解的巡检机器人避障方法研究与应用[J]. 微电子学与计算机, 2022,39(4):118—127.

[10] 郭国栋,龚雁峰,吴迪,等. 引入 HoloLens 进行信息融合与数据挖掘的新型巡检方式及体验[J]. 中国电力, 2021, 54(7):208—216.

[11] 郑亚红,于雪庭,马少华,等. 变电站故障预警巡检机器人自主运动规划[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(1):6—11.

[12] 姚楚阳,刘爽. 一种可升降式变电站室内巡检机器人控制系统设计[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2021, 47(1):116—122.

[13] 李游,刘卫东,邓维,等. 变电站高压设备无人机巡检安全距离确定方法研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(3):76—84.

[14] 董翔宇,李安,汪太平,等. 基于局部监督深度混合模型的变电站巡检机器人道路场景识别[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(6):748—752+770.

[15] 董翔宇,张中,朱俊,等. 一种基于深度神经网络的变电站巡检机器人路面识别方法[J]. 计算机应用研究, 2020,37(S2):389—391.