

四足机器人变电站巡检目标单探测器 复合激光跟踪算法

王身丽[†], 梅春晓, 赵威, 吴军, 张芳, 夏欢

(国网湖北省电力有限公司超高压公司, 湖北 武汉 430050)

摘要:巡检环境中的光线和角度对激光束有影响,因此在跟踪变电站巡检目标时,需要对光束进行有效校正,以提升跟踪精度。为此,提出了四足机器人变电站巡检目标单探测器复合激光跟踪算法。以单探测器的测站坐标为视角,构建出全局坐标系,并结合平移参数以及旋转参数将其转换为四足机器人的测量坐标系。结合伽马算法对激光光束坐标信息进行校正,并将激光光束点位的梯度信息与位置信息进行结合,构建出位置循环矩阵。结合卡尔曼滤波算法,结合循环位置矩阵中的历史数据,对巡检目标的位置信息进行动态预测,并基于预测结果对机器人的移动速度以及位置距离进行调整,从而实现巡检目标动态跟踪。实验结果表明,采用本文方法对巡检目标进行跟踪时,跟踪结果与实际运动路径的重合度较高,具备较为理想的跟踪精度。

关键词:四足机器人;变电站巡检;激光跟踪;单探测器;伽马算法

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

Single Detector Compound Laser Tracking Algorithm for Substation Inspection Target of Quadruped Robot

WANG Shenli[†], MEI Chunxiao, ZHAO Wei, WU Jun, ZHANG Fang, XIA Huan

(Ultra-high Voltage Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430050, China)

Abstract: The light and angle in the inspection environment have an impact on the laser beam. Therefore, when tracking the inspection target of a substation, it is necessary to effectively correct the beam and improve the tracking accuracy. In this regard, a quadruped robot substation inspection target single detector composite laser tracking algorithm is proposed. From the perspective of the measurement station coordinates of a single detector, a global coordinate system is constructed, and combined with translation and rotation parameters, it is converted into the measurement coordinate system of a quadruped robot. By combining the gamma algorithm to correct the coordinate information of the laser beam, and combining the gradient information of the laser beam point with the position information, a position loop matrix is constructed. By combining the Kalman filtering algorithm with historical data in the cyclic position matrix, the position information of the inspection target is dynamically predicted. Based on the prediction results, the robot's movement speed and position distance are adjusted to achieve dynamic tracking of the inspection target. The experimental results show that when using the method proposed in this paper to track inspection targets, the overlap between the tracking results and the actual motion path is high, and it has ideal tracking accuracy.

Key words: quadruped robot; substation inspection; laser tracking; single detector; gamma algorithm

收稿日期:2024-04-17

作者简介:王身丽(1978—),女,湖北武汉人,本科,正高级工程师,研究方向:输电运维,输电防震减灾,输变电设备带电检测等。

[†]通信联系人, E-mail: ojugevm@163.com

四足机器人因其出色的地形适应能力和稳定性,成为变电站巡检的理想选择。四足机器人能够在复杂多变的环境中自由行走,对变电站内的设备进行全面、细致的巡检^[1]。然而,要实现这一目标,就需要解决机器人在巡检过程中的精确定位和跟踪问题。激光跟踪技术作为一种高精度、高速度的定位方法,为四足机器人提供了有效的解决方案。然而,单一的激光跟踪技术在复杂环境下容易受到干扰,因此,研究复合激光跟踪算法,提高跟踪的稳定性和准确性,对于实现四足机器人在变电站的精准巡检具有重要意义。

国内外学者在激光跟踪技术方面进行了大量的研究。例如,文献[2]利用激光传感器获取目标的信息,并通过光电探测设备对目标进行跟踪。然而,该方法的局限性在于,当面对复杂环境或目标表面反射性能不佳时,激光传感器的测量精度会受到影响,从而导致跟踪精度不佳。此外,该方法对于目标的快速移动和突变情况也缺乏有效的应对策略。文献[3]通过精确测量激光束与目标之间的位置关系,实现了对目标的稳定跟踪。但是该方法对于目标表面的光学特性有着一定要求,对于某些特殊材质或颜色的目标,可能无法实现有效地跟踪。文献[4]利用巡检机器人搭载的边缘计算设备对目标进行实时跟踪和处理。但是由于巡检机器人在复杂环境中的运动能力受限,以及边缘计算设备的处理能力有限,该方法在面对复杂多变的跟踪任务时可能会表现出跟踪精度不佳的问题。文献[5]通过高速单光子探测器实现对目标的快速响应和精确跟踪。但是由于单光子探测器本身的性能限制,如探测效率、暗计数率等问题,该方法在实际应用中可能会受到一定限制。此外,复合跟踪控制系统的设计也需要考虑多种因素,如不同传感器之间的数据融合、控制策略的优化等,这些因素都可能影响跟踪精度。

为此,结合单探测器这一设备,针对四足机器人变电站巡检目标进行激光跟踪,通过构建变电站动态巡检目标坐标系,并结合探测位置循环矩阵,对巡检目标的移动路线进行预测与跟踪度。

1 四足机器人变电站巡检目标单探测器复合激光跟踪算法

1.1 四足机器人变电站动态巡检目标坐标系构建

在变电站巡检任务中,四足机器人需要能够精确识别并定位目标设备,这要求机器人具有明确的

参照系来确定目标与自身的相对位置关系。因此为对机器人提供一个统一的空间定位框架,本文针对动态巡检目标坐标系进行构建,从而保证后续激光跟踪定位的精准性^[6]。对此,以机器人所搭载的单探测器的测站坐标系为视角,所构建出的统一测量坐标系如图 1 所示。

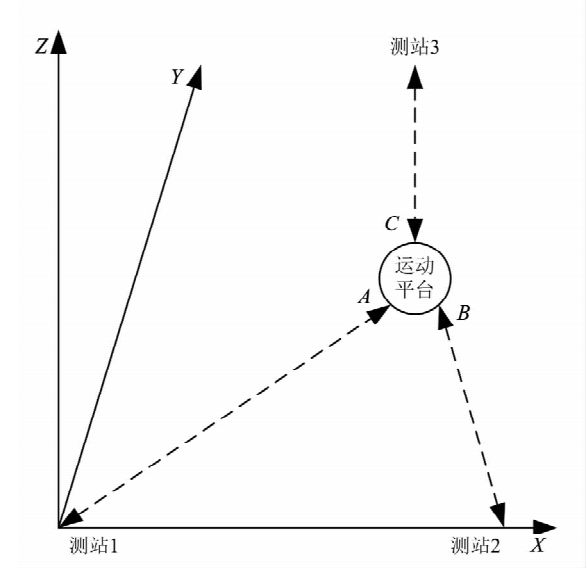


图 1 单探测器测站坐标系示意图

在上述坐标系中,本文以三个测站下对于运动目标的探测结果为核心,获取相同时刻下同一运动目标各个特征点的三维坐标值,从而实现动态跟踪^[7]。对此,考虑到测站坐标系属于全局坐标系,无法应用到单个探测设备的坐标系中,因此需要将上文中的测站坐标系 $O-XYZ$ 进行转换,从而得到测量坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 。假设四足机器人所搭载的单探测器的定向点为 P_i , (R_x, R_y, R_z) 代表测量坐标系的旋转参数, (X_i, Y_i, Z_i) 和 (X'_i, Y'_i, Z'_i) 分别代表定向点在测站坐标系以及测量坐标系中的对应坐标,那么可以得到坐标系转换表达式如下所示。

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_i - X_0 \\ Y'_i - Y_0 \\ Z'_i - Z_0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中, a_i, b_i, c_i 分别代表三个坐标轴对应的坐标旋转参数函数, (X_0, Y_0, Z_0) 代表坐标系的平移参数,由此可以对距离观测值进行求解,具体求解表达式如下所示。

$$S_i = \sqrt{(X'_i - X_0)^2 + (Y'_i - Y_0)^2 + (Z'_i - Z_0)^2} \tag{2}$$

其中, S_i 代表距离观测值,该值代表定向点与目标点之间的空间距离。

以单探测器的测站坐标为视角^[8],构建出全局坐标系,并结合平移参数以及旋转参数将其转换为测量坐标系,从而得到距离观测值。

1.2 巡检目标激光探测循环位置矩阵构建

单探测器所探测得到的巡检目标位置扫描数据可以在测量坐标系中进行展示。为对激光扫描数据进行处理,从而得到巡检目标与机器人之间的相对位置关系,本文对激光探测循环位置矩阵进行构建^[9]。该矩阵中包含了激光探测器所获取的扫描数据,具体包括激光束在不同角度或位置上的反射信息,能够对目标位移的形状、位置以及姿态进行反馈^[10]。

考虑到单探测器在实际工作场景中可能会受到可见光的影响而导致激光光束出现偏差,因此本文结合伽马算法对激光光束坐标下的图像信息进行校正,具体校正表达式如下所示。

$$\mathbf{G}(x, y) = \mathbf{G}'(x, y)^T \quad (3)$$

其中, $\mathbf{G}'(x, y)$ 代表校正前的激光光束点坐标下的图像数据, $\mathbf{G}(x, y)$ 代表校正后的图像, T 代表伽马算法的梯度幅值^[11]。可以针对校正结果分别计算出图像的梯度参数以及梯度方向,其具体计算公式如下所示。

$$\begin{cases} |\mathbf{G}(x, y)| = \frac{\sqrt{\mathbf{G}_x(x, y)^2 + \mathbf{G}_y(x, y)^2}}{\mathbf{G}'(x, y)^2} \\ \alpha(x, y) = \tan\left(\frac{\mathbf{G}_x(x, y)}{\mathbf{G}_y(x, y)}\right) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $G_x(x, y)$ 和 $G_y(x, y)$ 分别代表激光光束点坐标下图像在水平方向以及垂直方向上的梯度参数, $\alpha(x, y)$ 代表实际梯度方向^[12]。假设激光扫描点数为 N , 那么可以激光探测循环位置矩阵的尺寸为 $M \times N$, M 代表巡检过程中的扫描次数, 由此本文构建出的激光位置矩阵表达式如下所示。

$$\mathbf{P} = \alpha(x, y) \cdot \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1N} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{M1} & l_{M2} & \cdots & l_{MN} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, l_{ij} 代表在第 j 次扫描中第 i 个激光点的位置信息。将每次扫描获取的位置数据更新到循环位置矩阵的对应位置, 即可构建出循环位置矩阵^[13]。

通过上述步骤即可构建出关于激光位置信息的循环矩阵, 通过将激光光束点位的梯度信息与位置信息进行结合, 并对矩阵内容进行循环更新, 可以实时反映出目标在巡检过程中的位置变换。

1.3 位置数据预测与目标跟踪流程设计

利用循环位置矩阵中的历史位置数据, 本文结合卡尔曼滤波算法对目标在未来时刻的位置进行预测, 从而帮助机器人提前调整运动轨迹, 确保能够准确实现目标跟踪。对此, 本文所提出的基于单探测器的巡检目标复合激光跟踪流程如图 2 所示。

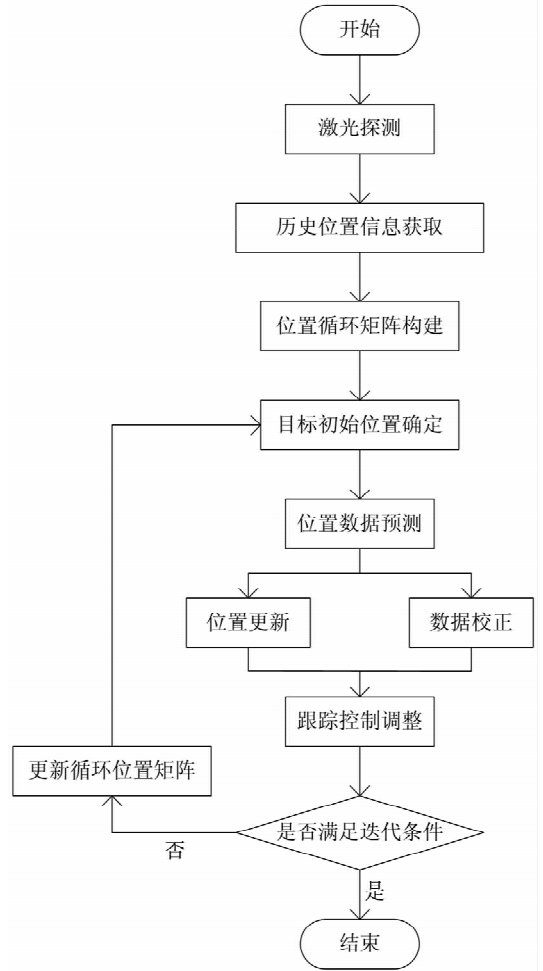


图 2 巡检目标复合激光跟踪流程

通过激光探测器获取目标的初始位置数据, 并将其存储到循环位置矩阵的第一列。同时, 根据这些初始数据, 确定跟踪算法的初始参数和状态^[14]。假设初始位置集合为 $P_0 = \{p_{10}, p_{20}, \dots, p_{n0}\}$, 其中 p_{i0} 代表第 i 个激光点在初始时刻下的位置数据。结合卡尔曼滤波法对目标未来时刻的位置进行预测, 具体预测表达式如下所示。

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{F}\mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{t-1} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{F}$ 代表状态转移矩阵, $\mathbf{B}$ 代表控制矩阵, $\mathbf{x}_t$ 代表巡检目标位置信息的预测结果, $\mathbf{x}_{t-1}$ 代表历史位置信息, $\mathbf{u}_{t-1}$ 代表历史状态向量。在完成巡检目标位置预测后, 在每次巡检过程中, 实时获取激光探测器的位置数据, 并将其与预测位置进行比较。如果两者之间的差异超过一定阈值, 则使用

实时数据对预测位置进行校正,并更新循环位置矩阵。并结合更新结果,采用式(2)计算出目标与机器人之间的相对位置和距离。并对机器人的移动速度以及移动方向进行调整,确保机器人能够稳定地跟踪到目标。

通过结合卡尔曼滤波算法与循环位置矩阵中的历史数据,对巡检目标的位置信息进行动态预测^[15],并基于预测结果对机器人的移动速度以及位置距离进行调整,从而实现目标的动态跟踪。将本节内容与上述提到的坐标系转换以及循环位置矩阵等相关内容进行结合,完成复合激光跟踪算法设计。

2 实验论证

2.1 实验说明

选取了两组常规的巡检目标跟踪方法作为对比对象,分别为基于机器视觉的巡检目标跟踪方法,以及基于卷积网络的巡检目标跟踪方法。通过构建实验平台,采用三种跟踪方法对同一个巡检目标进行动态跟踪,对比不同方法的实际跟踪效果。

2.2 实验对象

本次实验以变电站中的关键设备以及工作人员作为巡检目标,通过采用四足机器人搭载单探测器,并在探测器中安装半导体激光器,从而获取巡检目标的实时位置信息。

选择 SPD-046B 单探测器作为主要探测设备,由此搭建出的巡检设备结构如图 3 所示。

选用探测器以及激光器的具体参数配置如表 1 所示。

表 1 探测器及激光器的具体参数配置

设备名称	特性参数	数值
SPD-046B 单探测器	光谱响应范围	100~1100 nm
	响应度	1.0×10^4 V/W
	同轴度	≤0.1 mm
WP-LA 半导体激光器	发射波长	1064 nm
	最大光束发散角	18 mrad
	最大峰值功率	45 W
	最大脉冲升降时间	10 ns

针对上述探测设备参数,本文对变电站巡检目标的移动路径进行了提前规划,以便于后续得到激光跟踪结果后能够进行准确对比,具体规划结果如下图所示。

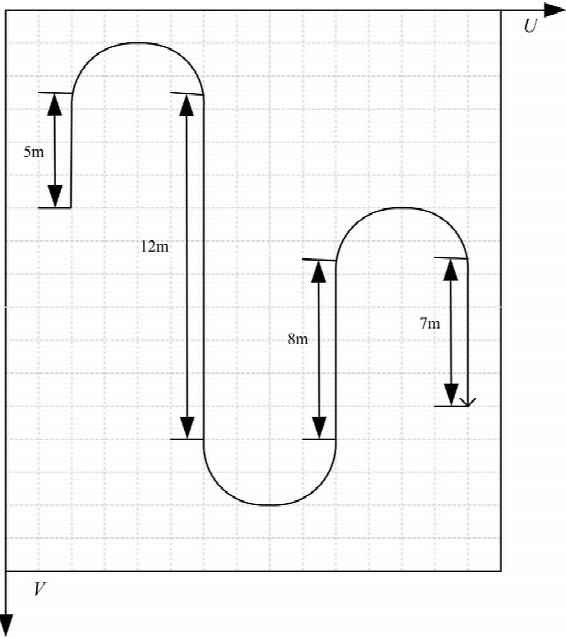


图 4 巡检目标移动路径规划结果

本文设定伽马算法的梯度幅值为 0.5,分别采用三种算法对上述巡检目标进行动态跟踪,并在实验结束后,对不同方法的实际跟踪结果进行记录,从而实现跟踪性能的有效对比。

2.3 跟踪精度结果对比

采用本文方法对巡检目标进行动态跟踪后,所得到的跟踪结果如图 5 所示。

通过上述实验结果可以看出,本文方法可以针对巡检目标进行精准跟踪,激光光束跟踪点与巡检目标移动路线较为接近。为提高实验结果的对比



图 3 四组机器人搭载设备结构

比性,本次实验以不同方法的跟踪结果与巡检目标路径的重合度作为对比指标,用于衡量不同方法的实际跟踪精度。具体实验对比结果如表 2 所示。

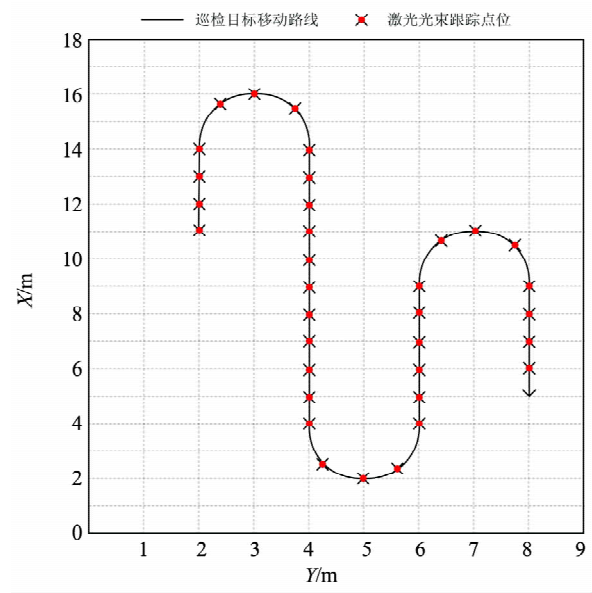


图 5 本文方法下的激光跟踪结果

表 2 不同方法下的跟踪路径与实际路径重合度对比结果

点位编号	本文方法	常规方法 A	常规方法 B
01	0.95	0.75	0.61
02	0.93	0.72	0.62
03	0.95	0.64	0.64
04	0.92	0.79	0.59
05	0.90	0.62	0.60
06	0.89	0.65	0.63
07	0.96	0.63	0.59
08	0.94	0.71	0.58
09	0.91	0.62	0.64
10	0.87	0.76	0.67
11	0.90	0.74	0.59
12	0.89	0.78	0.63

通过上述实验结果可以看出,在针对相同的巡检目标进行跟踪时,不同方法的实际跟踪法精度也有所不同。通过数值上的对比可以较为明显地看出,本文方法在实际跟踪效果上明显优于两种常规的跟踪方法,算法跟踪结果与目标的运动轨迹较为接近。

3 结 论

对四足机器人变电站巡检目标单探测器复合激光跟踪算法进行了深入研究,结合单探测器设备,实现了对变电站巡检目标快速探测与定位,同时复合激光跟踪算法的运用,有效提高了跟踪的稳定性和精确度,使得四足机器人在实际巡检工作中能够更好地应对各种挑战,提升机器人在复杂环境下的巡检效率和准确性。

参考文献

[1] 罗骏杰,董悦,潘亦辰. 变电站智能巡检机器人多目标识别方法研究 [J]. 电气技术与经济, 2024(1): 49—52.

[2] 王玲维,王华,黄汉云. 基于激光传感技术的光电探测设备隐蔽目标跟踪方法 [J]. 激光杂志, 2023, 44 (10): 173—177.

[3] 刘丹,廖俊东. 基于位置探测器的高精度激光跟踪系统 [J]. 激光杂志, 2023, 44 (8): 216—220.

[4] LI N, LU J, CHENG X, et al. Target tracking method for transmission line moving operation based on inspection robot and edge computing[J]. International Journal of Information Technologies and Systems Approach (IJITSA), 2023, 16 (3): 1—15.

[5] 徐乐风,孙彬,徐鲁波,等. 基于改进高速单光子探测器的复合跟踪控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (3): 155—161.

[6] 谢幸生,张永挺,吴启明,等. 变电站无人机巡检的动态目标跟踪方法 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (7): 402—406.

[7] 焦峰,梁文科,张鑫景,等. 基于 MPC 的煤矿巡检机器人轨迹跟踪技术研究 [J]. 煤炭技术, 2022, 41 (5): 212—215.

[8] 申丽芳,李莹. 基于窄带物联网的巡检机器人目标跟踪控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (4): 98—102.

[9] 伍鹏,卢朝成,颜真,等. 基于 GPS 定位技术的电力巡检目标实时跟踪平台设计 [J]. 导航与控制, 2022, 21 (2): 48—55.

[10] 张群,刘博,华康健,等. 基于单元探测器的激光跟踪技术研究 [J]. 光学与光电技术, 2022, 20 (2): 105—112.

[11] 车红娟,高学山,赵鹏,等. 火灾预警巡检机器人轨迹跟踪控制 [J]. 广西科学院学报, 2021, 37 (4): 346—353.

[12] 刘健,刘巍伟,臧延旭. 基于激光测量技术的远距离目标高精度跟踪研究 [J]. 激光杂志, 2021, 42 (11): 60—64.

[13] 杨娜,陈再胜,王颜霞. 变电站巡检定位跟踪的智能化应用研究 [J]. 自动化仪表, 2021, 42 (10): 83—87+93.

[14] 韩建峰,赵志伟,宋丽丽. 一种基于深度学习的公路巡检无人机实时目标跟踪算法 [J]. 光电子·激光, 2021, 32 (9): 927—934.

[15] 金书奎,寇子明,吴娟. 煤矿水泵房巡检机器人路径规划与跟踪算法的研究 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50 (5): 253—262.