

带电跨越施工作业安全距离检测方法 及应用研究

戚立峰, 瞿业明, 李洪兵

(浙江中新电力工程建设有限公司承装分公司, 浙江 杭州 311200)

摘要: 带电作业安全距离监测对于保证人员安全、提升跨越施工安全性和施工效率具有重要意义。为此, 从图像处理和空间位置识别的角度出发, 采用双相机进行带电作业图像实时拍摄, 基于两步法进行了相机标定, 建立了带电作业空间距离计算模型, 基于无线通信模块提出了一套带电作业远程监测和安全管控方法, 最后通过仿真实验对所提方法的合理性进行了验证。仿真结果表明, 所提方法能够有效实现带电作业安全距离的实时监测, 并且具有推广至各种不同恶劣工况和塔型的潜力。研究结果可为输电线路带电建设施工过程中的安全距离监测提供参考。

关键词: 带电作业; 安全距离; 图像识别; 输电线路建设

Research on detection method and application of live crossing construction safety distance

QI Lifeng, QU Yeming, LI Hongbing

(Zhejiang Zhongxin Power Engineering Construction Co.,Ltd.,Contracting Branch, Hangzhou 311200, China)

Abstract: It is important to improve the safety and safety of construction personnel. For this reason, from the perspective of image processing and spatial position recognition, this paper uses dual cameras to take real-time live working images, calibrates the camera based on two-step method, establishes the space distance calculation model of live working, and puts forward a set of remote monitoring and safety control methods of live working based on wireless communication module. Finally, the rationality of the method is verified by simulation experiments. The simulation results show that the proposed method can effectively realize the real-time monitoring of live working safety distance, and has the potential to be extended to various harsh working conditions and tower types. The research results can provide a reference for the safety distance monitoring in the construction process of transmission line with points.

Key words: live working; safe distance; image recognition; transmission line construction

0 引言

带电作业是在用户不停电情况下进行的电力建设、维护等工作, 其目的是提升跨越施工建设效率、提高电网运行的可靠性和经济性, 其中保

障工人的人身安全是带电作业过程中至关重要的问题^[1-3]。

早年的带电作业是由站在地面上的工作人员在施工现场进行监控和警告, 显然肉眼监视具有很大误差, 难以定量分析。随着计算机视

觉技术的发展,智能视觉监控技术得到了广泛的应用,视觉识别涉及图像处理、图像分析、机器视觉、模式识别和人工智能等,是一个综合性的跨学科问题,也是一个极具挑战性的前沿领域^[4-6]。目前视频监控设备已广泛应用于公路、铁路监控、冶金、建筑和医疗等工程领域^[7-10],为视频监控系统在带电作业领域的应用奠定了基础。

本文基于图像处理和空间位置识别技术,利用摄像机将三维现场信息转换为二维图像信息,并通过算法寻找二者之间的对应关系,计算出作业人员与带电体之间的实际距离。在此基础上根据安全条例的要求,使用视频重叠技术在图像上标记相应的报警区域。一旦作业人员进入报警区,报警系统立即发出警报,达到施工过程中的安全保护目的。研究结果可为带电作业施工过程中的安全距离监测和管控提供参考。

1 带电作业空间距离计算模型

1.1 双相机校准模型

一般而言,摄像机模型可以分为两类:线性模型和非线性模型。线性模型即针孔成像模型,如图1所示。实时工作场景中任意点 P 在图像中的位置 p 为相机光学中心 O 与 P 的连接线与图像平面的交点。这一图像点与实际点的关系称为中心关系。

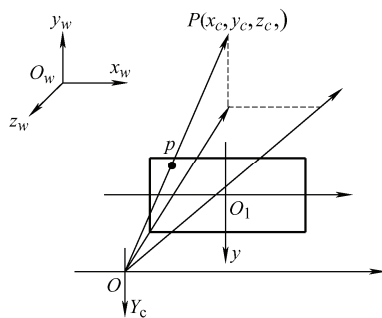


图1 相机成像模型

Fig. 1 Camera imaging model

其中三维坐标系模型(X_w, Y_w, Z_w)和图像坐标

系(u, v)可以得到二者转换关系如下

$$S \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K[Rt] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, S 为尺度因子; K 为相机内部参数; R 为 3×3 正交单位矩阵(旋转矩阵); t 为三维平移向量。

由于相机加工误差和装配误差的存在,使得实际镜头畸变程度不同,导致工作场景中物体的图像在镜头畸变的影响下产生误差。考虑镜头误差的模型为非线性相机模型,则镜头误差可以表示为

$$\begin{cases} \frac{X_d + \delta_x}{f} = \frac{r_{11}x_w + r_{12}y_w + r_{13}z_w + t_x}{r_{31}x_w + r_{32}y_w + r_{33}z_w + t_x} \\ \frac{Y_d + \delta_y}{f} = \frac{r_{12}x_w + r_{22}y_w + r_{23}z_w + t_y}{r_{31}x_w + r_{32}y_w + r_{33}z_w + t_z} \end{cases} \quad (2)$$

式中, δ_x, δ_y 表示相机的畸变系数,包括径向畸变、切向畸变和薄棱镜畸变等。

一般情况下,线性模型采用解析方法来求得方程的解析解,具有计算简单、运算速度快的优点,但准确度不高。与之相比,非线性模型能够准确地表达相机成像的繁杂过程,但往往需要配合非线性优化算法进行迭代求解,其计算过程极其复杂,鲁棒性较低。

1.2 相机标定方法

近年来,国内外学者对摄像机的标定方法进行了大量广泛而细致的研究。现有的相机标定技术基于不同的标定方法,可以分为传统标定方法和自标定方法两大类。传统的标定方法包括采用优化算法的标定方法、采用变换矩阵的标定方法、考虑失真补偿的两步标定方法和辛普森双平面法等,但是传统的标定方法已经不能适应复杂的环境。因此研究人员提出了自标定方法,自标定技术包括绝对二次曲线和最终变换求解 Kruppa 方程的方法、分层渐进标定方法、基于二次曲面的自标定方法和主动视觉标定方法^[11-12]等。目前国内比较常用的标定方法有直接非线性法、直接线性变换法和两步法^[13-14]。

直接非线性法主要采用迭代法求解方程组,

这种方法充分考虑了成像过程中所发生的各种相机畸变。同时其误差模型比较精确,结果的准确度很高,但对初值的要求也较高,如果初始值不够好,则会导致求解过程的稳定性差,无法得到收敛的结果。

直接线性法主要用于求解线性方程,以此求得相机的内外参数,其关键是利用继电器参数将原来非线性方程组中的变量重新组合成一组新的变量,形成线性方程组,然后用最小二乘法求出继电器参数,即求出原变量值。因此求解线性方程组的解不需要迭代运算,能够提高计算速度,但有时方程组本身可能会忽略相机的系统误差,使得误差标定部分存在不足。

两步法进行相机标定时,考虑了图像变形问题,并加入了非线性因素的影响。首先采用直接线性法或透视变换矩阵法计算相机参数,然后在考虑径向畸变的情况下采用优化算法进一步提高计算准确度。该方法没有考虑切向畸变和其他类型的畸变,提高了准确度限制。此外该方法还需要对主点坐标进行预标定,并需要一套较为精密的辅助仪器。对比各种方法的优缺点,本文选用两步法进行摄像机标定,基于式(1)稍加改变即可得到直接线性变换法的方程,即

$$\begin{cases} u = \frac{l_{11}x_w + l_{12}y_w + l_{13}z_w + l_{14}}{l_{31}x_w + l_{32}y_w + l_{33}z_w + l_{34}} \\ v = \frac{l_{21}x_w + l_{22}y_w + l_{23}z_w + l_{24}}{l_{31}x_w + l_{32}y_w + l_{33}z_w + l_{34}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, l_{ij} 为直接线性变换法的消弱系数,包含摄像机的内外参数,求解过程中可以令 l_{34} 等于 1,这样一来式(3)就变为由 11 个未知参数组成的方程组,利用三维坐标和 n 个($n > 5$)控制点的图像坐标,通过最小二乘法即可计算得到系数。考虑到摄像机的非线性畸变,可得

$$\begin{cases} u + \delta u(u, v) = u_c = \frac{l_{11}x_w + l_{12}y_w + l_{13}z_w + l_{14}}{l_{31}x_w + l_{32}y_w + l_{33}z_w + l_{34}} \\ v + \delta v(u, v) = v_c = \frac{l_{21}x_w + l_{22}y_w + l_{23}z_w + l_{24}}{l_{31}x_w + l_{32}y_w + l_{33}z_w + l_{34}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, δ_u 、 δ_v 为像点(u, v)的透镜畸变; (u_c, v_c)

为标定后的像坐标。

对于图像误差模型,可采用国际上比较常用的 Tsai 和 Weng 方法建模。通过以上标定方法,可在保证高准确度的条件下,有效地计算出相机的内外参数以及系统误差系数。

1.3 任意空间点距离计算模型

带电跨越施工作业过程中,需要在图像中定义一个矩形报警区域,因此需要使用摄像机来找到带电物体的三维坐标。将点的空间坐标设为 $P(x_w, y_w, z_w)$,从两个不同拍摄角度取点的图像,设拍摄后得到的图像点的坐标为(u_1, v_1)和(u_2, v_2)。首先需要消除系统误差,通过如下公式实现

$$\begin{aligned} u'_1 &= u_1 - \delta u_1, u'_2 = u_2 - \delta u_2 \\ v'_1 &= v_1 - \delta v_1, v'_2 = v_2 - \delta v_2 \end{aligned} \quad (5)$$

联立式(3)可得

$$\begin{aligned} [u'_1 - l_1]x_w + [u'_{10} - l_2]y_w + [u'_{11} - l_3]z_w + [u - l_4] &= 0 \\ [v'_1 - l_5]x_w + [v'_{10} - l_6]y_w + [v'_{11} - l_7]z_w + [v - l_8] &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

将(u'_1, v'_1)、(u'_2, v'_2)代入式(6),得到由四个方程组成的新方程组,采用最小二乘法即可确定 P 点的三维坐标 $P(x_w, y_w, z_w)$ 。利用该方法可以得到图像中任意点的三维坐标,从而确定任意两点的空间距离。

2 带电作业安全距离控制方法

基于上述原理,可以根据施工时的现场图像得到三维空间中人与带电体的实际距离,这个距离应该大于带电作业的最小安全距离,以保证工作人员的安全。带电作业的最小安全距离包括最小电气距离和安全施工范围。在国际电工技术委员会(IEC)标准中,最小电气距离是指在带电作业过程中防止发生电击穿的最小间隙距离。通过本文的方法得到带电物体的空间坐标后,就可以得到施工安全范围边界的三维坐标。确定三维坐标时,首先标定相机的外部参数和内部参数;然后通过视频图像叠加技术计算出图像中安全区域的边界。此处可以设置两个安全区:其中一个安全

区有一定的安全裕量,当工作人员超出该区域范围时自动运行警报,提醒可能出现的危险;另一个就是电击穿安全区域。

根据跨越施工的工作现场实际情况,可在多个位置定点设置摄像头,在实时监控带电作业时从多个角度捕捉图像。实时监控需要保证摄像机内部电源和无线接收器正常工作,无线接收器与主控计算机进行信息通信,将工作现场的情况传输给计算机。主控计算机可以安装在监控车内或主控制中心,以实现带电作业的远程监测和安全控制。

监控设备布置的原理如图2所示,点A和点B表示布置摄像机的位置。摄像机A设置在输电杆塔上,摄像机B设置在地面上,这两台带局部报警装置的摄像机可以从不同角度对工作现场进行监控;C点代表监控车辆,车辆位置可以离开施工地点,通常施工车辆停留在距离杆塔不远的道路上。

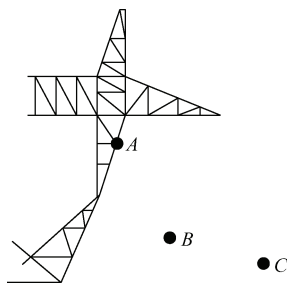


图2 监测设备布置示意图

Fig. 2 Layout of monitoring equipment

3 仿真实验

3.1 实验步骤

(1) 相机校准

图像上控制点的获取:在完成施工区域的图像标定之后,就可以通过 Harris 检测法来检测标定物的边角。这种方法通过计算每个像素的均方梯度矩阵的一阶差分图像,来获得边角的特征值以进行分析。由于实际工况的限制,需要消除一些干扰点,这些干扰点对应于它们各自的空间坐标。这样一来就可以避免由于点位置的变化导致的图像点与对应空间点不匹配的现象,标定物的

灰度空间示意图如图3所示。

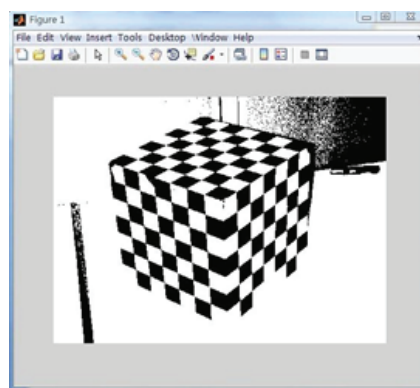


图3 标定物的灰度空间示意图

Fig. 3 Gray space diagram of calibration object

待定系数的线性变换:这一步的主要目的是准确确定标定目标物体上各控制点相对于三维坐标系的位置。计算出给定点的投影位置后,可以由式(3)求出摄像机的投影矩阵,即变量 l_y 的值。

失真系数的计算:本文采用的误差模型只考虑了图像的镜面畸变,忽略了切向畸变,在满足工程准确度要求的基础上使求解过程大大简化。

非线性失真模型由式(7)、式(8)给出

$$u = (u_c - u_0) \left[1 + k_1 (u_c - u_0)^2 + k_1 (v_c - v_0)^2 \right] + u_0 \quad (7)$$

$$v = (v_c - v_0) \left[1 + k_2 (u_c - u_0)^2 + k_2 (v_c - v_0)^2 \right] + v_0 \quad (8)$$

式中, (u_0, v_0) 为图像中心点。

通过线性变换得到方程组的11个待定系数,就可以确定 u_0 和 v_0 的值,即

$$\begin{cases} u_0 = \frac{l_1 l_9 + l_2 l_{10} + l_3 l_{11}}{l_9^2 + l_{10}^2 + l_{11}^2} \\ v_0 = \frac{l_5 l_9 + l_6 l_{10} + l_7 l_{11}}{l_9^2 + l_{10}^2 + l_{11}^2} \end{cases} \quad (9)$$

在计算失真系数时,从参考对象上取点作为参考点,利用这些参考点的空间坐标和式(1),可以计算出理想情况下的图像坐标。将计算结果代入式(7)和式(8),得到两个方向的畸变系数,然后取平均值即可得到失真系数。本文实验中采用了强控制的点分布模式,在 MATLAB 平台下实现标定的步骤如下:

1) 根据已知的维数和图像坐标,通过直接线

性变换计算出方程中的 11 个参数。

2) 计算图像中心的坐标(u_0, v_0)以及失真系数 b_u 和 b_v : $u_0=387.150\ 5$; $v_0=275.987\ 2$; $b_u=-0.001\ 6$; $b_v=-0.000\ 7$ 。

3) 计算旋转矩阵和平移向量, 即

$$R = \begin{bmatrix} -0.674\ 2 & -0.732\ 8 & 0.094\ 8 \\ -0.496\ 9 & 0.544\ 5 & 0.675\ 7 \\ -0.546\ 5 & 0.408\ 2 & -0.731\ 3 \end{bmatrix}$$

$$t = \begin{bmatrix} 132.095\ 5 \\ 17.739\ 5 \\ 436.187\ 8 \end{bmatrix}$$

(2) 空间距离计算

施工现场示意图如图 4 所示, 实验中需要计算点 A 和点 B 之间的距离。

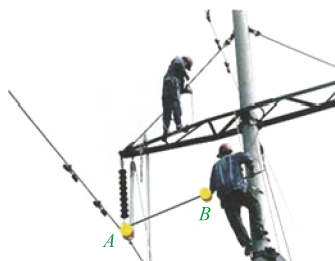


图 4 带电作业点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of live working point

取点 A 在不同位置的图像, 得到点 A 在两张不同图像中的图像坐标分别为(9.232 5, 37.501 1)和(6.429 3, 46.870 4)。去除相机系统噪声后得到图像坐标为(9.230 9, 37.500 4)和(6.427 7, 46.869 7)。将结果代入式(6)可得过定方程。最后用最小二乘法计算得到 A 点的空间坐标为(125.314 3, 255.561 4, 594.921 5); B 点的空间坐标为(909.416 1, 904.762 8, 1 090.142 0), A 、 B 两点之间的空间距离为 1.132 m。

3.2 结果与误差分析

将计算结果与三角函数理论计算的实地距离 1.2 m 进行比较, 可得误差 6%在正常范围内, 通过设置足够的安全区域裕量, 即可排除误差带来的危险。实际工程中施工环境十分复杂, 存在许多影响成像结果和计算结果的因素, 如光照、相机振动、温度和通信系统的错误等。造成标定误

差的原因主要有:

1) 边角提取错误。在提取边角点时, 算法对计算目标图像质量的要求很高, 但在实际应用中, 即使采用高准确度的计算目标, 也存在一定的误差。这是由于计算时镜头所拍摄的图像会产生微小的偏差, 从而造成误差。

2) 相机标定方法和系统固有误差。计算图像空间距离的过程中, 提取两幅具有不同特征点的图像坐标时存在一定误差, 同时在选择失真系数值的过程中可能存在误差。

由此可见, 虽然图像识别方法存在一定误差, 但智能监控系统对现场进行监控的准确度高于肉眼观察, 大大提高了带电作业现场施工的安全系数。

4 结束语

本文针对带电跨越施工作业过程中安全距离的检测问题, 提出了一种基于双相机图像识别的空间距离检测方法, 实现了带电作业空间距离监测和安全控制。得到以下几个主要结论:

1) 仿真实验表明本文提出的方法可有效实现三维空间距离的监测和计算, 结合 IEC 相关标准以及无线通信, 即可对带电跨越施工作业过程中的安全距离进行实时监测和管控。

2) 从技术角度看, 利用视频图像监测现场工作的方法具有更强的环境兼容能力, 优于基于磁感应或红外感应的监测方法。本文设计的监控系统可以在各种恶劣环境下以不同的方式对现场作业的安全距离进行监控。

3) 从距离检测原理上看, 本文提出的方法能够推广至不同的塔型施工现场, 具有一定的推广使用潜力。

参考文献

- [1] CAO Xianhui, OUYANG Kejian, LIU Weike, et al. Electric field characteristics of X-ray detection and safety protection in live work of transmission lines[J]. IOP Conference Series: Earth and

- Environmental Science, 2020, 546(2).
- [2] RUAN Huaping, ZOU Dehua, WANG Wei, et al. Online live working safety monitoring and early warning based on spatial cross-border prevention[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020, 15(6).
- [3] YAN Yu, JIANG Wei, ZOU Dehua, et al. Research on mechanism configuration and coordinated control for power distribution network live working robot[J]. The Industrial Robot, 2020, 47(3).
- [4] 朱凯, 方玉群, 余光凯. 特高压带电作业绝缘工器具试验电压优化及安全裕度[J/OL]. 中国电力: 1-9[2020-11-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.tm.20201119.1511.002.html>.
- [5] MA Zhenyu, CHEN Chao, GE Leijiao, et al. Feasibility analysis and protection measures of live working on the multi[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1550(5).
- [6] FANG Yaqi, WANG Linong, LI Rui, et al. Modelling for switching impulse breakdown of live working gaps between equipotential worker and transmission towers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(7).
- [7] GAO Jiachen, WANG Linong, LI Guanlin, et al. Discharge of air gaps during ground potential live-line work on transmission lines[J]. Electric Power Systems Research, 2020: 187.
- [8] SONG Wei, LI Yunfeng, ZHANG Haibing, et al. Design of control and hydraulic drive system for high-altitude live working vehicle[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(23).
- [9] XU Li, ZHU Ziqi, YANG Qi, et al. Development of live working device based on zero potential control principle[J]. Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2019, 7(6).
- [10] 刘邦友, 郑世寅, 赵辉. 浅谈 10 kV 配网架空线路运维检修带电作业研究[J]. 电力设备管理, 2020(10): 75-76, 89.
- [11] 邱灿树, 许树平, 丁瑞蓉. 配电网旁路带电作业应用分析[J]. 科技创新与应用, 2020(28): 183-184.
- [12] 张迪, 尹洪, 吴嘉琪, 等. 特高压直线塔带电作业进出等电位路径规划研究及应用[J]. 自动化应用, 2020(9): 103-106.
- [13] 高原, 刘海林, 王建城, 等. 带电作业绝缘杆法引流线搭接装置的研究与应用[J]. 农村电气化, 2020(9): 63-65.
- [14] 谢龙光, 王磊, 杨芳, 等. 基于模糊算法的带电作业机器人路径跟踪方法研究[J]. 电子设计工程, 2020, 28(17): 33-36, 41.

作者简介:



戚立峰

戚立峰(1976—), 男, 助理工程师, 主要从事输配电工程管理工作。

(收稿日期: 2020-11-22) **EA**