

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212323

基于双目视觉的输电线路防外破系统设计*

肖 扬¹ 高 峰^{1,2} 花国祥^{1,2}

(1.南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2.无锡学院自动化学院 无锡 214105)

摘要: 为防止吊车臂触碰输电线路引发事故,设计一种基于双目视觉的输电线路防外破系统。首先,通过将双目视觉防外破装置安装在吊车吊臂上实时获取图像数据;接着,针对实际环境中存在的光照干扰、弱纹理区域以及视差图中的边缘空洞填充,提出一种改进 SGBM 立体匹配算法,利用最小二乘拟合插值法和双边滤波进行算法优化,从而准确获取输电线路的三维信息;最后,根据双目视觉原理与空间耦合电容分压原理搭建测距环境与 10 kV 输电线路测试环境并进行现场测试。结果表明,改进 SGBM 算法在干扰环境下的测距平均相对误差仅为 1.345% 和 1.229%,对比传统 SGBM 算法与场强测距方法,分别减少 2.047% 和 1.851%,算法运行时间为 817.552 ms,测距系统兼顾实时性与精准性需求,满足实际环境下的输电线路吊车防外破使用。

关键词: 防外破;双目测距;SGBM;空间耦合电容分压;Ansys 仿真

中图分类号: TM726;TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Design of transmission line anti-external breakage system
based on binocular visionXiao Yang¹ Gao Feng^{1,2} Hua Guoxiang^{1,2}(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Automation, Wuxi University, Wuxi 214105, China)

Abstract: To prevent accidents caused by crane arms touching transmission lines, a transmission line anti-external breakage system based on binocular vision is designed. First, by installing the binocular vision anti-external breakage device on the crane arm to obtain image data in real time; then, an improved SGBM stereo matching algorithm is proposed for the light interference, weak texture area existing in the actual environment and edge hole filling in the parallax map, and the algorithm is optimized by using least squares fitting interpolation and bilateral filtering, so as to accurately acquire the three-dimensional information of the transmission line; finally, 10 kV transmission line test environment and ranging environment are built according to the principle of binocular visual and space coupling capacitance voltage division and tested in the field. The results show that the average relative error of the improved SGBM algorithm is only 1.345% and 1.229% under the interference environment, which is 2.047% and 1.851% less than the traditional SGBM algorithm and the field strength ranging method, respectively, and the algorithm running time is 817.552 ms. The ranging system takes into account the needs of real-time and precision, and meets the use of the transmission line crane against external breakage in the actual environment.

Keywords: anti-external breakage; binocular ranging; SGBM; space coupling capacitance voltage division; Ansys simulation

0 引 言

随着城镇建设的加速推进,吊车吊臂等大型作业机械违规触碰输电线路是导致断线、跳闸、短路、车毁人亡等安

全事故的主要原因,严重影响电力系统的安全稳定运行,外力破坏已成为输电维护的主要内容之一,因此,防外破是一项长期、复杂且困难的工作^[1-2]。

传统的输电线路防外破技术有^[3]人工定期巡检、固定

收稿日期:2022-12-07

* 基金项目:2023年江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX23_0388)、中国南方电网广东茂名供电局科技项目(030900KK52220007)资助、2020r006 无锡学院人才启动项目(550220006)资助

视频监控装置、基于背景差的视频监控技术、超声波回声测距技术。这些方法存在依赖人力且效率低下、易受外界因素干扰、误报率高等缺陷,在现代电网建设进程中已被逐步淘汰。近年来,雷达技术、智能图像识别技术、北斗定位技术、传感器技术的涌现和进步,已成为引入输电线路防外破工作的必然选择。文献[4]提出一种基于雷达技术的智能监控预警系统,将雷达原理、无线通信技术、图像处理技术、高精度传感器技术集成一体并应用其中,科学的模块化设计结构清晰。但其雷达与 4G 网络通信应用成本高、图像采集装置存在视线盲区、安装的声光报警装置无法达到准确预警效果、容易因为其他物体侵入限制范围而引起误报。文献[5]提出一种基于单目摄像头的防外力破坏研究方法,但其提出的以目标中心为检测点的单目测距方法应用于输电线路精确度不高,边缘检测 log 算子阈值仅根据个人经验设置并且研究测试全部在仿真软件下进行,缺少实际验证。文献[6]提出一种基于 AD-Census 代价的吊车防碰线技术,通过增加左右相机对亮度偏差的鲁棒性,降低误匹配率。但由于其采用固定权重,无法体现像素点区域特征,对于弱纹理区域匹配效果差,在其实际实验分析中,输电线路轮廓缺失明显,视差图像噪点多。文献[7]提出一种基于物联网和北斗定位技术的防外破预警系统,该系统具有成本低、保密性高的特点,通过北斗卫星、接收机、电网服务器完成测量定位吊车与电线塔之间的距离。但其无法测量输电线路与吊车之间的距离并且 1.2 m 的定位误差对于防外破工作仍然过大。文献[8]采用光纤传感技术监测靠近传输线的运动目标,光纤传感器具有抗干扰能力强、灵敏度高、测量范围广的优点,但作用型传感器成本高,难以普及。文献[9-10]分别使用了平行极板电容型电场传感器和空间耦合电容分压传感器进行输电线路非接触式验电,可以将其所测感应电压与场强、导体点位关系应用于输电线路防外破测距中,但在实际输电线路多组态、多回路环境中,传感器易受电磁干扰、杂散电容等影响,测距精度较低。

为解决上述问题,本文提出一种基于双目视觉的输电线路防外破系统,成本低、安全可靠、满足实际环境下吊车防外破使用要求,为吊车等大型作业机械防外破提供技术支撑,对电力能源的稳定传输具有重要意义。

1 双目视觉测距架构

1.1 成像模型与坐标系转换

安装在吊车吊臂上的双目视觉防外破装置从输电线路画面实时摄取到完成三维信息获取需要经过多个坐标系的转换。与相机自身特性相关的参数为内参,用矩阵形式表示为内参矩阵为 M_1 ; 相机外部参数是描述其世界坐标系中的方向和位置,用矩阵形式表示为外参矩阵 M_2 。图 1 所示为成像模型与坐标转换关系。

图 1 所示中, $O_w - X_w Y_w Z_w$ 为三维世界坐标系, $O_c - X_c Y_c Z_c$ 为三维相机坐标系, $O_i - xy$ 为二维图像坐标系,

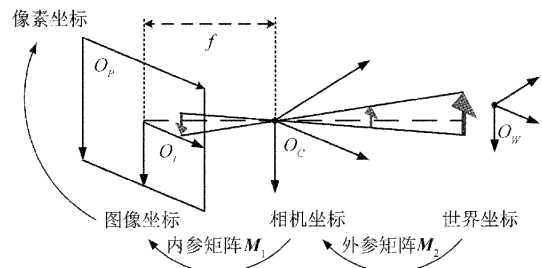


图 1 成像模型与坐标转换关系

$O_p - uv$ 为二维像素坐标系。世界坐标系中的一点到像素坐标系的转换公式如式(1)所示。

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{X}_w \quad (1)$$

式中: f 为相机焦距, d_x 与 d_y 是像素坐标系 u 轴和 v 轴方向上的物理尺寸, f_x 和 f_y 分别为双目相机在水平和垂直方向上以像素为单位的实际焦距,即 $f_x/d_x, f_y/d_y, u_0, v_0$ 为主点(图像原点)坐标,是二维坐标系转换偏移量;旋转矩阵 \mathbf{R} 与平移矢量 \mathbf{T} 构成外参矩阵,三维旋转矩阵 \mathbf{R} 由二维直角坐标系下分别绕世界坐标系 X, Y, Z 轴旋转得到的 3 个旋转矩阵相乘而来, $\mathbf{R} = \mathbf{R}_x(\theta) \cdot \mathbf{R}_y(\varphi) \cdot \mathbf{R}_z(\omega)$ 。

1.2 视觉测距原理

双目视觉测距通过两个相对平行的同步相机模拟人的双眼对不同画面中的相同场景形成视差值,从而获取目标物体场景的深度信息。双目测距原理如图 2 所示。

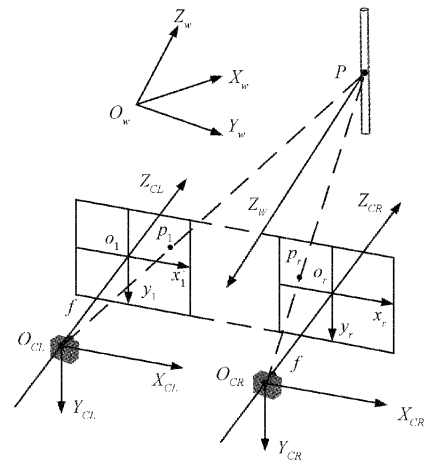


图 2 双目测距原理模型

如图 2 所示, O_{CL} 与 O_{CR} 分别为左右相机光心;左右相机光心之间的连接为基线 B 且与水平面平行; $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 为世界坐标系中拍摄的待测线路中的一目标点;点 $p_l(x_{pl}, y_{pl})$ 与 $p_r(x_{pr}, y_{pr})$ 为三维坐标点 P 在二维成像平面图像坐标系 $o_l - x_l, y_l$ 与 $o_r - x_r, y_r$ 上的投影点,在理想双目立体视觉中,点 p_l 与 p_r 在两二维平面内的高度相同,即 $y_{pl} = y_{pr}$; O_{CL} 到 o_l 的距离与 O_{CR} 到 o_r 的距离相同,为相机焦距 f ; Z_w 为 P 点到基线平面的距离,即点 P 在 Z 轴的深度。根据比例关系及相似三角形原理可以得到式(2):

$$\begin{cases} x_{pl} = X_w \frac{f}{Z_w} \\ x_{pr} = \frac{f(X_w - B)}{Z_w} \\ y_{pl} = y_{pr} = Y_w \frac{f}{Z_w} \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)整理可以得到 P 点的三维坐标:

$$\begin{cases} X_w = \frac{Bx_{pl}}{d} \\ Y_w = \frac{By_{pl}}{d} \\ Z_w = \frac{Bf}{d} \end{cases} \quad (3)$$

式中: d 为目标点的视差,即左右相机成像平面图像坐标系中点 p_l 与 p_r 横坐标的差值; $y = y_{pl} = y_{pr}$ 。其中相机焦距 f 与基线 B 可以通过相机标定得到,因此只需要求得视差值 d 就可以求出 P 点的深度距离^[11]。

1.3 视差与深度距离关系

图 3 所示为离散化视差与深度距离模型,不同距离下的 A、B、C、D 4 个点在同一平面具有不同的视差,从而产生不同距离感^[12]。深度距离与视差值成反比,深度值越大,视差越小,目标点在距离摄像头无限远处的视差值为 0;同时,深度值越大,同样的视差范围内,对应的深度范围越大。

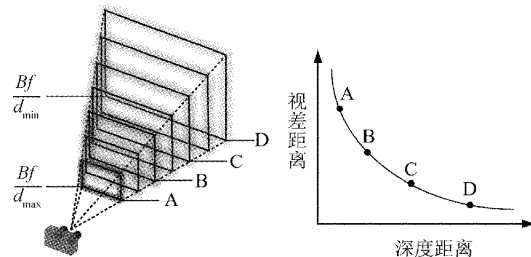


图 3 离散化视差与深度距离模型

视差值测量的准确性将直接影响视觉测距的准确性,通过任一图像的像素坐标与其对应的视差值即可求出其在另一视图中的同名点。因此,左右两幅图视差值的确定是实现深度三维重建的关键,而图像立体匹配技术则是计算视差的前提和关键。

2 双目视觉防外破系统

视觉测距系统流程如图 4 所示,主要包括图像获取、相机标定、图像校正、算法优化处理和三维数据处理^[13]。

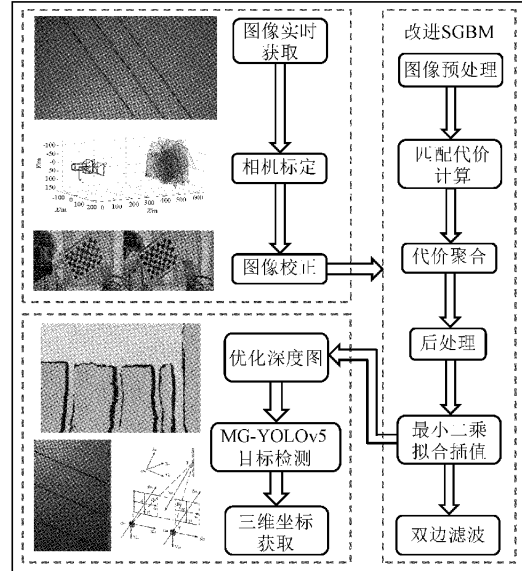


图 4 视觉测距系统流程

为实现输电线路的三维重建,实时获取输电线路三维数据,由双目视觉防外破装置、计算机等组成防外破监测预警系统,宏观上可以分为感知层与应用层,系统架构如图 5 所示。

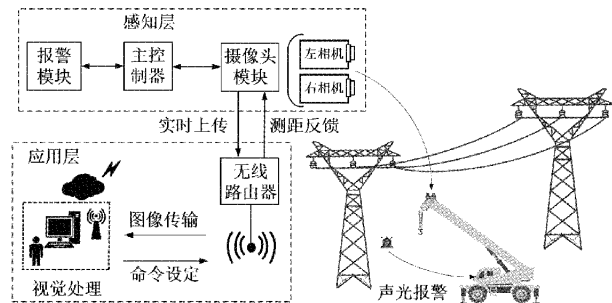


图 5 双目视觉防外破系统架构

1) 感知层

感知层主要由安装于吊机顶部的双目视觉防外破装置与安装在吊车驾驶室的声光报警器组成,两者都有独立的电源供应模块。双目视觉防外破装置主要由主控制器、双目相机与无线通信模块构成,通过无线路由器将数据实时上传至应用层。

2) 应用层

应用层主要由计算机组成。计算机用于接收双目视觉防外破装置实时传输的输电线路图像数据和电池电压容量,实现视觉测距立体匹配算法,完成输电线路的实时测距和三维重建,并将测距数据反馈至双目相机装置;同时根据 GB 6067.1-2021《起重机安全规程》,吊车在 10 kV 高压线

下作业,垂直方向安全距离应当 ≥ 2 m,可将其设定为报警阈值,当所测距离超出设定阈值时,主控制器向吊机驾驶室报警模块发送声光报警指令。

2.1 双目相机标定

双目相机标定的目的是为确定物体在三维世界坐标系与其在二维平面图像坐标系下的位置对应关系,而位置对应关系取决于双目相机自身标定的内外参数。单个摄像头共有 10 个内部参数,只与自身结构属性相关;除内参矩阵中的 5 个独立参数外,还包括 5 个畸变参数。6 个外部参数由外参矩阵构成,包括 3 个旋转参数 \mathbf{R} 与 3 个平移参数 \mathbf{T} 。本文采用张正友标定法,通过拍摄多角度棋盘进行相机标定,相较于传统标定方法与自标定方法,该方法操作简单且精确度高^[14]。

1) 非线性畸变

在实际应用中,相机透镜由于制作工艺、形状缺陷、sensor 组装时间与透镜间的角度不准等问题,导致图像失真,产生畸变。镜头畸变可分为径向畸变和切向畸变两类,如图 6 所示。

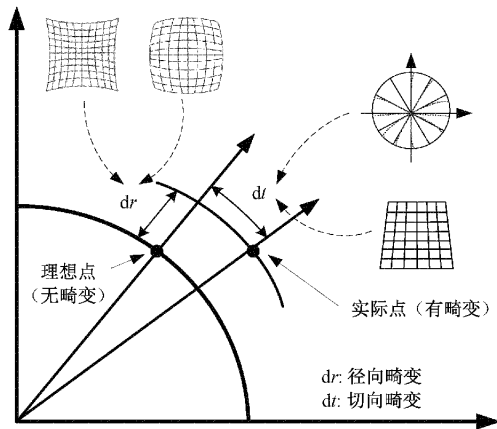


图 6 两类主要透镜畸变

张正友标定法仅考虑畸变模型中影响较大的径向畸变,其在图像坐标系下的数学表达式:

$$\begin{cases} \hat{x} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ \hat{y} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{cases} \quad (4)$$

式中: (x, y) 是理想状态下无畸变的归一化图像坐标, (\hat{x}, \hat{y}) 是原始畸变点的归一化图像坐标; k_1, k_2, k_3 为畸变系数, r 为像素点到图像中心的径向距离,即 $r^2 = x^2 + y^2$, $(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)$ 为补偿系数,分布服从二次函数,在实际应用中,只需求得 k_1, k_2 即可。

根据图像坐标系和像素坐标系的转换关系可将式(4)转化为:

$$\begin{bmatrix} (u - u_0)r^2(u - u_0)r^4(u - u_0)r^6 \\ (v - v_0)r^2(v - v_0)r^4(v - v_0)r^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{u} - u \\ \hat{v} - v \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: (u, v) 是理想状态下矫正后的图像对应点像素坐标; (u_0, v_0) 是理想状态下矫正后的图像中心点像素坐标; (\hat{u}, \hat{v}) 是畸变图像中的某点像素坐标。将式(5)简化,即可求解畸变系数:

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{d} \quad (6)$$

2) 立体标定

张正友标定法通过 MATLAB 中的 Stereo Camera Calibrator 集成工具模块实现。首先,自制大小 10×7 的棋盘格标定板,每个正方形棋盘格边长大小为 26 mm,图 7 所示为双目相机与 25 组标定图片的相对位姿关系。

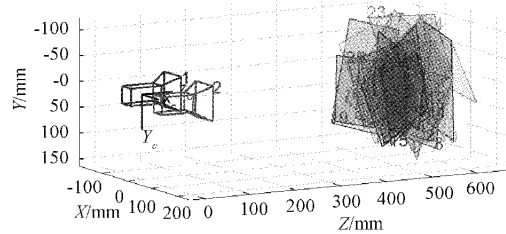


图 7 相对位姿 3D 视图

接着,根据检测特征点和棋盘格的实际尺寸得出特征点在世界坐标系和图像坐标系下的坐标,图 8 所示为内层棋盘格角点提取。

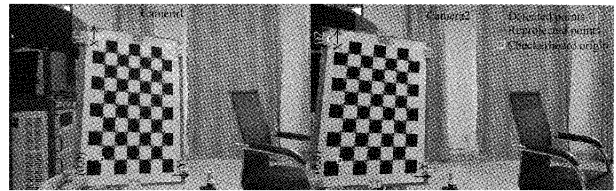


图 8 角点提取

最后,根据坐标转换关系求解理想状态下无畸变的相机内参与外参,应用最小二乘法求出实际的径向畸变系数^[15]。综合内参、外参、畸变系数,使用极大似然法优化估计,提升标定精度。表 1 所示为相机标定参数。

3) 极线校正

畸变校正通过算法结合畸变参数与畸变校正公式即可完成,此外还需进行极线校正。理想状态下,左右相机光轴平行、左右成像平面共面且成像交点连线与基线平行,即为相机前向水平对准^[16]。极线校正如图 9 所示。

然而在实际情况下,左右相机的参数结构不可能完全一致,无法做到左右图像在同一平面,极线也不会同一平面。为提升图像立体匹配时同名点搜索效率,获取接近理想状态下的行对准图像,同时,为验证标定参数准确性,采用 Bouguet^[17]极线校正方法,减少图像投影失真。

图 10 所示为校正前后图像,根据图中标注处可知,图像校正前未处于同一水平线,校正后对应同名点处于同一水平线。

表 1 相机标定参数

相机	参数
相机 1(左)	内参 M_1 $\begin{bmatrix} 496.18 & 0 & 309.83 \\ 0 & 494.99 & 259.71 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	畸变系数 $(k_1, k_2, p_1, p_2, k_3)$ (-0.055 31 0.134 93 0.001 91 -0.009 34 0)
相机 2(右)	内参 M_1 $\begin{bmatrix} 496.18 & 0 & 309.83 \\ 0 & 494.99 & 259.71 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	畸变系数 $(k_1, k_2, p_1, p_2, k_3)$ (-0.055 31 0.134 93 0.001 91 -0.009 34 0)
双目相机	旋转矩阵 R $\begin{bmatrix} 0.999 70 & 0.001 71 & 0.024 25 \\ -0.001 99 & 0.999 93 & 0.011 78 \\ -0.024 23 & -0.011 82 & 0.999 64 \end{bmatrix}$
	平移矢量 T (-118.284 0.319 982 -0.843 788)

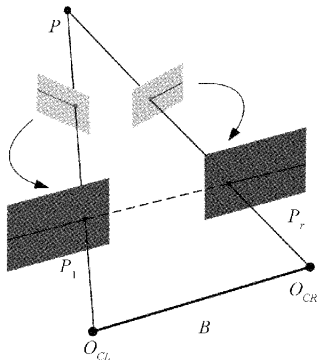
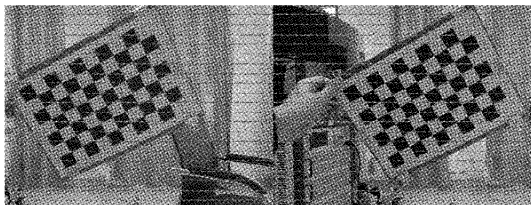
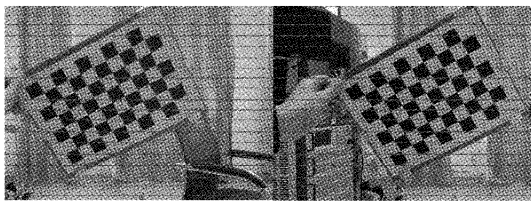


图 9 极线校正



(a) 校正后图像



(b) 校正前图像

图 10 校正前后对比

2.2 改进 SGBM 算法

半全局块匹配(semi-global block matching, SGBM)是一种同时兼顾匹配精度和处理速度的算法,该算法的核心在于优化全局立体匹配算法的能量函数并以局部最优理论进行代价计算,从而获得左图像点的最佳右匹配点^[18]。在计算视差时,局部立体匹配算法一般基于目标像素邻域内的局部窗口进行代价计算,而全局立体匹配算法考虑图像中的所有像素。SGBM 算法分为图像预处理、代价计算、代价聚合和后处理 4 个步骤。本文旨在在进一步提高 SGBM 精度,同时保持匹配效率,提出一种基于最小二乘拟合插值法和双边滤波的改进 SGBM 算法。在实际应用中,由于光照反射和弱纹理区域导致视差模糊,在匹配代价计算多维数据后,基本视差图中仍然存在一些错误和无效值。为进一步提高匹配结果的精度,采用最小二乘拟合插值法对各超像素区域的基本视差图进行优化,以提高三维重建的连续性和准确性^[19]。优化基本视差图的公式如下:

$$d = ax + by + c \quad (7)$$

其中, (a, b, c) 表示视差平面参数;如果平面参数确定,则图像平面中的每个坐标点都可以对应于一个视差值 d 。拟合平面数据样本大小为 i 时,最小二乘法公式如下:

$$\begin{cases} d_1 = ax_1 + by_1 + c \\ d_2 = ax_2 + by_2 + c \\ \vdots \\ d_i = ax_i + by_i + c \end{cases} \quad (8)$$

转化为矩阵形式可得式(9):

$$B = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_i \end{bmatrix} = \left(A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (9)$$

继而可以得到式(10):

$$A^T A \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = A^T B \quad (10)$$

从式(9)和(10)中,可以得到式(11):

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum x_i & \sum y_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i d_i \\ \sum y_i d_i \\ \vdots \\ \sum d_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

针对基于视差图的边缘空洞填充容易产生条纹的问题,采用边缘保持滤波器来降低噪声,很好保存图像的边缘信息,获得更为平滑的修复结果。双边滤波处理后的视差可表示为:

$$I_p^{bf} = \frac{\sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q}{W_p^{bf}} \quad (12)$$

其中, I_p^{bf} 为视差空洞填充结果, σ_s 和 σ_r 为空间域和像素范围内的光滑参数, p 和 q 分别为视差空洞点与邻域值, I_p 和 I_q 为像素 p 和像素 q 的输入差异, W_p^{bf} 为双边滤波权重值。

p 和 q 的像素坐标分别标记为 $p(x, y)$ 和 $q(x, y)$ 。

则 $G_{\sigma_s}(\|p - q\|)$ 和 $G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|)$ 可表示为:

$$G_{\sigma_s}(\|p - q\|) = G_{\sigma_s}(x, y, k, l) = \exp\left(-\frac{(i-k)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (13)$$

$$G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) = G_{\sigma_r}(x, y, k, l) = \exp\left(-\frac{\|I(i, j) - I(k, l)\|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (14)$$

式中: $I(i, j)$ 和 $I(k, l)$ 是视差图中对应像素的视差值。

3 实验验证与分析

3.1 实验环境搭建

为验证改进算法的有效性,在电场环境下对比传统 SGBM 算法与文献[9]中所用方法,将所测感应电压与场强、导体点位关系应用于输电线路防外破测距,从而搭建双目视觉测距与 10 kV 输电线路测试环境。计算机软件运行环境使用 PyCharm,配置 Opencv-Python3.4.1.15;测试双目相机使用 RER-1MP2CAM002-V90,最高有效像素达 $3\,840 \times 1\,080$;模拟导线采用 10 kV 钢芯绝缘导电缆线,通过升压器将工频交流 50 Hz 激励源提升至 10 kV;感应电压测量采用空间耦合电容分压传感器。实验环境如

图 11 所示。

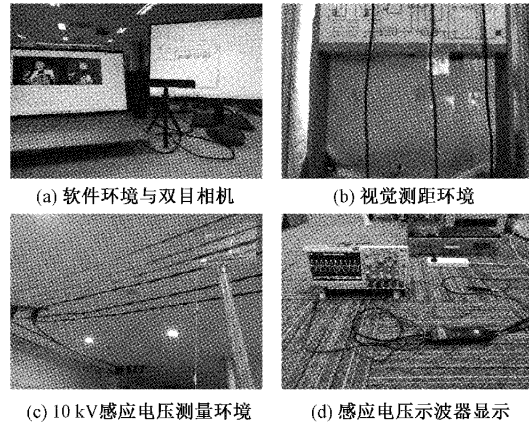


图 11 实验环境搭建

3.2 算法性能对比

本文实验对比改进前后的 SGBM 立体匹配算法,主要从视差效果与运行速度进行对比,视差效果通过匹配准确度中的整体错误率(all)与非遮挡错误率(nonocc)指标来定量衡量。

如图 12(b)所示,从深度图上分析,在光照、弱纹理与电场等环境干扰下,SGBM 算法生成的深度图在输电线路区域没有形成清晰准确的轮廓,主要由零碎视差点与视差空洞组成,视差匹配失败区域较多,算法效果差;如图 12(c)、(d)所示,将感知范围参数 numDisparities 同样设置为 128,改进后深度图成功显示 A、B、C 三相模拟输电线路轮廓,成功与背景区域分离,大部分区域视差平滑且无边缘空洞。

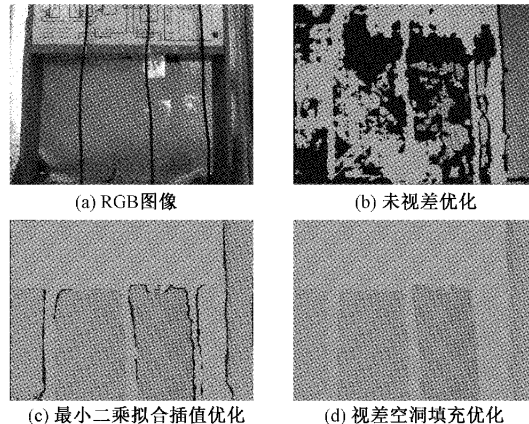


图 12 算法深度图对比

由表 2 可以看出,在实际双目防外破工作中,对处于非遮挡区域的弱纹理输电线路图像,改进 SGBM 算法的整体错误率和非遮挡错误率分别为 3.25% 和 2.87%,相较于改进前,视差提取结果更为准确。在运行速度上,SGBM 算法运行速度快于改进算法,在相同 SADWindowSize 与图像分辨率下,SGBM 算法运行速度为 700 ms 左右,改进

算法运行速度为 800 ms 左右,但同样能够满足测距系统实时性要求。

表 2 两种算法性能对比

算法	运行时间/ ms	整体错误率 (all)/%	非遮挡错误率 (nonocc)/%
SGBM	722.451	58.33	54.79
改进 SGBM	817.552	3.25	2.87

3.3 测距实验分析

1) 算法测距对比

首先,实验分析改进前后 SGBM 算法在视觉测距系统中测量模拟输电线路与相机的距离和两者实际距离之间的相对误差,以此来衡量本文视觉测距系统的精确程度。视觉测距环境如图 11(b)所示,每根模拟线缆间隔 30 cm,测距目标点分别选择导线 A、B、C 中心,为验证测

距的精确性,结合实际环境中吊机施工多位姿的情况选择 10 个测量位置。当相机基线与模拟线缆垂直时,分别位于模拟线缆 A、B、C 相线正下方、A、C 相线外斜下方 45°、B 相线下方垂直倾斜 30°;当相机基线与模拟线缆处于非垂直状态,分别位于 A、B、C 相线下方水平倾斜 30°、B 相线下方且基线与线缆平行。表 3 所示为改进 SGBM 算法在测距系统中的测量数据,由于位置 6 处相机坐标系二维平面 $x-y$ 与模拟线缆平面不处于平行位置,因此 A、B、C 有其相对应的实际距离,其中 Z 轴坐标即为目标距离,在防外破距离预警阈值设定为 2 m 的情况下,目标距离均小于实际距离,即为负误差,可达到提前预警效果,满足实际情况下的预警需求;在实际测量距离 3 m 内,距离误差范围在 1.2~4.0 cm 之间,最大相对误差为 2.41%,最小相对误差为 0.71%,平均相对误差为 1.345%,均在 3% 以内,满足实际防外破工作对于系统精度的要求。

表 3 改进 SGBM 算法测距数据

测量位置	测距目标点	X 轴坐标/ m	Y 轴坐标/ m	Z 轴坐标/ m	实际距离/ m	相对误差 百分比/%
位置 1	A	-0.119	0.001 2	0.973	0.996	2.309
	B	0.154	0.001 5	0.972		2.410
	C	0.424	0.001 3	0.975		2.108
位置 2	A	0.224	0.002 3	1.341	1.354	0.960
	B	0.523	0.002 2	1.337		1.256
	C	0.836	0.002 4	1.340		1.034
位置 3	A	-0.399	0.001 6	1.082	1.101	1.726
	B	-0.123	0.001 7	1.076		2.271
	C	0.152	0.001 6	1.078		2.089
位置 4	A	-0.684	0.002 6	1.671	1.690	1.124
	B	-0.419	0.002 4	1.678		0.710
	C	-0.156	0.003 0	1.673		1.006
位置 5	A	0.702	0.003 6	2.183	2.200	0.773
	B	0.963	0.003 7	2.180		0.909
	C	1.226	0.004 0	2.179		0.955
位置 6	A	-0.716	0.003 4	2.684	2.722	1.396
	B	-0.437	0.002 9	2.676	2.711	1.291
	C	-0.158	0.003 1	2.667	2.697	1.112
位置 7	A	0.209	0.002 2	1.881	1.921	2.082
	B	0.495	0.001 9	1.907		0.729
	C	0.779	0.002 5	1.884		1.926
位置 8	A	-0.167	0.001 6	2.417	2.447	1.226
	B	0.114	0.001 7	2.413		1.389
	C	0.403	0.001 6	2.412		1.430
位置 9	A	-0.427	0.002 3	2.168	2.190	1.005
	B	-0.135	0.002 2	2.165		1.142
	C	0.133	0.002 4	2.171		0.868
位置 10	A	-0.001 8	2.736	2.884	2.912	0.962
	B	-0.001 7	-0.025	2.875		1.271
	C	-0.001 9	-0.307	2.886		0.893

从图 13 可以看出,传统 SGBM 算法在位置 3、导线 B 为测距目标点处的相对误差可达 5.813%,最小相对误差为 1.227%,平均相对误差为 3.392%。处在同一位置与同一测距目标点下,改进 SGBM 算法测量模拟输电线路与相机的距离和实际距离之间的相对误差均小于传统 SGBM 算法,测量误差明显减小,平均相对误差减小 2.047%,更接近实际环境下的真实距离。

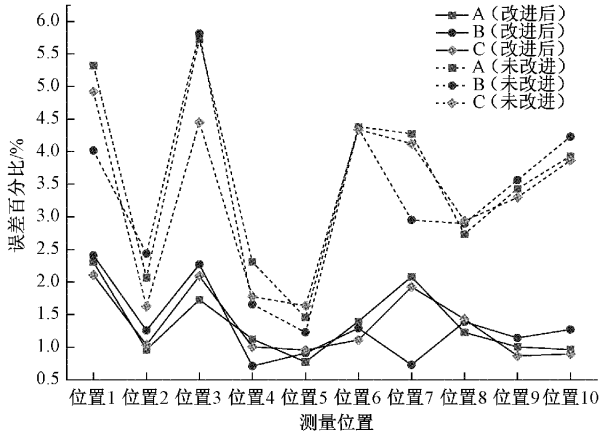


图 13 两种算法的测距相对误差对比

2) 场强测距对比

场强测距通过非接触式电场传感器装置测得感应电压继而根据感应电压与场强、导体电位关系获得装置与所测线缆之间的距离。本文采用文献[9]中的空间耦合电容分压传感器进行距离测量对比。为验证测距目标点下方的场强分布规律,利用 Ansys Electronics Desktop 搭建 10、35、66、110、220、500 kV 多电压等级的三相水平排列输电线路仿真模型,采用有限元分析法,500 kV 电场分布如图 14 所示。

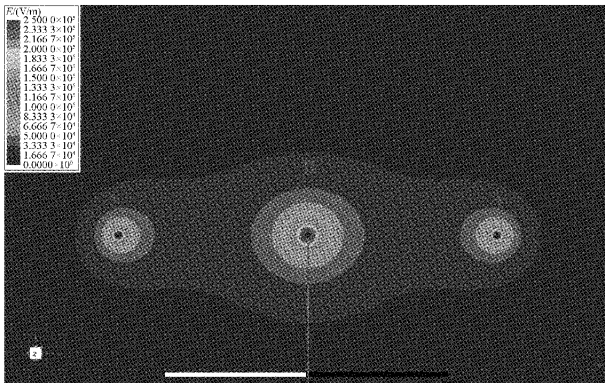


图 14 500 kV 三相水平架设电场仿真

选择仿真线路 B 相电缆为测试起点向正下方垂直移动,6 种电压等级的电场强度与垂直距离变化曲线如图 15 所示。

由图 15 可知,在防外破距离预警阈值 2 m 处的电场强度分别为 151.56、1 618.09、2 813.79、4 605.11、13 865.35、

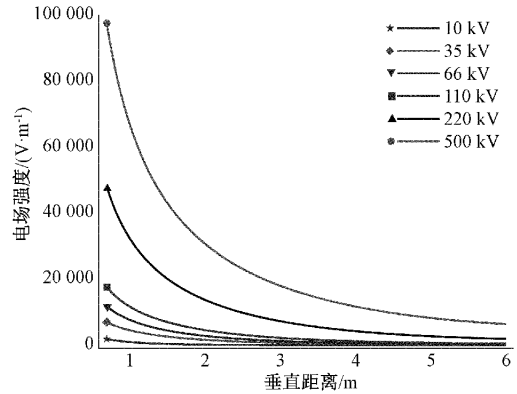


图 15 电场强度与距离关系曲线

31 002.85 V/m,随着距离的增加,电场强度均逐渐衰弱,二者呈现反比例关系,符合圆柱体输电线路电场强度与距离、导线电压之间的关系。

10 kV 感应电压测量环境如图 11(c)所示,数据采集如图 11(d)所示。在 10 kV 模拟三相线缆 A 相线正下方采集 16 组感应电压数据,并在相应位置进行视觉测距,由图 16 可知,由于杂散电容分压,感应电压测量值偏小,场强测距距离均小于基于改进 SGBM 算法的双目视觉测距距离与实际距离,场强测距平均相对误差为 3.08%,视觉测距平均相对误差为 1.229%,相较于场强测距平均相对误差减少 1.851%。场强测距与实际距离误差最大为 6.40 cm,此时,感应电压为 0.254 mV,场强为 13.034 V/m,场强测距为 1.5 m,而本文提出的视觉测距最大误差仅为 2.4 cm。

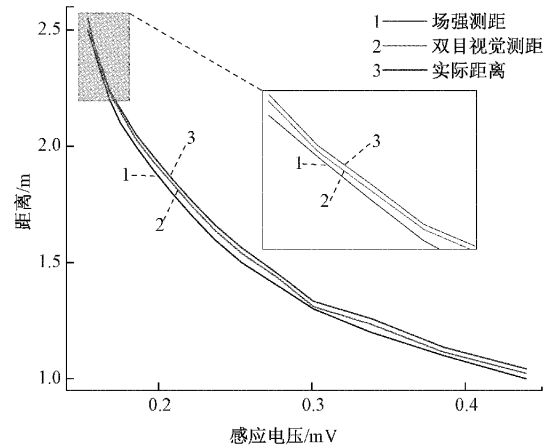


图 16 双目视觉测距与场强测距对比

3.4 现场测试

为验证双目视觉防外系统的测距效果,采用南方电网广东茂名供电局提供的 10 kV 三相交流户外试验平台,视觉测距系统与场强测距传感器安装完成后的现场图像如图 17(a)所示。

如图 17(c)所示,在强光、电磁干扰等复杂环境下,改进 SGBM 算法生成的视差图无视差空洞和图像噪点,线路轮廓清晰。经现场多次测试,对比传统 SGBM 算法与场强

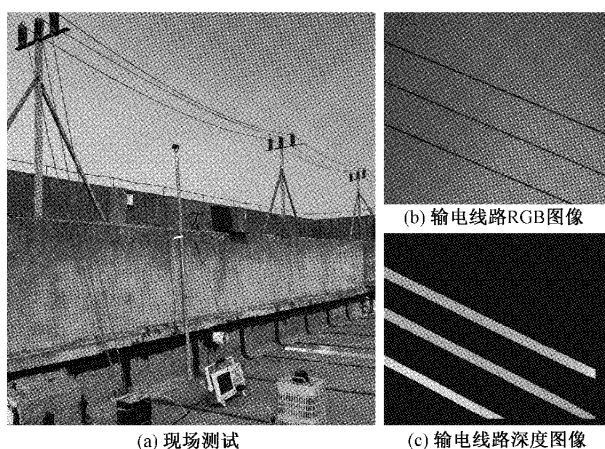


图 17 防外破系统测距现场试验

测距,改进 SGBM 的双目测距误差明显减小,测距相对误差均在 3%之内,达到实验预期。

4 结 论

本文针对输电线路复杂环境设计了一种基于双目视觉的输电线路防外破系统。首先,分析双目视觉测距架构并提出双目视觉防外破系统的工作流程;其次,针对光照、弱纹理区域等原因导致的视差图模糊和边缘视差空洞,提出一种基于最小二乘拟合插值法和双边滤波的改进 SGBM 算法;接着,搭建双目视觉测距与 10 kV 输电线路测试环境,进行算法性能与测距实验对比分析;最后,进行双目视觉防外系统测距现场试验。结果表明在干扰环境下对比传统 SGBM 算法测距与场强测距,改进 SGBM 立体匹配算法兼顾实时与精准测距的需求,可以提高系统预警精确度,适合实际环境下的测距防外破工作,为输电线路防外破工作提供智能化新方式。

参考文献

- [1] 苏晓. 构建适应城市发展的架空输电线路运检新模式[J]. 科技视界, 2021(27): 183-184.
- [2] 成焕顺. 新形势下输电线路防外破管理模式探索[J]. 电子世界, 2020(11): 25-26.
- [3] 易欢欢. 输电线路防外破在线巡检系统研究[D]. 宜昌:三峡大学, 2019.
- [4] 钟宏宇, 吴刚, 尹婷婷, 等. 基于雷达技术的输电智能监控预警系统[J]. 东北电力技术, 2022, 43(9): 29-34.
- [5] 赵江曼, 孟建良. 高压输电线路航拍图像目标边缘检测[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 27-32.
- [6] 方春华, 陆杰炜, 董晓虎, 等. 基于 AD-Census 代价及目标检测的吊车防撞线技术[J]. 电子测量技术, 2022, 45(13): 141-145.
- [7] XIE B L, PAN J S, LIN Y C, et al. Prevention of external force damage to overhead power lines based on network and intelligent positioning[J]. Journal of Network Intelligence, 2021, 6(3): 551-583.

- [8] JIANG Y, WU K Q, WANG Y, et al. Real time early warning method of transmission line external damage prevention based on optical fiber sensing technology[C]. International Conference on Signal Processing and Communication Technology, 2021, DOI: 10.1117/12.2631955.
- [9] 王宁, 刘云华, 闫振宏, 等. 新型组合式验电器的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 164-170.
- [10] 穆舟, 江波, 赵伟, 等. 电力系统暂态过电压测量技术综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 1-13.
- [11] 王明吉, 陈秋梦, 任福深. 基于双目视觉的目标测距系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2022(7): 5-8.
- [12] 李昊, 王建, 熊小伏, 等. 基于双目图像测距的输电线路净距计算与安全告警方法[J]. 广东电力, 2021, 34(6): 10-20.
- [13] HUANG L, WU G, LIU J Y, et al. Obstacle distance measurement based on binocular vision for high-voltage transmission lines using a cable inspection robot[J]. Science Progress, 2020, 103(3): 1-35.
- [14] 张竞艺. 基于双目视觉的运动目标实时追踪与测距[D]. 南京:南京邮电大学, 2020.
- [15] 谢东升, 孙滔, 史卓鹏, 等. 基于三维重建的输电线路舞动检测方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(3): 96-101.
- [16] 毛先胤, 吕黔苏, 马晓红, 等. 基于双目视觉的电力线巡检机器人障碍物定位测距[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(9): 244-248.
- [17] ADIL E, MIKOU M, MOUHSEN A. A real-time stereoscopic images rectification and matching algorithm based on python[C]. Springer Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2022, DOI: 10.1007/978-3-030-96308-8_77.
- [18] 顾梦娇, 朱宇锋, 郭迎庆, 等. 基于半全局立体匹配算法的改进研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19): 89-93.
- [19] LASTILLA L, RAVANELLI R, FRATARCANGELI F, et al. Foss4G date for DSM generation: Sensitivity analysis of the semi-global block matching parameters [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2019: 67-72.

作者简介

肖杨, 硕士研究生, 主要研究方向为输电线路检测与防外破、机器视觉。

E-mail: terminalxy@163.com

高峰, 讲师, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为先进阻尼减振技术。

E-mail: 1610081@stu.neu.edu.cn

花国祥(通信作者), 副教授, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为电力通信、继电保护、电力系统运维新技术。

E-mail: 20211249589@nuist.edu.cn