

文章编号 1004-924X(2024)08-1175-11

基于局部摄影的单目视觉输电线路弧垂测量

胡冠华¹, 孙成会^{2*}, 申立群², 胡 涛²

(1. 东北大学 机械工程和自动化学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 定期监测输电线路中导线弧垂的大小对输电线路的稳定运行有重要意义。传统的弧垂测量方法操作复杂且耗时较长, 应用单目视觉获取完整导线图像是一种便捷的弧垂测量方法, 但是当输电线路的档距过大时, 相机受视场角和分辨率的限制, 无法拍摄完整的导线, 难以测量弧垂。针对上述问题, 设计了一种便捷可用的局部摄影测量方法, 将 IMU 中的加速度计传感器与高分辨率工业单目相机结合, 在已知少量输电线路参数的条件下, 只需拍摄待测导线的左侧部分即可。获得单幅导线图像后, 引入语义分割技术提取图像中的导线, 以摄影测量模型为基础将导线的实际点与对应成像点建立联系, 以此建立非线性方程组, 经非线性求解恢复导线的三维形状, 进而计算导线弧垂。弧垂的测量相对误差可以控制在 5% 以内, 满足实际应用需求。

关键词: 输电线路; 弧垂; 局部摄影; 惯性测量单位; 语义分割

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243208.1175

Monocular vision transmission line sag measurement method based on local photography

HU Guanhua¹, SUN Chenghui^{2*}, SHEN Liquan², HU Tao²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University,
Shenyang 110819, China;

2. School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: sunchenghui11@163.com

Abstract: Regular monitoring of the size of wire sag in transmission lines is of great significance for the stable operation of transmission lines. The traditional sag measurement method is complex and time-consuming, and obtaining a complete wire image using monocular vision is a convenient sag measurement method. However, when the span of the transmission line is too large, the camera is limited by the field of view angle and resolution, making it difficult to capture the complete wire and measure the sag. To address the above issues, a convenient and usable local photogrammetry method was designed, which combines the accelerometer sensor in the IMU with a high-resolution industrial monocular camera. With a small amount of transmission line parameters known, only the left part of the tested wire needs to be photographed. After obtaining a single wire image, semantic segmentation technology was introduced to extract

收稿日期: 2023-10-26; 修订日期: 2023-12-12.

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目 (No. 52170218000G)

the wires in the image. Based on the photogrammetric model, the actual points of the wires were connected to the corresponding imaging points, and a nonlinear equation system was established. After nonlinear solving, the three-dimensional shape of the wires was restored, and then the wire sag was calculated. The relative error of sag measurement can be controlled within 5%, meeting practical application requirements.

Key words: transmission line; sag; localized photography; Inertial Measurement Unit(IMU); semantic segmentation

1 引 言

近几年来,我国大力持续发展电力建设,为国民经济的快速发展提供了重要保障。输电线路作为输送电能的主要承担者,在电力系统中起着重要作用。随着人们的用电需求不断扩大,输电线路的规模将继续扩大,与此同时,输电线路的安全运行问题愈来愈受到重视。弧垂作为线路设计和维护时的一个重要考量因素,弧垂大小的合理性与输电线路的稳定性息息相关。

弧垂是指导线上一点到导线两挂点连线的垂直距离。常见的弧垂测量方式为人工测量法^[1],测量人员需借助测绘仪器,结合数学公式来计算导线的弧垂。人工测量获取的弧垂取值精度较高,但劳动强度大,耗时较长,需要探究更好的方法来测量弧垂。毫米波^[2]、GPS^[3-5]、加速度计^[6-8]、激光^[9-11]等技术逐渐应用于导线弧垂的测量。Ayman Uddin Mahin等人^[12]利用发射机和收发器间传输的毫米波来测量导线弧垂。Sangeeta Kamboj等人^[13]利用GPS数据来提取导线的高度信息,进而测量得到导线的弧垂。Aydin Tarik Zengin等人^[14]利用可在导线上行驶的加速度计机器人来确定导线的形状,测量导线的弧垂。上述方法均是将测量装置直接安装在导线上,有一定的参考价值,但测量装置本身的重量会施加在导线上,装置应尽量做到轻便。Elena Golinelli等人^[15]提出了一种放置在地面上的用于测量弧垂的红外激光扫描系统。Siheon Jeong等人^[16]从机载激光扫描点云中提取和重建三维导线。使用激光测量导线弧垂的方法精度较高,但测量设备价格较为昂贵。

图像处理方法为弧垂的测量提供了新思路,相机可安装在无人机上^[17],高压线塔上^[18],或是

地面上^[19],极大满足了不同测量场景的要求。Elzbieta Pastucha等人^[20]利用无人机拍摄的多张图像重建导线,完成了导线弧垂的测量,该方法中,无人机的飞行路线要与导线平行。Achref Abed等人^[21]将相机固定在高压线塔上,通过模板匹配的方式测量导线的弧垂,使用该方法时,相机的位置需要牢牢固定。Alireza Safdarinezhad等人^[22]利用地面上智能手机拍摄的图像及手机内部的加速度计,设计了一种简单有效的弧垂测量方法,该方法需要拍摄完整的导线,当相机的视场角有限且分辨率较低时,不能很好地测量大档距导线的弧垂。

针对现有方法在弧垂测量中出现的问题,本文旨在开发一种便捷经济有效的非接触式弧垂测量方法,致力于解决大档距输电线路条件下使用单目相机测量弧垂困难的问题。应用单目视觉,能够在不与导线接触的安全距离下得到导线的弧垂取值,同时,无需将相机安装在无人机上或高压线塔上,只需将单目相机简单地架设在地面上。当输电线路档距过大,即导线两端挂点间的水平距离过大时,相机不需要拍摄完整的一段导线,拍摄图像中仅包含导线的左侧挂点即可,不必受限于相机的视场角以及拍摄距离。使用本文的方法,能够在已知部分输电线路参数的条件下,利用单目相机拍摄的单幅“不完整导线”图像,计算得到导线的弧垂。

2 弧垂摄影测量方法设计

2.1 弧垂摄影测量整体框架

本文测量导线弧垂的流程如图1。使用相机支架将固联有惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)的单目相机架设在地面上,相机拍摄输电线路中的导线时,令IMU处于工作状

态。通过IMU提供的重力加速度数据能够确定导线上各点处弧垂的成像位置,为弧垂的摄影测量提供有效辅助。获取单幅导线图像后,对图像中的导线进行提取,获取导线像点的像素坐标,为导线弧垂的摄影测量提供数据支持。

在输电线路部分参数已知的条件下,根据摄影测量方程,利用导线实际点以及对应像点与相机光心间的共线关系,建立非线性方程组,求解用于确定导线形状的未知参数。本文方法根据导线的图像信息恢复导线实际的三维形状,借助导线三维形状来计算导线弧垂。

测量弧垂的前提条件有:(1)假设导线在拍摄期间没有晃动,导线位于铅垂面上,弧垂具有铅垂线性性质;(2)导线两侧挂点之间的直线距离、高差为已知条件;(3)相机拍摄导线时,相机与导线左挂点的高差为已知条件;(4)相机上固联有IMU模块,拍摄导线前后,保持IMU模块处于工作状态。

2.2 待测导线的图像提取

采用摄影测量方法测量输电线路弧垂之前,需完成待测导线的图像提取工作。使用图像处

理软件可以手动得到成像导线上各点的像素坐标,但人工取点的方式过于繁琐,且效率较低。利用语义分割方法识别出图像上的导线,能够大大减轻人工取点的工作量,提高弧垂测量的效率。

UNet语义分割网络广泛应用于医学图像^[23]和卫星遥感图像^[24]的语义分割中,分割效果良好。输电线路图像中的导线结构简单,与医学图像的待分割目标相似^[25],同时,输电线路图像中的导线占比极小,与遥感图像中的待分割目标特征相似^[26]。因此,本文选择UNet网络结构为主要参考网络,训练导线语义分割模型。

为解决导线在图像中占比极小的问题,将大尺寸的输电线路图像裁剪成小尺寸图像块用来制作数据集。需要识别大尺寸的输电线路图像时,将大尺寸图像进行顺序裁剪,分块送入训练好的导线语义分割模型进行识别,以拼接的方式获得大尺寸输电线路图像的分割结果,导线的图像提取流程如图1中的部分框图所示。

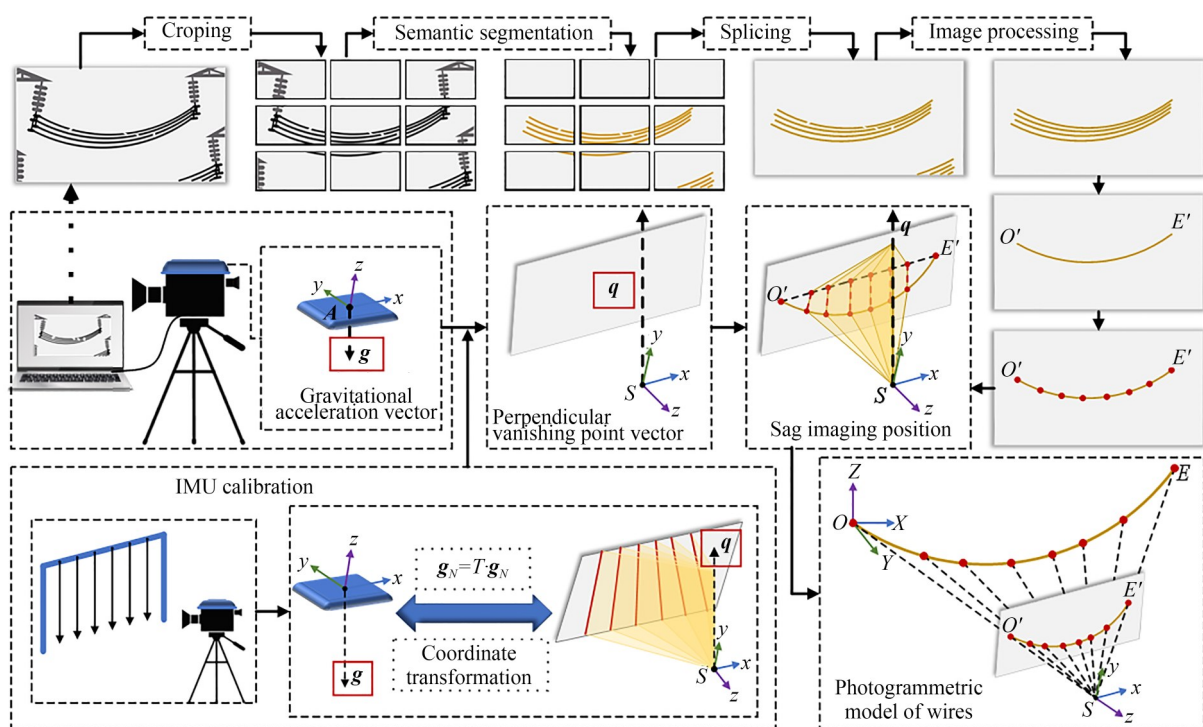


图1 弧垂测量流程图

Fig. 1 Flow chart of sag measurement

2.3 导线摄影测量模型构建

图 2 展示了导线的拍摄场景,为方便分析,先假设相机拍摄的是完整导线。

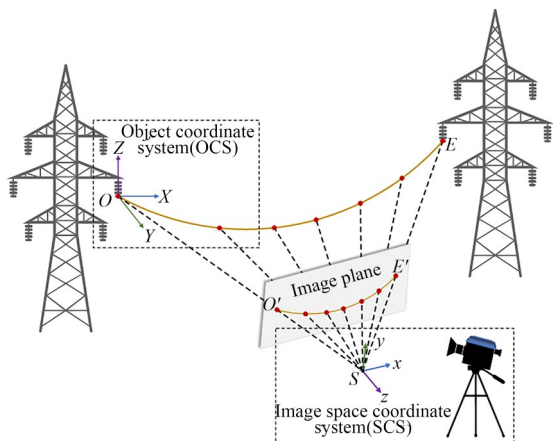


图 2 导线拍摄场景示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wire shooting scene

如图所示,经相机拍摄,导线投影到单目相机的像平面上,导线的两端挂点 O, E , 分别对应像平面上的两个像点 O', E' 。导线上任意一点及其像点与相机光心满足三点共线这一关系。

以导线的左侧挂点 O 为原点,建立对象坐标系 (Object Coordinate System, OCS)。在 OCS 中, Z 轴的方向竖直向上,导线所在铅垂面为 XOZ 平面, Y 轴垂直于 XOZ 平面,导线上任一点的 Y 分量为零。以相机光心 S 为原点,建立像空间坐标系 (Image Spatial Coordinate System, 简称 SCS), x 轴与 y 轴组成的平面平行于像平面, z 轴垂直于像平面,经像素坐标提取和坐标转换,像平面上各点的像空间坐标均为已知量。

导线上一点 i 在 OCS 中的坐标 (对象坐标) 用 $(X_i, 0, Z_i)$ 表示,点 i 对应像点 i' 在 SCS 中的坐标 (像空间坐标) 表示为 $(x_{i'}, y_{i'}, -f)$,使用摄影测量方程将导线上一点 i 与其对应像点 i' 的坐标建立转换关系,如下:

$$\begin{bmatrix} x_{i'} \\ y_{i'} \\ -f \end{bmatrix} = \lambda_i R \begin{bmatrix} X_i - X_s \\ 0 - Y_s \\ Z_i - Z_s \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: (X_s, Y_s, Z_s) 是 SCS 原点 S 在 OCS 中的坐标, f 为相机焦距, λ_i 是点 i 的比例因子, R 是 3×3 旋转矩阵。在本文中,利用相机与导线左侧挂点的高差可求得 Z_s 。

对矩阵 R 中的未知数进行消减。矩阵 R 是一个单位正交矩阵,矩阵中包含 v_x, v_y, v_z 三个单位正交向量,分别表示 SCS 中平行于 OCS 内 X, Y, Z 轴的平行方向,故 R 还可表示为 $R = [v_x \ v_y \ v_z]$ 。

矩阵 R 中的 v_z 向量方向竖直向上,由于 v_z 向量方向的特殊性, v_z 向量可利用相机上固联的 IMU 模块进行求取,求取方式将在后续说明。假设一单位正交矩阵 $R' = [v_1 \ v_2 \ v_z]$, 矩阵 R 可由矩阵 R' 绕 v_z 向量顺时针旋转 κ 角度得到。当 R' 矩阵中的 v_1 和 v_2 确定时, R 矩阵中的唯一未知量是 κ 角。像空间坐标系中, v_1 和 v_2 向量的选取如图 3 所示。 v_2, v_z 与 SCS 中的 z 轴共面, v_1 由 v_z 与 v_2 确定。

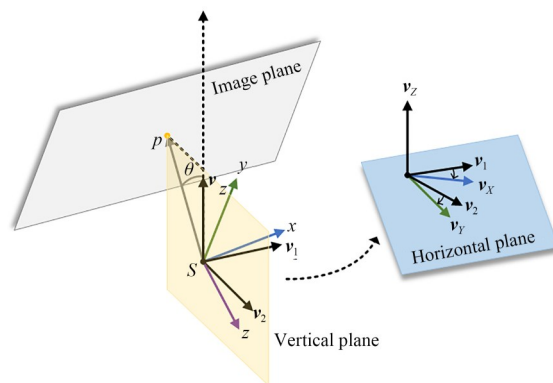


图 3 转换向量选取

Fig. 3 Selection of transformation vector

v_1 和 v_2 由以下方程来估计,其中,点 p 为 SCS 中 z 轴与像平面的交点, θ 为向量 p 与 z 轴的夹角。

$$\begin{aligned} v_2 &= -(p - \langle v_z \cdot p \rangle v_z) / (|p - \langle v_z \cdot p \rangle v_z|) \\ v_1 &= v_z \times v_2 \\ p &= [0 \ 0 \ -f]^T \end{aligned} \quad (2)$$

将上述摄影测量方程式展开,消去 λ_i , 转化为如式 (3) 所示的形式,将此方程作为导线的摄影测量模型。

$$\begin{aligned} x_{i'} &= -f \frac{R_{11}(X_i - X_s) + R_{12}(0 - Y_s) + R_{13}(Z_i - Z_s)}{R_{31}(X_i - X_s) + R_{32}(0 - Y_s) + R_{33}(Z_i - Z_s)} \\ y_{i'} &= -f \frac{R_{21}(X_i - X_s) + R_{22}(0 - Y_s) + R_{23}(Z_i - Z_s)}{R_{31}(X_i - X_s) + R_{32}(0 - Y_s) + R_{33}(Z_i - Z_s)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, R_{ij} 表示 R 矩阵中的第 i 行第 j 列。该式含有的参数包括导线上一点 i 的对象坐标 $(X_i, 0, Z_i)$, 对应成像点 i' 的像空间坐标 $(x_{i'}, y_{i'}, -f)$, 相机光心 S 的对象坐标 (X_s, Y_s, Z_s) 及矩阵 R 中的 κ 角。

将导线上一点的对象坐标与对应像点的像空间坐标作为一组坐标对。可将一组坐标对代入式(3), 得到两个非线性方程。多个坐标对可构成非线性方程组, 用于求解一定数量的未知数。每在像平面上选取一个导线像点 i' , 像点 i' 的像素坐标已知, 经坐标转换可得到 i' 的像空间坐标 $(x_{i'}, y_{i'}, -f)$, 但是像点 i' 对应的实际点 i 的对象坐标 $(X_i, 0, Z_i)$ 是未知的。每加入一个坐标对, 在增加两个非线性方程的同时, 会增加两个未知量。

2.4 非线性方程组建立

以导线摄影测量模型为基础来建立非线性方程组时, 为固定方程组的未知量, 考虑用有限的参数来表示导线上任一点 i 的对象坐标 $(X_i, 0, Z_i)$ 。使用抛物线对导线形状进行拟合, X_i 与 Z_i 的关系可表示为如式(4)所示的形式:

$$Z_i = C_1 X_i^2 + C_2 X_i, \quad (4)$$

式中, C_1, C_2 为两个未知参数。

借助导线弧垂的成像位置来寻找导线上不同点间 X_i 的联系。过导线上一点 i 向上做竖直线, 交 OE 于一点 ϕ_i 。弧垂的上端点为 ϕ_i , 下端点为 i , 分别对应像点 ϕ_i' 和 i' , 如图4所示。

在真实世界中, 弧垂点对(点 ϕ_i 与点 i)不被标记, 故 $\phi_i' i'$ 在像平面上不可见, 弧垂成像位置的确定将在第3章介绍。

在图4中, 设 $O\phi_i$ 的长度为 d_i , $O\phi_i$ 与 OCS 中 Z 轴正方向之间的夹角为 γ , γ 可利用导线挂点 O, E 间的距离与高差求得。在 OCS 中, 导线上一点 i 的 X 分量(X_i)可表示为:

$$X_i = d_i \sin \gamma. \quad (5)$$

在三维空间中, $S\phi_i$ 与 SO 的夹角为 α_i , $S\phi_i$ 与 SE 的夹角为 β_i 。当像点 ϕ_i' 的位置能够确定时, α_i, β_i 可求, 在 OCS 中, 可利用三角形 $\Delta O\phi_i S$, $\Delta S\phi_i E$ 和 ΔOES 的正弦定理, 进一步表示

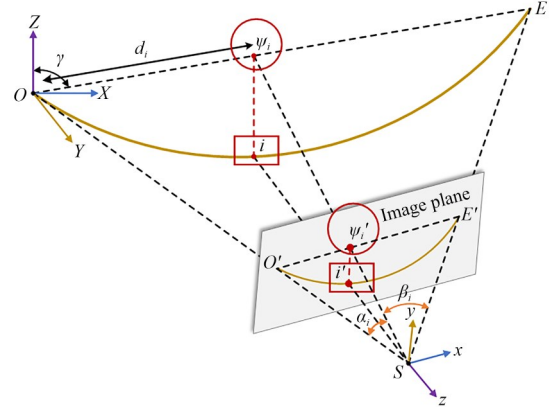


图4 弧垂成像位置

Fig. 4 Schematic diagram of sag imaging position

d_i , 如式(6)所示的形式:

$$\begin{aligned} d_i &= \frac{OE \cdot SO \cdot \sin \alpha_i}{SE \cdot \sin \beta_i + SO \cdot \sin \alpha_i} \\ SE &= \frac{OE \cdot SO \cdot \sin \gamma}{\sqrt{(X_s - OE \cdot \sin \gamma)^2 + Y_s^2 + (Z_s - OE \cdot \cos \gamma)^2}} \\ SO &= \sqrt{X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2} \end{aligned} \quad (6)$$

导线上任一点 i 的对象坐标 $(X_i, 0, Z_i)$ 可使用式(4)、式(5)和式(6)来表示, 涉及的未知参数个数是固定的, 分别为 X_s, Y_s, C_1, C_2 。故应用导线摄影测量模型建立非线性方程组时, 方程组中的未知参数是固定的, 分别为 $X_s, Y_s, C_1, C_2, \kappa$, 求解得到 C_1, C_2 后, 可获取导线形状, 从而计算导线弧垂。

以上分析适用于相机拍摄完整导线的情况。相机拍摄导线的一侧时, 如图5所示, B 为导线上一点, 在像平面上的像点为 B' , 过导线上一点向上做竖直线, 交 OB 于 u_i 。用 c 代替 γ , OB 代替 OE , c, OB 均为未知参数。 a_i, b_i 代替 α_i, β_i , a_i, b_i 仍可求。取导线上多个点及对应像点, 构成多组坐标对(超过4组), 代入摄影测量模型, 构建非线性方程组, 此时, 非线性方程组的未知参数有7个, 分别为 $OB, c, X_s, Y_s, C_1, C_2, \kappa$, 通过非线性求解可得到 C_1, C_2 取值, 计算弧垂。

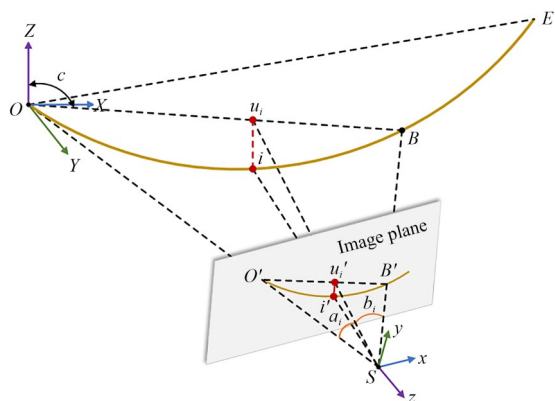


图5 相机拍摄部分导线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of camera captures partial wire

非线性求解时,除 X_s, Y_s, OB 外,其他未知量的初始值可设置为零。 X_s, Y_s 初始估计值的取值情况可根据相机光心与导线左侧挂点的空间位置关系确定。将 B 点选在距离间隔棒较近的位置, OB 的初值估计值可参考线路中的间隔棒距离参数。

导线上任一点 i 处的弧垂 sag_i 的计算公式如式(7)所示,本文计算导线的最大弧垂,即导线挂点连线与导线曲线间的最大差值。

$$sag_i = X_i \cot \gamma - C_1 X_i^2 - C_2 X_i. \quad (7)$$

3 弧垂成像位置确定

3.1 弧垂铅垂线特性研究

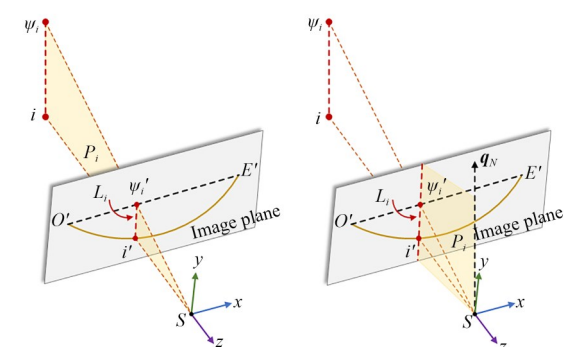
第2章中,弧垂的成像情况被当作已知量。本节利用弧垂的铅垂线特性,应用归一化的铅垂线灭点向量 $\mathbf{q}_N$ 来确定弧垂的成像位置。

图6展示了导线弧垂与其成像位置的空间关系,真实的导线未在图中画出。导线上一点 i 处的弧垂为 ψ_i ,对应像平面上的 ψ'_i ,相机光心 S , ψ'_i , ψ_i 共面于垂直平面 P_i 。

图6(b)中,过像空间坐标系的原点 S 作铅垂线的灭点向量 $\mathbf{q}$,向量 $\mathbf{q}$ 始终平行于铅垂线^[27],即平行于导线上任一点处的弧垂,故向量 $\mathbf{q}$ 位于 P_i 平面上。图中画出了向量 $\mathbf{q}$ 的归一化向量 $\mathbf{q}_N$ 。

取一导线像点 i' ,利用向量 $\mathbf{q}_N$ 与点 i' 可确定 P_i 平面, P_i 平面与像平面相交于直线 L_i (ψ'_i 所在直线),直线 L_i 与 $O'E'$ 的交点即为 ψ'_i 。

直线 L_i 的方程可写为:



(a) 弧垂及弧垂成像位置 (b) 向量 $\mathbf{q}_N$ 与弧垂的关系
(a) Sag and sag imaging position (b) Vector $\mathbf{q}_N$ and sag

图6 利用向量 $\mathbf{q}_N$ 确定弧垂的成像位置Fig. 6 Determine the imaging position of sag through $\mathbf{q}_N$

$$n_x x + n_y y = n_z f, \quad (8)$$

其中: n_x, n_y, n_z 是 P_i 平面三维法向量的分量,可由向量 $\mathbf{q}_N$ 与点 i' 的像空间坐标 $[x_{i'}, y_{i'}, -f]^T$ 的交叉乘积来获取。

向量 $\mathbf{q}_N$ 的计算可借助铅垂线。若相机在拍摄导线的同时拍摄到两条铅垂线,可计算得向量 $\mathbf{q}_N$ 。假设两条铅垂线的图像轨迹分别为 L_1 和 L_2 , L_1 与 $\mathbf{q}_N$ 共面(铅垂平面 P_1), L_2 与 $\mathbf{q}_N$ 共面(铅垂平面 P_2)。在像空间坐标系中,单位向量 $\mathbf{q}_N$ 可通过铅垂平面 P_1 和 P_2 的交线来确定,具体步骤如下:

(1)在 L_1 和 L_2 上各选取两点,分别根据 L_1, L_2 上两点的交叉积得到铅垂面 P_1, P_2 的法向量;

(2)计算两铅垂面法向量的交叉积,得到 $\mathbf{q}$ 的方向,归一化得到 $\mathbf{q}_N$;

(3)当拍摄多条铅垂线时,将铅垂线进行两两组合,重复上述步骤,得到多组 $\mathbf{q}$ 的归一化值,求取平均后得到最终的归一化值 $\mathbf{q}_N$ 。向量 $\mathbf{q}_N$ 与矩阵 $\mathbf{R}$ 中的 $\mathbf{v}_z$ 向量重合,可看作同一向量。

3.2 IMU 标定

3.1 节中,相机每改变拍摄姿态就要重新计算一次向量 $\mathbf{q}_N$,为避免此繁复运算,考虑将其坐标系中的竖直向量与像空间坐标系中的向量 $\mathbf{q}_N$ 建立计算关系。

重力加速度向量 $\mathbf{g}$ 的方向竖直向下,平行于向量 $\mathbf{q}_N$,向量 $\mathbf{g}$ 可由 IMU 在静止状态下测得。将 IMU 与相机固联在一起,经 IMU 标定,确定向量 $\mathbf{q}$ 与向量 $\mathbf{q}_N$ 的转换关系,可将 IMU 测得的向量 $\mathbf{g}$ 转换为向量 $\mathbf{q}_N$ 。图7展示了 IMU 标定的示意图。

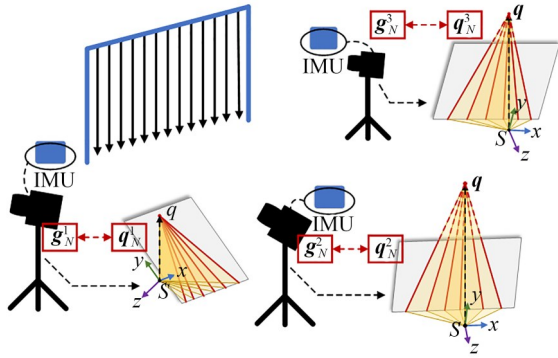


图7 IMU标定

Fig. 7 IMU calibration

如图7所示,使用相机分别从三个不同的视角来拍摄铅垂线模拟装置。相机拍摄铅垂线时刻,IMU记录拍摄图像时刻对应的重力加速度向量 g ,并对其进行归一化。得到铅垂线图像后,按照上一节计算向量 q_N 的步骤,利用图像中的铅垂线计算出向量 q_N ,作为 q_N 的参考真值。将每幅图像对应的归一化向量 q_N 与归一化向量 g_N 作为一组向量对,令 q_N 与 g_N 之间进行坐标转换,如式(9)所示:

$$q_N = T \cdot g_N, \quad (9)$$

式中, T 为 3×3 旋转矩阵。可根据三组向量对建立线性方程,求解后获取 T 矩阵的元素,得到 q_N 与 g_N 的转换关系。IMU标定完成后,使用相机拍摄导线时,只需提前开启IMU的数据记录功能,利用相机在拍摄导线时刻的重力加速度信息,即可获得导线上任一点所在铅垂线的成像位置,该成像位置涵盖了弧垂的成像位置。

4 实验验证

4.1 实际场景下的导线语义分割

使用Unet模型训练导线数据集,训练好的导线语义分割模型在测试集上的各项指标良好,平均像素精确率(mPA)为89.57%,平均交并比(mIoU)为94.50%,平衡F分数(F1-score)为94.22%。图8展示了一幅输电线路图像的语义分割过程。

将同一档距内的多条完整导线作为主要分割目标,重点检验导线语义分割模型对图像中间区域多条导线的分割效果。由上图中的局部小

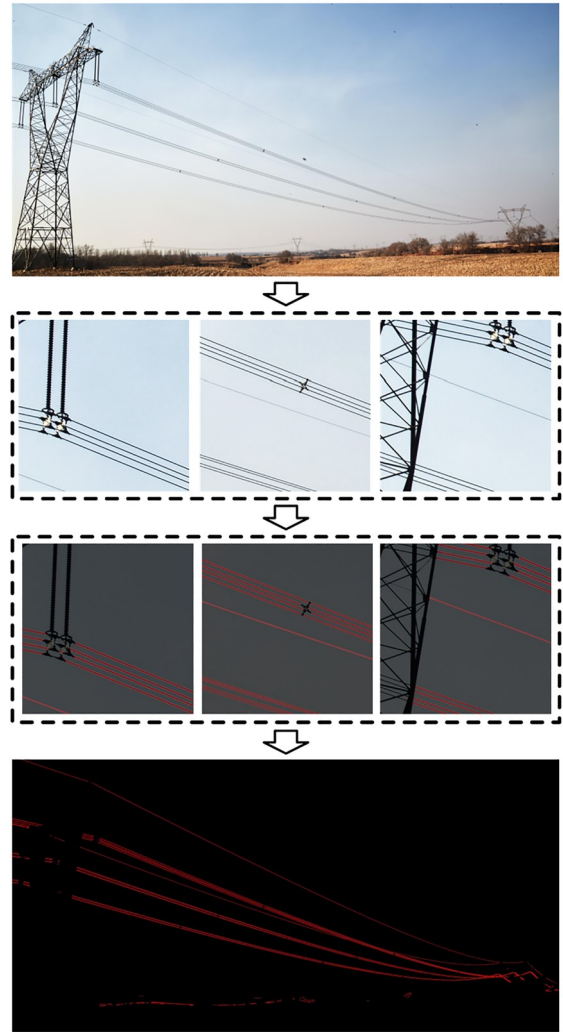


图8 导线的语义分割过程

Fig. 8 Semantic segmentation process of wires

块图像可看出,模型对导线的分割效果良好,导线与背景的边界清晰。拼接好的整幅输电线路图像基本上不存在拼接痕迹,也没有导线误分割情况,因此,训练好的导线语义分割模型,能够用来识别输电线路图像中的导线。

4.2 弧垂测量实验

在实际场景中,选择待测输电线路中的一根导线作为测量目标,输电线路电压为500 kV,导线宽度约为40 mm。经全站仪测量,目标导线两端挂点的直线距离为280.981 m,左右挂点的高差为8.840 m,使用全站仪获取目标导线中心线上若干点(包含挂点)的三维空间坐标,并进行三维曲线拟合,如图9所示。获得目标导线的最大弧垂为6.219 8 m,将此计算值作为目标导线弧垂的参考值。

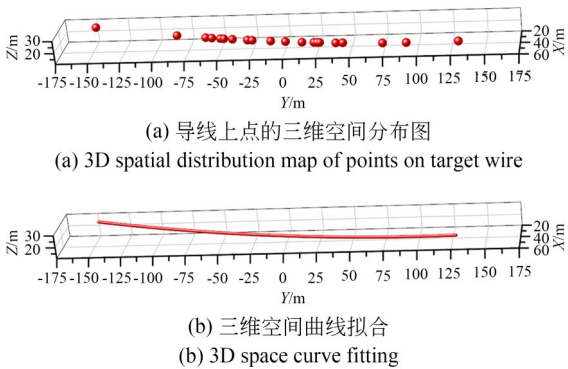


图9 目标导线的形状拟合

Fig. 9 Shape fitting of target wire

实验所用相机与镜头参数分别如图 10 所示。在进行弧垂测量实验前,使用张正友标定法进行相机标定,得到相机的焦距为 12.006 mm。由于相机的畸变系数很小,不再对相机拍摄图像进行去畸变处理。

测量导线弧垂时,将固联有 IMU 的单目相机架设在地面上,用于拍摄导线。IMU 固定在相机上方,处于工作状态,IMU 的型号为 IM948,加速度精度为 0.098 m/s²。

使用相机拍摄包含目标导线左挂点在内的导线部分图像,拍摄场景如图 11(a)。在输电线路前方设置 10 个相机拍摄方位,并令相机在方位线上前后移动。相机正对高压线塔的左侧时,将相机与左侧高压线塔的连线作为方位 1,以方位 1 为基准。方位 2 向右偏离 10 m,以此类推。使用相机拍摄的一幅导线图像如图 11(b)所示。

完成目标导线的拍摄后,经语义分割和骨干提取获得导线的中心线,将导线中心线上的点作

	Camera model	ME2P-2622-15U3C
	Image sensor	GMAX0505
	Target surface size	1.1"
	Pixel size	2.5 μm
	Resolution ratio	5 120×5 120
	Lens model	HN-P-1224-25M-C1.2/1
	Target surface size	1.2"
	Pixel size	2.74 μm
	Field angle	62.33°×55.33°(H×V)
	Focal length	(12±5%)mm

图 10 相机及镜头参数

Fig. 10 Camera and lens parameters

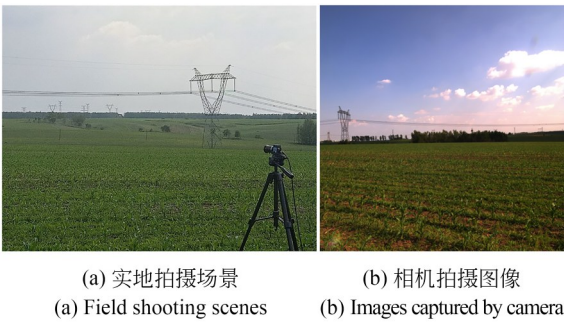


图 11 导线实地拍摄场景

Fig. 11 Field shooting scenes of wires

为导线的代表点。在导线中心线上均匀选取多个点,并将点的像素坐标转换为像空间坐标。随后运用本文设计的弧垂测量方法,将导线上多个点的对象坐标与对应像点的像空间坐标代入摄影测量方程,建立非线性方程组。通过合理设置相机光心对象坐标的初值,及被拍摄到的目标导线的部分档距初值,经非线性求解确定导线的实际形状,进而计算弧垂。目标导线的弧垂测量相对误差情况如表 1。

表 1 弧垂测量相对误差

Tab. 1 Relative error of sag measurement (%)

Distance/m	Shooting direction serial number									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100	3.22	0.49	3.17	1.34	4.46	3.92	1.44	2.37	1.21	4.35
120	0.58	2.27	1.69	3.88	2.24	0.43	3.16	4.19	1.29	3.02
150	0.91	1.26	3.04	0.66	0.80	0.25	0.68	2.32	3.27	1.36

将相机在不同距离不同方位下对应的弧垂测量相对误差绘制成图,如图 12 所示。

由表 1 和图 12 可以看出,弧垂的测量相对误

差未随拍摄距离的增加而加大,也没有随拍摄方位的改变而呈现规律性变化。

对影响弧垂测量结果的主要因素进行分析:

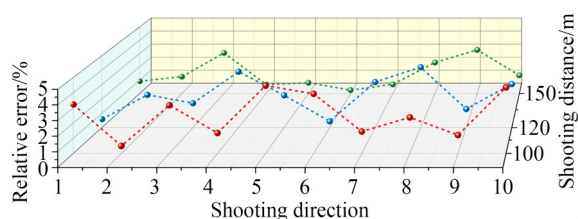


图12 导线弧垂测量相对误差曲线

Fig. 12 Relative error curve of wire sag measurement

(1)拍摄导线时,尽管天气较好,但偶有微风,线路中的导线会上下浮动,相机与相机支架可能会发生轻微抖动,这些均会对弧垂测量结果产生影响。(2)对导线图像进行处理时,导线的语义分割以及中心线提取效果亦会对弧垂的测量结果产生影响。例如,当拍摄距离分别为100 m和150 m时,导线在图像中的宽度约为7 pixels和5 pixels,像素当量约5 mm/pixel和8 mm/pixel。计算导线的弧垂时,会选取图像导线中心线上的多个点,若提取到的导线中心线不够准确,不能完全保证选取的每个点位于导线中心线上。取点位置每偏离一个像素,便会产生约5 mm和8 mm的实际尺寸误差,这会产生一定的弧垂测量误差。

本实验中,拍摄距离控制在100~150 m范围内,导线成像清晰,且拍摄方位没有出现偏情况,因素(1)和(2)对弧垂测量结果的影响超出拍摄距离、拍摄方位对弧垂测量结果的影响,故实验结果没有呈现明显规律。可认为,拍摄距离为100~150 m时,若导线在图像中成像清晰,拍摄距离不会过多地影响弧垂的测量精度,拍摄方位对弧垂的测量精度有一定程度的影响,当拍摄方位过于偏向导线两端时,弧垂测量相对误差超过5%,本实验中的拍摄方位均在可接受范围内。

综上,在拍摄距离100~150 m且拍摄方位不

过偏的条件下,使用本文设计的方法测量导线弧垂时,整体的相对误差能够维持在5%以内。当线路中的导线只受气温影响时,导线弧垂的最大变化量在2 m左右,若考虑风、覆冰等因素,弧垂的变化量会更大,因此,本文方法的测量精度能够满足输电线路弧垂的实际测量要求。

5 结 论

本文使用单目相机拍摄大档距导线时,导线在水平方向过长,相机无法获取完整导线的图像,为了克服这一难题,本文设计了一种通过拍摄部分导线来测量导线弧垂的方法,并完成了现场测试。

将单目相机与IMU固联,经IMU标定,能够根据IMU提供的重力加速度数据确定导线弧垂的成像位置。将弧垂成像位置作为已知条件,构建导线摄影测量模型,通过向模型代入多组导线的物点像点坐标对,建立含有限个数未知数的非线性方程组,经非线性求解可以获得导线形状参数,进而计算导线弧垂。

寻找坐标对时,利用空间几何关系,用有限的未知数表示导线上任一点的对象坐标,使得非线性方程组的未知数个数保持恒定;应用语义分割和中心线提取技术,快速提取成像导线中心线上所有点的像素坐标,经坐标转换得到像空间坐标,物点与像点间的对应关系可通过像点处的弧垂成像位置来一一确定。

测量导线弧垂时,将全站仪测量得到的弧垂值作为参考值,通过对比测量结果,本文设计的弧垂测量方法具有可靠性,能够很好地运用到实际场景中,弧垂的测量误差保持在5%以内,能够满足实际应用要求。

参考文献:

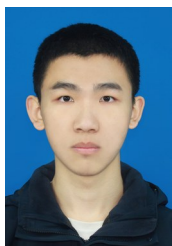
- [1] 陈凯,罗兆楠,江海涛.特高压变电站软母线弧垂测量方法[J].山东电力技术,2019,46(1):10-13.
CHEN K, LUO Z N, JIANG H T. Sag measurements of flexible busbar in UHV substations [J]. *Shandong Electric Power*, 2019, 46(1): 10-13. (in Chinese)
- [2] MAHIN A U, ISLAM S N, HOSSAIN M F. Mil-

- limeter wave based sag measurement using parabolic approximation for smart grid overhead transmission line monitoring[C]. 2019 *IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*. Beijing, China. IEEE, 2019: 1-5.
- [3] MENSAH-BONSU C, KREKELER U F, HEYDT G T, et al. Application of the Global Positioning System to the measurement of overhead power

- transmission conductor sag[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2002, 17(1): 273-278.
- [4] MENSAH-BONSU C, HEYDT G T. Real-time digital processing of GPS measurements for transmission engineering [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, 18(1): 177-182.
- [5] KAMBOJ S, DAHIYA R. Application of GPS for sag measurement of overhead power transmission line [J]. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 2011, 3(3): 268-277.
- [6] HSU T S, CHIEH CHIU H, YANG Y C, *et al.* An IoT-based sag monitoring system for overhead transmission lines [C]. 2019 *IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*. Bangkok, Thailand. IEEE, 2019: 515-519.
- [7] ABRAHAM A P, ASHOK S. Gyro-accelerometric SAG analysis and online-monitoring of transmission lines using line recon robot [C]. 2012 *Annual IEEE India Conference (INDICON)*. Kochi, India. IEEE, 2012: 1036-1040.
- [8] JIANG J A, CHIU H C, YANG Y C, *et al.* On real-time detection of line sags in overhead power grids using an IoT-based monitoring system: theoretical basis, system implementation, and long-term field verification [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(15): 13096-13112.
- [9] ZHENG Z J, LIU J H, ZHOU B Y, *et al.* Research on UAV sag measurement system based on 3D lidar [C]. 2020 *5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)*. Dalian, China. IEEE, 2020: 1-7.
- [10] GOLINELLI E, MUSAZZI S, PERINI U, *et al.* Conductors sag monitoring by means of a laser based scanning measuring system: experimental results [C]. 2012 *IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*. Brescia, Italy. IEEE, 2012: 1-4.
- [11] KWINTA A, WAŻYDRAĞ K, ZYGMUNT M. Analysis of power lines span geometry based on TLS measurements [J]. *E3S Web of Conferences*, 2018, 55: 00013.
- [12] MAHIN A U, HOSSAIN M F. Millimeter wave based sag measurement technique for overhead transmission lines in smart-grid [C]. 2019 *International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE)*. Dhaka, Bangladesh. IEEE, 2019: 1-5.
- [13] KAMBOJ S, DAHIYA R. *Designing and Implementation of Overhead Conductor Altitude Measurement System Using GPS for Sag Monitoring* [M]. Intelligent Computing Techniques for Smart Energy Systems. Singapore: Springer Singapore, 2019: 183-194.
- [14] ZENGİN A T, ERDEMİR G, AKINCI T C, *et al.* Measurement of power line sagging using sensor data of a power line inspection robot [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 99198-99204.
- [15] GOLINELLI E, PERINI U, OGLIARI G. A New IR laser scanning system for power lines SAG measurements [C]. 18th *Italian National Conference on Photonic Technologies (Fotonica 2016)*. Rome. London: IET, 2016: 1-4.
- [16] JEONG S, KIM D, KIM S, *et al.* Real-time environmental cognition and sag estimation of transmission lines using UAV equipped with 3-D lidar system [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(5): 2658-2667.
- [17] 郭明, 孙梦溪, 黄明, 等. 融合激光雷达与无人机的特大钢结构高精度测量 [J]. *光学精密工程*, 2021, 29(5): 989-998.
- GUO M, SUN M X, HUANG M, *et al.* High-precision measurement of steel structure based on LiDAR and UAV [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(5): 989-998. (in Chinese)
- [18] 张星, 王孟, 王政, 等. 基于单目测量方法的架空导线弧垂实验研究 [J]. *电力科学与工程*, 2018, 34(5): 65-69.
- ZHANG X, WANG M, WANG Z, *et al.* Experimental study of overhead conductor sag based on monocular measurement [J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2018, 34(5): 65-69. (in Chinese)
- [19] MOLAEI A, TAGHIRAD H D, DARGAHI J. Extracting of sagging profile of overhead power transmission line via image processing [C]. 2018 *IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE)*. Quebec, QC, Canada. IEEE, 2018: 1-5.
- [20] PASTUCHA E, PUNIACH E, ŚCISŁOWICZ A, *et al.* 3D reconstruction of power lines using UAV images to monitor corridor clearance [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(22): 3698.

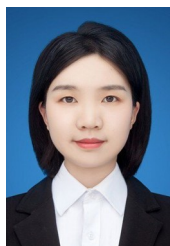
- [21] ABED A, GLASS M, TRABELSI H, *et al.* Sag monitoring of overhead power lines based on image processing [C]. 2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). Monastir, Tunisia. IEEE, 2021: 142-146.
- [22] SAFDARINEZHAD A, ABDOLLAHIFARD M J, GANJALI A. A photogrammetric solution for measurement of power lines sag via integration of image and accelerometer data of a smartphone[J]. *Measurement*, 2022, 199: 111493.
- [23] WENG Y, ZHOU T B, LI Y J, *et al.* NAS-un-et: neural architecture search for medical image segmentation [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 44247-44257.
- [24] HOU Y W, LIU Z Y, ZHANG T, *et al.* C-UN-et: complement UNet for remote sensing road extraction[J]. *Sensors*, 2021, 21(6): 2153.
- [25] GADOSEY P K, LI Y J, ADJEI AGYEKUM E, *et al.* SD-UNet: stripping down U-net for segmentation of biomedical images on platforms with low computational budgets[J]. *Diagnostics*, 2020, 10(2): 110.
- [26] 徐胜军, 张若暄, 孟月波, 等. 融合分形几何特征 Resnet 遥感图像建筑物分割[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(16): 2006-2020.
- XU S J, ZHANG R X, MENG Y B, *et al.* Fusion of fractal geometric features Resnet remote sensing image building segmentation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(16): 2006-2020. (in Chinese)
- [27] ARİK O, YUKSEL S E. Mobile device camera calibration using building images and onboard accelerometer [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 5022208.

作者简介:



胡冠华(2005—),男,黑龙江哈尔滨人,主要从事人工智能、机器视觉等方面的研究。E-mail: hu_guanhua@163.com

通讯作者:



孙成会(1998—),女,河北石家庄人,博士研究生,2021年于东北林业大学获得学士学位,2023年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事图像测量、三维测量等方面的研究。E-mail: sunchenghui11@163.com