



高电压技术

High Voltage Engineering

ISSN 1003-6520, CN 42-1239/TM

《高电压技术》网络首发论文

题目：基于双目测距的输电线交叉跨越测量
作者：孙胜男，吕玉祥，王帅，南永兵，邵亦博
DOI：10.13336/j.1003-6520.hve.20180822002
网络首发日期：2018-08-23
引用格式：孙胜男，吕玉祥，王帅，南永兵，邵亦博. 基于双目测距的输电线交叉跨越测量. 高电压技术. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20180822002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于双目测距的输电线交叉跨越测量

孙胜男, 吕玉祥, 王 帅, 南永兵, 邵亦博

(太原理工大学物理与光电工程学院, 太原 030024)

摘 要: 高压输电线间距过小时容易出现相间闪络和短路等故障, 为预防此类故障带来的危害, 提出了基于双目测距的输电线交叉跨越测量方法。该方法基于改进的链码算法, 设计了一种输电线自动检测算法, 以提取输电线的像素坐标; 依据双目测距原理, 建立了输电线交叉跨越几何测量模型, 计算了输电线间距。最后将该方法应用于对山西阳泉 2 条输电线的现场测量中。实际测量结果表明, 该方法可以有效地对待测线路进行检测、拟合与合并, 能够准确地获取待测线路的像素坐标; 在几何测量模型中, 待测的 2 条线路无论是平行, 还是交叉跨越, 均可被准确测量, 实现了自动检测与无接触测量。与全站仪测量结果相比, 新方法的测量误差 $<2\%$, 证明新方法准确有效, 满足实际测量要求。

关键词: 输电线路; 交叉跨越; 改进链码; 线路合并; 双目测距; 几何测量模型

Measurement of Space Crossing Transmission Line Based on Binocular Ranging

SUN Shengnan, LÜ Yuxiang, WANG Shuai, NAN Yongbing, SHAO Yibo

(College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Excessively short distance between high voltage transmission lines will lead to serious faults such as flashover and short circuit. In order to prevent the danger caused by such faults, we put forward a measurement method of space across transmission lines based on binocular ranging. The method is based on the improved chain code algorithm, and the automatic detection algorithm of transmission line is designed to extract the pixel coordinates of transmission line; according to the binocular ranging principle, a geometric measurement model of the space crossed transmission line was built to calculate the transmission line spacing. Finally, the method was applied to the on-site measurement of 2 transmission lines in Shanxi Yangquan. The actual measurement results show that the method can effectively detect, fit and combine the lines to be measured. In the geometric measurement model, the transmission line spacing can be accurately measured both in parallel or space crossing transmission line, then automatic detection and non-contact measurement can be realized by this method. Compared with the measurement results of the electronic total station, the maximum measurement error of the new method is less than 2%, which verifies the method is accurate and effective, and meets the requirements of actual measurement.

Key words: transmission line; space crossed; improved chain code; line merging; binocular ranging; geometric measurement model

0 引言

输电线交叉跨越距离是线路安全运行的重要指标, 由于电力线路的增加, 输电线交叉跨越带来的问题更加突出^[1-3]。输电线受自身运行状态和外部环境的影响, 会出现弧垂过大等问题, 从而引起交叉跨越距离的变化, 导致相间闪络^[4]和跳闸事故, 进而严重威胁到输电线路的正常运行。

国内外对于输电线跨越山川、建筑物、线杆、公路等的研究已经比较成熟, 但对于特殊环境下输

电线间交叉跨越的研究还不足^[5-6]。输电线交叉跨越测量普遍存在的问题是不能精确找到 2 条输电线间的交叉跨越点, 使得实际测量难度大。在目前使用较为普遍的方法中, 电子经纬仪操作简单, 但测量精度低; 超声波测距传感器的有效测量距离较短, 一般在 10 m 以内; 激光测距精度可达 mm 级, 但往往应用于测量点间的距离^[7]; 全站仪测量误差一般在 30~50 cm, 但安放位置受限且投影过程繁琐^[8]。由于输电线纹理单一, 无法找到特征点, 因此凭借工人的巡检经验进行测量会导致不可预知的误差。

随着技术的发展, 图像测量技术被广泛应用于工程测量中^[9], 在输电线的覆冰检测^[10-12]、弧垂监

测、线路故障诊断中也逐渐受到了关注。本文采用图像处理技术标定相机、矫正图像，采用改进的链码算法^[13-14]来自动检测线路，提出利用点搜索和线路拟合算法来获取待测线路的像素坐标，从而对线路进行拟合、合并和删除；并根据双目测距原理^[15-16]建立交叉跨越几何测量模型，该模型可测量平行和交叉跨越的输电线路，实现输电线路交叉跨越的自动检测与无接触测量。

1 测量方案

双目相机装置对交叉跨越区域进行拍摄，利用 MATLAB 程序对图像进行处理，并自动检测待测线路，获取线路的像素坐标，然后使用几何测量模型来计算交叉跨越距离。双目相机呈上下摆放，坐标均以各自的光心为坐标原点，2 个相机的光轴前向平行。现场模拟图如图 1 所示，图 1 中 m 、 n 为交叉跨越点，位于上方的是 1 号机，位于下方的是 2 号机。

1.1 相机标定与图像矫正

相机标定与图像矫正是图像测量的前提，在图像测量的过程中，测量精度受硬件、环境和软件因素的影响很大。本文选择表 1 所列型号的相机来减少相机性能、帧存与电荷耦合元件不同步等硬件因素的影响^[17]。相机标定是确定相机几何参数和光学参数的过程，通过相机标定得到的相机内外参数可以确定镜头的非线性畸变参数，应用此参数可对图像进行矫正，从而减少镜头畸变造成的测量误差。本文使用张正友标定方法^[18]实现相机标定，标定结果见表 1。

表 1 中的标定结果表明这 3 款相机均符合图像测量要求，可以应用到本文的测量中。

1.2 输电线的自动检测

1.2.1 改进链码算法

本文对无畸变图像进行去雾处理，并跟踪边界，删除长度小于阈值的边界，从而排除云朵、树枝等背景边缘噪声。使用 8 方向链码对线路进行边界检测，输电线路在图像中近似为直线，相邻链码取向变化量 $\leq 45^\circ$ ，即相邻的链码值的差值 ≤ 1 。由于实际线路环境较复杂，为获取准确、完整的待测线路像素坐标，需要对链码进行检测、跟踪、分裂及更新，算法流程图如图 2 所示。算法步骤如下：

1) 读取无畸变图像，使用 `bwboundaries` 语句跟踪边界，删除短边界，减少背景噪声。

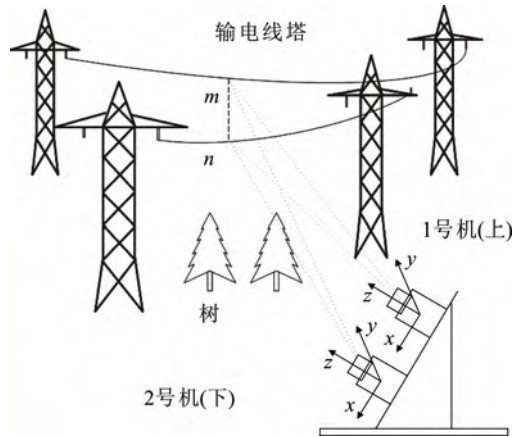


图 1 现场模拟图

Fig.1 Scene simulation figure

表 1 相机标定结果

Table 1 Camera calibration results

相机型号	像素 /万	传感器 尺寸 /(mm×mm)	有效 焦距 /pixels	径向畸变系数		误差 /%
				K_1	K_2	
MUC36M	36	3.6×4.8	1 440.7	-0.446 6	8.467 9	0.11
JHSM36f	36	3.6×4.8	1 347.2	-0.355 5	5.136 1	0.10
尼康 D90	1 230	23.6×15.8	8 960.8	0.293 4	2.122 4	0.08

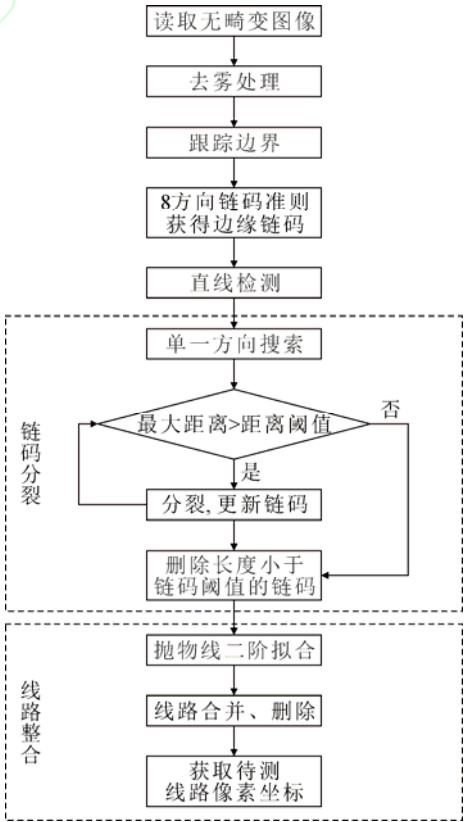


图 2 改进的链码算法流程图

Fig.2 Improved chain code algorithm flow chart

2) 使用传统 8 链码算法检测线路, 获取边界链码, 存储对应的像素坐标。

3) 某边界链码检测效果如图 3(a)深色粗线所示, 图 3(b)为图 3(a)的细节展示, 图中*点为边界点。在图 3(a)中有 4 条线段, 图像边缘线段 a、b 和 2 条相交线段线路 1 和线路 2。可看到单一线路原始方向的取向发生了改变, 且长度小于该线路原始长度。因此, 提出线路的单一方向搜索方法, 即对如图 3(b)的边界点像素坐标呈现递减和递增的交界 c 处进行链码断裂, 来排除图像边缘 a、b 和线路相交造成的错误检测。

4) 线路的单一方向搜索结果如图 4 所示。图 4(a)中图像边缘错误检测得以排除, 但仍出现 2 条线路相交使检测结果非单一线路原始方向取向的问题 (如图 4(a)中两条相交线段线路 3 和线路 4)。因此, 需要在 2 条线路交界处 (图 4(b)的 c 处) 进行交界点跟踪, 并在此处分裂、更新链码。具体方法是连接首尾边界点, 从而得到直线方程, 当边界点距此直线距离大于距离阈值时, 即找到相交线路的交界处, 此边界点即链码分裂处; 直到所有边界点距此直线距离均小于最大距离阈值时, 链码分裂结束, 并将长度小于链码长度阈值的剔除, 此时, 所有线路的链码跟踪、分裂、更新已完成。

1.2.2 点搜索算法

本文提出线路的点搜索算法, 相比于传统的特征检测、立体匹配、图像分割算法, 该算法可有效地检测到完整的同名点。成像示意图如图 5 所示, 双目相机上下放置, 使得部分输电线会出现在单个相机像平面上 (1 号相机图像为线--域, 2 号相机图像为线--区域), 而不在双目相机的视场重叠区域 (阴影 A)。此时, 若仍然根据相同的 x 轴像素值来求取同名点 y 轴像素值 (原理如 1.3.1 节所阐述), 则会出现错误, 因此需要搜索出视场重叠区域的输电线上的点。1 号相机的图像中, 线路的 x 轴坐标范围为 (x_2, x_{n2}) , 2 号相机的图像中, 线路的 x 轴坐标范围为 (x_1, x_{n1}) 。比较 2 幅图像中输电线上 x 值的大小, 从较大的 x 值开始 ($x_2 > x_1$), 同时搜索并存储 2 幅图像中各输电线点的像素坐标, 当没有相同 x 值时, 搜索结束, 得到像平面上双目相机视场重叠区的输电线上点的 x 值, 即视场重叠区线路的 x 轴坐标范围为 (x_2, x_{n1}) 。

1.2.3 线路合并算法

输电线纹理单一、特征不明显, 检测难度大,

常用的边缘提取算法会导致双边缘现象, 相位一致性算法得到的数据点不足。在 1.2.1 节中线路经链码断裂后, 同一条线路可能会断裂成多个边界链码, 对每个边界链码对应的像素坐标进行拟合后, 又会得到多个边界像素坐标, 即拟合出多条相近线路。因此本文在原有 2 阶抛物线拟合的基础上, 进一步提出线路合并、删除算法, 提取待测线路, 确定线路上点的像素坐标。线路合并、删除算法如图 6 所示, 效果图如图 7 所示。

2 阶线路拟合步骤如下:

1) 获取每个 cell 的链码所对应的线路的像素坐标, 使用线路的 2 阶抛物线模型得到系数 p_1 、 p_2 、 p_3 的值, 即输电线上点的拟合系数。

2) 由线路的 2 阶抛物线模型和拟合系数, 可表示线路上第 i 点 ($i=1, 2, \dots, s$) 的 y 值为

$$y(x_i) = p_1 x_i^2 + p_2 x_i + p_3 \quad (1)$$

式中: x_i 为点搜索算法所得的 x 轴像素值; s 为点的总个数。

线路合并、删除步骤如下:

1) 从图 7(a)中可看到, 对线路像素坐标 2 阶拟合后, 目标线路是需要获取的线路, 而邻近线路与

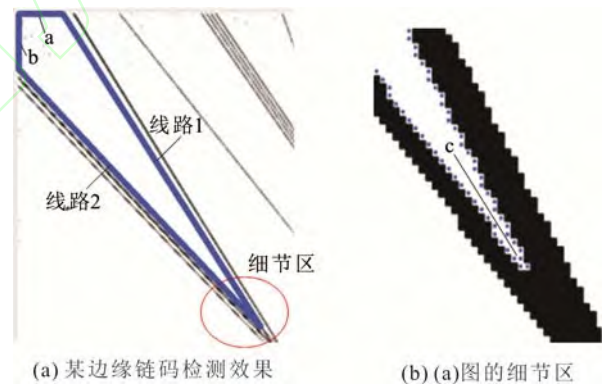


图 3 边缘链码检测效果

Fig.3 Chain code edge detection effect

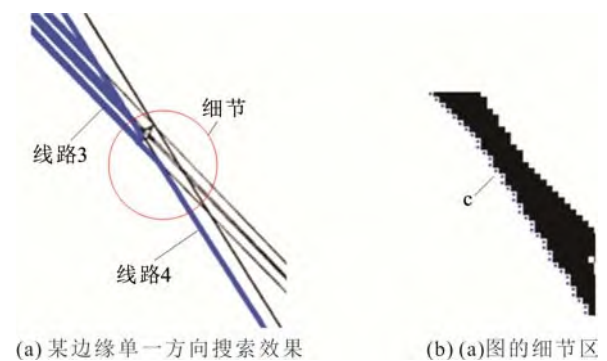


图 4 单一方向搜索效果

Fig.4 Single direction search effect

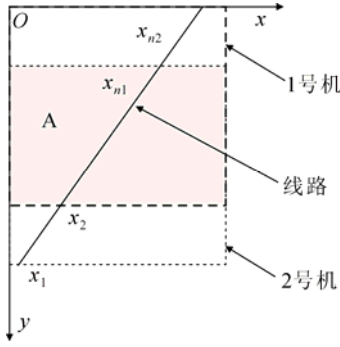


图5 成像示意图

Fig.5 Imaging schematic

远离线路对目标线路像素坐标的获取造成了干扰，因此统称为干扰线路。对比线路长度，超过阈值 d_0 的为不同线路，小于阈值 d_0 的可能是相邻线路、远离线路与旁路。

2) 对于长度相近的线路进行对应点距离的计算，小于阈值 d_1 的为相邻线路，需要对所有邻近线路进行第2次2阶拟合。

3) 小于阈值 d_3 、介于 d_1 与 d_2 之间的均可能为旁路，不符合条件的为远离线路，其拟合效果较差，需要被删除。

4) 当所有线路均不符合以上要求时，线路的自动检测结束；否则，循环检测。

图7(a)为处理前线路拟合效果图，图7(b)为处理后的效果图。对比可知，该算法有效检测到了输电线路，排除了干扰线路，并较准确地得到了线路的像素坐标，可为后续的准确计算奠定基础。

1.3 交叉跨越几何测量模型的提出

1.3.1 双目测距原理

双目立体成像的实现是基于视差的原理，双目测距原理如图8所示。2台相机的相对位置固定，像平面位于同一平面上，光轴前向平行^[19]。由于输电线符合2阶抛物线模型，则1个 y 值可能对应多个 x 值，所以双目相机采取上下放置的形式。2幅图像是列对准的，具有相同的方向和 x 轴坐标。在图8中， O_1 、 O_2 分别表示1、2号相机的光心位置， f 为相机的有效焦距， T 为基线长度，mm。点 C 在上下图像上的成像点的纵坐标分别为 y_u 和 y_d ，pixels，视差表示为 $d=y_u - y_d$ ， C 点到像平面的距离为 L ，mm。

由点搜索与线路拟合算法得到点像素坐标计算视差 d ，并由三角形相似原理计算待测点到像平面的距离 L ，即

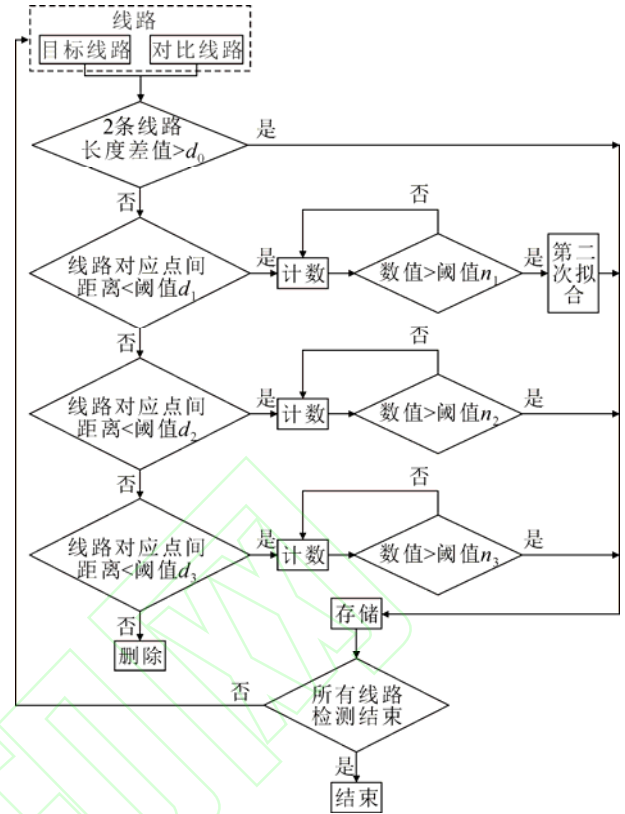


图6 线路合并、删除算法流程图

Fig.6 Line merge and delete algorithm flow chart

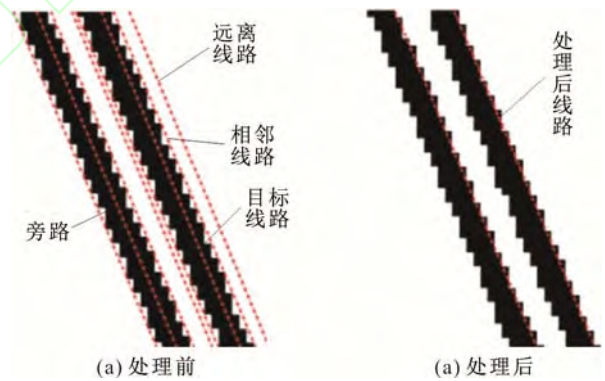


图7 线路合并、删除效果图

Fig.7 Line merge and delete effect

$$L = \frac{fT}{y_u - y_d} \quad (2)$$

1.3.2 交叉跨越几何测量模型

在实际应用中，为保证拍摄到交叉跨越区域，测量方法需不受安置位置的限制。为此，本文基于双目测距原理提出交叉跨越几何测量模型，见图9。

模型的 xy 平面平行于像平面， yz 平面垂直于像平面，上下2条输电线上任意2点 m 、 n 在模型的对角顶点处，线段 mn 的长度为2点的距离。求取

交叉跨越点的距离就是计算线段 mn 的长度。根据针孔成像原理和相似三角形原理可计算得到线段 mn 的长度在 xy 平面上的投影长度 D_{xy}

$$D_{xy} = \frac{(L - fb)l'}{f} \quad (3)$$

式中: $l' = \sqrt{(x_{m'} - x_{n'})^2 + (y_{m'} - y_{n'})^2}$; 点 $m'(x_{m'}, y_{m'})$ 、 $n'(x_{n'}, y_{n'})$ 分别为点 m 、 n 在像平面的投影点; l' 为投影长度, pixels; f 为有效焦距, pixels; b 为像素尺寸, μm 。

由式(2)可得到 m 、 n 点到像平面距离 L_m 、 L_n , 经计算得到 m 、 n 点到像平面距离的差值 l

$$l = L_m - L_n \quad (4)$$

由交叉跨越几何测量模型得到式(5), 可计算线段 mn 的长度 D

$$D = \sqrt{D_{xy}^2 + l^2} \quad (5)$$

由几何测量模型可知, 当 2 条输电线平行时, 该模型可计算线路最邻近处距离; 当 2 条线路交叉跨越时, 最小长度 D_{\min} 即为输电线间交叉跨越距离。当相机不正对交叉跨越点时, 可对整段线路分次测量来寻找交叉跨越点。

2 测量结果

2.1 实验测量结果

实验室使用 2 部工业相机和 2 部单反相机进行对比实验, 相机参数如表 1 所示。相机的像素坐标可通过 1.1 节相机标定结果进行校正^[20], 经校正的像素坐标对测量结果的影响可以忽略。测试线路交叉跨越距离测量结果如图 10 所示。

图 10(a)中纵坐标 D 表示线路 1 上的 m 点与线路 2 上所有点的距离, 横坐标表示线路 2 上的第 i 点, 同理可得图 10(b)。 D_1 为线路 1 交叉跨越点与线路 2 的最短距离, D_2 为线路 2 交叉跨越点与线路 1 的最短距离。 D_1 和 D_2 的平均值即 2 条线路交叉跨越距离 229.639 8 mm, 实际交叉跨越距离 D_0 为 230 mm, 测量误差为 0.16%, 实验结果验证了线路自动检测算法可以保证测量结果的准确性。

在实验室搭建的环境下, 待测线路的实际交叉跨越距离为 230 mm (线路的中心线的交叉跨越距离)。工业相机的测量结果如图 11(a)所示, 单反相机测量结果如图 11(b)所示, 图中横坐标表示相机位置序号。实验步骤: 从 $L=3$ m 开始, 每隔 1 m 的 10 个不同位置进行测量, 至 $L=10$ m 为止, 测得 80 组

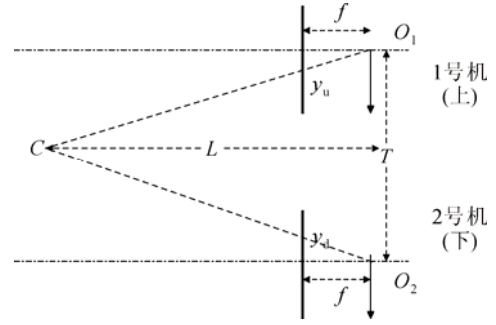


图 8 双目测距原理

Fig.8 Binocular ranging principle

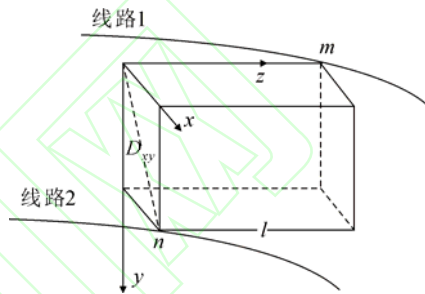


图 9 交叉跨越几何测量模型

Fig.9 Space crossing geometric measurement model

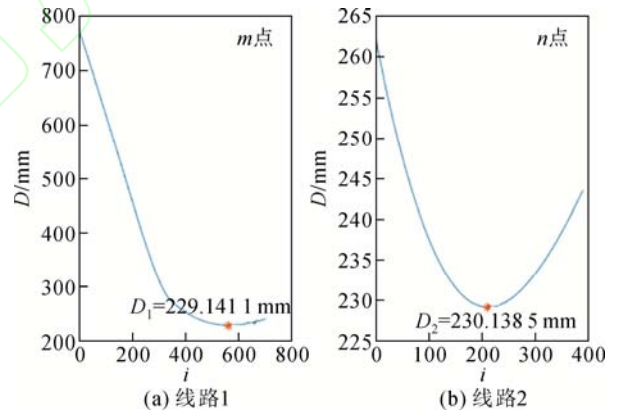


图 10 交叉跨越距离测量结果

Fig.10 Space crossing distance measurements

数据, 此 80 组数据为不同位置、不同角度处拍摄。在图 11(a)中, 当 $L > 6$ m 时, 随着 L 的增大, 测量值明显小于实际值; 在图 11(b)中, 随着 L 的增加, 测量值一直在实际值附近小范围浮动。针对此现象, 实验对比了工业相机与单反相机的测量结果, 结果如表 2 所示。

在表 2 中, 工业相机距导线的距离超过一定值 (6 m) 时, 测量误差增大, 在 L 为 10 m 时, 测量误差已 $> 5\%$, 单反相机的测量误差在 L 为 10 m 以内 (包

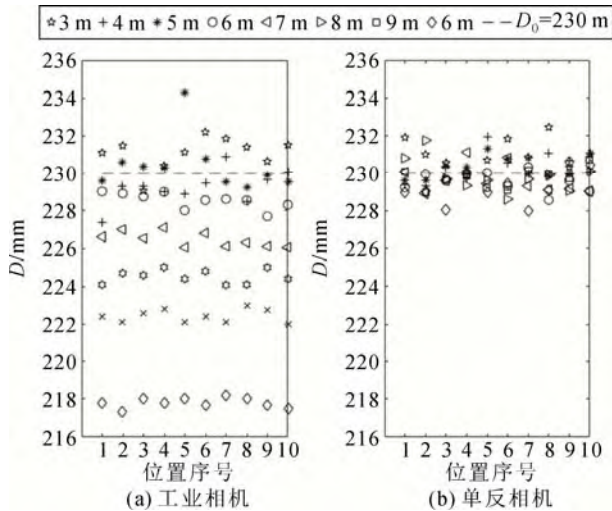


图 11 实验测量结果

Fig.11 Experimental measurement results

表 2 3~10 m 平均测量误差

Table 2 Average measurement error from 3 m to 10 m

L/m	工业相机测量误差/%	单反相机测量误差/%
3	0.55	0.47
4	0.41	0.30
5	0.37	0.21
6	0.63	0.22
7	1.54	0.32
8	2.38	0.29
9	3.30	0.20
10	5.31	0.41

含 10 m) 时均 $<1\%$ 。由表 1 中相机的参数可知,工业相机的分辨率、焦距、感光元件尺寸均远小于单反相机。此对比实验证明,测量精度主要受相机分辨率和感光元件制造缺陷的影响。当相机与导线的距离 L 超过相机分辨率可识别范围时,测量误差增大,但若选取分辨率更高的相机与镜头,搭配适当的焦距,则测量距离 L 的极限值可扩大。

2.2 实际测量结果

实际测量是对山西省阳泉市的 2 条输电线(电压等级分别为 220 kV、500 kV)的交叉跨越距离进行了多次实地数据采集与测量,结果见图 12、图 13。

图 12(a)为实际线路自动检测效果,图 12(b)为线路 1、2 的细节图,由图 12 可知自动检测效果较好。实际测量使用的相机型号为尼康 D90, 1230 万像素,焦距为 70 mm。应用本文提出的方法计算交叉跨越距离,并与全站仪测得数据进行对比,全站仪型号为徕卡 TS06,全站仪测量结果为 10.67 m。

图 13 为实际测量结果, D_1 和 D_2 的平均值即本

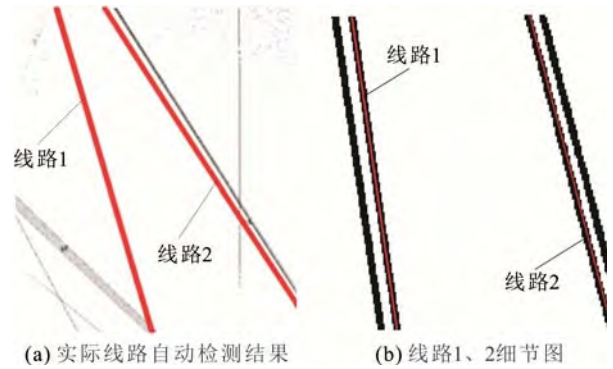


图 12 实际线路自动检测结果

Fig.12 Automatic detection results of actual line

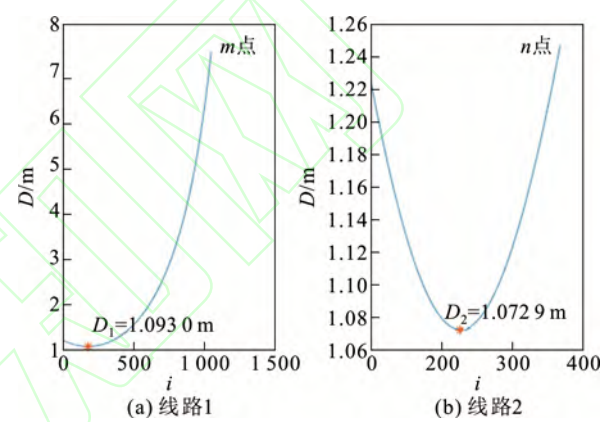


图 13 实际测量结果

Fig.13 Actual measurement results

文方法测的实际结果 10.825 9 m, 误差为 1.45%。实际测量结果证明本文提出的改进链码算法、点搜索算法、线路合并算法,以及交叉跨越几何测量模型能够成功应用到实际输电线的交叉跨越测量中,且测量精度较高。

3 结论

1) 对于图像中待测线路像素坐标的获取,提出了改进链码算法、点搜索算法、线路合并算法,准确地得到了待测线路的像素坐标,实现了线路的自动检测。

2) 在双目测距原理基础上,提出并建立了交叉跨越几何测量模型,实际测量误差为 1.45%,效果较好。

3) 由文中几何测量模型的性质可知,双目相机装置在不被遮挡情况下,可不受安放位置的限制、便于携带、操作安全简单、可实现无接触测量。

4) 本文方法存在的不足之处可做如下改进:

采用分辨率更高的相机与镜头进行测量;改进算法,研究本文方法应用到输电线跨越树木、线杆、建筑物等情况,使应用更具普遍性。

参考文献 References

- [1] 杜志叶, 李凌燕, 陈 媛, 等. ± 800 kV/ ± 500 kV 同塔混压双回直流输电线路的导线选型[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2605-2611. DU Zhiye, LI Lingyan, CHEN Yuan, et al. Conductor selection of double-circuit DC transmission lines with mixed-voltage ± 800 kV/ ± 500 kV on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2605-2611.
- [2] 邹仁华, 王毅超, 邓元婧, 等. 基于变权综合理论和模糊综合评价的多结果输出输电线路运行状态评价方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1289-1295. ZOU Renhua, WANG Yichao, DENG Yuanjing, et al. Condition assessment method for transmission line with multiple outputs based on variable weight principle and fuzzy comprehensive evaluation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1289-1295.
- [3] 向 玲, 任永辉, 卢 明, 等. 特高压输电线路防舞装置的应用仿真[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3830-3836. XIANG Ling, REN Yonghui, LU Ming, et al. Simulation of anti-galloping device's application in UHV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3830-3836.
- [4] 孙 斌, 赵晓龙, 马维青, 等. 输电线路交叉跨越三维模型算法的研究与应用[J]. 煤炭技术, 2016, 35(4): 303-306. SUN Bin, ZHAO Xiaolong, MA Weiqing, et al. Study and application on three-dimensional model algorithm for transmission line crossing[J]. Coal Technology, 2016, 35(4): 303-306.
- [5] 卞玉萍, 倪良华, 郝思鹏, 等. 基于特殊环境中输电线路交叉跨越测量[J]. 华东电力, 2013, 41(3): 598-601. BIAN Yuping, NI Lianghua, HAO Sipeng, et al. Crossing measurement of transmission lines in special environment[J]. East China Electric Power, 2013, 41(3): 598-601.
- [6] 齐 翼, 芮晓明, 朱宽军, 等. 特高压大跨越输电线路防振设计系统的研究[J]. 中国电力, 2017, 50(2): 5-10. QI Yi, RUI Xiaoming, ZHU Kuanjun, et al. Research on anti-vibration design system for UHV large crossing transmission line[J]. Electric Power, 2017, 50(2): 5-10.
- [7] 彭向阳, 陈 驰, 徐晓刚, 等. 基于无人机激光扫描的输电通道安全距离诊断技术[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3254-3259. PENG Xiangyang, CHEN Chi, XU Xiaogang, et al. Transmission corridor distance diagnosis based on point cloud and unmanned aerial loaded airborne laser scanning[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3254-3259.
- [8] 李 巍, 赵 亮, 张占伟, 等. 常用全站仪放样方法及精度分析[J]. 测绘通报, 2012(5): 29-32. LI Wei, ZHAO Liang, ZHANG Zhanwei, et al. Commonly used methods for electronic total station layout and its precision analysis[J]. Bulletin of Survey and Mapping, 2012(5): 29-32.
- [9] 汤青松, 武 威, 张 婧, 等. 高压线高度精确测量方法和装置的研究[J]. 科技传播, 2016, 8(1): 107. TANG Qingsong, WU Wei, ZHANG Jing, et al. The high tension line highly accurate measurement method and the device research[J]. Communication of Science & Technology, 2016, 8(1): 107.
- [10] 杨 浩, 吴 畏. 基于三维重建的输电线路覆冰在线监测方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 103-108. YANG Hao, WU Wei. On-line monitoring method of icing transmission lines based on 3D reconstruction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 103-108.
- [11] 张 烨, 冯 玲, 穆靖宇, 等. 输电线路绝缘子覆冰厚度图像识别算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 195-202. ZHANG Ye, FENG Ling, MU Jingyu, et al. Image identification algorithm of icing thickness for insulator in power transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 195-202.
- [12] 郝艳捧, 蒋晓蓝, 阳 林, 等. 基于图像分割评估运行绝缘子自然覆冰程度[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 285-292. HAO Yanpeng, JIANG Xiaolan, YANG Lin, et al. Evaluation of natural icing condition for in-service insulators based on image segmentation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 285-292.
- [13] 韩 丹. 边缘主点作用下的立体影像特征线匹配方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016(12): 176-179. HAN Dan. Research on the line feature matching in stereo image based on the main points of the edge[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016(12): 176-179.
- [14] 韩晓坤, 全卫国. 基于机器视觉的输电线跨越距离测量方法研究[J]. 传感器世界, 2015, 21(11): 24-29. HAN Xiaokun, TONG Weiguo. Power lines across the distance measurement method based on machine vision research[J]. Sensor World, 2015, 21(11): 24-29.
- [15] 程登峰, 张 帆, 潘建平. 输电线路交叉跨越测量新技术[J]. 云南电力技术, 2014, 42(1): 74-77. CHENG Dengfeng, ZHANG Fan, PAN Jianping. Transmission lines crossing measurement technology[J]. Yunnan Electric Power, 2014, 42(1): 74-77.
- [16] FU Y, RONG S A, ZHAO W B, et al. Research on monitoring device for indicating external damage risk of overhead line based on image recognition technology with binocular vision cameras[C] // International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Xi'an, China: IEEE, 2016: 156-159.
- [17] 支健辉, 董新民, 孔星炜, 等. 相机标定的外界影响因素分析[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 286-291. ZHI Jianhui, DONG Xinmin, KONG Xingwei, et al. Analysis of external influence factors in camera calibration[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(2): 286-291.
- [18] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [19] 张丽娟, 杨进华, 姜雨彤, 等. 基于双目 CCD 测距的目标图像匹配算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014(9): 97-104. ZHANG Lijuan, YANG Jinhua, JIANG Yutong, et al. Research on target image matching algorithm for binocular CCD ranging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014(9): 97-104.
- [20] 支健辉, 董新民, 孔星炜, 等. 相机标定的外界影响因素分析[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 286-291. ZHI Jianhui, DONG Xinmin, KONG Xingwei, et al. Analysis external influence factors in camera calibration[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(2): 286-291.



SUN Shengnan

孙胜男

1991—, 女, 硕士生

主要从事输电线交叉跨越检测与测量、电力系统自动化研究工作

E-mail: SUNshengnantyut@163.com



LÜ Yuxiang

吕玉祥(通信作者)

1964—, 男, 硕士, 教授

主要从事高电压放电检测、电力电子设备的开发与研究工作

E-mail: lyx823@126.com

Professor

Corresponding author

编辑 何秋萍