

doi: 10.6046/zrzyyg.2021207

引用格式: 马御棠, 潘浩, 周仿荣, 等. 基于卫星影像的输电杆塔坐标校准方法[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 63–71. (Ma Y T, Pan H, Zhou F R, et al. Method to calibrate the coordinates of transmission towers based on satellite images[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(2): 63–71.)

基于卫星影像的输电杆塔坐标校准方法

马御棠¹, 潘浩¹, 周仿荣¹, 黄然¹, 赵加能¹, 罗继强²,
刘靖^{2,3}, 孙浩轩⁴, 贾伟洁⁵, 张涛⁶

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院电力遥感技术联合实验室, 昆明 650217; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 3. 华南理工大学计算机学院, 广州 510006; 4. 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079; 5. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 6. 军委装备发展部装备采购服务中心, 北京 100009)

摘要: 为实现输电线路精细化巡线管理, 提高其运维效率, 实现卫星智能巡检, 精准查找杆塔及输电线路的缺陷及隐患, 以云南省昆明市输电线路杆塔坐标为例, 提出利用卫星影像进行输电杆塔坐标校准的方法。首先以参考底图数据为基准匹配控制点, 并利用数字高程模型(digital elevation model, DEM)对原始遥感影像进行几何纠正; 然后结合阴影检测、边缘检测等技术与目视判读, 得到校准的杆塔坐标。实验检验了昆明地区高景一号和高分二号卫星影像的几何纠正精度, 纠正后平面中误差分别为 0.931 m 和 1.387 m; 此外, 实验检验了 2 条线路上的旧杆塔台账坐标校准精度, 结果表明, 杆塔台账的平面精度由 13.811 m 和 8.256 m 分别提升至 5.970 m 和 5.104 m, 满足基本的电网需求。该方法可以实现杆塔坐标的校准, 减小人工巡检的工作量, 提高巡线效率。随着遥感影像的数据量级爆发式增长, 空天地多源影像将不断结合, 基于卫星遥感影像的输电线路杆塔定位技术将有更加广阔的发展前景。

关键词: 输电杆塔; 几何纠正; 坐标校准; DEM; 遥感

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)02-0063-09

0 引言

电力工业是国民经济与社会发展的重要支柱产业, 电力输电线路的安全直接关系到电力系统的稳定运行。然而, 输电线路一直受到内部压力、外部侵害、交叉跨越危险等诸多因素威胁^[1]。线路巡检是保障输电线路安全运行的重要手段。其中, 获取高精度的输电线路杆塔坐标是线路巡检的关键目的之一, 其在无人机安全巡检^[2]、雷电定位系统保障^[3]、净空距离测算^[4]等方面发挥着重要作用。

传统的输电线路杆塔坐标测量, 往往采用人工巡检方式, 基于地理信息系统(geographic information system, GIS)及全球定位系统(global positioning system, GPS)技术, 通过手持 GPS 直接得到杆塔坐标^[5-6]。然而, 人工巡视的频次有限, 无法做到设备

缺陷的及时发现, 且人工成本高, 管理成本维持困难。近年来, 结合遥感技术的杆塔坐标定位校准方法开始进入视野。遥感技术, 通过高频次、大范围的信息测量, 已经在提高巡检效率上取得了成效^[7-8]。研究精度更高、方法更便捷的遥感技术辅助坐标校准方法, 将会有效减少人工巡检频次, 使电力线路巡检更加安全高效。

截至目前, 基于遥感技术的输电线路杆塔坐标测量方法主要有 3 类: 基于定位设备的传统方法、基于激光雷达的方法和基于影像的方法。基于定位设备的传统方法利用单点定位设备进行杆塔坐标测量, 利用 GPS^[3-4,9]、北斗^[10-11]等定位卫星进行点目标测量。基于激光雷达的方法利用激光雷达对整个输电走廊区域进行三维重建, 利用地面激光雷达^[12]或机载激光雷达^[13-14], 通过点云重建杆塔及周边地物的空间信息。基于遥感影像的方法利用地面相机

收稿日期: 2021-07-06; 修订日期: 2021-10-27

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(编号: GFZX0404130302)和云南科技项目“基于卫星技术的电网‘天空地协同’巡视及风险防控策略研究与示范应用”(编号: YNKJXM20180016)共同资助。

第一作者: 马御棠(1986-), 男, 硕士, 研究方向为防雷与接地技术。Email: 1277396850@qq.com。

通信作者: 孙浩轩(1995-), 男, 博士研究生, 研究方向为三维重建与星载遥感影像处理。Email: endu@foxmail.com。

进行多视重建^[15-16],或利用 Google Earth 的多源影像进行平面坐标校准^[7-8,17-20]。

几乎所有的现有方法在进行杆塔坐标测量时,都存在测量范围小或重复测量周期长的问题。地面测量的杆塔定位方法,无论是基于定位卫星的点测量,还是激光雷达与光学相机实现的区域测量,其测量频率和测量范围都难以保证。基于机载的激光雷达及光学影像测量方法,受成本限制,存在空间覆盖范围不足和重访周期过大等问题,难以有效进行大范围杆塔坐标校准。

近年来,高空间分辨率卫星数量及其对地观测能力一直在不断提升。卫星遥感影像的分辨率达到亚米级,已经能够观察到输电杆塔的典型地物特征。与此同时,单景影像几何纠正技术得到广泛发展,在存在基准底图情况下,对卫星影像进行几何纠正可获得较高的平面定位精度^[21-23]。

综合上述研究,本文提出一种完全不依赖航空影像的卫星影像输电走廊杆塔坐标校准方法。首先对原始遥感影像进行几何纠正;然后结合杆塔旧台账坐标,从几何纠正后的影像中辨识杆塔并获取杆

塔校准后的坐标。该方法旨在实现大面积区域的杆塔坐标校准,较之传统方法,能够快速获取大范围杆塔坐标,降低巡线员的工作量与巡线风险,提高巡线效率;并及时发现输电线路运行状态的异常,以确保电网运行安全,提升电网智能化水平。随着遥感影像的数据量级爆发式增长,空天地多源影像将不断结合,基于卫星遥感影像的输电线路杆塔定位技术将有更加广阔的发展前景。

1 杆塔坐标校准方法

1.1 基于参考底图的几何纠正

参考底图几何纠正方法根据已有的地面控制资料,即基准参考底图数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM)和数字高程模型(digital elevation model, DEM),通过卫星影像和控制资料自动匹配提取地面控制点,对有理函数几何成像模型的有理多项式系数(rational polynomial coefficients, RPC)进行精化处理,以达到提升影像几何定位精度目的。流程图如图 1 所示。

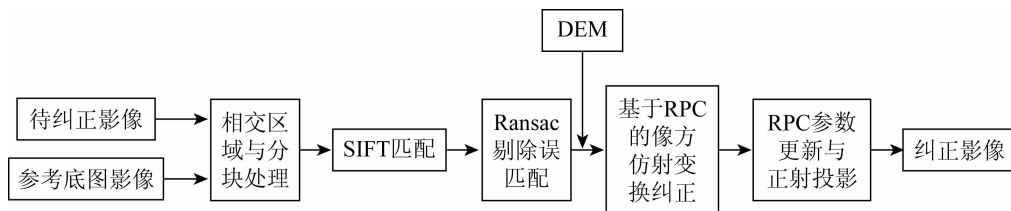


图 1 参考底图几何纠正流程图

Fig. 1 Flowchart of geometric correction based on the reference image

其主要由 6 个步骤组成:

- 1) 将待校准影像 A 中 4 个角点坐标通过 RPC 计算出与参考底图 B 的相交范围区域 C 。
- 2) 设置影像的分块大小,对相交范围区域 C 进行网格分块处理。
- 3) 分别对影像 A 中与参考底图 B 中每一块区域进行尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)匹配,得到地面控制点像平面坐标。
- 4) 利用随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法对 SIFT 匹配得到地面控制点中的粗差点进行剔除,得到筛选后的控制点。
- 5) 基于控制点的平面坐标,参考 DEM,利用插值的方式读取每个控制点的高程,得到地面控制点物方三维坐标。
- 6) 利用控制点的物方三维坐标和像方平面坐标,通过仿射变换模型进行系统误差补偿,实现待纠正影像的 RPC 模型精化和影像纠正。

方法的核心环节为:光学影像的 SIFT 匹配、基

于 RANSAC 算法的粗差剔除与 RPC 模型精化。

1.1.1 SIFT 匹配

SIFT 是用于影像局部特征点检测与描述的一种算法,其生成特征保持了优良的不变性。SIFT 匹配建立在 SIFT 算法的生成特征上,主要分为特征检测、特征描述和匹配 3 部分。

SIFT 算法首先对影像进行基于不同尺度高斯滤波器的模糊,随后对相邻尺度的模糊影像进行差分,构建得到尺度空间。在尺度空间中通过寻找极值来获得潜在的具有尺度不变性的兴趣点。同时,在每个候选的位置上,通过拟合一个精细的模型来确定子像素位置和尺度。

对于已经确定位置与尺度的关键点,SIFT 基于影像局部的梯度方向来获得相等信息量的像素窗口和对特征进行描述。算法分配给每个关键点位置一个或多个方向,最终生成一个 128 维特征向量。在匹配阶段,通过各关键点的 SIFT 特征向量,进行两两比较,找出相互匹配的若干对特征点,建立同名像

点间的对应关系。本文采用欧氏距离进行匹配,即:

$$d(S_i, R_k) = \sqrt{\sum_{j=1}^{128} (S_{ij} - R_{kj})^2}, \quad (1)$$

式中: S_i 和 R_k 为 2 帧影像 S 和 R 上分别生成的第 i 和第 k 个 SIFT 特征; j 为其第 j 个特征。

1.1.2 RANSAC 粗差剔除

RANSAC 算法是一种粗差剔除算法。算法认为适宜目标模型的数据被称为局内点; 而局外点是不能适应模型的数据, 其出现往往由噪声的极值、错误的测量方法、对数据的错误假设等产生, 会对模型参数估计造成影响。RANSAC 误匹配剔除的目的是找出剔除掉误匹配的同名点, 通过迭代估计一个敏感模型参数的方式, 不断随机抽取 3 个匹配点对进行仿射变换估计, 统计该仿射变换下匹配点与原匹配点的差异, 获取到适配最多匹配点的最佳仿射变换模型, 从而剔除不适宜的同名点对。

1.1.3 基于 RPC 模型的像方平差

高分辨率卫星影像通常采用严格的轨道模型来完成影像的高精度几何定位^[24-25]。由于星上测量

参数保密等原因, 严密模型参数难以获取, 取而代之的是采用一个比值多项式模型, 称之为 RPC 模型^[26-28]。该模型能够建立像方坐标点与对应物方坐标点之间的几何关系, 一般来说, 影像初始状态的 RPC 参数误差比较大, 通常采用的方法为建立一个像方误差补偿模型来对原始 RPC 模型进行系统误差补偿。

根据像点坐标以及对应地面控制点的经纬度和高程, 基于单片空间后方交会方法, 利用式(2)中的仿射变换模型对原始影像 RPC 参数进行精化, 仿射变换中的参数通过式(3)中的误差方程进行求解。

$$\begin{cases} y = e_0 + e_1 \cdot x_{\text{RPC}} + e_2 \cdot y_{\text{RPC}} \\ x = f_0 + f_1 \cdot x_{\text{RPC}} + f_2 \cdot y_{\text{RPC}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: (x, y) 为控制点在影像上的量测坐标; $(x_{\text{RPC}}, y_{\text{RPC}})$ 为基于 RPC 模型计算得到的像点坐标; $e_0, e_1, e_2, f_0, f_1, f_2$ 为待求解的 6 个仿射变换参数。对于每一个像点, 可以列出如式(3)的误差方程, 迭代求解仿射变换参数改正值, 公式为:

$$\begin{cases} v_x = \left(\frac{\partial x}{\partial e_0} \cdot \Delta e_0 + \frac{\partial x}{\partial e_1} \cdot \Delta e_1 + \frac{\partial x}{\partial e_2} \cdot \Delta e_2 + \frac{\partial x}{\partial f_0} \cdot \Delta f_0 + \frac{\partial x}{\partial f_1} \cdot \Delta f_1 + \frac{\partial x}{\partial f_2} \cdot \Delta f_2 \right) + F_{x0} \\ v_y = \left(\frac{\partial y}{\partial e_0} \cdot \Delta e_0 + \frac{\partial y}{\partial e_1} \cdot \Delta e_1 + \frac{\partial y}{\partial e_2} \cdot \Delta e_2 + \frac{\partial y}{\partial f_0} \cdot \Delta f_0 + \frac{\partial y}{\partial f_1} \cdot \Delta f_1 + \frac{\partial y}{\partial f_2} \cdot \Delta f_2 \right) + F_{y0} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: v_x, v_y 分别为像素列方向、行方向的坐标改正值; F_{x0}, F_{y0} 分别为在当前仿射变换参数下的列方向、行方向像点坐标值与像点坐标观测值之差; $\Delta e_0, \Delta e_1, \Delta e_2, \Delta f_0, \Delta f_1, \Delta f_2$ 为本次仿射变换参数迭代改正。每个控制点都可以建立式(3)的误差方程, 最终通过最小二乘法, 迭代求解得到最佳仿射变换参数, 最终获得影像的精确 RPC 参数。

1.2 杆塔坐标校准

1.2.1 阴影检测

本文基于 Rufenacht 等^[29]的阴影识别算法提取影像的阴影图。首先通过式(4)所示非线性映射 $f(x)$ 将可见光和近红外波段的低亮度区域映射为高值, 同时通过式(5)所示的乘性结合来识别在可见光和近红外波段综合较暗的像素, 构建阴影候选图, 即:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(1 - \frac{1}{x^\gamma} - \beta)}}, \quad (4)$$

$$D_{ij} = f(p_{ij}^{\text{NIR}})f\left(\frac{p_{ij}^{\text{R}} + p_{ij}^{\text{G}} + p_{ij}^{\text{B}}}{3}\right), \quad (5)$$

式中: (i, j) 为影像的行列坐标; $p_{ij}^{\text{NIR}}, p_{ij}^{\text{R}}, p_{ij}^{\text{G}}$ 和 p_{ij}^{B} 分别为近红外和可见光波段像元值; α, β, γ 为参数, 通常取 $\alpha = 14, \beta = 0.5, \gamma = 2.2$ 。对于以太阳直射光照射为主的地物, 其在可见光波段与近红

外波段的灰度差异不大。而对于阴影来说, 当考虑阴影主要由天空光照射时, 其在可见光波段的灰度大于近红外波段的灰度。因此, 通过可见光与近红外波段的比值易于将阴影区域区分。这里通过参数 $\theta = 10$ 来给予可见光波段灰度远大于近红外波段灰度的像元一个上界, 得到各像元可见光与近红外波段的 0~1 区间比值 T_{ij} , 公式为:

$$T_{ij} = \frac{1}{\theta} \min\left(\max_k\left(\frac{p_{ij}^k}{p_{ij}^{\text{NIR}}}\right), \theta\right). \quad (6)$$

需要注意的是, D_{ij} 中暗区域同时包含可能的非阴影, 因此将 2 个候选区域值的乘性结合, 得到最终的阴影值 U_{ij} , 公式为:

$$U_{ij} = (1 - D_{ij})(1 - T_{ij}). \quad (7)$$

在原文中, 作者基于阴影值 U_{ij} 进行一系列后处理进行阴影区域提取^[29], 本文并不确认区域, 而是利用阴影值 U_{ij} 为后续杆塔坐标校准提供帮助。

1.2.2 杆塔坐标校准

检出的阴影图中仍然混有其他阴影, 混淆阴影通常为树林等团状阴影。由于输电杆塔具有特殊的几何结构, 中间接近镂空, 其影像阴影具有明显的边缘线结构, 易于团状阴影区分。因此, 通过 radon 变换^[30]进行线识别, 以定位杆塔边缘线。随后, 对检

测出的边缘线在极坐标域进行聚类,得到大致的杆塔位置。

然而,考虑到卫星影像上的大部分杆塔特征微弱,识别困难。对于识别得到的点,应当与旧的杆塔台账合并,进行逐点的人工目视判读移点。则整个杆塔坐标提取流程为:通过识别结果进行辅助,结合阴影检测图,目视判别杆塔位置,挪动杆塔到合适的新位置以得到新的校准杆塔坐标。

1.2.3 杆塔校准坐标误差评价

电网各应用场景对杆塔的坐标需求不一,杆塔坐标精度主要影响自然灾害、外力破坏等作用于杆塔及沿线的定位及判断。例如,1 km 精度的落雷定位系统、气象系统等,若仅考虑杆塔对象,则 1 km 左右的杆塔定位精度即可满足杆塔区段的气象获取。然而,一些基于卫星影像的巡检任务,如洪涝灾害监测、施工区域监测,往往需要更高的杆塔定位精度,否则无法判断具体受影响位置。考虑到这类基于影像的识别与检测任务(这类影像有时完全失去了杆塔特征,无法通过在同一景满足受灾区域与杆塔的相对误差来达成目的),其自身影像也存在几何误差,杆塔坐标往往需要尽量准确。按照经验,5~6 m 的定位精度应当足以符合电网的基本任务预期。

通过校准值与真值的评价 x 方向或 y 方向的误差,公式为:

$$error_x = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |x_k - x_k^{gt}|, \quad (9)$$

式中: x_k 为校准后杆塔; x_k^{gt} 为选定的杆塔真值; k 为杆塔序号; N 为杆塔总数。同时通过平面中误差评

价杆塔坐标相对于真值的误差,公式为:

$$error_{plane} = \sqrt{(x_k - x_k^{gt})^2 + (y_k - y_k^{gt})^2}. \quad (10)$$

2 实验数据

本次实验选用高分二号(GF-2)和高景一号(SV-1)数据进行实验。其中,GF-2 卫星作为我国首个空间分辨率优于 1 m 的国产光学遥感卫星,具有辐射精度高、定位精度高、姿态机动能力快等特点^[31];而 SV-1 是我国自主研发的高分辨率商用遥感卫星,其数据经过稀疏控制点区域网处理后的平面精度可以满足 1:10 000 比例尺测量的要求^[32]。二者详细情况见表 1。实验辅助数据中参考底图(DOM)分辨率为 0.3 m,由 R, G, B 3 波段组成;参考 DEM 数据分辨率为 10 m。

表 1 实验数据说明

Tab. 1 Experimental data

序号	SV-1			GF-2		
	影像类型	分辨率/m	获取日期	影像类型	分辨率/m	获取日期
1	SV1-02 多光谱	2	2018.11.14	GF-2 多光谱	4	2019.01.23
2	SV1-02 全色	0.5	2018.11.14	GF-2 全色	1	2019.01.23
3	SV1-03 多光谱	2	2018.01.16	GF-2 多光谱	4	2019.10.31
4	SV1-03 全色	0.5	2018.01.16	GF-2 全色	1	2019.10.31

实验所用卫星影像数据与参考底图的位置关系如图 2 所示。

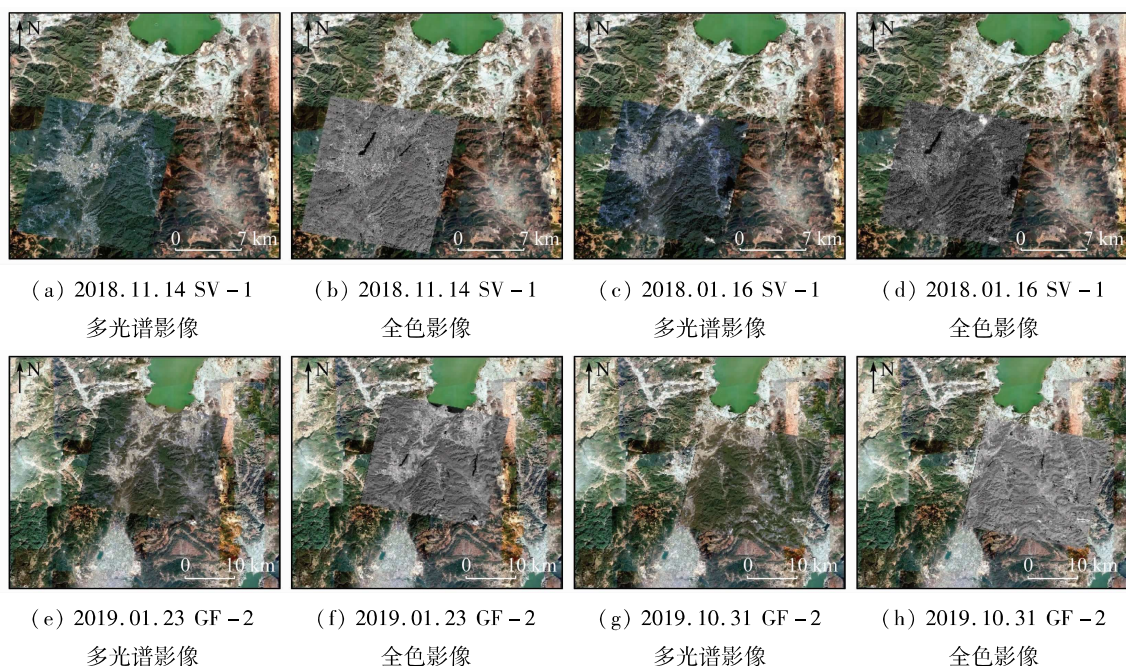


图 2 实验影像数据与底图位置关系

Fig. 2 Location relationship between image data and base images

对比影像与参考底图的接边情况。结果发现,在未经过底图校准时,SV - 1 及 GF - 2 影像数据均与参考底图影像有较大的偏差,如图 3 所示。

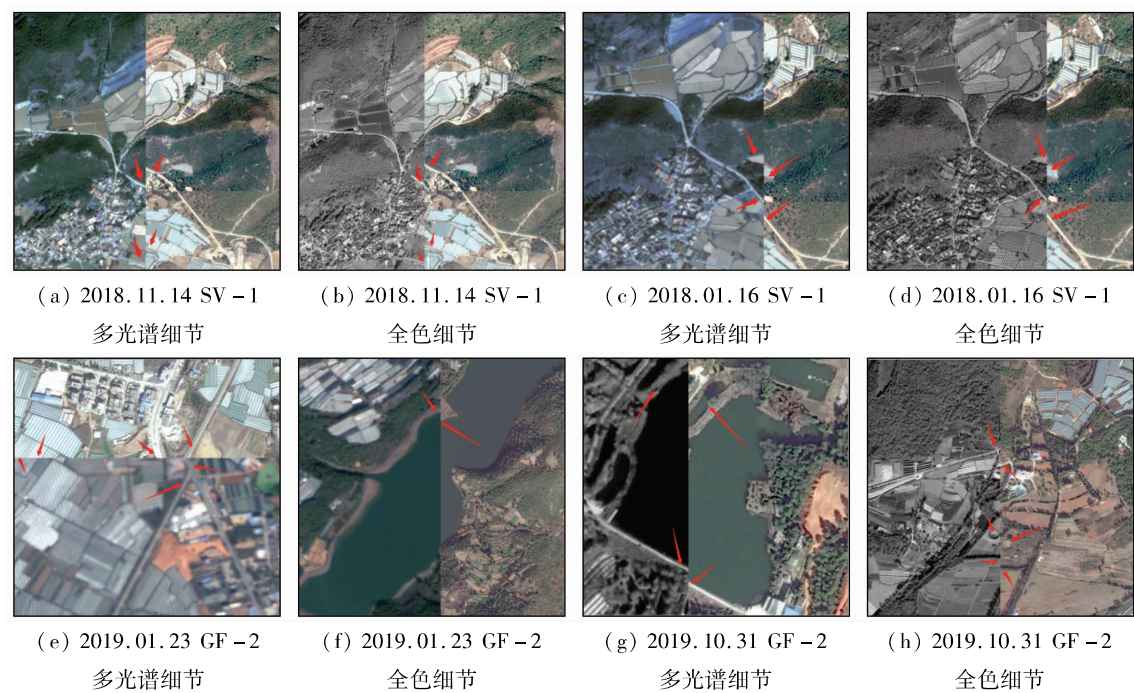


图 3 参考底图与实验影像位置关系细节图

Fig.3 Details of the location relationship between the base images and test images

从图 3 的细节图中可以看出:卷帘接边左右道路、水域等存在明显的接边误差,根据统计,接边的偏差距离平均为 65 m。考虑到误差的传递性,杆塔校准坐标误差将大于参考底图误差,此结果已大幅超出一些电网场景中需要满足的杆塔坐标精度要求。因此,在利用卫星影像数据获取杆塔准确坐标之前,需要基于参考底图对原始影像进行校准。

3 实验结果

3.1 影像坐标校准实例及效果分析

3.1.1 几何纠正精度验核

对 SV - 1 影像和 GF - 2 影像进行基于参考底图几何纠正实验。其中,4 景影像均与底图匹配多个点,选取其中 10 个作为控制点,将其余点作为检查点进行精度验证。汇总实验结果见表 2。由表 2 分析可知,检查点数量为 10 时,平面精度可达到 2

像元以内。校准后影像与参考底图影像接边情况如图 4 所示。图 4 中,(a) — (d) 为 SV - 1 接边细节;(e) — (h) 为 GF - 2 接边细节。由结果可见,几何纠正后 GF - 2 和 SV - 1 的接边误差从纠正前的 65 m 左右提升到了 2 m 以内,影像与底图的接边误

表 2 实验影像与参考底图校准精度

Tab.2 Calibration accuracy table of reference image for test image

影像名	匹配点/个	控制点/个	检查点像方精度/像元			检查点物方精度/m		
			x	y	平面	x	y	平面
SV-1-03-20180116	58	10	1.196	1.179	1.679	0.660	0.626	0.910
SV-1-02-20181114	58	10	1.205	1.230	1.722	0.615	0.725	0.951
GF2-20190123	50	10	1.011	1.115	1.505	0.885	0.819	1.206
GF2-20191031	110	10	1.550	1.237	1.983	1.208	0.998	1.567

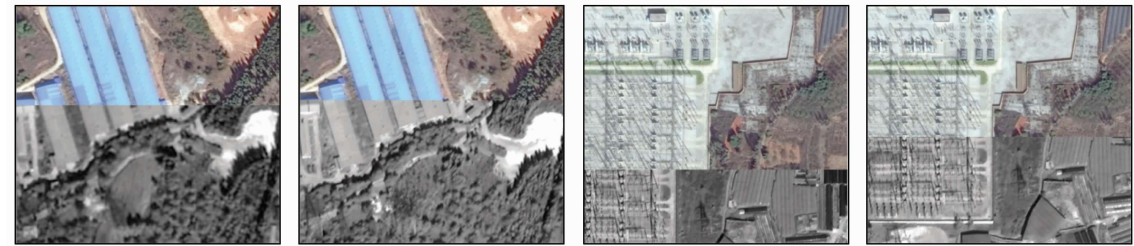
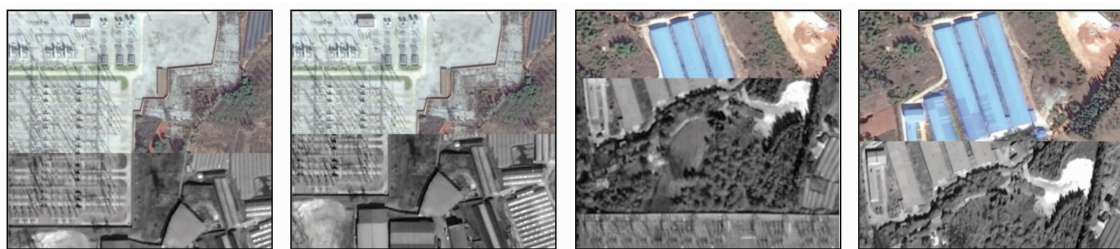


图 4-1 参考底图与纠正后实验影像接边关系细节图

Fig.4-1 Details of edge connection relationship between underlay and corrected test images



(e) GF-2 接边细节 1

(f) GF-2 接边细节 2

(g) GF-2 接边细节 3

(h) GF-2 接边细节 4

图 4-2 参考底图与纠正后实验影像接边关系细节图

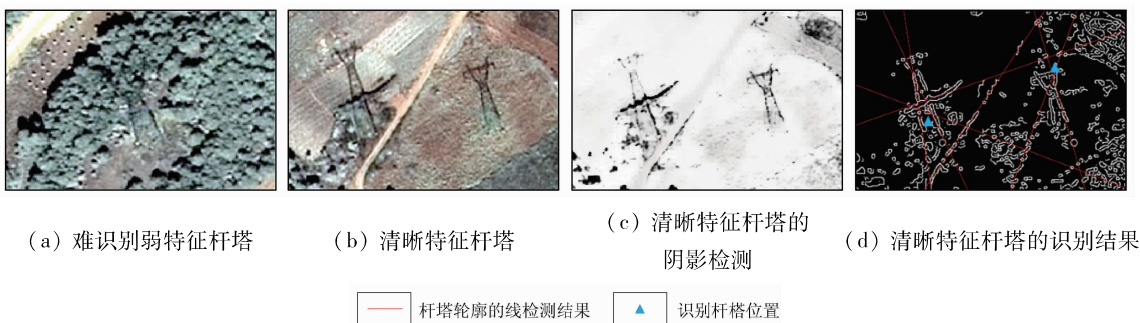
Fig. 4-2 Details of edge connection relationship between underlay and corrected test images

差有了明显改善。实验表明,通过与参考底图进行匹配并纠正的方式可以实现杆塔坐标的校准,能够满足杆塔坐标巡检的需求,为下一步实现杆塔坐标校准提供有力支撑。

3.1.2 阴影检测与杆塔定位

在某段区域测试了共计 72 个杆塔的识别情况,检出点在杆塔较近位置则判为检出,部分杆塔识别示意图见图 5。结果显示,检出杆塔个数仅为 15 个,识别率 21%,尽管存在少数特征较清晰的杆塔,

基于目前的卫星影像进行杆塔识别结果仍然较差,尚不能直接用于批量杆塔坐标提取。然而,通过旧杆塔台账矢量辅助,当内业处理人员预先知道此处存在杆塔,可以结合阴影检测图、边缘识别图,通过目视判别决策杆塔位置,将其挪动到合适的位置,得到新的校准杆塔坐标。这种识别辅助人工目视判读的校点方案可以在内业实现 2 个实验区的校点,避免繁杂的外业梭巡。



(a) 难识别弱特征杆塔

(b) 清晰特征杆塔

(c) 清晰特征杆塔的阴影检测

(d) 清晰特征杆塔的识别结果

图 5 杆塔识别辅助人工判读示意图

Fig. 5 Schematic diagram of manual visual interpretation assisted by tower identification

3.1.3 杆塔坐标校准结果

本文对云南省昆明市两个区域的电力输电线路杆塔校准情况进行实验。区域 1 中心地理坐标为 E102°35', N24°35', 平均海拔为 2 000 m 左右,区域线路共有 20 级杆塔。区域 2 中心地理坐标为 E103°15', N24°52', 平均海拔为 1 860 m 左右,区域线路共 14 级杆塔。

实验统计了杆塔校准的误差情况,表 3 列出了校准前后杆塔坐标与实验真值的误差。其中,区域 1 杆塔坐标真值取自高精度底图的目视提取结果。区域 2 杆塔坐标真值通过无人机航测三维激光测量获得。由表 3 可知,校准后杆塔坐标偏差明显低于校准前旧杆塔台账偏差,通过卫星影像的杆塔校准可以实现对原有杆塔台账平面坐标精度的提升。2 个区域的校准点平面中误差都在 6 m 内,按照电网相关经验,通过参考底图对卫星影像进行配准并纠正的方法可以实现杆塔坐标校准,已能够满足杆塔坐标巡检的需求。

表 3 杆塔校点精度

Tab. 3 Calibration accuracy table of towers (m)

类型	区域 1			区域 2		
	x 误差	y 误差	平面中误差	x 误差	y 误差	平面中误差
旧杆塔台账偏差	5.010	5.744	13.811	6.157	3.502	8.256
校准后杆塔坐标偏差	3.328	2.725	5.970	3.795	3.414	5.104

4 结论与讨论

本文根据杆塔校准目前遇到的实际问题,通过研究和实验测试,提出了一种基于卫星影像几何纠正的输电线路杆塔坐标校准的方法,结论如下:

1) 提出了一种根据参考底图对待原始遥感影像进行几何纠正,并根据阴影检测、边缘识别等技术,与目视判读对杆塔坐标进行校准的方法。

2) 以云南省昆明市为例,对该区域 GF-2 和

SV-1影像进行几何纠正实验。结果表明,纠正前影像接边点平均误差65 m,纠正后平面中误差分别为0.931 m和1.387 m,几何纠正能有效提升几何精度。

3)以云南省昆明市为例,对该区域2段输电线路上的旧杆塔台账进行校准实验。结果表明,线路平面中误差从旧台账的13.811 m和8.256 m分别提升至5.970 m和5.104 m,满足基本的电网需求。

4)本文方法可以实现杆塔坐标的校准,减小人工巡检的工作量,提高巡线效率。

本文提出了一种基于卫星影像底图几何纠正的输电线路杆塔坐标校准方法,分为基于参考底图的影像几何纠正与杆塔校准2部分,杆塔校准精度与几何纠正的精度相关。通过实验验证了本文方法的基于参考底图几何纠正精度,然而,方法暂没有考虑多景影像镶嵌及多景区域网平差,获得多景影像的杆塔校准仍然需要经后续工作进一步研究。

文章还探讨了一个困难任务,即基于卫星影像的杆塔识别。研究并未采用基于学习的方法,其主要原因是获得大量高分辨率影像的杆塔样本需要极大成本,一景影像上的杆塔数量有限,且大多数杆塔特征的清晰程度有限难以作为训练样本。方案采用阴影检测、边缘检测等经典技术,相较于因样本不足而无法训练的基于学习的检测模型,可以提供一种基于单景4波段影像和手工特征的杆塔定位方法,数据门槛更低。应当注意的是,方法仍然很难做到提取精确杆塔坐标,实验结果也显示了其识别率仍然受影像分辨率制约,当前方案更适合作为人工目视判图的参考。然而,当前卫星影像分辨率正在飞速提升,卫星影像上的杆塔清晰程度持续增加,基于卫星影像的电力系统监测有极大的发展空间,作为基于卫星影像的杆塔校准的良好尝试,笔者希望本文的工作可为未来的卫星影像杆塔校准研究提供参考。

参考文献(References):

[1] 彭向阳,钱金菊,麦晓明,等.大型无人直升机电力线路全自动巡检技术及应用[J].南方电网技术,2016,10(2):24-31.
Peng X Y, Qian J J, Mai X M, et al. Automatic power line inspection technology of large unmanned helicopter and its application [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(2): 24-31.

[2] 许敏,宋宁宁,刘秀娟.影响雷电定位系统故障查询的原因分析[J].山西电力,2008,148(4):29-30.
Xu M, Song N N, Liu X J. Cause analysis of factors affect lightning location system fault inquire [J]. Shanxi Electric Power, 2008, 148(4): 29-30.

[3] 陈家宏,张勤,冯万兴,等.中国电网雷电定位系统与雷电监测网[J].高电压技术,2008,34(3):425-431.
Chen J H, Zhang Q, Feng W X, et al. Lightning location system and lightning detection network of China power grid [J]. High Voltage

Engineering, 2008, 34(3): 425-431.

[4] 于旭宅.基于LiDAR数据的输电线路通道危险区域提取方法研究[D].北京:北京林业大学,2018.
Wang X Z. Study on the dangerous area extraction of transmission line passage based on LiDAR data [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.

[5] 李伟性,李兴,冯家荣,等.探讨基于大地坐标系求解输电线路杆塔坐标的方法[J].广西电力,2007(4):75-78.
Li W X, Li X, Feng J R, et al. Discuss on method to solve problem of pole or tower coordinates of power transmission line based on earth coordinate system [J]. Guangxi Electric Power, 2007(4): 75-78.

[6] 高成发. GPS事后相位差分坐标解算模型及其相关问题的研究[J].测绘学报,2006,35(2):148.
Gao C F. Research on coordinate solution model of GPS post difference and correlated problems [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(2): 148.

[7] 杜双育,杨强,黄勇,等.输电线路杆塔坐标校验研究及应用[J].广东电力,2014,27(12):102-107.
Du S Y, Yang Q, Huang Y, et al. Research and application of check on power transmission tower coordinate [J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(12): 102-107.

[8] 翁永玲,范兴旺,胡伍生,等.多源遥感数据及GIS技术在输电线路路径优选中的应用研究[J].东南大学学报(自然科学版),2013(s2):269-274.
Weng Y L, Fan X W, Hu W S, et al. Application of multisensor image and GIS in electric transmission line path design [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013(s2): 269-274.

[9] 吕雅婧,滕玲,邢亚,等.北斗卫星导航系统在电力行业的应用现状[J].电力信息与通信技术,2019,17(8):70-74.
Lu Y J, Teng L, Xing Y, et al. Application status of Beidou satellite navigation system in power industry [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(8): 70-74.

[10] 穆晓辰,周学坤,王常欣,等.基于北斗及GPS双系统的电力杆塔滑移监测系统研究[J].电力信息与通信技术,2019,17(6):44-50.
Mu X C, Zhou X K, Wang C X, et al. Research on power tower slip monitoring system based on Beidou and GPS dual system [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(6): 44-50.

[11] 宋军,赵凡,严天峰,等.高精度GPS形变系统在电力杆塔监测中的应用[J].自动化与仪器仪表,2014(8):63-65.
Song J, Zhao F, Yan T F, et al. The application of high-precision GPS deformation monitoring system on monitor of power tower [J]. Automation & Instrumentation, 2014(8): 63-65.

[12] Liang X, Hyyppä J, Kukko A, et al. The use of a mobile laser scanning system for mapping large forest plots [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014, 11(9): 1504-1508.

[13] 刘洋.机载点云电力走廊要素提取及风险计算[D].武汉:武汉大学,2018.
Liu Y. Feature extraction and inspection of transmission corridor based on ALS data [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.

[14] 张勇.架空输电线路障碍物巡检的无人机低空摄影测量方法研究[D].武汉:武汉大学,2017.
Zhang Y. Inspection of overhead power line corridor obstacles by UAV photogrammetry [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.

[15] 张帆,黄先鋒,屈孝志,等.基于竖基线摄影测量的电力线测量方法[J].测绘通报,2013(11):33-36.

- Zhang F, Huang X F, Qu X Z, et al. Power line measurement method based on vertical baseline photogrammetry[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(11):33–36.
- [16] 屈航. 基于双目系统的电力线与地物间距离的测量[D]. 重庆:重庆交通大学, 2013.
- Qu H. Distance surveying between power lines and features based on binocular system[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [17] 骆洁艺. Google Earth 在输电线路防雷中的应用[J]. 广东电力, 2010, 23(12):92–96.
- Luo J Y. Application of Google Earth in lightning protection of transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2010, 23(12):92–96.
- [18] 马御棠, 王磊, 马仪, 等. 利用 Google Earth 对线路杆塔坐标校正[J]. 南方电网技术, 2013(1):72–75.
- Ma Y T, Wang L, Ma Y, et al. The correction with Google Earth for tower coordinate of transmission line[J]. Southern Power System Technology, 2013(1):72–75.
- [19] 唐东跃, 熊助国, 王金丽. Google Earth 及其应用展望[J]. 地理空间信息, 2008, 6(4):110–113.
- Tang D Y, Xiong Z G, Wang J L. Application and outlook of Google Earth[J]. Geospatial Information, 2008, 6(4):110–113.
- [20] 马御棠, 王磊, 马仪, 等. 雷电定位系统线路杆塔坐标校准方法[J]. 中国电力, 2012, 45(6):18–21.
- Ma Y T, Wang L, Ma Y, et al. Calibration method of transmission tower coordinates in lightning location system[J]. Electric Power, 2012, 45(6):18–21.
- [21] 魏鑫. 电力勘测中卫星遥感影像技术的应用[J]. 低碳世界, 2018(1):58–59.
- Wei X. Application of satellite remote sensing image technology in electric power survey[J]. Low Carbon World, 2018(1):58–59.
- [22] 朱志超. 关于电力勘测中卫星遥感影像技术的应用研究[J]. 通讯世界, 2018(6):172–173.
- Zhu Z C. Research on the application of satellite remote sensing image technology in power survey[J]. Telecom World, 2018(6):172–173.
- [23] 赖余斌, 袁太平, 洪巧章, 等. 基于卫星遥感技术的电网建设全过程动态监控技术研究[J]. 绿色科技, 2018(24):187–190.
- Lai Y B, Yuan T P, Hong Q Z, et al. Dynamic monitoring of power grid construction process based on satellite remote sensing technology[J]. Journal of Green Science and Technology, 2018(24):187–190.
- [24] 晏杨, 谢宝蓉, 李欣, 等. 基于 RPC 模型的星上遥感卫星影像快速正射纠正[J]. 上海航天, 2018, 35(1):110–116.
- Yan Y, Xie B R, Li X, et al. Fast ortho rectification of remote sensing satellite images based on RPC model[J]. Aerospace Shanghai, 2018, 35(1):110–116.
- [25] 刘楚斌, 张永生, 范大昭, 等. 高分辨率三线阵卫星遥感影像的区域网平差算法与实验[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(5):489–493.
- Liu C B, Zhang Y S, Fan D Z, et al. Block – adjustment algorithm and test for three – line – array image of high – resolution remote sensing satellite[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2015, 32(5):489–493.
- [26] 杨国东, 赵强, 张旭晴, 等. 基于 SPOT6 卫星遥感数据无控制点正射校正[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(7):1–3.
- Yang G D, Zhao Q, Zhang X Q, et al. Based on SPOT6 satellite remote sensing data without control point orthorectification[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(7):1–3.
- [27] 王超, 吴亚文, 张伟. 基于有理函数模型的北京二号影像几何校正[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(1):162–165.
- Wang C, Wu Y W, Zhang W. Geometric correction of based on Beijing – II image with rational function model[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(1):162–165.
- [28] 张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正[D]. 武汉:武汉大学, 2005.
- Zhang G. Rectification for high resolution remote sensing image under lack of ground control points[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [29] Rufenacht D, Fredembach C, Susstrunk S. Automatic and accurate shadow detection using near – infrared information[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2014, 36(8):1672–1678.
- [30] Beylkin G. Discrete radon transform[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing, 1987, 35(2):162–172.
- [31] 耿婵. 控制点布设对高分二号影像精度影响研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(6):144–147.
- Gen C. Research on influence of control points laying on precision of GF – 2 image[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(6):144–147.
- [32] 汪建峰, 方青. 高景一号卫星影像测绘能力分析[J]. 测绘技术装备, 2020, 22(2):10–14.
- Wang J F, Fang Q. Mapping capability analysis of SuperView – 1 satellite image[J]. Geomatics Technology and Equipment, 2020, 22(2):10–14.

Method to calibrate the coordinates of transmission towers based on satellite images

MA Yutang¹, PAN Hao¹, ZHOU Fangrong¹, HUANG Ran¹, ZHAO Jianeng¹,
LUO Jiqiang², LIU Jing^{2,3}, SUN Haoxuan⁴, JIA Weijie⁵, ZHANG Tao⁶

(1. Joint Laboratory of Power Remote Sensing Technology, Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Company Ltd., Kunming 650217, China; 2. China Academy of Space Technology Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China; 3. School of Computer Science & Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 4. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 5. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resource, Beijing 100083, China; 6. Equipment Procurement Service Center of China's Central Military Commission (CMC) Equipment Development Department (EDD), Beijing 100009, China)

Abstract: In order to realize the refined line inspection management of transmission lines, improve its operation

and maintenance efficiency, realize satellite intelligent inspection, and accurately find the defects and hidden dangers of towers and transmission lines, the paper took the coordinates of transmission line towers in Kunming City, Yunnan Province as an example and proposed a method to calibrate the coordinates of transmission towers using satellite images. The method first uses the reference base – map data as the basis to match the control points and uses the digital elevation model (DEM) to perform geometric correction on the original remote sensing image. Then combined with such technologies as shadow detection and edge detection and visual interpretation, the calibrated tower coordinates are obtained. The experiment verified the geometric correction accuracy of the SuperView – 1 (SV1) and Gaofen – 2 (GF2) satellite images in the Kunming area, and the errors in the plane after correction were 0.931 and 1.387 m, respectively. In addition, the experiment verified the calibration accuracy of the old tower coordinates on the two lines. The results show that the plane accuracy of the tower has increased from 13.811 m and 8.256 m to 5.970 m and 5.104 m, respectively, which meets the basic power grid requirements. This method can realize the calibration of the tower coordinates, reduce the workload of manual inspection, and improve the efficiency of line inspection. With the explosive growth of remote sensing image data, multi – source images from the space and ground will continue to be combined, and the technology for the positioning of transmission towers based on satellite remote sensing images will have a broader development prospect.

Keywords: transmission tower; geometric correction; calibration of coordinates; DEM; remote sensing

(责任编辑: 张 仙)